

Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej
Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechnika Śląska

ROZPRAWA DOKTORSKA

„Zastosowanie stopu NiTi w aktuatorach oraz układach sensorycznych wykonanych
z kompozytów polimerowych”

mgr inż. Jonasz Hartwich

Dyscyplina: Inżynieria mechaniczna

PROMOTOR

dr hab. inż. Sławomir Duda, prof. PŚ

PROMOTOR POMOCNICZY

dr inż. Sebastian Sławski

GLIWICE 2025

Spis treści

1	Wstęp.....	7
2	Wprowadzenie.....	8
3	Przegląd istniejącego stanu wiedzy i aplikacji z zakresu stopów NiTi.....	14
3.1	Przegląd literatury	14
3.2	Aplikacje wykorzystujące stopy NiTi.....	27
3.2.1	Zastosowanie stopu NiTi w aktuatorach	27
3.2.2	Zastosowanie stopów NiTi w układach sensorycznych.....	36
3.3	Terminologia związana z wyjątkowymi właściwościami stopów NiTi.....	37
3.4	Podsumowanie przeglądu literatury	37
4	Cel i zakres pracy	39
5	Aparatura badawcza	41
5.1	Moduły podstawie	43
5.2	Moduły akwizycji danych i sterowania.....	46
5.2.1	Moduł akwizycji danych	46
5.2.2	Moduł sterowania	50
5.3	Moduł roboczy	54
5.4	Moduły pomocnicze	55
5.5	Elementy wykonywane technikami przyrostowymi	59
5.6	Parametry zastosowanego stopu NiTi.....	59
5.6.1	Dane materiałowe uzyskane na podstawie dokumentacji dostarczonej przez producenta	59
5.6.2	Badania mikroskopowe wykorzystywanego stopu NiTi.....	60
5.7	Podsumowanie	62
6	Eksperymentalne badania wpływu obciążenia mechanicznego na własności elektryczne stopów NiTi.....	63
6.1	Badania własności drutów ze stopów NiTi możliwych do potencjalnego wykorzystania w układach sensorycznych.....	63

6.1.1	Metodyka.....	63
6.1.2	Rezultaty.....	68
6.1.3	Analiza wyników i dyskusja	70
6.1.4	Podsumowanie	73
6.2	Ocena możliwości wykorzystanie zmian właściwości elektrycznych drutów ze stopów NiTi wewnątrz struktury kompozytowej w monitorowaniu strukturalnym	74
6.2.1	Metodyka.....	74
6.2.2	Rezultaty.....	83
6.2.3	Analiza wyników i dyskusja	85
6.2.4	Podsumowanie	88
7	Badania zmian własności stopów NiTi wynikających z przemian fazowych.....	89
7.1	Wpływ przemiany fazowej na własności drutów ze stopu NiTi.....	89
7.1.1	Metodyka.....	89
7.1.2	Rezultaty.....	93
7.1.3	Analiza wyników i dyskusja	98
7.1.4	Podsumowanie	100
7.2	Badanie aktuatora na bazie drutu ze stopu NiTi w osnowie z PLA.....	101
7.2.1	Metodyka.....	101
7.2.2	Rezultaty i dyskusja	107
7.2.3	Podsumowanie	110
8	Badania numeryczne drutów ze stopów NiTi	111
8.1	Model materiałowy	111
8.2	Eksperymentalne wyznaczenie parametrów modelu materiałowego.....	113
8.3	Badania numeryczne struktur kompozytowych wykonanych na bazie stopów NiTi w osnowie z poliaktydu.....	116
8.3.1	Wykorzystane oprogramowanie.....	116
8.3.2	Materiał	116
8.3.3	Model numeryczny.....	117

8.3.4	Metodyka symulacji numerycznej	119
8.3.5	Rezultaty i dyskusja	124
8.3.6	Podsumowanie	125
8.4	Model numeryczny aktuatora na bazie drutu ze stopu NiTi w osnowie z PLA.....	126
8.4.1	Wykorzystane oprogramowanie.....	126
8.4.2	Materiał	127
8.4.3	Model numeryczny.....	127
8.4.4	Metodyka badań numerycznych.....	129
8.4.5	Rezultaty i dyskusja	134
8.4.6	Podsumowanie	136
9	Podsumowanie	137
10	Wnioski	140
	Ważniejsze publikację powiązane z pracą doktorską.....	143
	Ważniejsze referaty powiązane z pracą doktorską.....	143
	Bibliografia.....	144
	Streszczenie	162
	Abstract.....	163

Wykaz ważniejszych oznaczeń

ε -wydłużenie drutu w trakcie pomiarów [mm/mm]

h -parametr utwardzania (model materiałowy) [GPa]

R -granica sprężystości (model materiałowy) [MPa]

$\bar{\varepsilon}$ - maksymalne wydłużenie transformacji (model materiałowy) [1/mm]

β - współczynnik proporcjonalności temperatury (model materiałowy) [MPa/°C]

T_0 - temperatura odniesienia (model materiałowy) [°C]

ρ_d -gęstość [kg/m³]

ρ_r -rezystywność [$\mu\Omega\text{cm}$]

c -ciepło właściwe [J/kg *K]

k -przewodność cieplna [W/m*K]

R_m - wytrzymałość na rozciąganie [MPa]

E -moduł Young'a [GPa]

σ_Y -granica plastyczności [MPa]

ν -współczynnik Poissona [-]

M_S -temperatura początku przemiany martenzytycznej[°C]

M_F -temperatura zakończenia przemiany martenzytycznej[°C]

A_S -temperatura początku przemiany austenitycznej[°C]

A_F -temperatura zakończenia przemiany austenitycznej[°C]

Wykaz ważniejszych skrótów

SMA – stopy z pamięci kształtu (ang. Shape Memory Alloy)

SME – efekt pamięci kształtu (ang. Shape Memory Effect)

SE – efekt pseudosprężystości (ang. Superelasticity Effect)

SMP – polimer z pamięcią kształtu (ang. Shape Memory Polymer)

SMPC – kompozyt o osnowie z SMP (ang. Shape Memory Polymer Composite)

SMPNC – nanokompozyt o osnowie z SMP (ang. Shape Memory Polymer Nanocomposite)

CNT – nanorurki węglowe (ang. Carbon Nanotube)

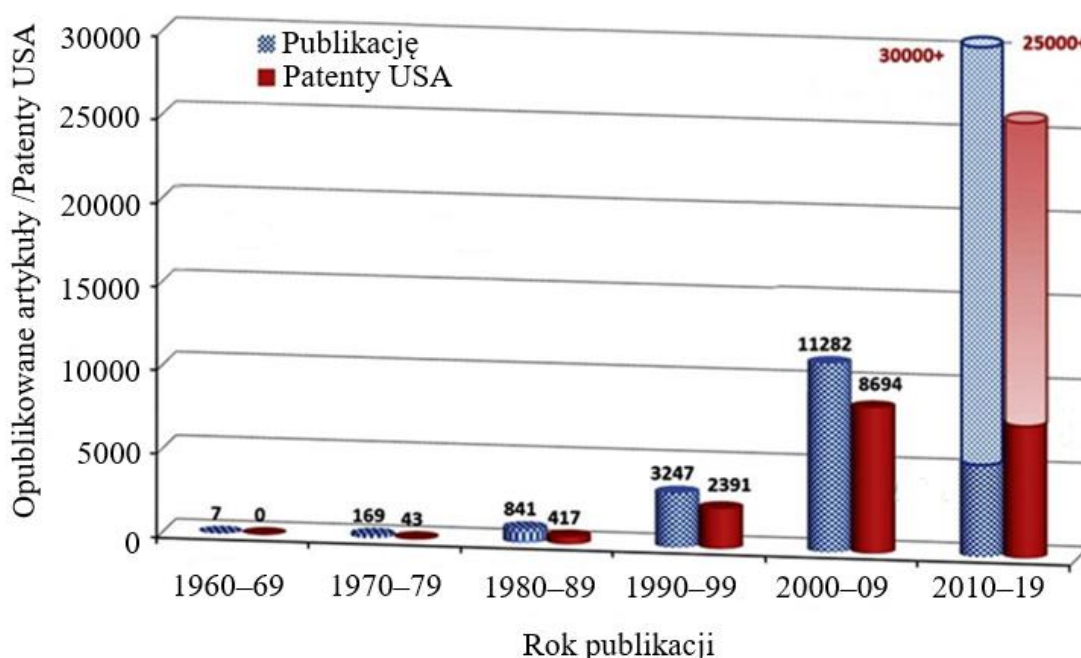
1 Wstęp

Od wielu lat sektory przemysłu produkujące tzw. „inteligentne” rozwiązania charakteryzują się bardzo dynamicznym rozwojem oraz dłużą liczbę nowatorskich aplikacji [1-4]. Trend ten wpisuje się w przemysłowe koncepcje rozwoju technologii, takie jak czwarta rewolucja przemysłowa oraz Internet Rzeczy. Wzrost zapotrzebowania na inteligentne struktury wiąże się jednocześnie ze wzrostem zapotrzebowania na sensory, aktuatory oraz sterowniki. Zastosowanie ich nie pozostaje bez wpływu na masę, objętość oraz konsumpcję energii urządzeń [5] i wytworzyło na rynku niszę dla tzw. „inteligentnych materiałów”, potrafiących łączyć cechy elementów wykonawczych, sensorycznych oraz sterujących w ramach jednego komponentu [6, 7]. Do grupy inteligentnych materiałów można zaliczyć: ciecze magnetoreologiczne, materiały piezoelektryczne oraz stopy z pamięcią kształtu (SMA). Wśród SMA najwięcej aplikacji przemysłowych bazuje na stopach niklu i tytanu (NiTi). Stopy te, ze względu na swoje unikalne właściwości, używany jest w produkcji między innymi aparatów ortodontycznych, stentów naczyniowych, hybrydowych łożysk lotniczych, zaworów zamykanych pod wpływem temperatury, układów tłumienia drgań oraz aktuatorów.

W niniejszej pracy przedstawiono analizę zależności pomiędzy właściwościami elektromechanicznymi stopów NiTi oraz tego, jak wpływają na nie przemiany struktury krystalicznej. Zaproponowano też nowe metody i stanowisko badawcze przeznaczone do wyznaczania tych właściwości. Część literaturowa przedstawia aktualny stan wiedzy dotyczący badań właściwości stopów NiTi oraz ich aplikacji w nowoczesnych aktuatorach i układach sensorycznych. Na podstawie literatury omówiono aktualne zagadnienia związane z hybrydowymi kompozytami wzmacnianymi stopami NiTi. W część doświadczalnej rozprawy opisano badania eksperymentalne podejmujące zagadnienia, takie jak: zmiany właściwości elektrycznych i mechanicznych stopów NiTi w trakcie przemiany, zmiany właściwości elektrycznych wskutek cyklicznego obciążenia oraz badania właściwości drutu ze stopu NiTi stanowiącego wzmocnienie kompozytu o osnowie polimerowej. Dodatkowo w pracy wyznaczono też, na podstawie badań eksperymentalnych, parametry modelu materiałowego stopu NiTi. Model ten poddano walidacji na podstawie danych uzyskanych z badań doświadczalnych.

2 Wprowadzenie

Stopy NiTi odkryto w 1962 roku i stało się to kamieniem milowym dla późniejszych badań tych stopów[8, 9]. Na rysunku 2.1 zobrazowano liczbę publikacji (także patentowych) dotyczących tego zagadnienia.



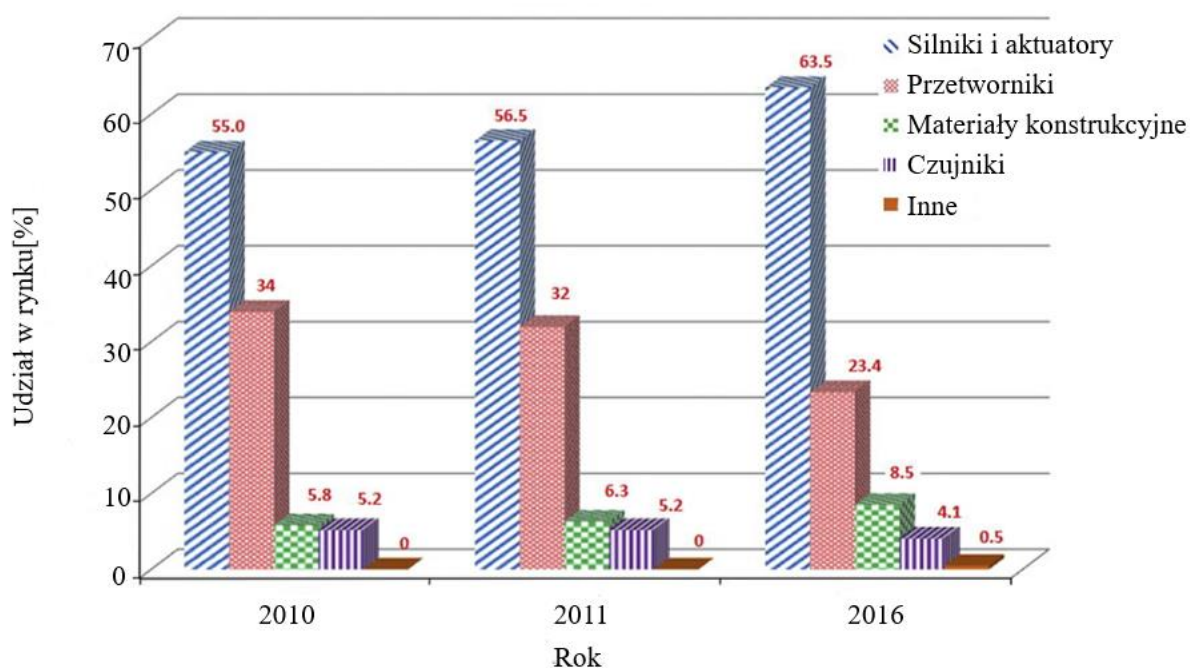
Rysunek 2.1. Liczba artykułów i patentów wydawanych w tematyce stopów z pamięcią kształtu od czasu odkrycia [10]

Jest to spowodowane wyjątkowymi właściwościami tych stopów (łączenie cech sensorów oraz aktuatorów) oraz dużym potencjałem rozwoju tej technologii, gdyż pomimo wielu lat badań właściwości tego typu stopów dalej nie są w pełni zbadane.

Jednym z najbardziej znanych stopów z pamięcią kształtu jest nikiel i tytan. Poza NiTi wyróżnia się wiele SMA o innym składzie chemicznym, przede wszystkim stopy żelaza i miedzi, takie jak: Fe–Mn–Si, Cu–Zn–Al oraz Cu–Al–Ni. Są to materiały powszechnie stosowane w przemyśle ze względów ekonomicznych. Cechują się jednak mniejszą powtarzalnością i odpornością na warunki otoczenia oraz gorszą sprawnością termodynamiczną [11-13], co sprawia, iż NiTi pozostaje najpowszechniej wykorzystywanym stopem z pamięcią kształtu.

Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na lekkie aktulatory oraz samodzielne, wielozadaniowe struktury, materiały inteligentne nie tylko wzbudzają coraz większe zainteresowanie środowisk naukowych, lecz także znajdują coraz szersze zastosowanie

w obszarze komercyjnym. Badania z zakresu analizy rynku materiałów inteligentnych potwierdzają dynamiczny wzrost w tym sektorze. Między rokiem 2011 a 2012 wartość tego rynku wzrosła z 19,6 miliarda USD do 22 miliardów USD [14], przy czym do 2022 roku rynek ten osiągnął wartość 60 miliardów USD [15]. Prognozy przewidują dalszy wzrost wartości rynku materiałów inteligentnych do 2026 roku ma on osiągnąć 115 miliardów USD. Największy udział mają akulatory, które w 2016 roku stanowiły 63,5% całego rynku [14] (rysunek 2.2). Natomiast sensory zajmują dopiero trzecie miejsce i stanowią 8,5% rynku [14].

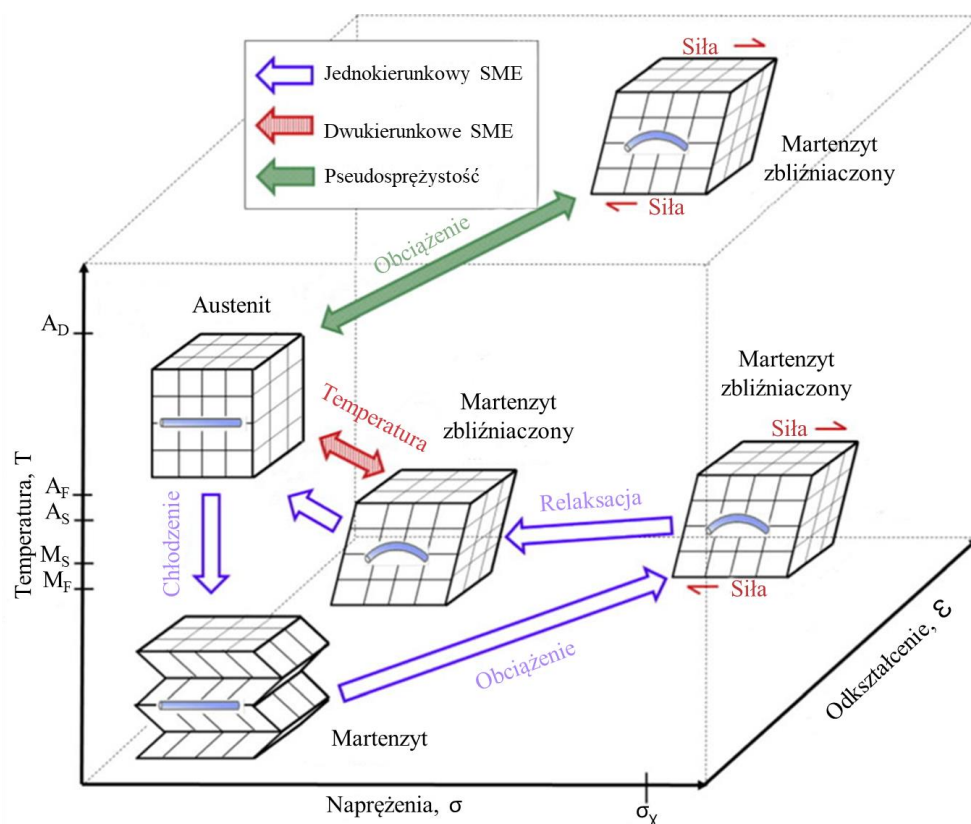


Rysunek 2.2. Udział różnych rodzajów zastosowań materiałów inteligentnych w rynku [10]

Materiały z pamięcią kształtu to stopy metaliczne o wyjątkowych właściwościach, efekt pamięci kształtu przejawia się możliwością powrotu materiału do pierwotnego kształtu (uzyskanego w procesie tzw. trenowania) i rozmiaru pod wpływem bodźca zewnętrznego [16]. Powrót materiału do pierwotnego kształtu wynika z przemiany struktury martenzytycznej do struktury austenitycznej [17, 18]. Jest to przemiana indukowana przez zwiększenie temperatury stopu.

Ogrzewanie materiału może być realizowane za pomocą zewnętrznego bądź wewnętrznego źródła ciepła (prawo Joule'a Lenza) [19, 20]. Materiały z pamięcią kształtu mogą ulegać przemianom pomiędzy trzema różnymi strukturami krystalicznymi takimi jak: martenzyt, martenzyt zbliźniaczony oraz austenit [21, 22]. Struktura martenzytyczna jest stabilna w niskich temperaturach, natomiast struktura austenityczna w wysokich temperaturach. Podczas

ogrzewania stopu z pamięcią kształtu po osiągnięciu temperatury początkowej przemiany austenitycznej A_S rozpoczyna się przemiana struktury martenzytycznej w strukturę austenityczną. Przemiana kończy się po osiągnięciu przez stop finalnej temperatury przemiany austenitycznej A_F . Wraz z początkiem przemiany materiał rozpoczyna powrót do pierwotnego kształtu. Podczas ochładzania stopu następuje odwrotna przemiana, po osiągnięciu temperatury początku przemiany martenzytycznej M_S rozpoczyna się przemiana struktury austenitycznej w martenzytyczną, która dobiega końca w temperaturze końca przemiany martenzytycznej M_F . Powyżej temperatury A_D NiTi traci swoje właściwości i ulega stałej deformacji tak jak inne materiały (rysunek 2.3) [23].



Rysunek 2.3. Struktury krystaliczne i przemiany materiałów z pamięcią kształtu [10]

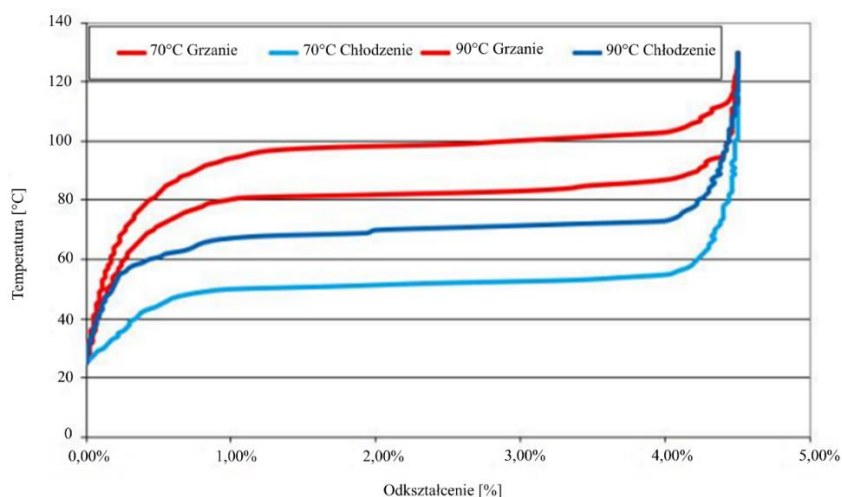
W efekcie pamięci kształtu można wyróżnić dwa rodzaje przemian: jednokierunkowy efekt pamięci kształtu [24] oraz dwukierunkowy efekt pamięci kształtu [25-29]. Jednokierunkowe SME oznacza powrót elementu ze stopu NiTi do pierwotnego kształtu wskutek przemiany struktury krystalicznej wyindukowanej wzrostem temperatury [30]. Dwukierunkowe SME oznacza natomiast możliwość przyjęcia przez stop NiTi dwóch różnych założonych form (ustalonych w procesie tak zwanego trenowania), zarówno dla wysokiej, jak i niskiej

temperatury [31]. Dwukierunkowy efekt pamięci kształtu jest komercyjnie dużo rzadziej stosowany ze względu na skomplikowanie procesu trenowania materiału oraz niższe maksymalne naprężenia w porównaniu do efektu jednokierunkowego.

Istotną właściwością stopów z pamięcią kształtu jest efekt pseudosprężystości (SE). Efekt ten polega na przemianie struktury martenzytycznej stopu do struktury martenzytu zbliźnionego wskutek oddziaływania na stop określonego granicznego naprężenia. Po ustąpieniu obciążenia następuje powolny powrót materiału do swojej pierwotnej postaci [32- 36].

Stopy z pamięcią kształtu mogą przechodzić jeszcze jedną przemianę, polegającą na wydzielaniu się w strukturze krystalicznej stopu fazy R („romboedrycznej”) [37-39]. Jest to faza pośrednia powstająca podczas przemiany sześciennego austenitu w monokliczny martenzyt. Faza ta pojawia się najczęściej w stopach NiTi poddanych obróbce cieplnej w niższej temperaturze [40]. Wpływ wydzielania się fazy R na właściwości makroskopowych modeli materiałowych NiTi jest w literaturze systematycznie pomijany. Brak jest badań dotyczących wpływu fazy romboedrycznej na przemianę i dlatego wykorzystanie tej fazy w sposób komercyjny może być obecnie niebezpieczne [41].

Do ważnych właściwości stopów NiTi należy też zaliczyć histerezę przemiany fazowej pomiędzy austenitem a martenzytem (rysunek 2.4). Histereza określa różnicę w temperaturach przejściowych pomiędzy ogrzewaniem i chłodzeniem.



Rysunek 2.4. Przemiana fazowa NiTi [42]

Wielkość histeryzy danego stopu NiTi ma duże znaczenie dla jego możliwych zastosowań. Stopy o mniejszej histerezie częściej wykorzystywane są w sytuacjach, w których wymagana

jest szybka praca, np. w robotyce, natomiast stopy o dużej histerezie lepiej sprawdzają się w zastosowaniach, w których istotne jest dokładne odwzorowanie kształtu w różnych zakresach temperatury [43].

Fazy martenzytyczna oraz austenityczna w materiałach SMA cechują się innymi parametrami materiałowymi. Różnią się pod względem mechanicznym, jak na przykład modułem Younga lub skalą twardości, a także własnościami fizycznymi takimi jak rezystancja elektryczna, przewodność oraz pojemność cieplna [44-47]. W tabeli 2.1 przedstawiono parametry materiałowe stopu z pamięcią kształtu na bazie NiTi.

Tabela 2.1. Parametry materiałowe stopu NiTi [10, 42]

Właściwość	Oznaczenie	Jednostka	Martenzyt	Austenit
Gęstość	ρ_d	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	6450	
Rezystywność	ρ_r	$[\mu\Omega\text{cm}]$	80	100
Ciepło właściwe	c	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	836,8	836,8
Przewodność cieplna	k	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right]$	8,6	18
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	α	$\left[\frac{\text{m}}{\text{mK}}\right]$	$6,6 \times 10^{-6}$	$11,0 \times 10^{-6}$
Wytrzymałość na rozciąganie	R_m	$[\text{MPa}]$	895	
Moduł Younga	E	$[\text{GPa}]$	28–41	75–83
Granica plastyczności	σ_Y	$[\text{MPa}]$	70–140	195–690
Współczynnik Poissona	ν	$[-]$	0,33	

Dla stopów niklu i tytanu maksymalne odkształcenie sprężyste to około 8% [42-51]. Powyżej tej wartości następują trwałe i nieodwracalne odkształcenia plastyczne, dlatego producenci stopów NiTi zalecają, aby maksymalne odkształcenie nie przekraczało 5% [42].

Innym ważnym mechanizmem związanym z SME jest transformacja martenzytyczna indukowana naprężeniem (SINT) [52-56]. Transformacja ta jest spowodowana odkształceniem i polega na przemieszczeniu płytek martenzytu, co prowadzi do reorientacji struktury martenzytycznej. Martenzyt, który został odwarstwiony, może być odkształcony do około 8% bez tworzenia pasm poślizgu lub przemieszczania dyslokacji. Po podgrzaniu taki odkształcony martenzyt przekształca się w austenit, który usuwa odkształcenia wywołane martenzytem, powodując SME. Zjawisko to występuje, gdy temperatura stopu jest niższa niż A_F . Gdy stop NiTi jest poddawany obciążeniu w temperaturze powyżej A_F , indukowany jest SE, z histerezą naprężeń od odkształceń typową dla stopów NiTi.

3 Przegląd istniejącego stanu wiedzy i aplikacji z zakresu stopów NiTi

Rozdział ten został podzielony na dwie części. W pierwszym podrozdziale omówiono zagadnienia naukowe i badawcze dotyczące stopów NiTi, które nie koncentrują się na konkretnych zastosowaniach. Druga część przedstawia artykuły poruszające temat potencjalnych aplikacji tych materiałów.

3.1 Przegląd literatury

Jak wcześniej wspomniano w poprzednim rozdziale, wyjątkowe właściwości stopów NiTi opisano po raz pierwszy w połowie ubiegłego wieku. Od tej pory materiały te wzbudzają duże zainteresowanie środowisk naukowych, które podejmują badania nad właściwościami tych stopów [57-60]. Y. Kaynak i inni [61] zbadali wpływ szybkości skrawania na między innymi efekt pamięci kształtu stopów NiTi. W pracy autorzy skupili się na charakterystyce powierzchni po skrawaniu, badając też wpływu obróbki na SME. Wykazali, że obróbka skrawaniem wpływa na przemianę fazową materiału do 500 μm w głąb od skrawanej powierzchni. Zaburza to efekt pamięci kształtu w górnych warstwach materiału, wpływając tym samym na jego trwałość. Autorzy podkreślają, że dobór parametrów skrawania ma wpływ na powrót materiału do pierwotnego kształtu, wymuszając dobór odpowiednich parametrów obróbki do potencjalnej aplikacji. B. V. Krishna i inni [62] przeprowadzili badania w celu określenia parametrów produkcji stopu NiTi pozwalających na wykonanie jednorodnego materiału bez niepożądanych faz. W pracy potwierdzono, że obróbka laserowa proszków Ni oraz Ti pozwala na wyeliminowanie powstających na granicach ziaren niepożądanych domieszek, zwiększając jednocześnie część parametrów mechanicznych. Pomimo iż wpływ obróbki mechanicznej i procesów wytwórczych na właściwości stopów NiTi jest bardzo istotny, to najważniejszym czynnikiem wpływającym na efekt pamięci kształtu pozostaje proporcja masowa stopu. W pracy J. Frenzel i inni [63] zbadali wpływ stężenia Ni na temperatury przemian oraz na szerokość termicznej histerezy (zależność odkształcenia od temperatury). Autorzy potwierdzili częsty wniosek, iż wzrost zawartości Ni skutkuje spadkiem temperatury M_s oraz zmniejsza szerokość histerezy. Ponadto w pracy zauważono, że obecność tlenków stanowiących domieszki wynikające z procesów produkcyjnych wpływa na zwiększenie zawartości Ni, prowadząc do spadku temperatury M_s .

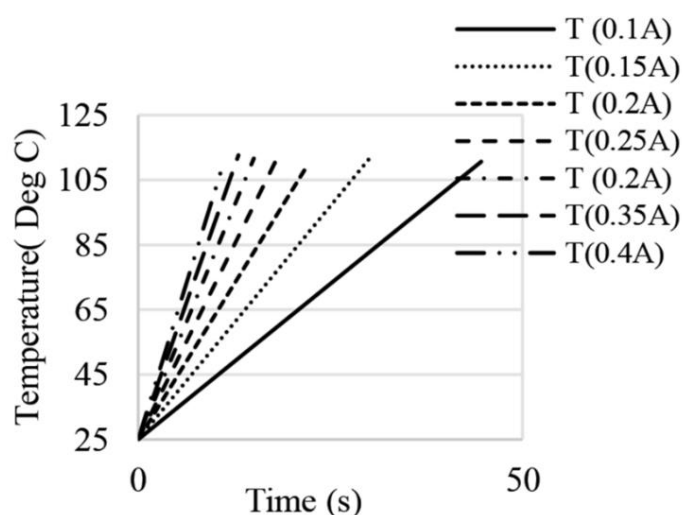
W literaturze można znaleźć opis badań nad wieloma rodzajami elementów mechanicznych wykonanych ze stopów NiTi. Jednakże z punktu widzenia efektu pamięci kształtu najczęściej bada się stopy NiTi w formie drutu oraz sprężyny. Druty ze stopu NiTi stanowią optymalne

wykorzystanie materiału, oferując dużą wydajność aktuatora w stosunku do jego masy. Co więcej, obciążenie rozciągające pozwala na uzyskanie największej wydajności w porównaniu z innymi rodzajami obciążenia [64]. Druty wykorzystywane są nawet częściej od sprężyn. Świadczy o tym duża dostępność różnych konfiguracji drutów ze stopu NiTi w sprzedaży detalicznej.

Wiele artykułów podejmuje zagadnienia związane bezpośrednio z efektem pamięci kształtu i trwałością drutów NiTi. O. Tyc i inni [65] poddawali druty ze stopów NiTi wielokrotnej przemianie martenzytyczno-austenitycznej (pod obciążeniem zewnętrznym) w celu znalezienia przyczyn spadku wydajności SME. Wydajność spadała z kolejnymi cyklami przemiany w związku ze wzrostem wartości nieodwracalnych odkształceń. Autorzy wykazali, że nawet przy bardzo dużych odkształceniach powyżej 9% (dla NiTi producenci zalecają nie przekraczać 5% odkształcenia) materiał zachowuje całkowitą zdolność do SME. Nieodwracalne odkształcenia pojawiają się jedynie w cyklicznej pracy pod obciążeniem, przy czym temperatura pracy ma kluczowy wpływ na uzyskaną liczbę cykli pracy aktuatora. Autorzy wykazali, że wraz ze wzrostem temperatury pracy znacząco spada trwałość drutów ze stopu NiTi, natomiast obniżenie temperatury o 30 °C może wydłużyć żywotność drutu o 20%. A. Figueiredo i inni [66] prowadzili badania nad wytrzymałością zmęczeniową drutów ze stopu NiTi. Autorzy przedstawili spostrzeżenia podobne do pracy O. Tyc, ponadto wykazując, że druty NiTi o stabilnej strukturze martenzytycznej nie ulegają uszkodzeniom przez prawie dwa rzędy wielkości większą liczbę cykli niż stopy o stabilnej strukturze austenitycznej.

Istotna część artykułów analizujących właściwości drutów ze stopów NiTi podejmuje zagadnienia pomiaru temperatury, parametru kluczowego z punktu widzenia SME. Wynika to z faktu, iż stopy NiTi stanowią SMA z przemianą indukowaną zmianą temperatury. Dlatego też pomiar temperatury stanowi dobrą metodę nadzorowania działania aktuatora ze stopu NiTi. W badaniach drutów o średnicach powyżej 500 µm często wykorzystuje się czujniki termoelektryczne. Natomiast przy mniejszych średnicach zastosowanie dotykowego pomiaru może wpłynąć na prowadzone pomiary. Jest to związane z dużą czułością stopów NiTi na oddziaływanie czynników zewnętrznych. E. Abel i inni [67] wyznaczyli temperatury przemiany stopu NiTi z zastosowaniem różnych metod, między innymi kalorymetrii różnicowej oraz metody wykorzystującej dane o zmianie odkształcenia próbki w trakcie aktywacji. Wykazano, że wyniki uzyskane tymi metod są różne. Autorzy stwierdzają, że pod względem projektowania aktuatorów wykorzystujących NiTi dokładniejsze jest wyznaczenie temperatury przemiany na podstawie danych o zmianie odkształcenia próbki. Pomiar taki przeprowadza się bowiem w

warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy aktuatora. Do pomiaru temperatury wykorzystano termoparę w kontakcie z drutem, nasmarowaną olejem silnikowym. S. Karunakaran i D. Majid [68] doszli do analogicznych wniosków co E. Abel, iż temperatury przemian wyznaczone za pomocą kalorymetrii różnicowej nie są zgodne z temperaturami uzyskanymi na podstawie analizy odkształcenia drutu podczas aktywacji. Ponadto w pracy wykazano też zależność pomiędzy wartością wstępnego obciążenia drutu a temperaturami przemiany, które wzrastają wraz ze wzrostem wstępnego obciążenia. W pracy zastosowano inne podejście do pomiaru temperatury. Nie mierzono bezpośrednio temperatury drutu, ponieważ został on umieszczony w specjalnej komorze termicznej. W związku z powyższym autorzy założyli, że temperatura drutu będzie zgodna z odczytem temperatury na maszynie. W literaturze można również znaleźć mniej liczne publikacje wykorzystujące termopary w badaniach na cienkich drutach ze stopu NiTi. V. Vajjapurkar i Y. Ravinder [69] opracowali oparty na zmianie długości model rezystancji elektrycznej drutu ze stopu NiTi o bardzo małej średnicy (125 μm). W pracy mierzono temperaturę drutu z wykorzystaniem termopary zakotwiczonej na końcu przewodu przyklejonej do drutu z wykorzystaniem kleju epoksydowego. Obszar pomiaru temperatury osłonięty był tygłem krzemionkowym, aby ograniczyć wpływ otoczenia na pomiary temperatur. Pozostała część drutu pozostała nieosłonięta, a autorzy założyli, że drut za sprawą przepływu prądu elektrycznego zostanie równomiernie rozgrzany. Na rysunku 3.1 przedstawiono wykres temperatury w czasie.



Rysunek 3.1. Zmiana temperatury w czasie dla różnych prądów grzania [69]

Uzyskano liniowy wzrost temperatury co może wynikać z faktu, iż pomiar temperatury, realizowany był we wnętrzu tygla krzemionkowego. Wykorzystując termoparę do pomiarów

temperatury cienkiego drutu o średnicy 300 μm ze stopu NiTi E. Toptas i inni [70] mierzyli wpływ prądu elektrycznego na wygenerowane przez drut przemieszczenie oraz siłę. Nie podano jednak szczegółów na temat tego, jak ten pomiar był realizowany.

Pomimo iż określenie temperatury stopu stanowi dobry sposób estymacji fazy jego struktury krystalicznej, to ze względu na skomplikowanie pomiarów temperatury dla cienkich drutów NiTi rzadko tego typu pomiary mogą być wykorzystywane poza laboratorium. W związku z powyższym w literaturze znajdują się też artykuły przedstawiające zależności pomiędzy rezystancją elektryczną a przemianami struktury krystalicznej stopów NiTi. P. Šittner i inni [71] wyznaczyli moduł Younga martenzytu, wykorzystując rezystancję elektryczną przewodu do identyfikacji fazy. Wyniki pokazały, że rezystywność elektryczna wzrasta w sposób zbliżony do liniowego wraz ze wzrostem odkształcenia. V. Antonucci i inni [72] w przeprowadzonym przez siebie badaniu identyfikowali fazę NiTi za pomocą rezystywności elektrycznej. Autorzy stwierdzili, iż pomiary rezystywności są dobrym wskazaniem fazy struktury krystalicznej i mogą pozwolić na lepsze określenie temperatur przemiany od skaningowej kalorymetrii różnicowej. Ze względu na występowanie zależności pomiędzy rezystancją elektryczną a przemianami struktury krystalicznej stopów NiTi są one bardzo często badane pod względem potencjalnego i praktycznego zastosowania w aktuatorach typu „self-sensing”. Wiele prac badawczych skupia się na wyznaczeniu modelu pozwalającego na estymację wydłużenia drutu NiTi na podstawie pomiaru rezystancji. H.N. Bhargaw i inni [73] wyznaczyli zależności pomiędzy parametrami takimi jak prąd grzania, odkształcenie drutu oraz rezystancja elektryczna w różnych warunkach pracy. Autorzy zaobserwowali również duży spadek rezystancji elektrycznej podczas aktywacji drutu. Ponadto w pracy wykazano zależność rezystancji od deformacji drutu NiTi. Autorzy podkreślają konieczność wyznaczania zależności pomiędzy właściwościami termicznymi, mechanicznymi oraz elektrycznymi w trakcie prowadzenia prac projektowych nad aktuatorem ze stopu NiTi. H. Li [74] opracowali jednowymiarowy model numeryczny określający zależność temperatury przemiany stopu NiTi od prędkości odkształcenia. Autorzy wykazali że wraz ze wzrostem prędkości maleje temperatura przemiany. Natomiast H.N. Bhargaw H. Li i inni również stwierdzili, iż zależność pomiędzy odkształceniem a zmianą rezystancji elektrycznej w trakcie rozciągania drutu ze stopu NiTi jest liniowa. Analogiczną zależność rezystancji i odkształcenia uzyskali Lu i inni [75] w ramach pracy, w której zbadali zależności pomiędzy właściwościami elektro-mechanicznymi różnych stopów z pamięcią kształtu. Artykuł miał na celu opracowanie modelu

rezystancji w zależności od odkształcenia. Aktywacja drutu NiTi realizowana była za pomocą komory grzewczej, w której umieszczony był drut.

Wiele artykułów zajmujących się tematem estymacji wydłużenia drutu NiTi na podstawie pomiarów jego rezystancji elektrycznej podejmuje też zagadnienie związane z regulacją pracy takiego drutu. J. Guan i inni [76] poza badaniem zależności między rezystancją a odkształceniem badali wpływ sygnału sterowania na dokładność i zużycie energii siłownika ze stopu NiTi. Wykazali, że sygnał prostokątny znacząco zmniejsza zużycie energii i generuje mniejsze zakłócenia. Wyniki tego badania zostały wykorzystane w kolejnej pracy tego autora. J. Guan i inni [77] badali możliwość wykrywania przemiany fazowej stopu na podstawie rezystancji elektrycznej. Aby ograniczyć wpływ zakłóceń oraz niedokładności, autorzy opracowali specjalny algorytm optymalizujący sygnał aktywacji pod kątem obróbki cieplnej, jakiej został poddany przewód wraz z filtracją sygnału. Pozwoliło to opracować algorytm detekcji fazy stopu na podstawie różnicy skrajnych wartości rezystancji. Opracowany model pozwolił autorom wykrywać przejścia fazowe drutu ze stopu NiTi z dużą powtarzalnością. J. Li oraz H. Harada [78] również podjęli zagadnienie wpływu sygnału sterowania na pracę aktuatora na bazie drutu ze stopu NiTi. Autorzy sterowali dwoma aktuatorami z drutów ze stopu NiTi w układzie szeregowym ze sprężyną. Zastosowali impulsowy sposób aktywacji układu uzyskując w ten sposób jednakowy kształt histerezy rezystancji w trakcie chłodzenia i grzania drutu. Na podstawie wyników obu powyższych artykułów można stwierdzić, że sygnał sterowania (prąd elektryczny) układu z aktuatorem ze stopu NiTi ma kluczowe znaczenie dla jego działania. Poza analizą wpływu różnych parametrów sygnału okresowego na jakość sterowania aktuatorem NiTi w literaturze można też znaleźć artykuły odwołujące się do zagadnień związanych z automatyką poprzez zastosowanie różnych regulatorów do sterowania układem w pętli zamkniętej. S. Lee i inni [79] opracowali model rezystancyjny drutu ze stopu NiTi wykorzystywany do estymacji wydłużenia drutu. Autorzy opracowali aktuator sterowany z wykorzystaniem regulatora PID o dynamicznie kalibrowanych nastawach z wykorzystaniem logiki rozmytej. Sprzężenie zwrotne z układu stanowił pomiar rezystancji elektrycznej wykorzystany do estymacji wydłużenia drutu. Autorzy wykazali poprawność działania modelu rezystancyjnego oraz potwierdzili, iż zastosowanie tej metody regulacji zwiększa powtarzalność pracy aktuatora. Co więcej, opracowany model pozostawał odpowiedni dla dużej liczby cykli aktywacji. Ze względu na złożoność procesów związanych ze sterowaniem aktuatorami typu „self-sensing” na bazie drutów ze stopu NiTi część badań podejmuje zagadnienie sterowania z wykorzystaniem sieci neuronowych wytrenowanych w taki sposób

aby zwiększyć dokładność estymacji wydłużenia aktuatora na podstawie jego rezystancji elektrycznej. Takie podejście badali N. Ma i inni [80] stosując sieć neuronową do określenia odkształcenia drutu ze stopu NiTi na bazie jego rezystancji elektrycznej. Sterowanie samym drutem było realizowane za pomocą regulatora PD a sprzężenie zwrotne stanowiło odkształcenie określone przez model sieci neuronowej. Autorom udało się uzyskać stabilną regulację oraz potwierdzić, że zastosowane podejście może być wykorzystywane do sterowania aktuatorami na bazie drutów ze stopów NiTi. H. Gurung i A. Banerjee [81] rozwinęli tę tematykę, stosując sieć neuronową z filtrem Kalmana do estymacji odkształcenia sprężyny pracującej w układzie szeregowym z drutem NiTi. Układ określał odkształcenie sprężyny wyłącznie na bazie rezystancji elektrycznej drutu NiTi. Model sieci neuronowej wykorzystany w pracy trenowany był wyłącznie na wynikach eksperymentalnych i jego zastosowanie pozwoliło na zwiększenie dokładności określenia deformacji sprężyny. Z. Shi i inni [82] zaproponowali połączenie sieci neuronowej i algorytmu logiki rozmytej w układzie sterowania aktuatora typu „self-sensing”. Autorzy badali możliwość wykorzystania układu ze sprzężeniem zwrotnym z dwóch aktuatorów jednocześnie. Aktuatory te były połączone antagonistycznie i stanowiły druty ze stopu NiTi zarówno SMA jak i superelastyczne SMA (w pracy autorzy posługują się skrótem SSMA). W pętli sprzężenia zwrotnego wykorzystano wartość rezystancji zarówno drutów SMA jak i SSMA. Uzyskano ostatecznie cechujący się dużą uniwersalnością algorytm określenia deformacji drutów ze stopów NiTi. Inne podejście do zagadnienia stopów NiTi w aktuatorach typu „self-sensing” zaproponowali A. Gurley i inni [83]. Autorzy obciążali drut ze stopu NiTi trzema różnymi masami. Dla każdej z nich uzyskano określoną zmianę wydłużenia drutu w wyniku jego aktywacji za pomocą prądu elektrycznego. Na podstawie pomiaru prądu płynącego przez układ oraz napięcia z wykorzystaniem dotykowych sond estymowano przemieszczenie drutu bez danych o jego długości. W badaniu podkreślono problemy wynikające z dotykowych pomiarów napięcia jak zależność wyników pomiarów od stanu połączenia pomiędzy sondą a drutem oraz konieczność uzyskania przewodności powierzchni drutu.

Istotnym zagadnieniem pozostaje też możliwość wykorzystania stopów NiTi w aktywnych kompozytach. Powszechnie znanymi w środowisku naukowym materiałami stosowanymi w takich kompozytach są polimery z pamięcią kształtu (SMP), w których jak sama nazwa wskazuje, zachodzi efekt pamięci kształtu częściowo podobny do tego, który ma miejsce w materiałach SMA takich jak NiTi. Ponieważ materiały SMP nie cechują się wysokimi właściwościami mechanicznymi, bardzo istotnym parametrem jest wartość naprężeń, przy

których możliwe jest odzyskanie przez SMP kształtu. Określa się je mianem naprężeń odzyskiwania i dla większości SMP są niewielkie, co uniemożliwia ich zastosowanie w pewnych sektorach przemysłu, jak np. sektor lotniczy [84]. Parametry tego typu materiałów modyfikuje się więc poprzez tworzenie kompozytów na bazie SMP. Do takich kompozytów należą materiały jak SMPNC (ang. Shape Memory Polymer Nano-Composite) oraz SMPC (ang. Shape Memory Polymer Composite). Kompozyty tego typu potrafią wykazywać cechy SMP oraz posiadać większe naprężenia odzyskiwania. W pracy wykonanej przez P. Miaudet i innych [85] zbadano właściwości kompozytów włóknistych cechujących się SME. Badacze zaobserwowali, że kompozyty te cechują się nawet o dwa rzędy wielkości większymi naprężeniami odzyskiwania niż zwykły SMP. Podobne wyniki uzyskali M. Fejős i inni [86], badając wpływ zastosowania wzmocnienia tkaniną z włókna szklanego kompozytu epoksydowego. W tej pracy zastosowanie wzmocnienia pozwoliło zwiększyć naprężenia odzyskiwania struktury kompozytowej również o dwa rzędy wielkości w porównaniu z czystym epoksydem. Badania tego typu świadczą, iż właśnie tworzenie kompozytów na bazie materiałów z SME pozwala na ograniczenie wpływu wielu problemowych zagadnień projektowych, jakie tego typu materiały generują.

Kompozyty wykorzystujące SMP można ogólnie podzielić na zbrojone cząsteczkami oraz włóknami. Bardzo popularnym w środowisku naukowym wzmocnieniem cząsteczkowym kompozytu są nanorurki węglowe (CNT). Są one stosowane także w SMPC, żeby zwiększyć wytrzymałość mechaniczną oraz przewodność elektryczną SMP. Q. Ni i inni [87] opracowali nanokompozyty węglowe na podstawie SMP z różnym udziałem masy składników, sprawdzając wpływ proporcji na makroskopowe właściwości kompozytu. Wykazali, że dodanie do masy SMP zaledwie 3,3% CNT zwiększyło dwukrotnie naprężenie odzyskiwania (z 2,5 do prawie 5 MPa). Ponieważ wygodnym sposobem wywołania SME w aktywnym kompozycie jest grzanie z wykorzystaniem prądu elektrycznego (analogicznie jak w przypadku NiTi), często stosuje się zbrojenie, które zwiększa przewodność elektryczną SMP. Dobrym przykładem takiego wzmocnienia są cząstki pochodnych grafenu. Q. Wang i inni [88] wzmocnili SMP na bazie epoksydu tlenkiem grafenu, uzyskując w ten sposób znacznie lepszą prędkość odzyskiwania kształtu w związku z bardziej wydajnym sterowaniem elektrycznym aktywacji. W analogiczny sposób J.T. Kim i inni [89] wzbogacili poliuretanowe SMP o poddany redukcji termicznej grafen uzyskując znaczącą poprawę własności elektrycznych. Zastosowanie odpowiedniego wzmocnienia pozwala nie tylko wpłynąć na proces aktywacji kompozytu, ale jednocześnie może znacząco poprawić jego parametry mechaniczne. K.K. Patel

i inni [90], wzmacniając poliuretan nano-płytkami grafenowymi, uzyskali zarówno możliwość wywołania SME wykorzystując promieniowanie mikrofalowe, jak i poprawić napężenie odzyskiwania o 150% oraz wytrzymałość na rozciąganie kompozytu o 20%.

W kompozytach opartych na materiałach SMP wykorzystuje się poza wymienionymi szeroką gamę innych wzmocnień między innymi nanowłókna węglowe, węgliki krzemowe, azotek boru, tlenki krzemu itp. [91-94]. Nanocząstki potrafią znacząco wpływać na właściwości funkcyjne kompozytów, nie wpływają jednak na ich parametry mechaniczne, w tym wytrzymałość, w związku z tym SMPCN rzadko są stosowane jako materiały konstrukcyjne [95]. Problem ten może rozwiązać zastosowanie innego rodzaju wzmocnienia, jak włókna ciągle pozwalające na znaczącą poprawę wytrzymałości. Do najczęściej stosowanych w kompozytach włóknistych na bazie SMP wzmocnień należy włókno węglowe oraz włókno szklane [96]. H. Herath i inni [97] wyznaczyli właściwości mechaniczne kompozytu SMPC o epoksydowej osnowie wzmocnionego włóknem węglowym. Autorzy pracy wykazali, że zastosowanie badanego wzmocnienia zwiększyło wytrzymałość na rozciąganie czystego SMP 10-krotnie, jednocześnie wywołując tylko niewielki spadek wartości parametrów związanych z SME. H. Xie i inni [98] również zbadali wpływ zastosowania wzmocnienia z włókna węglowego na właściwości SMP na bazie kopolimeru etylenu i octanu winylu. Autorzy uzyskali znaczącą poprawę parametrów mechanicznych kompozytu przy spadku współczynnika odzyskiwania kształtu z 92.9% do 80.6% (współczynnik ten oznacza procent skompensowanego przez aktywację kompozytu odkształcenia). T. Ohki i inni [99] wykazali, że zastosowanie włókna szklanego w kompozycie na bazie poliuretanu zwiększa wytrzymałość na rozciąganie o 44% względem czystego SMP. Autorzy jednocześnie wykazali spadek wartości współczynnika odzyskiwania kształtu z ponad 40% dla czystego SMP do około 30% dla kompozytu o 10% zawartości włókna szklanego. A.A. Rahman i inni [100], badając wpływ procentowego udziału włókna szklanego w SMP na bazie poliuretanu, wykazali, że wraz ze wzrostem udziału wzmocnienia wzrastają parametry mechaniczne SMPC. Autorzy badali też jak wzrost udziału masy włókna (w całkowitej masie kompozytu) wpłynie na sprawność efektu pamięci kształtu, wykazując zbliżoną do liniowej odwrotną zależność pomiędzy sprawnością SME a wytrzymałością SMPC.

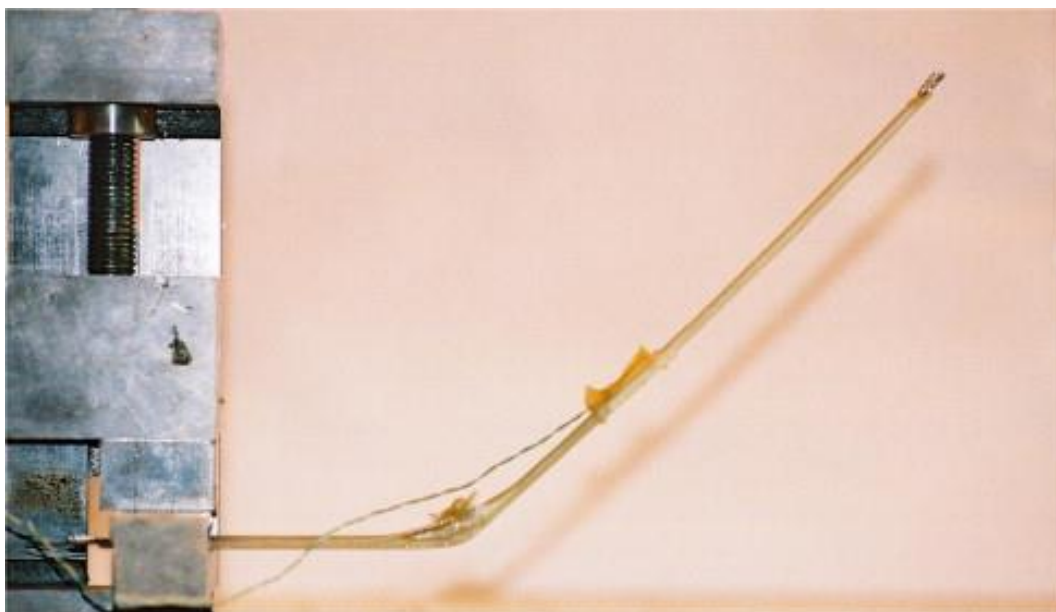
Jak już zostało wcześniej wspomniane, aktywacja SMP jest możliwa (poza bezpośrednim podgrzewaniem materiału) głównie z zastosowaniem odpowiedniego wzmocnienia kompozytu. Do najbardziej niezawodnych metod aktywacji efektu pamięci kształtu należy grzanie prądem elektrycznym. Aby zwiększyć przewodność SMP, konieczne jest więc

odpowiednie wzmacnianie (np. nanorurki węglowe). Wykonanie tego typu kompozytu jest dość kosztowne, ponadto SMPNC nie mogą być zastosowane w roli materiałów konstrukcyjnych. Zbrojenie SMP z wykorzystaniem włókna węglowego bądź szklanego znacząco poprawia właściwości mechaniczne kompozytów, jednocześnie wpływa negatywnie na efekt pamięci kształtu, zmniejszając jego wydajność. Materiały SMP w większości przypadków nie posiadają też możliwości odzyskania kształtu pod wpływem ciągłego obciążenia przeciwnie do stopów NiTi. Aby wykorzystać zarówno cechy stopów NiTi jak i SMP, projektowane są kompozyty hybrydowe łączące cechy tych materiałów.

W literaturze możliwe jest znalezienie dużej liczbie publikacji analizujących potencjalne wykorzystanie hybrydowych kompozytów wzmocnionych NiTi. Badania te mają szeroki zakres i w wielu wypadkach wykorzystują inne cechy NiTi niż SME. J. Aurrekoetxea i inni [101] opracowali kompozyt na bazie tkaniny węglowej z poliestrem wzmocniony drutami ze stopu NiTi badając następnie jego odporność uderową. F.Pinto i inni [102] również wykonali hybrydowy kompozyt wzmocniony drutami ze stopu NiTi w laminacie z polifenylenu siarczkowego oraz włókna węglowego na rzecz badań odporności uderowej. S. Khalili i inni [103] opracowali łatę kompozytową służącą do naprawy próbek stalowych. Autorzy badali różne łaty; jedną z nich stanowił kompozyt kewlarowy wzmocniony drutami ze stopu NiTi. Ze względu na wysoką absorpcję uderzeń, odporność na korozję, wysoki poziom odzyskiwania odkształcenia i zdolność tłumienia stopy NiTi często stosowane są w tego typu kompozytach [104-107]. Hybrydowe kompozyty wzmacniane stopami NiTi często badane są też pod względem termicznej aktywacji drutów ze stopów NiTi oraz ich oddziaływania na strukturę. M. Amano i inni [108] podjęli próbę wykonania kompozytu wzmocnionego folią ze stopu NiTi umieszczoną między warstwami polimeru wzmocnionego włóknem węglowym. Aby monitorować uszkodzenie kompozytu, wykorzystano czujnik światłowodowy. Zastosowanie stopów NiTi pozwoliło na zatrzymanie propagacji pęknięcia poprzez jego aktywację, co potwierdziły dane z układu światłowodowego. Uzyskanie dobrego połączenia między NiTi a pozostałą częścią kompozytu było możliwe dzięki zastosowaniu dodatkowej epoksydowej warstwy adhezyjnej. Istotnym problemem projektowym hybrydowych kompozytów wzmocnionych NiTi są oddziaływania międzyfazowe i trwałość zmęczeniowa osnowy przy kolejnych aktywacjach NiTi. G. Psarras i inni [109] zaprojektowali i wykonali hybrydowy kompozyt składający się z żywicy epoksydowej wzmocnionej włóknami aramidowymi, zawierający druty ze stopu NiTi. Badania przeprowadzone przez autorów miały na celu wzbudzić naprężenia we wnętrzu kompozytu. Autorzy pracy wykazali, że druty ze stopu NiTi

generują naprężenia prowadzące do deformacji kompozytu nawet jeśli temperatura aktywacji jest niewielka. Naprężenia te w ostateczności prowadzą do uszkodzenia próbki. L. Zhao i inni [110], aby zwiększyć wytrzymałość między fazami kompozytu o epoksydowej osnowie i drutem ze stopu NiTi, osadzili na powierzchni drutu nanostruktury ZnO. Wykazano, że naprężenia potrzebne do przerwania faz wzrosły o 36%.

Największą część badań związanych z aktywnymi kompozytami na bazie NiTi odnosi się jednak do wykorzystania ich w: pamięci kształtu, dynamicznej regulacji sztywności oraz kontroli wibracji. G. Song i inni [111] wykonali belkę kompozytową na bazie NiTi. Belka zamocowana w jednym z końców w momencie aktywacji ugięła się (badania nad pamięcią kształtu struktur kompozytowych). Autorzy pracy skupili się na opracowaniu układu sterowania w pętli zamkniętej z wykorzystaniem regulatora PD. Dane o ugięciu belki kompozytowej zbierane były przez czujnik optyczny. Badania pokazały, iż przy odpowiednim układzie sterowania możliwe jest uzyskanie dobrych parametrów sterowania aktywnym kompozytem wzmocnionym drutami NiTi. Autorzy uzyskali szybką odpowiedź układu na wymuszenie jednocześnie bez obserwowalnego przeregulowania oraz z minimalnym uchybem ustalonym. W pracach zajmujących się pamięcią kształtu struktur kompozytowych wzmocnionych NiTi często podkreślana jest podatność połączenia oraz osnowy na uszkodzenia przy częstej aktywacji kompozytu. G. Zhou i P. Lloyd [112] opracowali kompozyty węglowo-epoksydowe oraz szklano-epoksydowe wzmocnione drutami ze stopu NiTi. Drut był wstępnie naprężony, w związku z czym w momencie aktywacji kompozyt ugiął się. Autorzy zaobserwowali, że kompozyt węglowy uzyskuje niewielkie ugięcie i wymaga znaczącego przegrzania drutu ze stopu NiTi. W przypadku kompozytu szklanego autorzy wykazali duże ugięcie belki, jednakże po zaledwie pięciu cyklach aktywacji kompozyt uszkodził się. Wyniki pracy podkreślają konieczność zastosowania odpowiednich materiałów w roli osnowy hybrydowego kompozytu pozwalających na uniknięcie uszkodzeń. Na rysunku 3.2 przedstawiono zniszczenie belki po 5 cyklach aktywacji.



Rysunek 3.2. Zdjęcie przedstawiające uszkodzony kompozyt wzmocniony włóknem szklanym po pięciu cyklach aktywacji [112]

W wielu artykułach dotyczących aktywnych kompozytów na bazie NiTi również poruszono ten problem. C.M. Friend i N. Morgan [113] wykazali, że z kolejnymi cyklami aktywacji hybrydowe kompozyty z NiTi ulegają wewnętrznym uszkodzeniom. C. Lelieveld i inni [114] opracowali kompozyt wzmocniony pasami ze stopu NiTi w osnowie z polimeru z pamięcią kształtu. Opracowany element miał umożliwiać zgięcie kompozytu o kąt 90° . Wykonane próbki w pierwszych cyklach aktywacji cechowały się wysoką dokładnością pozycjonowania. Jednakże powtarzalność spadała przy większej liczbie cykli pracy aktuatora. Druty NiTi są stosowane też w aktywnych kompozytach w celu zmiany ich sztywności w trakcie obciążenia [115, 116], wpływając na odkształcenie kompozytu lub na jego częstość rezonansową. W literaturze można też znaleźć wiele odniesień do badań analizujących potencjał wykorzystania drutów NiTi do kontroli wibracji [117-120]. K. Lau [121] zbadał częstość drgań własnych belki kompozytowej wzmocnionej drutami ze stopu NiTi w stanie aktywnym (po podgrzaniu) oraz w stanie pasywnym (po schłodzeniu). Autor wykazał, że aktywacja drutu NiTi we wnętrzu struktury kompozytowej prowadzi do niewielkiego wzrostu częstości drgań własnych oraz do wielokrotnego wzrostu współczynnika tłumienia drgań. Badano jednak bardzo konkretną konfigurację kompozytu. Również w trakcie tych badań kompozyt uległ uszkodzeniu wynikającemu z naprężeń wewnętrznych. K. Malekzadeh i inni [122] zbadali odpowiedź na drgania swobodne hybrydowej płyty kompozytowej wzmocnionej drutami ze stopu NiTi. Wykazano wpływ aktywacji drutu ze stopu NiTi na częstotliwość drgań własnych płyty,

ponadto zaobserwowano, iż wstępne naprężenie drutów zwiększa wpływ aktywacji kompozytu na właściwości badanej płyty.

Stopy z pamięcią kształtu, jak już wcześniej wspomniano, charakteryzują się unikalnymi właściwościami elektromechanicznymi, co pozwala na tworzenie na ich podstawie aktuatorów oraz układów sensorycznych. Analogicznie, jak dla nieosłoniętych drutów wykorzystywanych w roli aktuatorów, hybrydowe kompozyty z zatopionym drutem NiTi również badane są pod względem wykorzystania jako aktywne kompozyty typu „self-sensing”. Jednakże problem zastosowania zmian rezystancji elektrycznej do detekcji kształtu aktywnego kompozytu wzmocnionego NiTi wciąż jest rozwijany i publikacje powiązane z tematem są nieliczne. S. Lee i S. Kim [123] opracowali belkę kompozytową wzmocnioną drutami ze stopu NiTi umożliwiającymi przy aktywacji gięcie belki. Na podstawie pomiarów rezystancji opracowany został model rezystancji od odkształcenia, pozwalający na estymację ugięcia belki. Wykazano, że obserwowana zależność rezystancji i ugięcia belki ulegała tylko niewielkim zmianom dla 80 cykli pracy. Ze względu na podatność modelu na oddziaływanie zewnętrzne autorzy podkreślają konieczność prowadzenia dalszych prac badawczych.

W badaniach naukowych często też porusza się zagadnienie wytwarzania kompozytów hybrydowych na bazie stopów NiTi. W ostatnich latach ze względu na swoją uniwersalność oraz niewielkie skomplikowanie procesu produkcji znaczenie zyskują techniki addytywne [124-130]. S. Song i inni [127] opracowali kompozyt wykorzystujący tylko dwa druty ze stopu NiTi jako aktulatory mające wywoływać przemieszczenie. Zamiast większej liczby drutów mających umożliwić uzyskanie konkretnych pozycji kompozytu wykorzystano specjalne rusztowania zatopione we wnętrzu kompozytu, pozwalające na wymuszenie konkretnej deformacji. Rusztowania te wydrukowano w technologii FDM. Autorom udało się uzyskać cztery różne pozycje kompozytu, stosując zaledwie dwa druty NiTi. R. Sreesha i inni [128] przeprowadzili badania współczynnika odzyskiwania kształtu aktywnego kompozytu o osnowie z PLA wzmocnionego drutami ze stopu NiTi pod stałym obciążeniem. Kompozyt ten składał się z dwóch drukowanych części połączonych ze sobą drutami ze stopu NiTi, których tylko fragment był zadrukowany we wnętrzu kompozytu. Porównano stop NiTi ze stopem NiTiFe oraz NiTiCu. Autorzy wykazali, że największym współczynnikiem odzyskiwania kształtu cechuje się stop NiTi, który w badanym układzie wynosił 8%. M. Kang i inni [129] opracowali hybrydowy kompozyt o osnowie z SMP (autorzy wykorzystali Nylonem 12 wzmocniony drutami NiTi). Badany kompozyt został wykonany metodą druku 3D. W pierwszym etapie wydrukowano podstawę, na którą naniesiono drut ze stopu NiTi, następnie

naniesiono kolejne warstwy polimeru. Autorzy zbadali między innymi wpływ stosunku masowego pomiędzy NiTi a SMP na zmienne długości kompozytu, wykazując że dla stosunku 1:5 zmiana długości kompozytu była największa i wynosiła 8mm (Kompozyt podczas badań był nieobciążony). S. Bodkhe i inni [130] opracowali nowatorską metodę wykonywania kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym z zatopionymi drutami NiTi. Autorzy zmodyfikowali głowicę do druku 3D w technologii FDM o moduł pozwalający na nakładanie drutu bezpośrednio na polimerową powierzchnię osnowy. Autorzy uzyskali istotne ugięcie belki kompozytowej przekraczające 50 mm (co dla parametrów eksperymentu w omawianej pracy oznaczało, że po aktywacji belka tworzyła kąt z nieruchomą podporą przekraczający 90°)

W literaturze spotykane są też prace badające potencjał drukowanych kompozytów w monitorowaniu strukturalnym. M. Saleh i inni [131] opracowali hybrydowy kompozyt wykonany z wykorzystaniem druku 3D wzmocniony przewodami ze stopów niklu. Nie wykorzystano w tej pracy materiałów inteligentnych, jednakże stanowi ona przykład podobnego zastosowania kompozytu w badaniach stanu konstrukcji. Wykazano zależność pomiędzy rezystancją elektryczną a odkształceniem. Ponadto zaobserwowano, że obszar histerezy obserwowanej dla zależności rezystancji od odkształcenia wzrasta z kolejnymi cyklami. Pomimo wyjątkowych właściwości elektromechanicznych stopów NiTi oraz bardzo wielu prac badających zależność rezystancji i odkształcenia w tych stopach w ramach tego przeglądu literatury nie znaleziono przykładu pracy wykorzystującej NiTi w monitorowaniu stanu struktur kompozytowych.

Wiele prac badawczych podejmuje zagadnienie symulowania właściwości stopów NiTi [132-135]. W badaniach numerycznych tych stopów wykorzystuje się różne modele konstytutywne. Modele te najczęściej dzieli się na trzy grupy w zależności od stopnia szczegółowości: mikro, mikro-makro i makro. Modele mikro opisują wewnętrzne oddziaływania materiału i badają mikroskopowe właściwości stopów NiTi [136]. Grupa modeli makro-mikro wykorzystuje prawa termodynamiki oraz zagadnienia mikromechaniki do określenia przemian energii wewnętrznej w trakcie transformacji fazowych [137]. Zastosowanie zarówno modeli mikro, jak i mikro-makro wiąże się z koniecznością wyznaczenia współczynników materiałowych oraz wymaga dłuższej mocy obliczeniowej, co znacząco ogranicza ich wykorzystanie w większości zagadnień inżynierskich. W kontekście prostoty implementacji wyróżniają się modele opisujące zjawiska jak SME i SE w skali makro [138]. Modele te są wykorzystywane w oprogramowaniu komercyjnym jak Ansys czy Abaqus [139]. Wykorzystanie modelu materiałowego SMA i komercyjnego oprogramowania w badaniach

naukowych często jest tematycznie powiązane z numerycznymi badaniami implantów medycznych jak stent lub aparat ortodontyczny [140, 141]. Jednak ze względu na swoją uniwersalność modele makroskopowe SMA wykorzystywane są też w symulacjach SME. Jednym z przykładów prac wykorzystujących komercyjne modele SMA, takich jak model opracowany na podstawie kilku prac [142-145] i dostępny w środowisku Ansys, jest publikacja M. Pathana i innych [146]. Autorzy opracowali aktuator na bazie stopu NiTi metodą addytywną. Opisany przez autorów siłownik stanowił aktywny kompozyt drukowany z elastycznego filamentu (w pracy nie podano dokładnych parametrów filamentu) wzmocniony drutami ze stopu NiTi o kształcie cylindra z drutami NiTi rozłożonymi na jego obwodzie. Autorzy symulowali, z wykorzystaniem oprogramowania Ansys, skręcanie się cylindra, które następnie było kompensowane przez aktywację drutów ze stopów NiTi. S. Alazzawi i P. Filip [147] również wykorzystali domyślny model materiałowy SMA w środowisku Ansys do wykonania symulacji drutu ze stopu NiTi wygiętego w kształt litery C w celu porównania aktywacji takiego siłownika przy różnych parametrach obciążenia. Autorzy symulowali właściwości różnych stopów NiTi (różniących się przede wszystkim pod względem procesów wytwórczych), które badano przy różnej prędkości obciążenia oraz dla różnych scenariuszy termicznych (reorientacja struktury martenzytycznej oraz indukowana nieprężeniami przemiana martenzytyczna). Autorzy wykazali wiele zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem a warunkami obciążenia.

3.2 Aplikacje wykorzystujące stopy NiTi

Praca podejmuje zagadnienia związane z zastosowaniem stopów NiTi w różnych aplikacjach. Dokonując przeglądu literatury, przytoczono kilka artykułów opisujących obiecujące zastosowania stopów NiTi, zarówno w aktuatorach, jak i układach sensorycznych.

3.2.1 Zastosowanie stopu NiTi w aktuatorach

Kluczowym, o dużym potencjale rozwoju, jest sektor aktuatorów ze stopów NiTi. W literaturze można znaleźć dziesiątki rozwiązań oraz patentów opartych na materiałach z pamięcią kształtu, zwłaszcza dotyczących zastosowania NiTi.

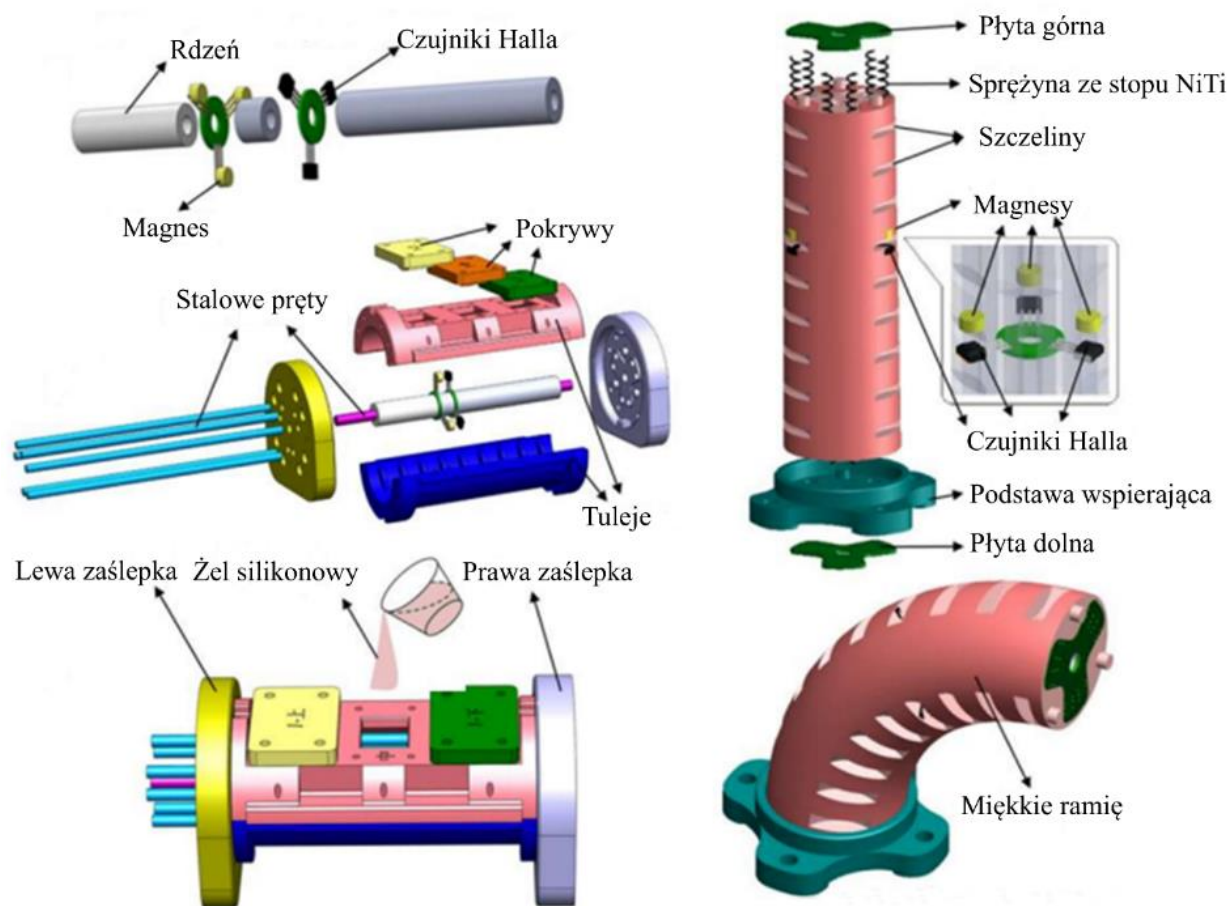
Jednym z najbardziej powszechnie badanych aktuatorów z NiTi są sztuczne włókna mięśniowe. Aktuatory te mają poprzez wykorzystanie efektu pamięci kształtu zasymulować pracę ludzkich bądź zwierzęcych włókien mięśniowych. W pracy “Micro artificial muscle fiber using NiTi spring for soft robotics” autorzy opisują proces projektowania pojedynczego włókna

mięśniowego na podstawie sprężyny wykonanej ze stopu NiTi [148]. Dodatkowo wykonano prototypowy model aktuatora odwzorowującego ruchy ślimaka, co przedstawia rysunek 3.3.



Rysunek 3.3. Aktywator wykonany na podstawie drutów NiTi odwzorowujących ruchy ślimaka [148]

Podobne w zakresie mechanicznym, lecz bardziej zaawansowane rozwiązanie, zostało opisane w pracy pod tytułem „Design and Implementation of a Soft Robotic Arm Driven by NiTi Coils”. Autorzy opisują proces wykonywania elastycznego ramienia robota wykorzystującego sprężyny z NiTi w roli aktuatorów. Ramię to wykonane jest z elastycznego silikonu możliwego do odgięcia za pomocą sprężyn z NiTi. Sterowanie ramięm realizowano poprzez odczyt pola magnetycznego generowanego przez umieszczone w centrum ramienia magnesy za pomocą czujników Hala [149]. Model ramienia robota przedstawiono na rysunku 3.4.



Rysunek 3.4. Model ramienia robota z aktuatorami wykonanymi ze sprężyn NiTi [149]

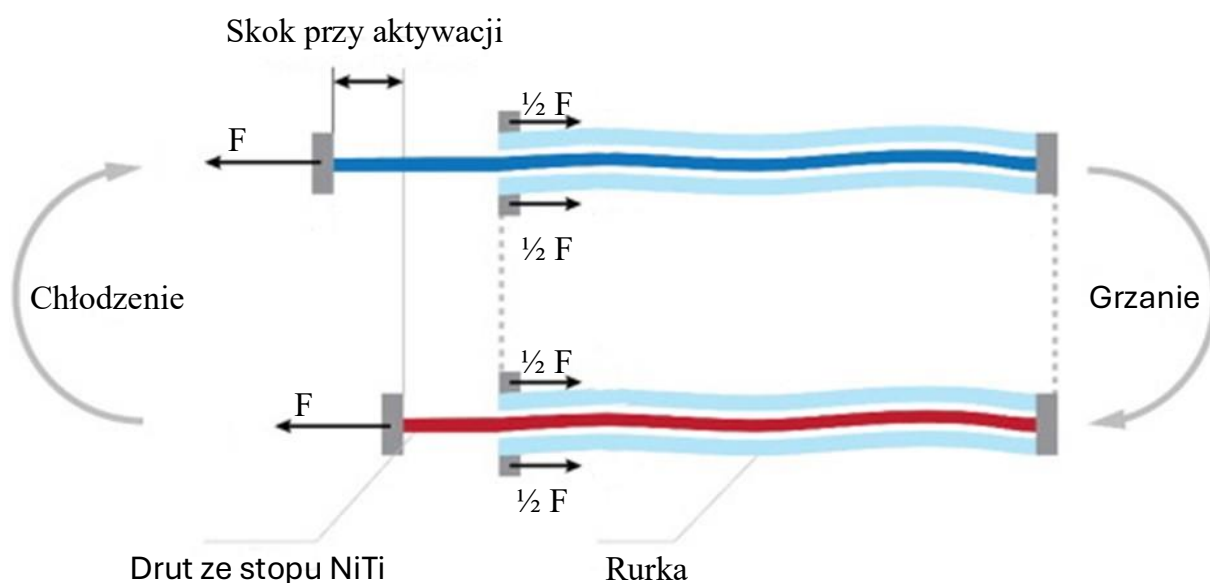
Tak zaprojektowane ramię robota ma sześć stopni swobody i dużą łatwość pozycjonowania co przedstawiono na rysunku 3.5.



Rysunek 3.5. Ruchomość elastycznego ramienia robota [149]

Opisane w tej publikacji ramię nie jest jeszcze gotowe do komercjalizacji ze względu na brak możliwości pracy z dużymi obciążeniami oraz ograniczoną dokładnością sterowania. Są to problemy, z którymi boryka się większość aktuatorów mających odwzorować pracę ludzkich bądź zwierzęcych mięśni.

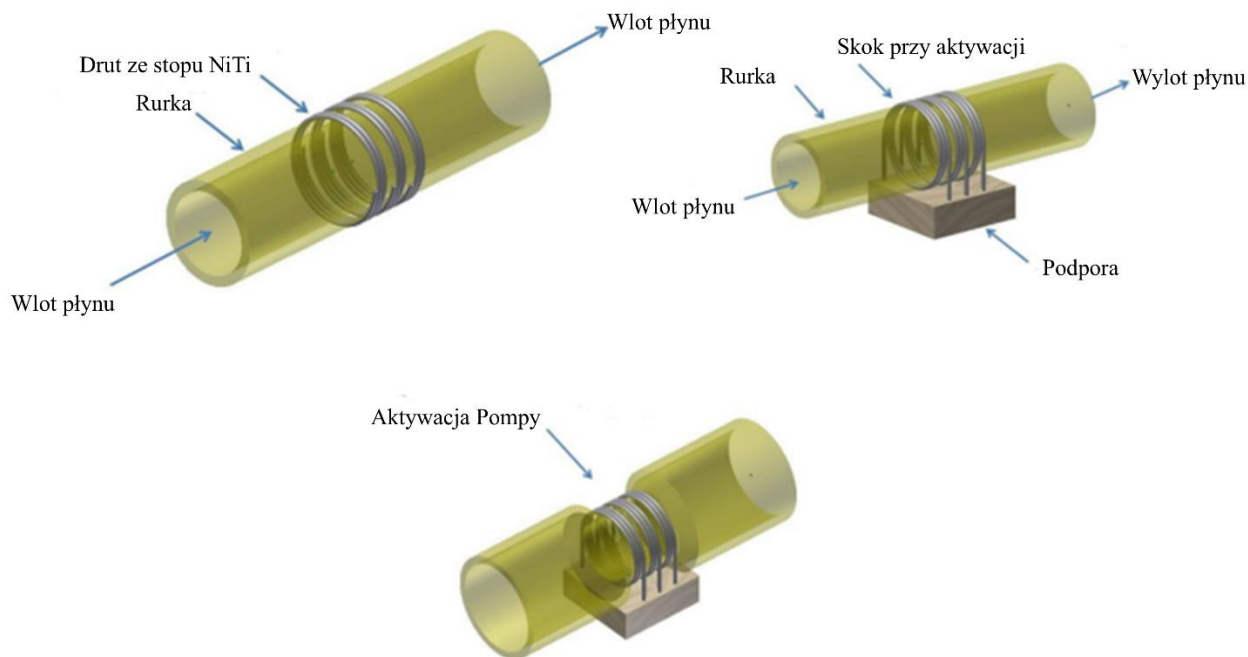
Na bazie stopów NiTi tworzone są też dużo prostsze aktulatory o jednym stopniu swobody. Przykład takiego aktuatora przedstawiono w artykule „Modelling and mechanical design of a flexible tube-guided NiTi actuator”. Opisano procesy modelowania oraz projektowania prostego aktuatora wykorzystującego efekt pamięci kształtu do generowania przemieszczenia w jednej osi co zostało przedstawione na rysunku 3.6 [150].



Rysunek 3.6. Jednoosiowy aktuator [150]

Dodatkowo w przedstawionym projekcie drut z NiTi umieszczono we wnętrzu elastycznej przewodnicy rurowej wykonanej z politetrafluoroetylu. Umieszczony wewnątrz tworzywa drut może być zginany i skręcany, a dalej zachowa pełen zakres skoku aktuatora wynoszący 4%. Według autorów tak zaprojektowany aktuator idealnie nadaje się do zastosowania w przemyśle tekstylnym.

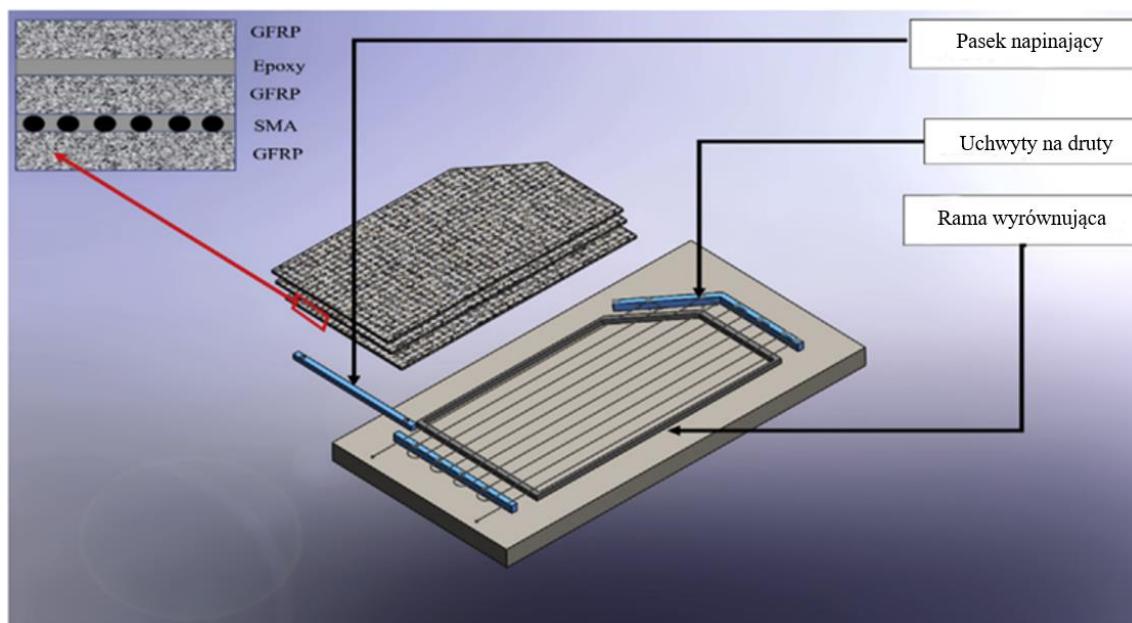
Do innych przykładów prostych aktuatorów wykorzystujących materiały inteligentne można zaliczyć mikropompę. W artykule „Miniaturized Flexible Flow Pump Using NiTi Actuator” przedstawiono projekt pompy [151]. Pompa ta wywołuje przepływ cieczy poprzez wytworzenie różnicy ciśnień, ściskając elastyczny przewód z cieczą. Przewód ściskany jest za pomocą zwoju wykonanego z NiTi. Model aktuatora pokazano na rysunku 3.7.



Rysunek 3.7. Mikropompa wykorzystująca zwoje z NiTi [151]

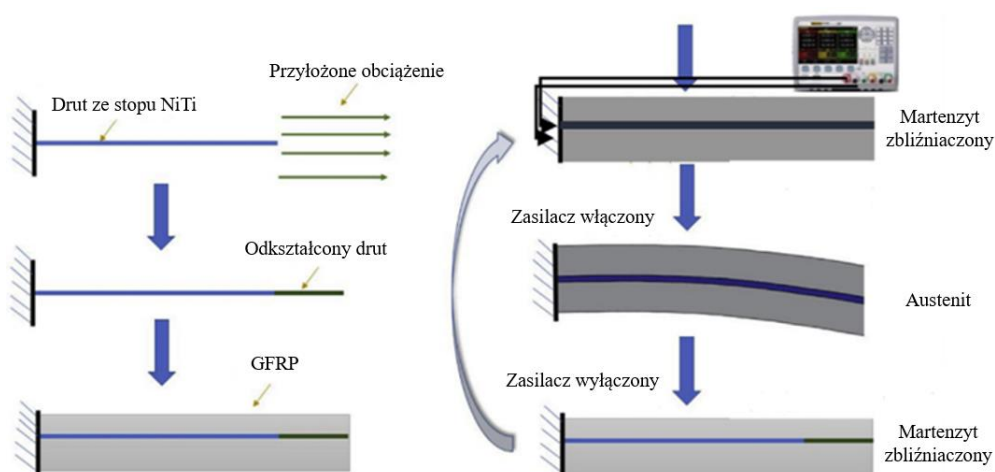
Aktuator ten jest nowoczesnym rozwiązaniem pozwalającym uzyskać przepływ cieczy w dwóch kierunkach (co nie jest możliwe dla większości mikropomp). Dodatkowo elementy wykonawcze nie mają kontaktu z cieczą, co pozwala zachować jej czystość i nie stwarza zagrożenia wówczas, gdy ciecz jest toksyczna lub żrąca.

Innym istotnym kierunkiem badań nad aktuatorami z NiTi jest tworzenie aktywnych struktur kompozytowych będących połączeniem elastycznej polimerowej osnowy oraz wzmocnienia wykonanego ze stopu z pamięcią kształtu. Tak wykonany kompozyt jest aktuatorem o określonej liczbie stopni swobody zależnej od konstrukcji. Przykładem pracy opisującej taką strukturę kompozytową jest „Development and actuation analysis of shape memory alloy reinforced composite fin for aerodynamic application” [152]. Autorzy opisują procesy modelowania, projektowania oraz wykonania kompozytowej lotki na podstawie drutu ze stopu NiTi. Zastosowanie aktywnego kompozytu w roli lotki pozwala na korektę toru lotu bez konieczności wykorzystania dodatkowych silników. Model kompozytu przedstawiono na rysunku 3.8.



Rysunek 3.8. Model kompozytu ze wzmocnieniem ze stopu z pamięcią kształtu [152]

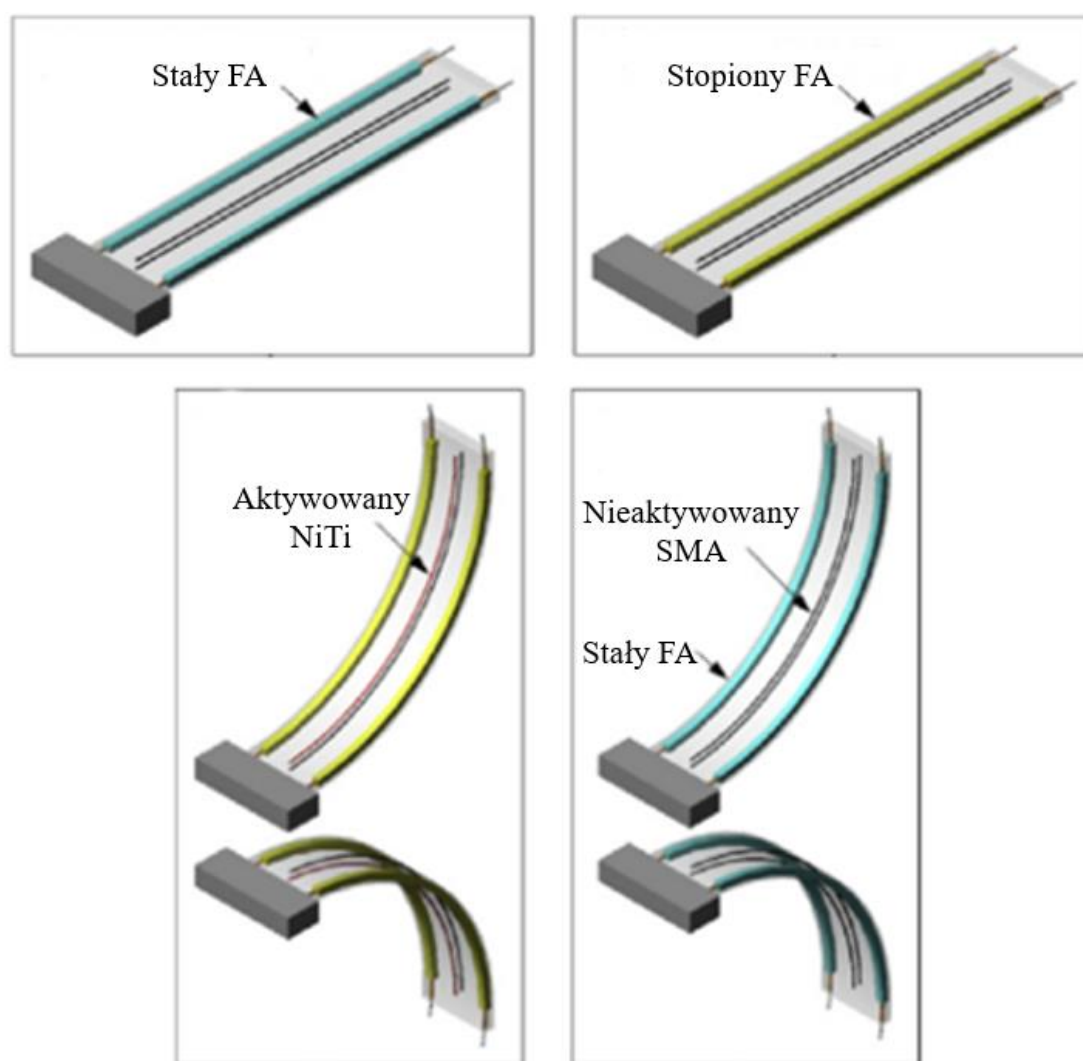
Korekcja toru lotu pocisku jest możliwa dzięki elektrycznej aktywacji stopów z pamięcią kształtu. Przemiana NiTi powoduje skurczenie stopu, a także odkształcenie elastycznej osnowy. Zmiana kształtu lotki wpływa na jej aerodynamikę, co w efekcie może wywołać zmianę kierunku lotu. Drut NiTi aby działać w opisany sposób, musi zostać poddany wstępnemu obciążeniu, po czym umieszczony wewnątrz kompozytu. Sposób przygotowania kompozytu został pokazany na rysunku 3.9.



Rysunek 3.9. Metoda wykonania oraz działania lotki [152]

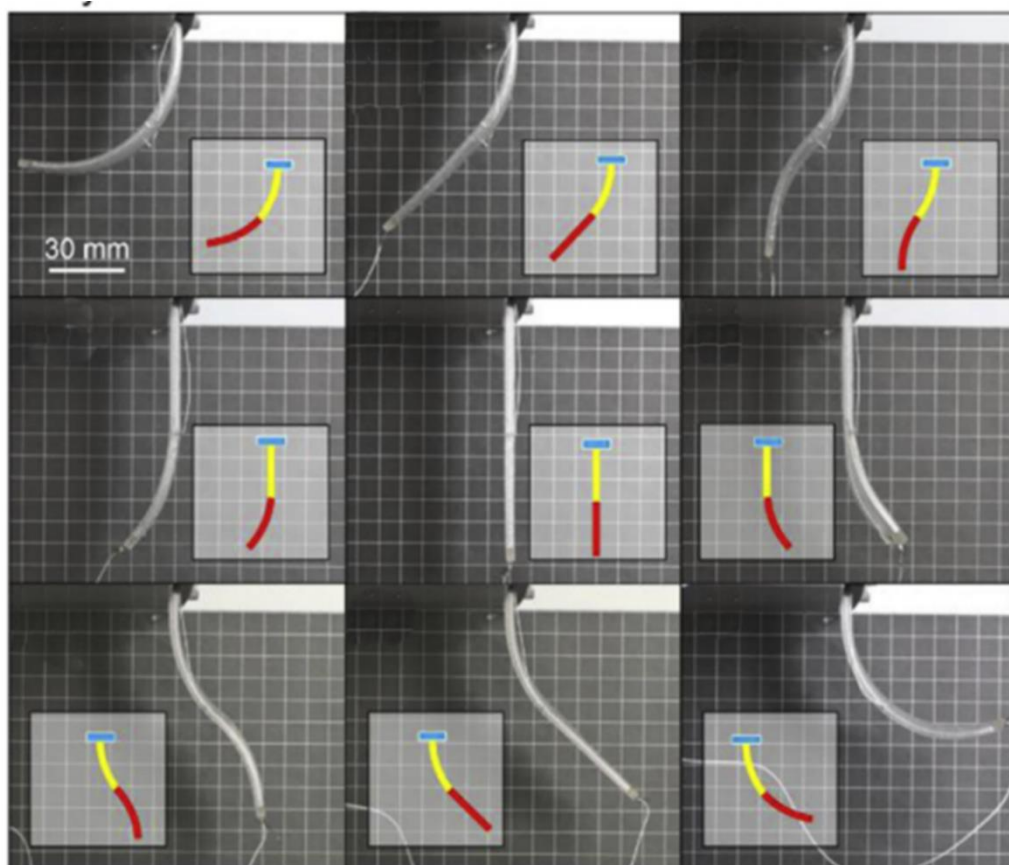
Innym przykładem aktuatora kompozytowego jest opisany w pracy „Smart soft composite actuator with shape retention capability using embedded fusible alloy structures” SSC (ang. NiTi Soft Composite), wykonany na bazie drutu z pamięcią kształtu. W aktuatorze tym drut z

NiTi, podobnie jak w poprzednim przypadku, służy do odgięcia elastycznej osnowy polimerowej. Jednakże opisany w tym artykule kompozyt umożliwia dodatkowo ustalenie stałej pozycji bez konieczności ciągłej aktywacji NiTi. Jest to realizowane poprzez zastosowanie struktury FA, czyli stopu topliwego [153]. Działanie aktuatora podzielone jest na kilka etapów: najpierw poprzez aktywację prądową roztapiana jest struktura FA, następnie podczas ponownego krzepnięcia struktury kompozyt jest odginany wskutek efektu pamięci kształtu indukowanego poprzez przepływ prądu elektrycznego. Po ponownym okrzepnięciu FA drut NiTi może zostać odłączony od zasilania, a kompozyt pozostaje we wcześniej ustalonej pozycji. Sposób działania SSC przedstawiono na rysunku 3.10.



Rysunek 3.10. Sposób działania kompozytu SSC [153]

Tak zaprojektowane kompozyty można łączyć szeregowo, uzyskując większą swobodę pozycjonowania, co zostało przedstawione na rysunku 3.11.



Rysunek 3.11. Przestrzeń robocza aktuatora wykonanego z dwóch członów kompozytu SSC [153]

Kluczowym zagadnieniem przy projektowaniu aktuatora na podstawie inteligentnych materiałów jest sterowanie. W przypadku stopu NiTi aktywacja przemiany jest bardzo prosta, bo może być realizowana z zastosowaniem prawa Joule'a Lenza, co zostało już wcześniej omówione. Jednakże efekty takiego samego wymuszenia prądowego różnych stopów NiTi mogą nie być takie same. Dodatkowo sterowanie aktuatorami z efektem pamięci kształtu metodą otwartą wymaga tworzenia skomplikowanych modeli pozwalających na ocenę zachowania siłownika. Rozwiązaniem powyższych problemów może być realizacja sterowania w układzie zamkniętym. Jest to jednak utrudnione, ponieważ bezpośredni pomiar stopnia przemiany fazowej stopu jest niemożliwy.

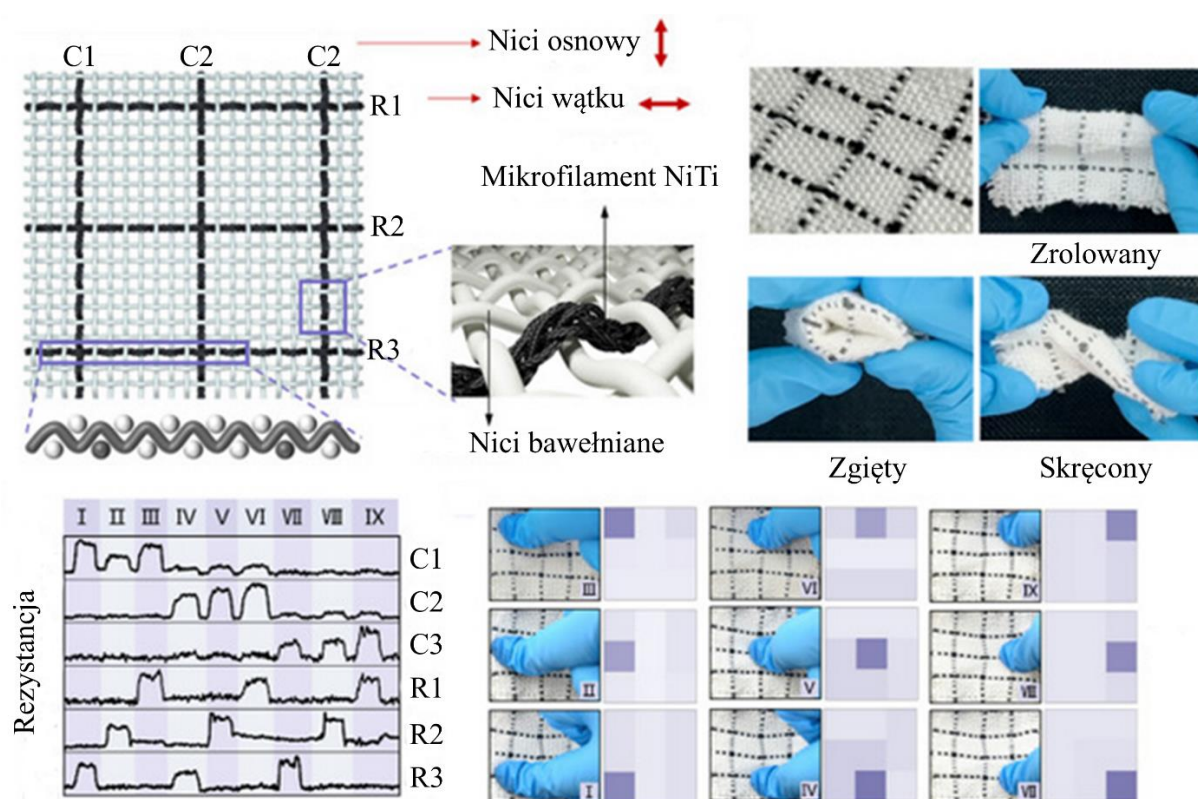
Przykładem publikacji analizującej metody sterowania aktuatorami NiTi jest praca pod tytułem „Differential resistance feedback control of a self-sensing shape memory alloy actuated system” [154]. W pracy tej, aby sterować aktuatorem typu self-sensing wykorzystującym stopy NiTi, użyto regulatora typu PID. Ta metoda sterowania testowana była na pojedynczym siłowniku z drutu NiTi połączonym szeregowo ze sprężyną. Stosowanie regulacji PID wiąże

The diagram illustrates a control system for a pendulum. A pendulum with mass m and length L is shown at an angle θ . A displacement sensor (Przemieszczenie) measures the displacement. The system is controlled by a PID controller (Regulator PID) which drives a motor (Drut NiTi) to move the pendulum. The control system is implemented using a measurement card (Karta pomiarowa) connected to a computer running Matlab/Simulink.

Rysunek 3.12. Układ sterowania serwym z wykorzystaniem stopów z pamięcią kształtu

3.2.2 Zastosowanie stopów NiTi w układach sensorycznych

Stopy NiTi ze względu na unikalne właściwości mogą być wykorzystywane nie tylko w aktuatorach, ale także w układach sensorycznych. Dobrym przykładem jest artykuł Yiwen Liu i in., w którym spleciony mikrofilament ze stopu NiTi został wykorzystany w roli czujnika ciśnienia [155]. Dzięki zastosowaniu splecionego mikrowłókna ze stopu NiTi, uzyskano zbliżoną do liniowej reakcję mechaniczną materiału, jednocześnie osiągając większą wytrzymałość. Opracowany przez Yiwen Liu i in. czujnik może być wykorzystywany do pomiarów wysokich ciśnień przy odkształceniu mikrowłókna sięgającym do 8% pod obciążeniem 600 MPa. Zastosowanie mikrowłókna pozwoliło autorom również na uzyskanie stabilnej pracy układu sensorycznego w warunkach istotnych różnic temperatur (303–403 K). Autorzy wykonali również prototypowy sensor przedstawiony na rysunku 3.13.



Rysunek 3.13. Sensor ciśnienia oparty o wykorzystanie [155]

Innym istotnym sektorem wykorzystującym stopy NiTi są czujniki w skali mikro. Ze względu na fakt, iż: temperatura, naprężenia, pole elektryczne wpływają na właściwości stopów NiTi (co zostało opisane w podrozdziale 2.1), mogą być one wykorzystywane w czujnikach stanowiących część układów typu MEMS (mikroukład elektromechaniczny) [156]. Przekładowym zastosowaniem tego typu jest wykorzystanie cienkiej warstwy ze stopu NiTi w mikrolustrach o szerokim zakresie ruchu. Element taki pod wpływem temperatury porusza

się w górę albo w dół, w związku z czym można go uznać za czujnik w przełączniku optycznym. W pracy Y Q Fu i in. wykonali element tego typu zaczepiony na wsporniku o kształcie litery V, którego grubość nie przekraczała 40 μm . Zgodnie z rezultatami badania maksymalny kąt zginania dla mikrowłókna wyniósł pomiędzy 15-20° [157].

3.3 Terminologia związana z wyjątkowymi właściwościami stopów NiTi

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono szerokie spektrum badań mających na celu określenie korelacji lub zależności pomiędzy poszczególnymi właściwościami stopów NiTi, które jak już wspomniano we wstępie, zaliczają się do materiałów z pamięcią kształtu. Ponieważ jest to wyjątkowa grupa materiałów zaliczana do tak zwanych materiałów inteligentnych i charakteryzują ją dość wyjątkowe właściwości, niektóre terminy wykorzystane w tej pracy stosowane są przede wszystkim do opisu tych materiałów.

Kluczowym terminem dla samej pracy jest reorientacja struktury krystalicznej martenzytu. Termin ten odnosi się do wywołanych obciążeniem przemian struktury krystalicznej fazy martenzytycznej, polegających głównie na jej bliźniakowaniu.

Terminem związanym z tym samym zjawiskiem jest też plateau naprężeń. Określenie to odnosi się do etapu rozciągania stopu NiTi, podczas którego wzrasta odkształcenie przy minimalnym wzroście naprężeń, tworząc charakterystyczny fragment o niewielkim pochyleniu widoczny na krzywej rozciągania tych stopów (patrz: podrozdział 2.1).

W niniejszej pracy wykorzystano też określenie aktywacja stopu. Termin ten odnosi się do wywołania przemiany martenzytyczno-austenitycznej, stanowiącej bezpośrednią przyczynę efektu pamięci kształtu. W tym kontekście określenie aktywacja oznacza więc inicjację powrotu układu do nieodkształconej pozycji. Dla stopów NiTi stanowiących przykład stopów SMA o przemianie indukowanej termicznie sprowadza się więc do zwiększenia temperatury badanych próbek i dla wszystkich badań realizowane jest to z wykorzystaniem prądu elektrycznego zgodnie z prawem Joule'a-Lenza. Nie jest to termin stosowany wobec stopów NiTi, został on wykorzystany w tej pracy po to aby skrócić powtarzający się często opis konkretnych zjawisk.

3.4 Podsumowanie przeglądu literatury

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury można stwierdzić, iż dużym zainteresowaniem naukowym cieszą się artykuły podejmujące zagadnienia wyznaczania właściwości stopów NiTi w tym analizujące druty o niewielkiej średnicy (poniżej 500 μm). Duża liczba prac badawczych podejmuje przede wszystkim tematykę wyznaczania zależności

między własnościami mechanicznymi a elektrycznymi stopów NiTi ze względu na wyjątkowe cechy wykorzystywane w aktuatorach typu „self-sensing”. Pomimo tego, że w bardzo wielu badaniach podejmowano te tematykę, to wciąż pojawiają się istotne rozbieżności pomiędzy wynikami opisanymi w poszczególnych artykułach. Wiąże się to przede wszystkim z tym, że wciąż rozwijane są metody oraz procedury badawcze wykorzystywane w celu prowadzenia takich badań. Dobrym przykładem jest skaningowa kalorymetria różnicowa stosowana w wielu badaniach do wyznaczania temperatur przemian stopów NiTi. W przeglądzie literatury przytoczono prace starające się wykazać, że DSC osiąga gorsze wyniki w kontekście estymacji przemian fazowych od metod wykorzystujących analizę odkształcenia w trakcie aktywacji. Można więc stwierdzić, iż konieczne jest prowadzenie dalszych prac nad opracowaniem nowych metod oraz stanowisk badawczych do wyznaczania właściwości elektromechanicznych drutów ze stopów NiTi.

Ponadto w ramach przeglądu przytoczono też wiele prac zajmujących się aktywnymi kompozytami ze stopu NiTi. Prace te oferują bardzo dużą wiedzę z zakresu wymogów i problemów projektowych związanych z tego typu kompozytami. Hybrydowe kompozyty oraz rezystancyjne modele wykorzystywane w aktuatorach „self-sensing” są bardzo dobrze opisane w literaturze, trudno jest znaleźć prace łączące te zagadnienia. Świadczy to o tym, że hybrydowe kompozyty wzmocnione drutami NiTi mają duży potencjał rozwoju. Dotyczy to także zyskujących na popularności addytywnych metod wykonywania tego typu kompozytów. Druk 3D ze względu na uniwersalność oraz krótki czas produkcji bardzo dobrze nadaje się do wykonywania kompozytów z zatopionym przewodem NiTi. Równie istotne jest, że wiele materiałów SMP (jak polilaktyd) stosuje się w filamentach wykorzystywanych w metodzie FDM. Materiały SMP, jak wskazano w przeglądzie literatury, stanowią odpowiednią podstawę dla hybrydowych kompozytów wzmocnianych NiTi.

Innym zagadnieniem poruszonym w przeglądzie literatury było monitorowanie stanu konstrukcji kompozytowych. Nie zaleziono jednak prac zajmujących się tym zagadnieniem.

Podstawę do rozpoczęcia niniejszej pracy doktorskiej stanowiło badanie przeprowadzone na Politechnice Śląskiej przez S. Sławskiego i innych [158], w którego ramach wykazano korelację pomiędzy cyklicznym obciążeniem drutów ze stopu NiTi a spadkiem rezystancji elektrycznej. Biorąc pod uwagę to badanie oraz wiele innych prac omówionych w ramach przeglądu literatury, które podejmują kwestię zależności między rezystancją a odkształceniem drutów NiTi, można stwierdzić, że istnieje potrzeba pogłębienia wiedzy na temat zaobserwowanego zjawiska oraz oceny możliwości wykorzystania tych stopów w monitorowaniu strukturalnym.

4 Cel i zakres pracy

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury zauważono, iż pomimo tego, że bardzo wiele prac badawczych podejmuje zagadnienia wyznaczania własności stopów NiTi, to pozostają one ze sobą często w polemice, proponując inne podejście do tego zagadnienia. Stwierdzono też, iż istnieje bardzo bogata liczba źródeł literaturowych zajmujących się: przemianami fazowymi stopów NiTi, zastosowaniem ich wyjątkowych właściwości elektromechanicznych oraz hybrydowymi kompozytami wzmocnionymi stopami NiTi, wykorzystywanymi np. do kontroli kształtu lub tłumienia drgań. Pomimo bogactwa literatury i wynikającego z niej potencjału stopów NiTi, trudno jest znaleźć artykuły analizujące wykorzystanie tych właściwości w kompozytach, np. w roli aktuatora typu „self-sensing” oraz w nowoczesnych układach sensorycznych do monitorowania strukturalnego.

W wyniku przeprowadzonej kwerendy literatury stwierdzono, iż istnieje konieczność dalszych badań nad metodami wyznaczania właściwości elektromechanicznych drutów ze stopów NiTi aby zaproponować nowe rozwiązania, które mogłyby zwiększyć replikowalność prowadzonych badań. Ponadto biorąc pod uwagę zarysowany w pracy potencjał stopów NiTi oraz wyniki pracy naukowej stanowiącej inspirację dla niniejszej pracy [158], można stwierdzić, że istnieje duża przestrzeń do badań właściwości stopów NiTi pod względem ich wykorzystania w układach sensorycznych do monitorowania stanu konstrukcji.

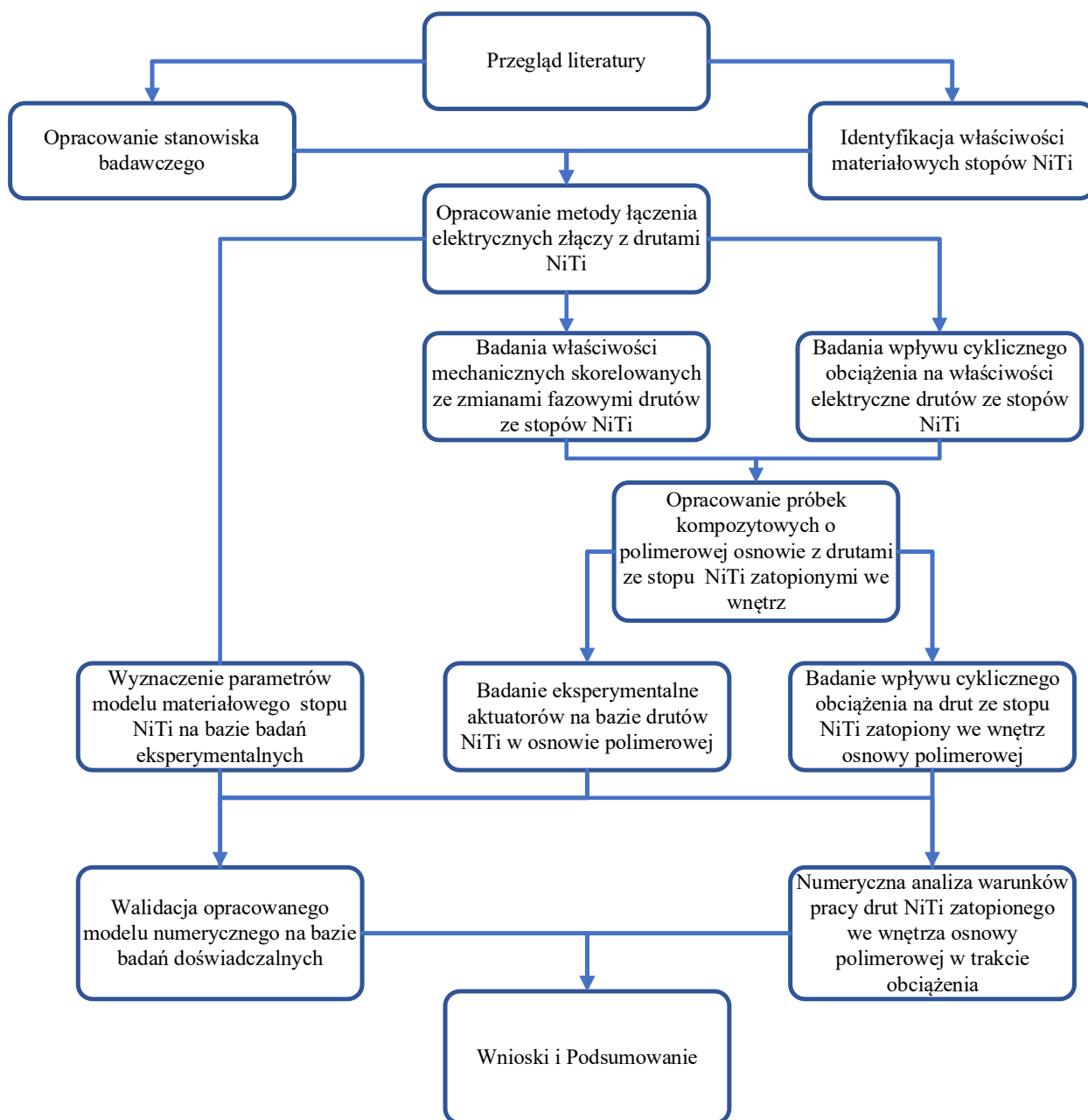
Celem niniejszej pracy było więc zaproponowanie nowych metod i autorskiego stanowiska badawczego do wyznaczania własności elektromechanicznych drutów ze stopów NiTi, a także poszerzenie wiedzy na temat własności stopów NiTi możliwych do potencjalnego wykorzystania w monitorowaniu strukturalnym i w aktuatorach typu „self-sensing” na podstawie badań eksperymentalnych na nieosłoniętych i zatopionych we wnętrzu struktury kompozytowej drutach.

Zakres czynności niezbędnych do zrealizowania celu pracy:

1. Przegląd literatury.
2. Przegląd dostępnych modeli materiałowych stopów NiTi.
3. Opracowanie metodyki badań.
4. Konfiguracja stanowiska badawczego.
5. Kalibracja modelu materiałowego stopu NiTi w środowisku Ansys do badań numerycznych.

6. Przeprowadzenie badań doświadczalnych stopów NiTi.
7. Opracowanie kompozytów ze stopów NiTi w osnowie polimerowej.
8. Podsumowanie badań doświadczalnych i symulacji numerycznych.
9. Porównanie wyników badań numerycznych z eksperymentalnymi.
10. Opracowanie wniosków na podstawie przeprowadzonych badań.

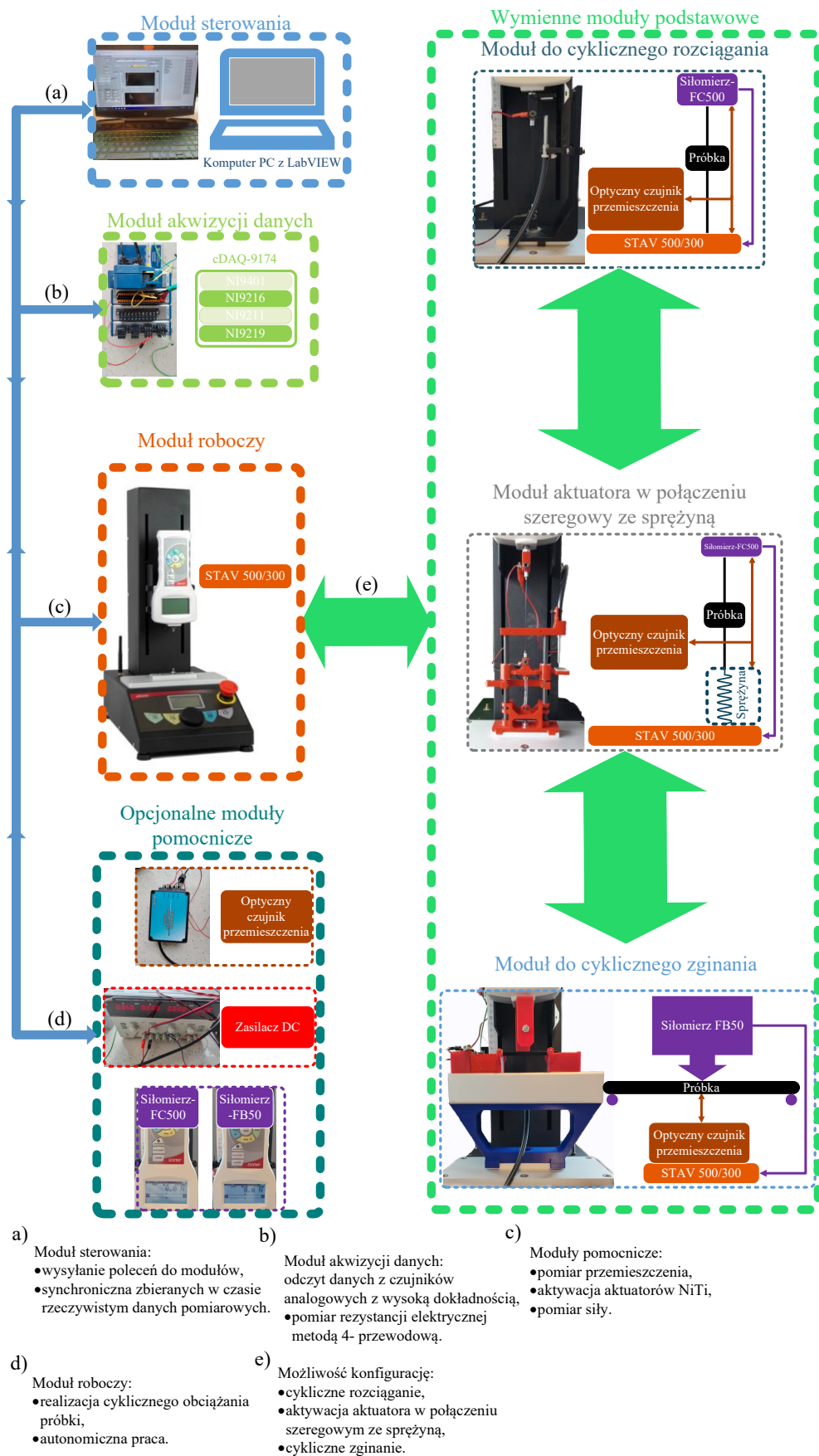
Poszczególne etapy realizowane w ramach rozprawy doktorskiej przedstawiono w postaci schematu na Rysunku 4.1.



Rysunek 4.1. Etapy realizacji zadań w ramach rozprawy doktorskiej

5 Aparatura badawcza

Opracowano aparaturę badawczą do wyznaczania właściwości elektro-mechanicznych stopów NiTi. Aparatura ta pozwoliła na przeprowadzenie szerokiego zakresu badań stopów NiTi bez konieczności ponoszenia za każdym razem znaczących kosztów związanych ze zleceniem konkretnych pomiarów zewnętrznym instytutom badawczym. Opracowane stanowisko badawcze umożliwiło przeprowadzanie szerokiego zakresu testów, w tym prób rozciągania i zginania drutów oraz ich kompozytów na bazie stopu NiTi. Ponadto na opracowanym stanowisku konieczne było prowadzenie mniej standardowych badań, jak analiza wpływu cyklicznego rozciągania na rezystancję elektryczną oraz analiza wpływu indukowanej termicznie przemiany fazowej na właściwości mechaniczne oraz elektryczne drutów ze stopów NiTi. We wszystkich badaniach wykonywanych za pomocą stanowiska badawczego głównym ruchem roboczym był ruch liniowy, który przy odpowiedniej konstrukcji stanowiska, wykorzystywano zarówno do rozciągania, jak i zginania próbek. Wykorzystywane były różne rodzaje wymuszeń, poza rozciąganiem ze stałym odkształceniem obciążano próbki również siłą nadążną oraz zwiększano ich temperaturę w celu wywołania przemiany fazowej. Jednocześnie w różnych procedurach pomiarowych mierzona była szeroka gama wielkości, takich jak: przemieszczenie, siła, rezystancja elektryczna, temperatura próbki. Ze względu na bardzo dużą uniwersalność, jaką cechowało się opracowane stanowisko badawcze, uznano, iż najlepszym podejściem będzie podzielenie go na moduły. Dzięki temu możliwa była konfiguracja toru pomiarowego stanowiska pod wymogi konkretnego eksperymentu poprzez łączenie wcześniej przygotowanych modułów. Przygotowano trzy różne konfiguracje, opierające się na wykorzystaniu modułów: do cyklicznego rozciągania, do cyklicznego zginania oraz aktuatora w układzie szeregowym ze sprężyną. Każda z tych konfiguracji pozwoliła na prowadzenie zupełnie odmiennych procedur badawczych, oferując uniwersalność wymaganą dla tego stanowiska badawczego. Poza tymi trzema modułami, kluczowe dla prowadzenia pomiarów były też podukłady do akwizycji danych oraz sterowania. Wyodrębniono kilka elementów stanowiących pojedyncze komponenty, które jednak zostały określone mianem modułów, gdyż stanowisko zostało przygotowane w sposób pozwalający na ich łatwą integrację, a także odłączenie od układu. W tej podgrupie wyróżniono pięć modułów: do pomiaru siły, do pomiaru przemieszczenia, do pomiaru temperatury, umożliwiający aktywację drutu ze stopu NiTi oraz moduł roboczy. Schemat zestawiający ze sobą wszystkie wykorzystane moduły przedstawiono na rysunku 5.1.

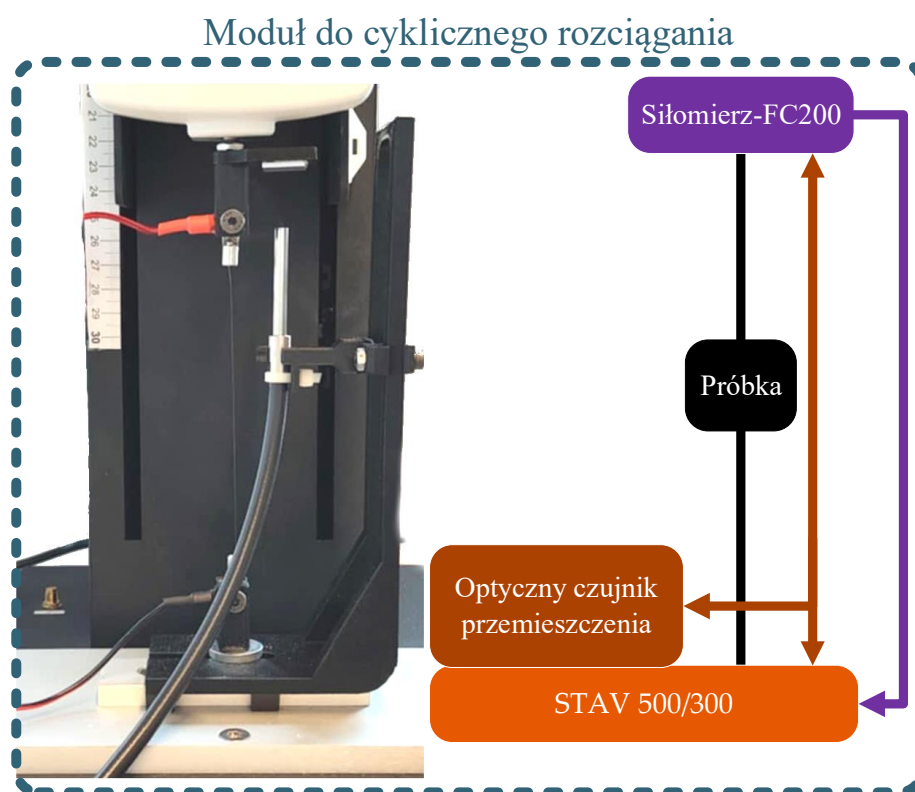


Rysunek 5.1. Moduły wchodzące w skład stanowiska pomiarowego

5.1 Moduły podstawowe

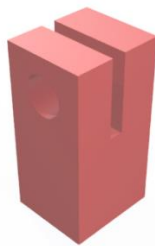
Kluczowe elementy stanowiska badawczego stanowiły trzy moduły umożliwiające przeprowadzenie różnych rodzajów badań eksperymentalnych na różnych próbkach.

Moduł do cyklicznego rozciągania umożliwiał wielokrotne obciążenie próbki stanowiącej drut ze stopu NiTi przy jednoczesnym pomiarze jej wydłużenia oraz siły w trakcie rozciągania. Na rysunku 5.2 przedstawiono schemat wraz z ujęciem pokazującym działanie modułu w praktyce.



Rysunek 5.2. Moduł do cyklicznego rozciągania

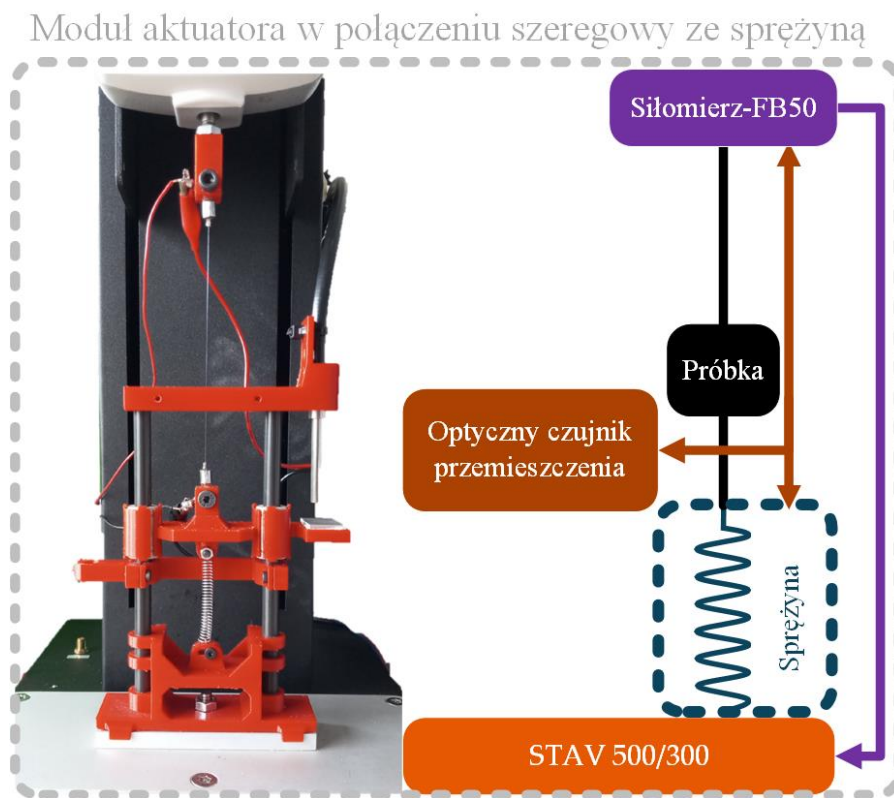
Podstawowym elementem wchodzącym w skład tego modułu były uchwyty na próbki wykonane metodą addytywną. Uchwyt ten jest prostopadłościennym elementem z rowkiem o szerokości odpowiedniej pod oczkowe zakończenie przewodu oraz z otworami pod śrubę i zamocowanie nakrętki. Pod spodem elementu znajduje się otwór z gwintem M5 przeznaczony do wkręcenia w znajdujący się na stanowisku (dokładny opis w dalszej części rozdziału) pręt gwintowany. Wizualizację tego uchwytu przedstawiono na Rysunku 5.3.



Rysunek 5.3. Wizualizacja uchwytu przeznaczonego do zamocowania na stanowisku pomiarowym: próbka na bazie drutu ze stopu NiTi w rzucie izometrycznym

Poza mocowaniem próbek moduł ten został jeszcze wyposażony w uchwyt pod czujnik optyczny (pozwalający na regulację pozycji głowicy czujnika w każdej osi) oraz powierzchnie refleksyjną, mającą na celu zwiększenie powtarzalności pomiarów z wykorzystaniem czujnika optycznego. Obie części zostały wydrukowane na drukarce 3D, natomiast samą powierzchnię refleksyjną stanowiła niewielkich rozmiarów (4x4mm) płytka z anodowanego aluminium (dokładniejszy opis działania czujnika optycznego znajduje się w dalszej części rozdziału).

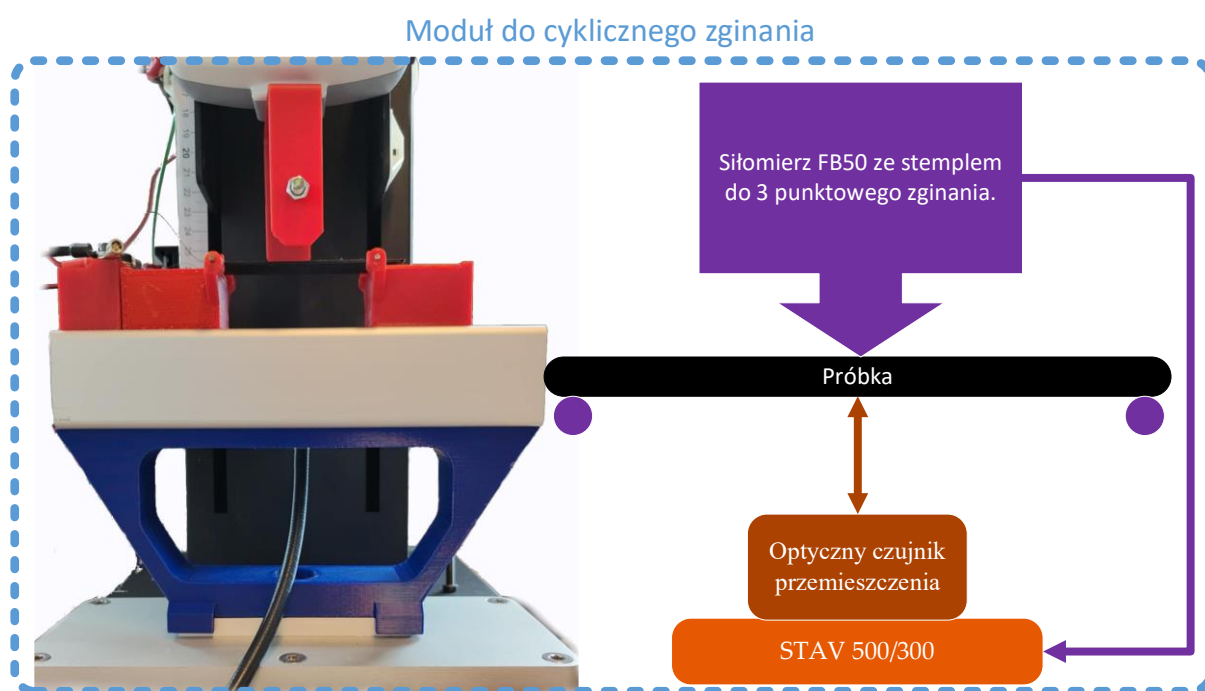
Moduł aktuatora w układzie szeregowym ze sprężyną pozwalał na badanie zmian własności elektrycznych i mechanicznych w trakcie aktywacji drutu ze stopu NiTi. Na rysunku 5.4 przedstawiono schemat modułu wraz z ujęciem pokazującym działanie modułu w praktyce.



Rysunek 5.4. Moduł aktuatora w połączeniu szeregowym ze sprężyną

Moduł ten składa się z: wózka poruszającego się wzdłuż dwóch przewodnic liniowych z wykorzystaniem pary ceramicznych łożysk ślizgowych, uchwytu na sensor optyczny oraz umożliwiającej mocowanie tych elementów podstawy. Wózek stanowił miejsce mocowania próbki badawczej (uchwyt ten jest analogiczny do tego przedstawionego na rysunku 5.3, jedyną różnicą jest to, że stanowi jeden element z wózkiem) oraz miejsce zamocowania powierzchni refleksyjnej dla sensora optycznego. Elementem ograniczającym ruch układu była sprężyna zamocowana między wózkiem a podstawą o współczynniku sprężystości 0,3 N/mm (wartość ta została wyznaczona doświadczalnie poprzez badania bezpośrednio na stanowisku). Do przewodnic liniowych przymocowany został również uchwyt na sensor optyczny w taki sposób, aby głowica sensora znajdowała się w odległości 10 mm od powierzchni refleksyjnej (w zakresie pomiarowym sensora). Wózek, podstawa oraz uchwyt wykonano metodą druku 3D, natomiast łożyska, przewodnice i sprężyna zakupiono. Analogicznie jak dla poprzedniego modułu, powierzchnię refleksyjną stanowiła płytka z anodowanego aluminium.

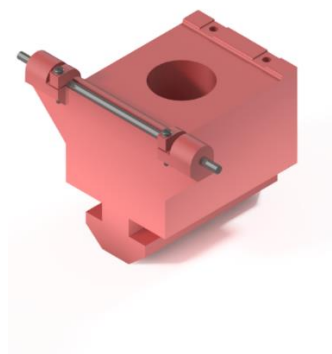
Moduł do cyklicznego zginania pozwalał na badanie próbek kompozytowych o osnowie z PLA wzmocniony drutem ze stopu NiTi. Na rysunku 5.5 przedstawiono schemat modułu wraz z ujęciem pokazującym działanie modułu w praktyce.



Rysunek 5.5. Moduł do cyklicznego zginania

Moduł składał się ze: stempla, uchwytów (pod próbkę i przewody), profilu aluminiowego pozwalającego na łatwe mocowanie elementów oraz podstawy. Uchwyty do trójpunktowego

zginania wykonano zgodnie z normą ISO dotyczącą oznaczania właściwości przy zginaniu dla tworzyw sztucznych [159]. Dla wybranych gabarytów próbki stempel ma średnicę 5 mm, natomiast podpory 2 mm. Aby zagwarantować odpowiednie warunki tarcia, zarówno stempel jaki i podpory zostały wykonane ze stali nierdzewnej. Stempel nagwintowano z obu stron gwintem metrycznym o średnicy 5 mm, aby możliwe było późniejsze przymocowanie go do uchwytu z wykorzystaniem nakrętek. Wałki 2 mm służące jako podpory zamocowano na wcisk do odpowiednio zaprojektowanych otworów. Na uchwytach pod podpory przygotowano też zaciski. Ich wykorzystanie umożliwiło zablokowanie wałów. Model uchwytu na podpory wraz z zamontowanym na nim wałkiem przedstawiono na rysunku 5.6.



Rysunek 5.6. Wizualizacja podpory do trójpunktowego zginania w rzucie izometrycznym

Wykorzystany profil aluminiowy o wymiarach 40x40mm z rowkiem 8mm pozwalał na wygodne mocowanie kolejnych uchwytów, a także na swobodne przesuwanie ich zależnie od potrzeb. Całość ze statywem połączono podstawą. Stosując druk 3D, wykonano wszystkie uchwyty oraz podstawę natomiast pozostałe części zakupiono z zewnątrz.

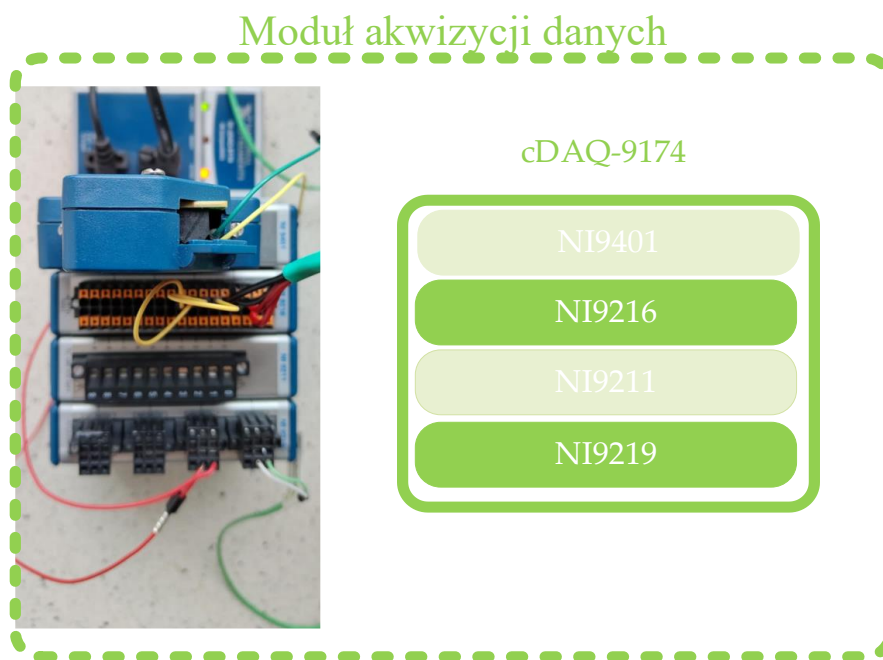
5.2 Moduły akwizycji danych i sterowania

Kluczowymi modułami wchodzącymi w skład stanowiska badawczego są układy akwizycji danych i sterowania. Wszystkie prace badawcze, przynajmniej w części, musiały korzystać z tych modułów, gdyż bez rejestracji danych i sterowania stanowiskiem nie byłoby możliwe zrealizowanie żadnych celów niniejszej pracy.

5.2.1 Moduł akwizycji danych

W ramach eksperymentów doświadczalnych omawianych w niniejszej pracy konieczne było zsynchronizowanie w czasie pomiarów kilku różnych wielkości (rezystancji elektrycznej, napięcia, natężenia prądu, temperatury, przemieszczenia). W tego typu zadaniach najczęściej stosuje się system akwizycji, danych rejestrując dane z kilku kart pomiarowych jednocześnie.

Do realizacji niniejszej pracy wybrano system Compact DAQ cDAQ-9174 (National Instruments CORP, North Mopac Expressway, Teksas, USA). Jest to system pozwalający na synchronizowanie pracy czterech kart pomiarowych. Ponadto umożliwia proste skomunikowanie kart z komputerem PC poprzez przewód USB. Schemat modułu wraz z ujęciem rzeczywistej karty pomiarowej przestawiono na rysunku 5.7.



Rysunek 5.7. Moduł akwizycji danych

Dzięki wykorzystaniu tego systemu możliwe jest łatwe dodawanie kolejnych kart pomiarowych tak, aby dostosować układ do wymagań konkretnego zagadnienia. Ponadto wszystkie urządzenia pomiarowe National Instruments są kompatybilne z opracowanym przez tę firmę graficznym językiem programowania LabVIEW. Dzięki temu możliwe jest zaprogramowanie protokołu rejestracji, wykorzystując gotowe biblioteki. Jednocześnie zastosowanie tego rozwiązania definiuje język programowania, jaki powinien zostać wykorzystany do implementacji algorytmu sterowania ze względu na fakt, iż dla powszechnie stosowanych języków system ten nie jest domyślny i wymaga stosowania API. Wybrane parametry techniczne omawianego systemu przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Wybrane parametry techniczne systemu akwizycji danych CompactDAQ cDAQ-9174

Parametr	Opis/Wartość
Typ obudowy	4-slotowa obudowa CompactDAQ dla modułów I/O
Interfejs komunikacyjny	USB 2.0
Liczba slotów	4 sloty na moduły serii C
Synchronizacja czasowa	Synchronizacyjna obsługa modułów
Częstotliwość próbkowania	1,6 MS/s (łącznie dla wszystkich modułów)
Zasilanie	Zasilanie z zewnętrznego źródła (9–30 V DC)
Sterowniki i oprogramowanie	Współpraca z LabVIEW, NI-DAQmx,

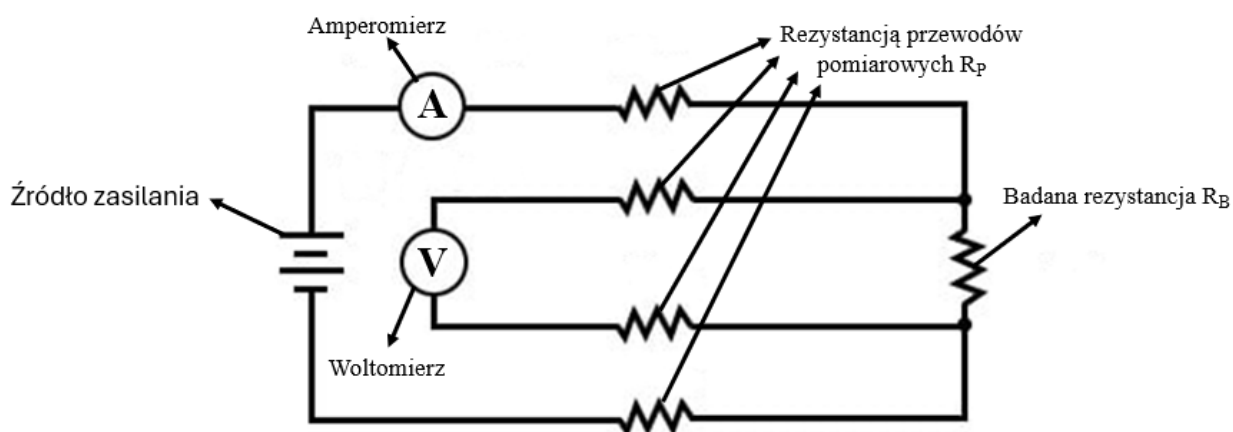
Ponieważ zapis wartości sił w trakcie eksperymentów realizowany był poprzez siłomierz skomunikowany ze statywem, pomiar tej wielkości nie mógł być zsynchronizowany z pozostałymi pomiarami poprzez system akwizycji danych. W tym konkretnym przypadku dane zostały zsynchronizowane na poziomie programu sterowania.

Podczas badań pomiarowych wykorzystano dwie karty kompatybilne z systemem CompactDAQ: NI9216 oraz NI9219(National Instruments CORP, North Mopac Expressway, Teksas, USA). Na zdjęciu 6.6 przedstawiającym system akwizycji danych; widać dwie dodatkowe karty, nie są one jednak używane w mniejszych badaniach stanowią jedynie przestarzeń do dalszego rozwoju stanowiska.

System akwizycji danych cDAQ-9174 umożliwia pomiar sygnału z czujników, takich jak tensometry, rezystancyjne czujniki temperatury (RTD), termopary, a także pozwala wykonywać pomiary prądu w ćwierćmostku, półmostku i pełnym mostku, z wbudowanym wzbudzeniem napięciowym i prądowym. Każdy kanał jest indywidualnie sterowany, dzięki czemu możliwe jest wykonanie innego typu pomiaru na każdym kanale. Karta ta umożliwia rejestrację danych z prędkością 100 tys. S/s dla każdego kanału jednocześnie. W ramach niniejszej pracy najczęściej wykorzystywane były dwa kanały. Na pierwszym kanale przeprowadzono rejestrację temperatury z pomocą odpowiednio skonfigurowanej termopary TTE426 (Klasa 1, temperatura -40 do 400 °C). Natomiast drugi kanał wykorzystano do pomiarów przemieszczenia poprzez analogowy optyczny miernik RC171 zwracający napięcie w wartości proporcjonalnej do odległości od emitera.

Karta pomiarowa NI9216 umożliwia trzy i czteroprzewodowy pomiarami rezystancji elektrycznej. Potrafi również automatycznie wykryć metodę pomiarową (trzy lub czteroprzewodową) na podstawie podłączenia do kanału i konfiguruje każdy kanał dla odpowiedniego trybu. Moduł zapewnia odpowiednie do metody wzbudzenie prądowe każdego kanału. NI-9216 posiada funkcję kalibracji i podwójną barierę izolacyjną między kanałem a uziemieniem, zapewniającą bezpieczeństwo, odporność na zakłócenia i wysoki zakres dopuszczalnego napięcia. NI9216 ma możliwość pracy przy wysokiej częstotliwości próbkowania aż do 400 tys. S/s dla każdego kanału.

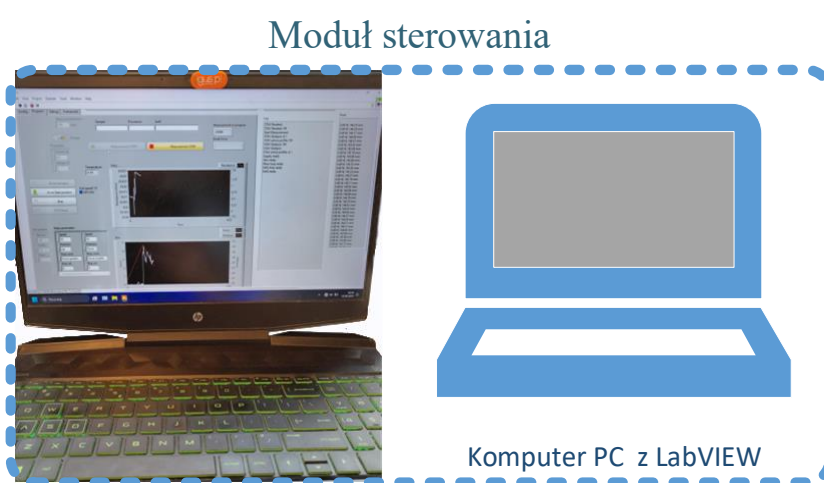
W ramach prowadzonych badań wykorzystywana była czteroprzewodowa metoda pomiaru rezystancji elektrycznej ze względu na jej wysoką dokładność i fakt iż jest to metoda przeznaczona do pomiarów małych rezystancji. Ten sposób pomiaru rezystancji jest określany także mianem metody Kelvina. Do wykonania pomiarów za pomocą techniki czteroprzewodowej wykorzystuje się oddzielne źródła prądu i miernik napięcia. W tej konfiguracji prąd testowy przepływa przez rezystancję testową za pomocą jednego zestawu przewodów pomiarowych, podczas gdy napięcie na testowanym elemencie jest mierzone za pomocą drugiego zestawu przewodów. Prąd jest taki sam wzdłuż całej ścieżki, nawet jeśli występują pewne spadki napięcia spowodowane rezystancją przewodów i styków. Mimo że przez parę przewodów prowadzonych do miernika napięcia może przepływać niewielki prąd, jego wartość jest pomijalnie mała (poniżej μA), co wynika z faktu, że impedancja miernika napięcia jest bardzo wysoka. W związku z tym rezystancje przewodów i styków nie powodują spadku napięcia w przewodach pomiarowych. Spadek napięcia mierzony przez miernik napięcia jest zatem zasadniczo taki sam jak napięcie na rezystancji testowej. Dzięki temu wartość rezystancji można wyznaczyć znacznie dokładniej niż standardową metodą dwuprzewodową. Schemat elektryczny czteroprzewodowej metody pomiaru rezystancji elektrycznej przedstawiono na rysunku 5.8.



Rysunek 5.8. Schemat elektryczny cztero-przewodowej metody pomiaru rezystancji elektrycznej

5.2.2 Moduł sterowania

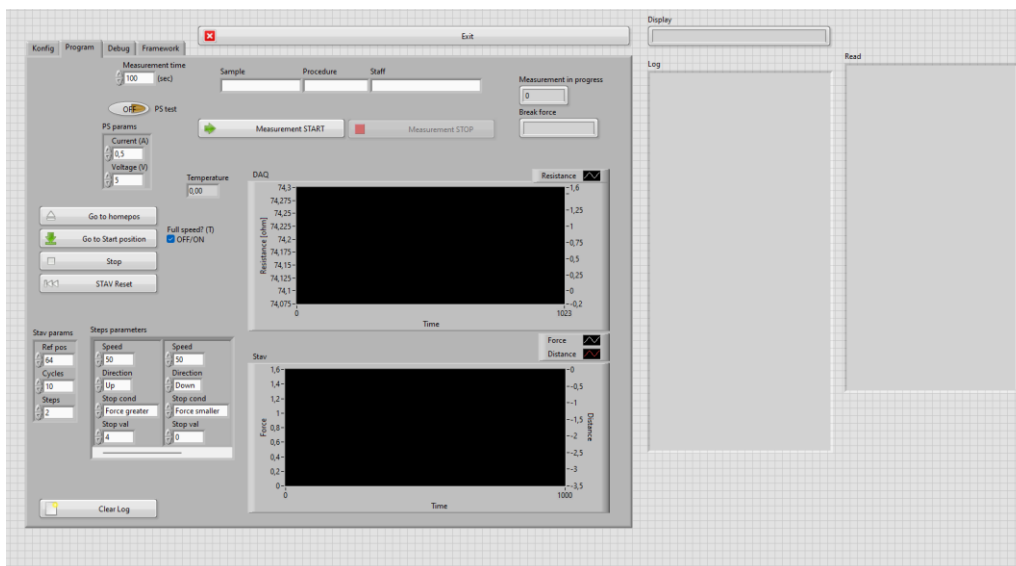
Dla tego modułu hardware sprowadza się do dowolnego komputera osobistego z odpowiednio przygotowanym oprogramowaniem. Opis tego modułu dotyczy więc głównie oprogramowania. Ikonę modułu wykorzystywaną w schematach przedstawiono na rysunku 5.9.



Rysunek 5.9. Moduł sterowania

Autorskie stanowisko zostało wyposażone w autorskie oprogramowanie opracowane w środowisku LabVIEW. Oprogramowanie to musiało umożliwić w czasie rzeczywistym zarówno rejestrację danych pomiarowych z różnych urządzeń peryferyjnych (takich jak system akwizycji danych cDAQ-9174, czujnik optyczny Philtec RC171, statyw STAV500/300), jak i sterowanie stanowiskiem, kierując ruchem roboczym. Opracowane oprogramowanie musiało też umożliwić ustalenie zmiennych warunków pracy przy różnych eksperymentach prowadzonych w ramach omawianej pracy. Zostało to osiągnięte poprzez wykorzystanie

wewnętrznych algorytmów automatycznej pracy statywu regulowanych z poziomu oprogramowania. Kolejnym, bardzo istotnym, elementem było też graficzne przedstawienie wyników pomiarowych w formie interfejsu użytkownika (GUI). Rysunek 5.10 przedstawia główną kartę opracowanego GUI.



Rysunek 5.10. GUI oprogramowania sterującego opracowanym stanowiskiem

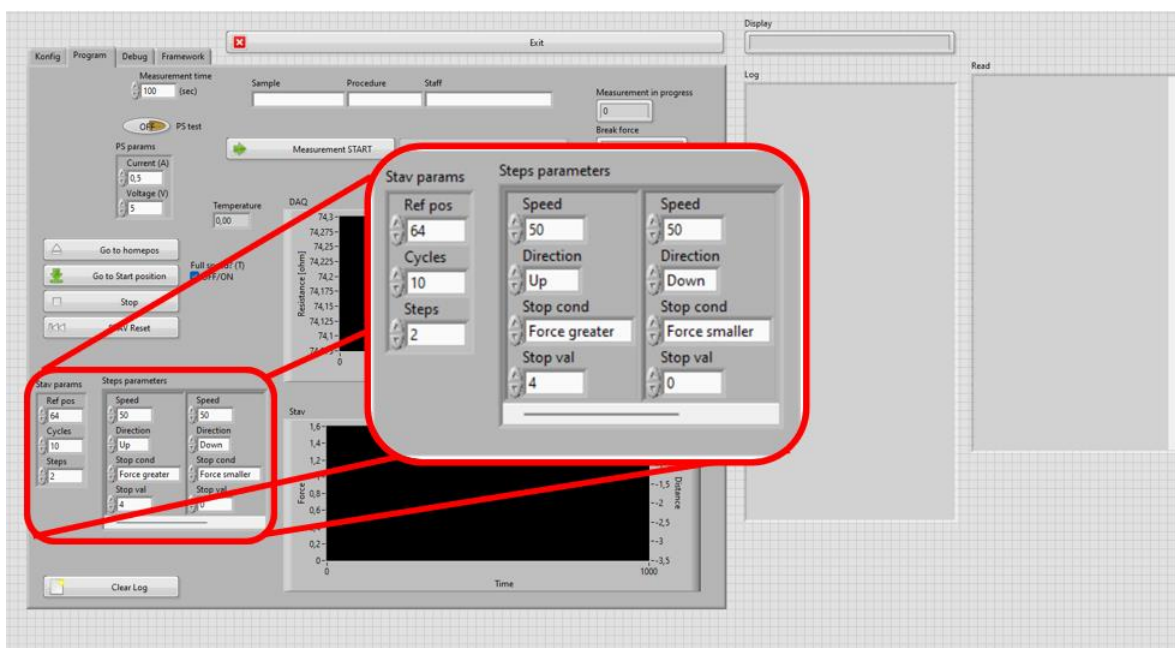
Oprogramowanie opracowano zgodnie z szablonem Queued Message Handler, stanowiącym wersję wzorca projektowego Producent/Konsument. Szablon ten pozwala na równoległe uruchamianie różnych sekcji kodu oraz przekazywanie informacji pomiędzy nimi w uporządkowany sposób, co czyni go idealnym do realizacji zadań badawczych łączących konieczność odczytu danych z wielu różnych peryferyjnych urządzeń.

Ostateczne oprogramowanie zostało podzielone na siedem sekcji kodu, w tym pętlę główną stanowiącą rdzeń oprogramowania, regulującą pracę pozostałych pętli oraz inicjującą rozpoczęcie jak i zatrzymanie pomiarów, pętlę zdarzeń obsługującą zapytania pochodzące z interfejsu użytkownika, obsługującą naciśnięcie poszczególnych przycisków jak rozpoczęcie pomiaru, zatrzymanie pomiaru, dojazd do pozycji początkowej itp.. Do zadań pozostałych pętli (pętla statywu, zasilacza DC, pętla dla obu wykorzystanych kart pomiarowych) należała obsługa modułów pomocniczych oraz prowadzenie rejestracji danych pomiarowych z poszczególnych urządzeń. Ostatnią część oprogramowania stanowiła pętla odpowiedzialna za prezentację wyników pomiarowych [160].

Na potrzeby opracowanego algorytmu sterowania stanowiskiem badawczym do komunikacji ze wszystkimi urządzeniami peryferyjnymi wykorzystano jeden protokół komunikacji UART.

Ze względu na fakt, iż założenia wobec prędkości komunikacji nie były bardzo wysokie nie było konieczności wykorzystania protokołów komunikacji full-duplex jak Serial Peripheral Interface, a wystarczające było wykorzystanie protokołu half-duplex jak UART. W algorytmie sterowania wykorzystano właśnie protokół UART przede wszystkim ze względu na dużą uniwersalność oraz prostą implementację. LabVIEW, w ramach podstawowych bibliotek, oferuje odpowiednie obiekty umożliwiające łatwą obsługę tej komunikacji na poziomie oprogramowania. Dodatkowo całość komunikacji mogła być realizowana za pomocą przewodów i portów USB.

Kluczowym urządzeniem w większości badań odpowiadającym za ruch roboczy (zadawanie obciążania badanym próbką), a także ruchy pomocnicze, był statyw STAV 500/300. Większość ruchów pomocniczych, mających na celu m.in. ustawienie układu w pozycji początkowej, wstępne obciążenie próbki lub inne operacje przygotowawcze, była realizowana poprzez wysłanie komendy nakazującej przejazd statywu do określonej pozycji. Żądania te wysyłane były z poziomu interfejsu użytkownika. Jednak aby zwiększyć dokładność pomiarów i uniknąć nieprzewidzianego zachowania, urządzenia ruchy robocze były realizowane na podstawie wewnętrznego oprogramowania statywu. STAV 500/300 pozwalał na zaprogramowanie profili stanowiących procedurę pomiarową polegającą na wykonaniu określonych czynności z dostępnej puli (takich jak dojazd na pozycję względem referencyjnej wartości stanowiącej początek procedury, zatrzymanie się po przejechaniu określonego dystansu oraz zatrzymanie się po przekroczeniu określonej siły na siłomierzu). W pojedynczym profilu możliwe jest połączenie różnych czynności, tworząc dostosowaną do konkretnego zagadnienia procedurę pomiarową. Opracowany program pozwalał na wymuszenie startu procedury oraz przygotowanie jej z poziomu GUI. Obszar aplikacji odpowiedzialny za konfigurację profili przedstawiono na rysunku 5.11.



Rysunek 5.11. Widget GUI umożliwiający konfigurację poszczególnych profili

Ponieważ zjawiska badane z wykorzystaniem autorskiego stanowiska pomiarowego nie są szybkozmienne, wymogi wobec częstotliwości próbkowania nie są wysokie. Stanowisko zostało jednak wyposażone w podzespoły, jak karta pomiarowa National Instruments (patrz pod rozdział 5.2.1), pozwalająca na akwizycje danych pomiarowych z częstotliwością rzędu setek kHz. Maksymalna częstotliwość próbkowania stanowiska jest jednak ograniczona przez, statyw który w konfiguracji z siłomierzem pozwala na zapis wartości siły z częstotliwością do 10 Hz.

W trakcie prowadzenia pomiarów rejestrowano dane pochodzące z różnych źródeł i z różnych urządzeń peryferyjnych. W związku z tym zagadnienie synchronizacji tych danych stanowiło kluczowy aspekt opracowanego oprogramowania. Potencjalne korelacje pomiędzy różnymi wielkościami stanowiły przedmiot badania i bez ich zsynchronizowania w czasie nie byłoby możliwości aby prawidłowo przeanalizować wyniki. Dlatego też opracowano procedurę, w której ramach każdej zarejestrowanej wartości przypisywano konkretny czas. Dane były zapisywane w pliku; tmds, jest to format proponowany do zapisu danych z komunikacji szeregowej przez firmę National Instruments. W momencie zapisu do pliku (realizowanego na bieżąco w trakcie pomiarów) sprawdzano różnicę pomiędzy czasami odczytu poszczególnych próbek i jeśli różnica ta przekraczała założoną wartość (100ms), dane z takich próbek nie były zapisywane.

5.3 Moduł roboczy

Kolejnym modulem wykorzystanym w większości badań prowadzonych w ramach niniejszej pracy był moduł roboczy. Moduł ten sprowadza się przede wszystkim do statywu STAV 500/300 (AXIS Sp. z o.o., Gdansk, Poland). Ujęcie statywu wraz z oznaczeniem na schematach przedstawiono na rysunku 5.12.



Rysunek 5.12. Moduł roboczy

Ponieważ badane próbki cechują się niewielkimi polami powierzchni przekrojów poprzecznych (badane są druty ze stopów NiTi poniżej $375\mu\text{m}$), zastosowanie standardowej maszyny wytrzymałościowej było niezasadne. Do przeprowadzenia eksperymentów w pełni wystarczyło zastosowanie automatycznego statywu. Ponadto ze względu na niewielką długość próbek (poniżej 200 mm) nie była wymagana duża przestrzeń robocza. Moduł do realizacji ruchu roboczego wykorzystuje silniki krokowe oraz napęd śrubowo toczny z rozdzielczością posuwu 0,01 mm. Ponadto urządzenie posiada interfejs użytkownika wyświetlany na ekranie ciekłokrystalicznym i wyposażone jest w cztery automatyczne tryby pracy umożliwiające przeprowadzenie konkretnych zadań badawczych. Najistotniejszą funkcją ze względu na automatyczną pracę jest dostępność interfejsów komunikacji UART oraz RS232. W szczególności interfejs UART pozwala na łatwe podpięcie urządzenia do komputera PC za pośrednictwem przewodu USB. Ze względu na fakt, iż jest to interfejs używany w aparaturze badawczej oraz przemysłowej jest łatwy do oprogramowania w ramach dowolnego środowiska. Sam statyw jest kompatybilny z siłomierzem, pod którego mocowanie przygotowane są otwory w obudowie. Dodatkowo możliwe jest skomunikowanie siłomierza ze statywem za pomocą

drugiego dostępnego interfejsu RS232. Końcowo zmontowany układ cechuje jednak niska częstotliwość próbkowania wynosząca do 10 Hz.

Za pomocą interfejsu UART możliwe jest też przesłanie zdefiniowanych komend pozwalających na zdalne sterowanie urządzeniem z poziomu komputera PC. Producent przewidział zakres poleceń od prostych; nakazujących przemieszczenie do określonej pozycji, po komendy nastawiające konkretne parametry (jak prędkość ruchu, jednostki w jakich zapisywane są dane itp.), kończąc na komendach umożliwiających zdefiniowanie i uruchomienie automatycznych trybów pracy. Kluczowe parametry maszyny przedstawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Dane techniczne STAV 500/300 [161]

Parametr	STAV500/300
Maksymalna badana siła	Zależnie od siłomierza 50N lub 500N
Przestrzeń robocza	300mm
Maksymalna prędkość posuwu	300mm/min
Maksymalne odchylenie kolumny przy obciążeniu	1,3mm
Rozdzielczość posuwu	0,01mm
Temperatura pracy	-10°C ~ +40°C
Interfejsy komunikacji	RS232C, USB, moduł bezprzewodowy

5.4 Moduły pomocnicze

Pozostałe moduły składały się z pojedynczych urządzeń peryferyjnych, których integracja z układem sprowadzała się do dodania odpowiednich przewodów lub uchwytów oraz przygotowania pętli do obsługi komunikacji pomiędzy modulem a oprogramowaniem. Moduły te mogą być swobodnie odłączone od układu lub dołączane wedle wymagań danego zadania. Na rysunku 5.13 przedstawiono schemat wszystkich wykorzystanych w ramach pracy modułów pomocniczych.



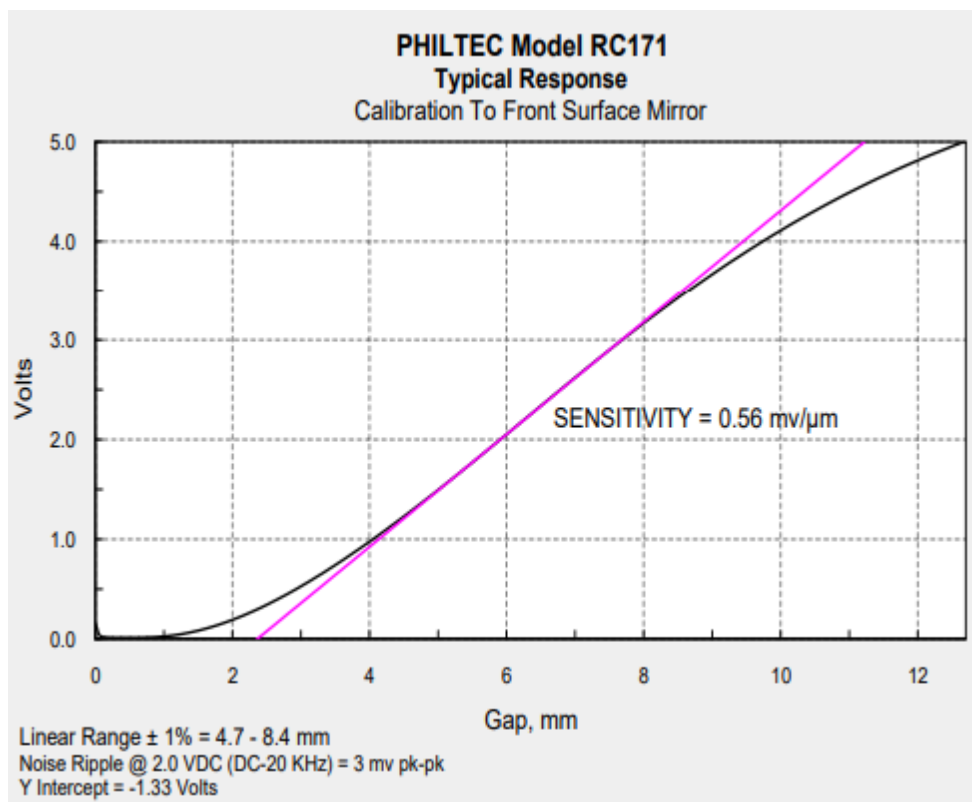
Rysunek 5.13. Moduły pomocnicze

Do rejestracji siły w trakcie pomiarów wykorzystywano siłomierze FC200 oraz FB50 (AXIS Sp. z o.o., Gdansk, Poland). Siłomierze były wykorzystywane zamiennie w zależności od potrzeb. FC200 posiada większy zakres pomiarowy do 500 N oraz wyższą częstotliwość próbkowania 1000 S/s. Natomiast siłomierz FB50 cechuje zakres pomiarowy do 50N oraz częstotliwość próbkowania 40 S/s. Siłomierz FB50 ma mniejszą działkę odczytu, która dla FB50 to 0,01N, natomiast dla FC200 to 0,1N. Integracja tych modułów z układem była najprostsza ze wszystkich pozostałych modułów i sprowadza się do połączenia go przez interfejs RS232 ze statywem, który przesyła dane o zarejestrowanej sile do układu sterowania.

Do aktywacji próbek ze stopów NiTi wykorzystano zasilacz DC RS PRO RS-D3305P(RS Components Ltd., P.O. Box 5762, Corby, Northamptonshire). Zasilacz ten posiada trzy wyjścia: dwa umożliwiające pracę na max 30V przy max 5A oraz wyjście do zasilania drobnej elektroniki z wybieralnym napięciem 3,3V lub 5V. Dokładność nastaw napięcia to 10mV, a prądu 1mA. Wartości te zdecydowanie pozwalają na precyzyjne grzanie próbki, minimalizując możliwość jej zniszczenia. Głównym powodem dobrania tego zasilacza był jednak interfejs UART, pozwalający na łatwą integrację z modułem sterowania. Integracja urządzenia z układem wymagała dodania pętli obsługującej komunikację między modułem aktywacji a modułem sterowania. Moduł ten w niektórych układach połączony był z rezystorem bocznikującym który pozwalał na wyznaczenie prądu płynącego do aktuatora podczas aktywacji.

Pomiary termowizyjne realizowane były z wykorzystaniem kamery termowizyjnej przeznaczonej do pomiarów temperatury pracy niewielkich układów elektronicznych i płytek PCB FlirA325 (Teledyne FLIR LLC 27700 SW Parkway Avenue, Wilsonville, OR, USA). Zastosowanie takiej właśnie kamery termowizyjnej wraz z odpowiednim zbliżeniem optycznym Close-up x4 lens (Teledyne FLIR LLC 27700 SW Parkway Avenue, Wilsonville, OR, USA) było konieczne ze względu na bardzo niewielkie średnice badanych próbek (najmniejsze 100 μm). W konfiguracji z dodatkowym obiektywem kamera pozwalała uzyskać gęstość pikseli na poziomie 25 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ oraz pomiar temperatury w zakresie od 0 do 350°C. Integracja kamery z układem sprowadzała się do wyzwolenia nagrania w momencie rozpoczęcia pomiarów.

Aby uniezależnić pomiary przemieszczenia od danych zwróconych z napędu statywu, wykorzystano optyczny czujnik przemieszczenia. Rozwiązanie to zwiększa dokładność pomiarów przemieszczenia, a co za tym idzie dokładność estymacji odkształcenia na jego podstawie. W tym celu został wykorzystany analogowy czujnik optyczny Philtec RC171 (Philtec inc., Annapolis, Maryland, USA.), za pomocą którego można odczytać wartość napięcia proporcjonalną do odległości powierzchni refleksyjnej od głowicy czujnika stanowiącej zarówno emiter jak i odbiornik. Jest to bardzo precyzyjny miernik o czułości na poziomie 0,56 mV/ μm , pozwalający na dokładny pomiar przemieszczenia w zakresie od 2 do 12 mm. Jest to zakres odległości od emitera, dla którego sygnał napięcia na wyjściu czujnika pozostaje w liniowej zależności od odległości badanego obiektu od emitera. Zależność tę przedstawiono na Rysunku 5.14.



Rysunek 5.14. Wartość napięcia na wyjściu miernika w funkcji odległości od emitera [162]

Pozostałe kluczowe parametry miernika Philtec RC171 zostały przedstawione w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Wybrane parametry techniczne optycznego miernika odległości Philtec RC171 [162]

Parametr	Wartość
Źródło światła	Dioda LED, 850 nm
Rozbieżność wiązki światła	25°
Czułość nominalna	0,5 mV/ μ m
Rozdzielczość	460 μ m (DC-200 kHz), 230 μ m (DC-20 kHz), 50 μ m (DC-100 Hz)
Temperatura pracy światłowodu	10 do 107°C

5.5 Elementy wykonywane technikami przyrostowymi

Tworzywem, z którego wykonano drukowane elementy, był polilaktyd (Prusa Research, Praga, Republika Czeska). Komponenty były drukowane przy standardowych temperaturach dyszy (220°C) oraz płyty grzewczej (50°C) z wypełnieniem zależnym od wymagań zastosowania konkretnego detalu. Uchwyty próbek i elementy przenoszące obciążenia drukowano z 100% wypełnieniem, natomiast elementy stanowiące korpus oraz mocowania mierników z 20%. Pozostałe właściwości materiału przedstawiono w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Właściwości mechaniczne PLA [163]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Gęstość	g/cm ³	1,24
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	60
Napężenie po zerwaniu	MPa	53
Wydłużenie po zerwaniu	%	6
Wytrzymałość na zginanie	MPa	83
Moduł Younga	GPa	3,8

5.6 Parametry zastosowanego stopu NiTi

Do grupy SMA zaliczyć można wiele materiałów o bardzo szerokiej gamie właściwości i zastosowań. Jednakże do najczęściej wykorzystywanych w przemyśle oraz cieszącym się największym zainteresowaniem naukowym materiałem z tej grupy są stopy NiTi. W związku z tym ze względu na dobrze opisane i specyficzne właściwości oraz powszechność właśnie ten materiał został wytypowany do wykorzystania w badaniach prowadzonych w ramach niniejszej pracy.

5.6.1 Dane materiałowe uzyskane na podstawie dokumentacji dostarczonej przez producenta

W badaniach wykorzystano stopy z pamięcią kształtu, a konkretnie druty ze stopów NiTi dostarczone przez firmę Dynalloy (DYNALLOY, Inc. 2801 McGaw Ave. Irvine, CA, USA), o nazwie handlowej Flexinol. Stopy NiTi użyte w badaniach były niskotemperaturowe (oznaczenie producenta LT), ich temperatura końca przemiany martenzytyczno-austenitycznej(A_F) wynosi zgodnie z danymi producenta 78°C [42]. Zastosowano stop

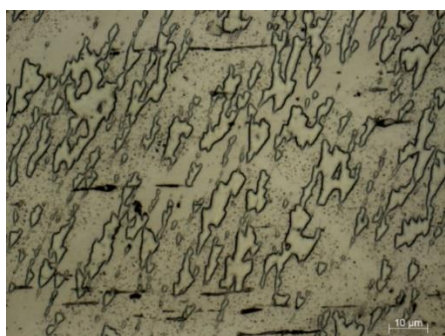
niskotemperaturowy, który poza wartością (A_F) nie różni się właściwościami od stopu wysokotemperaturowego. Jednocześnie, dzięki niższej temperaturze przemiany, charakteryzuje się on większą odpornością na warunki otoczenia. Podstawowe, zależne od fazy, właściwości zastosowanego materiału według informacji producenta przedstawiono w tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Wybrane właściwości drutu NiTi [42]

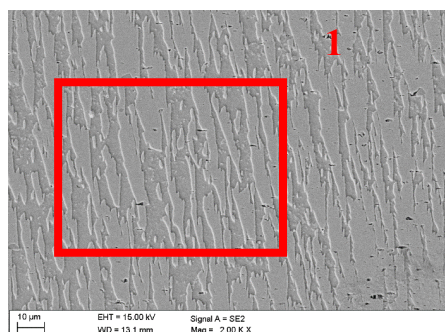
	Gęstość	Moduł Younga	Współczynniki Poissona	Ciepło właściwe	Rezystancja elektryczna
Jednostka	g/cm ³	GPa	-	cal/g*°C	μΩ*cm
Martenzyt	6,45	28	0,33	0,2	80
Austenit	6,45	75	0,33	0,2	100

5.6.2 Badania mikroskopowe wykorzystywanego stopu NiTi

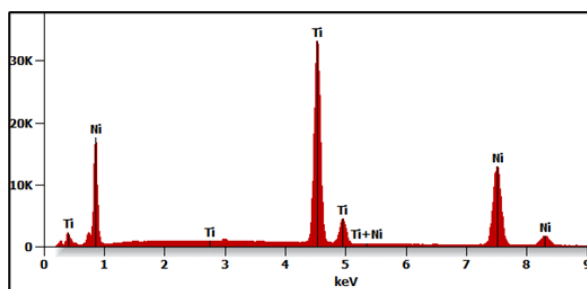
Ze względu na fakt, iż producent nie dostarczył części informacji (np. skład) na temat wykorzystywanego w mniejszej pracy stopu NiTi, konieczne było poddanie drutów ze stopów NiTi badaniom mikroskopowym. Strukturę stopów zbadano, stosując mikroskop optyczny (OM). Natomiast mikrostruktura i skład chemiczny wyznaczono za pomocą mikroskopu sił elektronowych (SEM) o wysokiej rozdzielczości Supra 35 (ZEISS AG, Oberkochen, Niemcy) i detektora rentgenowskiego z dyspersją energii (EDX, EDAX Trident XM4 AMETEK Inc. Berwyn, PA, USA). Analizę fazową przeprowadzono przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego XPert PRO (Panalytical, Almelo, Holandia), analizując uzyskane wyniki z pomocą oprogramowania X'Pert High Score Plus (v. 3.0e). Rysunek 5.15 przedstawia mikrostrukturę badanych stopów z pamięcią kształtu na bazie NiTi wyznaczoną za pomocą OM i SEM. Obserwacje mikroskopowe i mikroanalizy EDAX wykazały, że podstawową fazą jest NiTi. Ponadto można również zaobserwować pewną frakcję cząstek NiTi₂ oraz tlenków. Wyniki analizy dyfrakcyjnej XRD potwierdzają wyniki analizy mikroskopowej. Jak pokazano na rysunku 5.15 e, wzór XRD wskazuje, że badane próbki składają się z dominującej fazy martenzytycznej o strukturze jednoskośnej i związku międzymetalicznego NiTi₂ o strukturze sześcienniej.



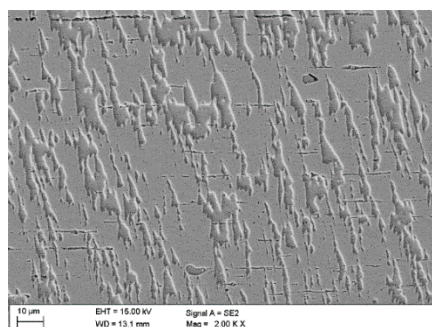
(a)



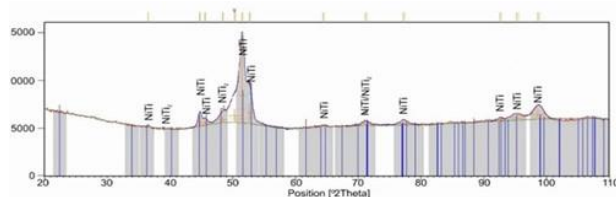
(b)



(c)



(d)



(e)

Rysunek 5.15. Wyniki obserwacji mikroskopowych: (a) OM, (b) SEM, (c) EDS, (d) SEM, (e) wzór dyfrakcyjny XRD

Na podstawie EDX stwierdzono, że szczegółowy skład badanego materiału jest następujący: nikiel (Ni): 55 % mas., 50 at.%; tytan (Ti): 45% mas., 50 at.%. Ponadto na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wykorzystywany materiał cechuje się dużą ilością tlenków oraz frakcji innej fazy. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że nadaje się on do zastosowań przemysłowych.

5.7 Podsumowanie

Opracowane stanowisko badawcze cechowało się dużą uniwersalnością oraz łatwym dostępem do poszczególnych modułów. Ponadto opracowana aparatura badawcza pozwolił na korygowanie pracy stanowiska zgodnie z modyfikacjami metodyki badawczej. Całe

stanowisko badawcze składające się z różnych modułów cechowały konkretne parametry pracy:

- Moduł roboczy:
 - uniwersalność, łatwość rekonfiguracji oraz dostęp do wszystkich części,
 - dużą dokładność pozycjonowania układu napędowego (wykonującego ruch roboczy) oraz powtarzalność osiąganych pozycji (z minimalnym wpływem luzów) zwłaszcza przy wielokrotnych cyklach pomiarowych,
 - przestrzeń robocza 300cm.
- Moduły pomocnicze i akwizycji danych:
 - duża dokładność i powtarzalność pomiarów oraz odpowiednia czułość pozwalająca na zarejestrowanie niewielkich zmian wielkości mierzonych (zmiany rezystancji na poziomie $\mu\Omega$, zmiany siły rzędu 0,1 N),
 - siła zależnie od wykorzystanego siłomierza nie większe niż 50N lub 500N,
 - częstotliwość próbkowania rzędów dziesiątek Hz,
 - dostępny interfejs komunikacji pozwalający na automatyczny odczyt i akwizycję danych pomiarowych.
- Moduł sterowania:
 - powtarzalne osiągnięcie zadanych pozycji.
 - rejestracja danych pomiarowych oraz ich automatyczna segregacja,
 - rejestracja danych w formatach odpowiednich dla arkuszy kalkulacyjnych np. csv, xls, xlsx, xlm itp.,
 - prosty interfejs graficzny umożliwiający modyfikację parametrów stanowiska
 - możliwość ustalania kolejnych kroków bez konieczności ponownego programowania urządzenia,
 - czytelny i odpowiednio podzielony na pod programy kod, łatwy do przerabiania oraz wielokrotnego wykorzystania w różnych zadaniach.

6 Eksperymentalne badania wpływu obciążenia mechanicznego na własności elektryczne stopów NiTi

Rozdział ten grupuje badania, analizujące wpływ obciążenia mechanicznego na własności elektryczne stopów NiTi. W pierwszym podrozdziale opisano badania wpływu cyklicznego obciążenia na nieosłonięte druty, natomiast w drugim przedstawiono analogiczne badanie z wykorzystaniem próbek kompozytowych.

6.1 Badania własności drutów ze stopów NiTi możliwych do potencjalnego wykorzystania w układach sensorycznych

Kluczowym elementem omawianego badania była weryfikacja możliwości wykorzystania stopów NiTi w czujnikach pozwalających na monitorowanie odkształceń w wybranych punktach konstrukcji.

Za wstępną fazę niniejszej koncepcji można uznać pracę naukową wykazującą korelację między cyklami obciążenia drutu ze stopu NiTi a wartością rezystancji elektrycznej tego drutu po każdym kolejnym cyklu [158].

Aby możliwe było opracowanie docelowych układów, konieczne jest potwierdzenie, że zaobserwowany efekt jest widoczny w większej liczbie próbek oraz cechuje się częściową powtarzalnością.

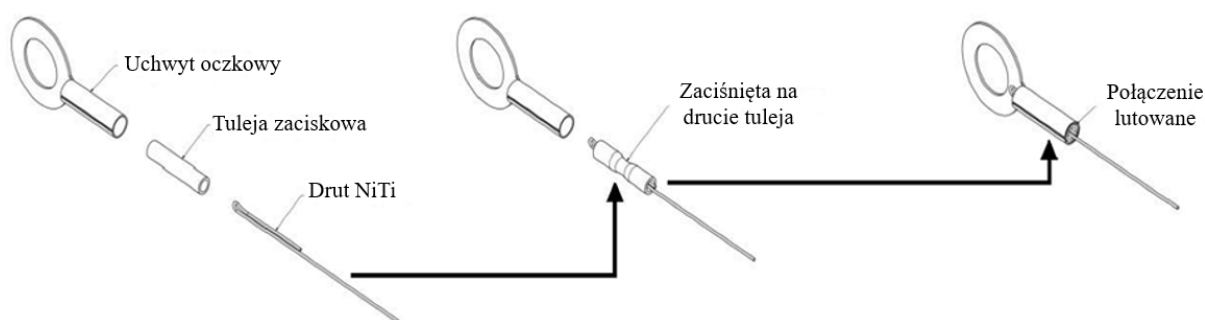
Przeprowadzono badanie 12 próbek wykonanych z drutu o bardzo małej średnicy 100 μm każda. Poza zweryfikowaniem czy zaobserwowany efekt jest powtarzalny w większej populacji próbek, sprawdzono też, czy wiąże się on z konkretnymi warunkami eksperymentu z zastosowaniem różnych rodzajów wymuszania zadanego na próbki. Posłużono się wymuszeniem opartym na cyklicznym odkształceniu próbki ze stałym przemieszczeniem (tak samo jak w pierwotnym badaniu) oraz wymuszeniem ze stałą siłą (stanowiącym inne podejście do zagadnienia). Podstawowym celem, niniejszego badania była próba określenia przyczyn obserwowanego efektu na podstawie literatury oraz wniosków wypływających z doświadczenia, przeprowadzonego przez autora niniejszej rozprawy.

6.1.1 Metodyka

Przygotowanie próbek ze stopów NiTi rozpoczęto od przecięcia drutów nawiniętych na szpulę (w takiej formie były one dostarczone przez producenta) do odpowiedniej długości. Wykorzystano druty o długości 100 mm ze względu na łatwość przygotowania próbek oraz ograniczenia przestrzeni roboczej stanowiska. Podczas badania wykorzystano próbki o

średnicach 100 μm . Zastosowanie tak małych średnic było podyktowane tym, że umożliwiają one precyzyjny pomiar właściwości elektrycznych.

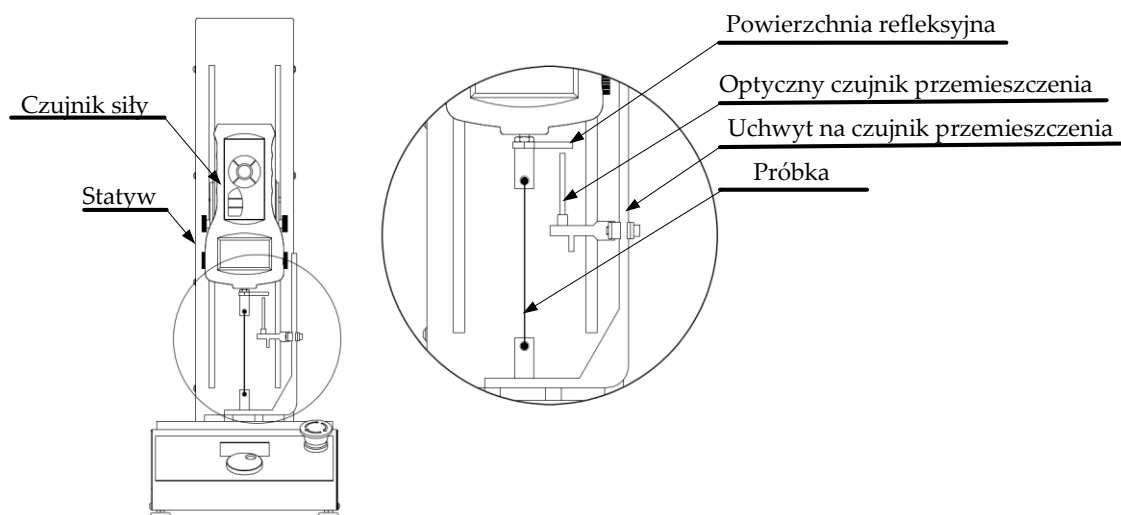
Po przycięciu próbki były nagrzewane do 78°C w celu wywołania SME (powrotu próbki do początkowej struktury). Po „resecie” próbka była mierzona (z wykorzystaniem suwmiarki), przy czym na tym etapie próbki miały długość 110 mm, aby pozostawić naddatek na zamontowanie na zakończeniach kontaktów elektrycznych. Następnie próbka była zginana na obu zakończeniach w odległości 2,5 mm od końca drutu. Na zagiętą część drutu wprowadzano tulejkę, a następnie zaciskano ją odpowiednim narzędziem. Po zaciśnięciu tulejek ponownie „resetowano” drut, sprawdzając, czy robocza część próbki (odległość między końcem jednej tulejki a drugiej) przyjmuje zadaną długość 100 mm. Dopuszczano niedokładność do 0,5 mm. Próbki z większą odchyłką były odrzucane. Do zakończeń tak przygotowanej próbki przylutowano uchwyt oczkowy. Proces przygotowania próbki schematycznie przedstawia rysunek 6.1.



Rysunek 6.1. Schemat przedstawiający proces przygotowania próbki pomiarowej

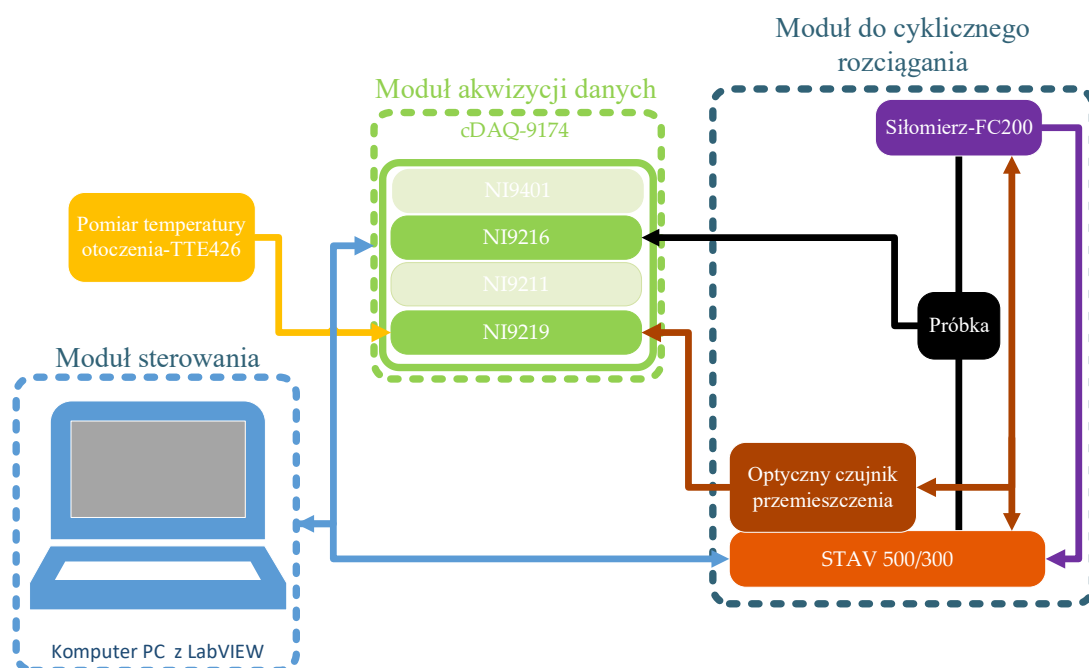
Po zakończeniu całego procesu próbki były ponownie podgrzewane do 78°C w celu wywołania SME i umieszczane pojedynczo w odpowiednich opisanych opakowaniach, gdzie były przechowywane do rozpoczęcia właściwych pomiarów.

Pierwszy koniec próbki badawczej zamontowano w statywie, a drugi koniec do czujnika siły. Całościowy tor pomiarowy pokazano na rysunku 6.2.



Rysunek 6.2. Schemat stanowiska testowego z zaznaczonymi głównymi komponentami

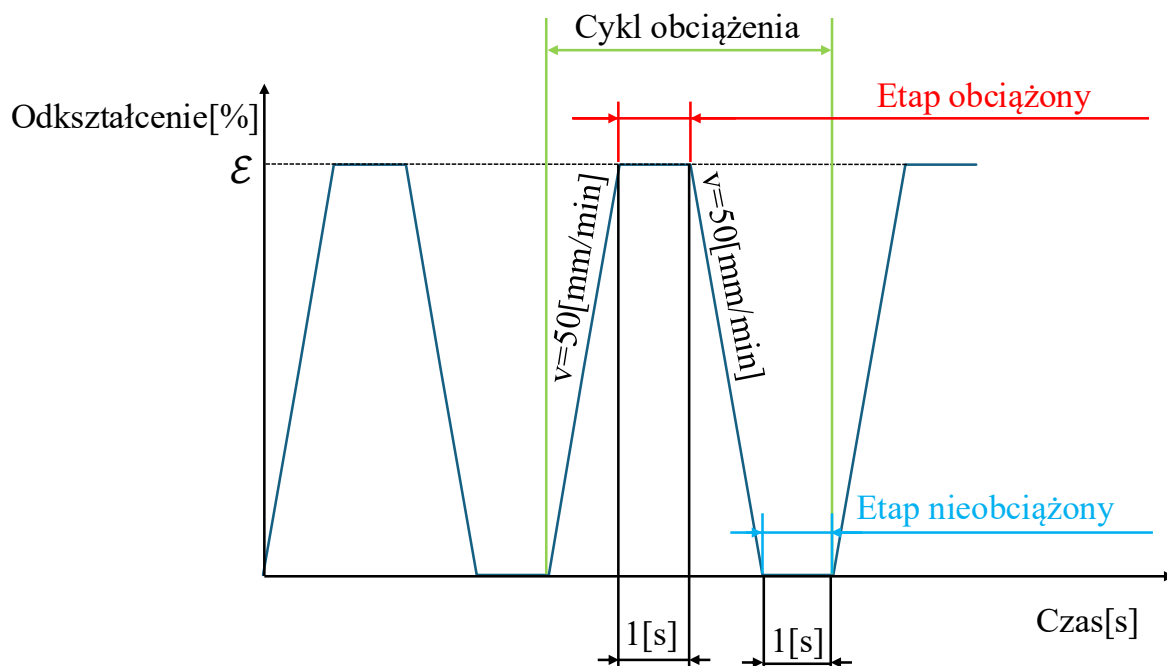
W badaniu wykorzystano STAV 500/300 służący do mocowania próbki i wykonywania ruchu głównego (cyklicznego rozciągania), czujnik siły FC200 umożliwiający pomiar sił, analogowy czujnik optyczny RC171 do pomiaru wydłużenia próbki, termoparę TTE426 do pomiaru temperatury otoczenia. Do akwizycji danych z czujników optycznych i termopary zastosowano kartę NI9219. Karta NI9216 została użyta do czteroprzewodowych pomiarów rezystancji. Tor pomiarowy składał się więc z modułu do cyklicznego rozciągania, modułu akwizycji danych, modułu sterowania oraz modułu pomocniczego do pomiaru wydłużenia próbki. Schemat modułów oraz komunikacji przedstawiono na rysunku 6.3.



Rysunek 6.3. Schemat modułów oraz komunikacji

Próbka była cyklicznie rozciągana podczas eksperymentów, uchwyt przymocowany do statywu pozostawał nieruchomy, a drugi koniec zamontowano do siłomierza poruszającego się pod wpływem ruchu wykonywanego przez statyw.

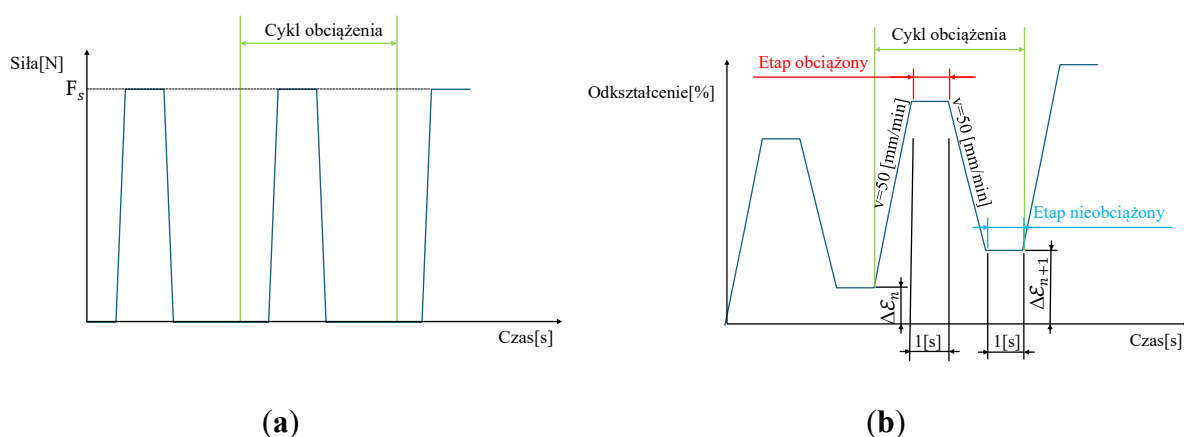
Badania przeprowadzono przy dwóch różnych typach obciążeń. W przypadku pierwszego typu obciążenia przeprowadzono cykliczne rozciąganie, aż do osiągnięcia stałej wartości odkształcenia równej w każdym kolejnym cyklu. Założone odkształcenie każdej próbki (ϵ) wynosiło 0,5% (0,5 mm). Dobrana wartość ϵ wynika z faktu, że przy niewielkim odkształceniu omawiany efekt jest łatwo obserwowalny. Podczas każdego cyklu rozciąganie odbywało się ze stałą prędkością (50 mm/min), aż statyw osiągnął zadaną pozycję. Następnie pozostawał w tej pozycji przez czas 1 s, po czym powracał do pozycji początkowej ponownie ze stałą prędkością (50 mm/min). Wybrano niewielką wartość prędkości odkształcenia ($8,3 \cdot 10^{-3} \cdot s^{-1}$), aby ograniczyć znaczenie dynamicznego zachowania materiału. Takie badania stopów prowadzi się przy prędkości odkształcenia poniżej $10^{-1} \cdot s^{-1}$ [164]. Po osiągnięciu pozycji początkowej nastąpiła przerwa trwająca 1 s. Schemat cyklu ze stałym odkształceniem pokazano na rysunku 6.4.



Rysunek 6.4. Schemat cyklu rozciągania ze stałym odkształceniem

Dodatkowo przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu drugiego rodzaju obciążenia, w którym stałą wartością w każdym kolejnym cyklu była siła przykładana do próbki. W każdym cyklu wartość zadanej siły (F_s) wynosiła 0,3 N (jest to uśredniona

maksymalna wartość siły zarejestrowana w pierwszym cyklu rozciągania próbek ze stałym odkształceniem). Stanowisko do realizacji cyklu wymagało więc sprzężenia zwrotnego nie tylko z napędów, ale także z siłomierza. Ustawiona wartość siły była podobna do sił uzyskanych w pierwszym cyklu podczas rozciągania próbek ze stałym odkształceniem. Analogicznie do pierwszego typu obciążenia, rozciąganie odbywało się ze stałą prędkością (50 mm/min) do momentu zarejestrowania zadanej wartości siły przez czujnik siły. W tej pozycji system pozostawał przez czas 1 s. Następnie rozpoczął powrót ze stałą prędkością (50 mm/min), aż czujnik siły zarejestrował wartość 0N. System pozostał w tej pozycji przez okres 1 s. Schemat cyklu rozciągania ze stałą siłą pokazano na rysunku 6.5.



Rysunek 6.5. Schematyczne przedstawienie cyklu rozciągania ze stałą siłą:

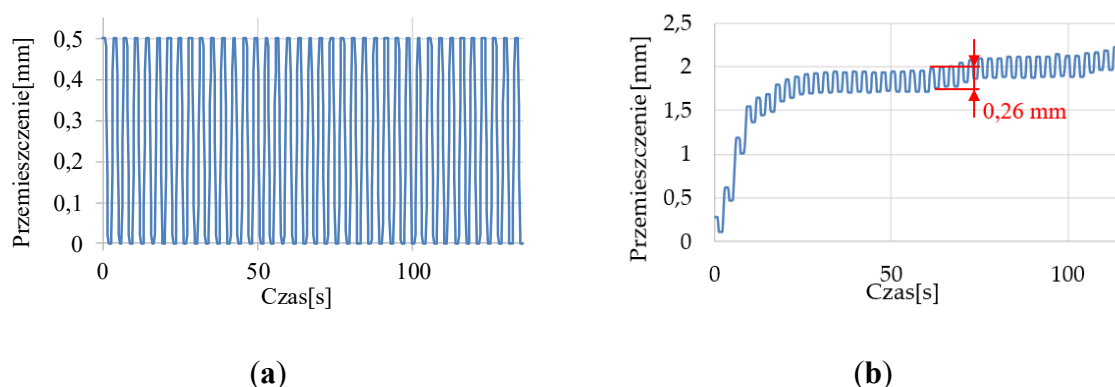
(a) zadany przebieg siły (b) oczekiwany przebieg przemieszczenia

W przypadku obciążenia ze stałą siłą, po każdym kolejnym cyklu, odkształcenie w stosunku do pozycji bazowej ($\Delta\epsilon$) wzrasta, ponieważ statyw kończy rozciąganie po osiągnięciu zadanej siły, co ma miejsce w kolejnych cyklach po osiągnięciu innej wartości odkształcenia. Jest to konsekwencja plateau naprężeń obserwowanego w stopach NiTi.

Zbadano 12 różnych próbek (6 poddawano obciążeniu ze stałym odkształceniem, a kolejne 6 poddano obciążeniu ze stałą siłą). Początkowe rezystancje elektryczne każdej próbki w niewielkim stopniu różniły się od siebie, co spowodowane było niedokładnościami wynikającymi z wykonania próbki czyli nieidealnym cięciem oraz różnicami w kontaktach elektrycznych. Przed rozpoczęciem badań każda próbka została poddana aktywacji (wywołano transformację martenzytyczno-austenityczną). Podczas testów każdą próbkę poddano 40 cyklom rozciągania. Temperatura otoczenia podczas testów oscylowała między 25 a 26°C.

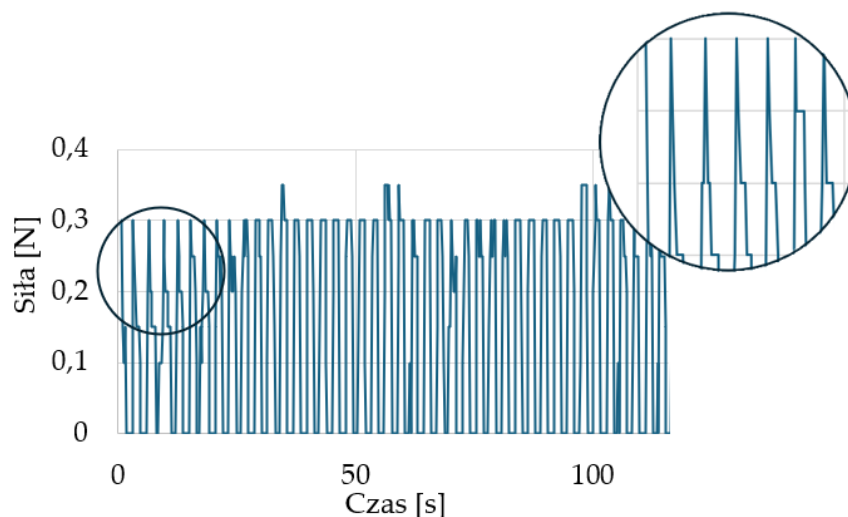
6.1.2 Rezultaty

Podczas badań próbki poddano cyklicznemu rozciąganiu, mierzono rezystancję elektryczną, odkształcenie i siłę. Wydłużenie próbki przy obciążeniu ze stałym przemieszczeniu w nieobciążonej fazie cykli pozostało takie samo po każdym cyklu, natomiast przy obciążeniu o stałej sile wzrosło. Wynika to z plateau naprężeń (obserwowanym przy rozciąganiu stopów NiTi), podczas którego odkształcenie może znacznie wzrosnąć przy minimalnej zmianie naprężenia (patrz podrozdział 3.3). Porównanie przykładowych przebiegów odkształceń dwóch różnych typów obciążeń przedstawiono na rysunku 6.6.



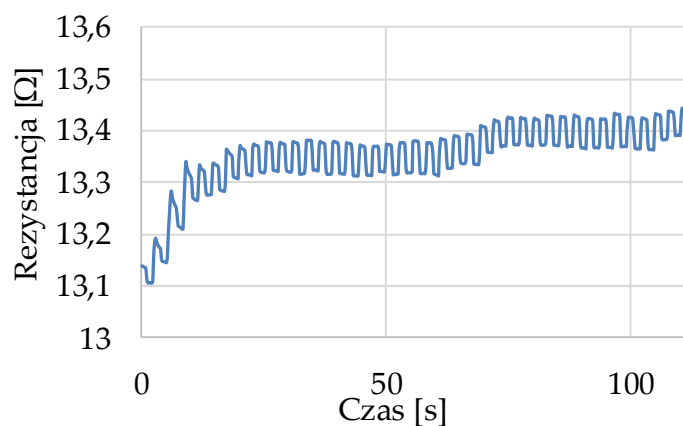
Rysunek 6.6. Przykładowe przebiegi przemieszczenia dla typu obciążenia: (a) ze stałym odkształceniem (b) ze stałą siłą

Wzrost wydłużenia próbki w pierwszych cyklach trybu obciążenia ze stałą siłą był gwałtowny (w pierwszych 6 cyklach średnio 0,23 mm). Warto jednak zauważyć, że zmiana wydłużenia zmniejsza się z każdym kolejnym cyklem (w cyklach od 5 do 40 średnio wynosi 0,012 mm). Obserwowaną zmianę wydłużenia można przypisać transformacji wewnętrznej struktury próbki, w trakcie której następuje znaczący wzrost odkształceń przy minimalnym wzroście naprężeń. Efekt ten jest obserwowany w postaci wahań wartości siły i spadku oporu podczas obciążenia. Spadek ten jest największy w pierwszych cyklach, w których obserwuje się również największą zmianę wartości $\Delta\epsilon$. Przebieg wartości siły rozciągającej podczas pomiarów przedstawiono na rysunku 6.7.



Rysunek 6.7. Przykładowy przebieg siły rozciągającej podczas cyklicznego obciążenia ze stałą siłą

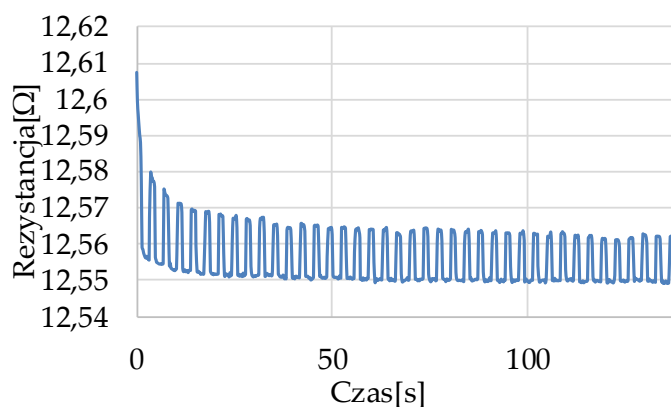
W obu typach obciążenia obserwuje się inne przebiegi rezystancji elektrycznej próbki na cykliczne rozciąganie. W przypadku drutu obciążonego stałą siłą po każdym kolejnym cyklu można zauważyć wzrost rezystancji elektrycznej. Jest to wzrost wartości rzędu $0,05 \Omega$ (w pierwszych cyklach zależnie od próbki około 6 cykli) do $0,01 \Omega$ (w późniejszych cyklach). Wzrost ten następuje w sposób podobny do wzrostu odkształcenia drutu po kolejnych cyklach. Przebieg rezystancji elektrycznej podczas pomiarów przedstawiono na rysunku 6.8.



Rysunek 6.8. Przebieg rezystancji elektrycznej dla typu obciążenia o stałej sile

W przypadku drugiego rodzaju obciążenia o stałym przemieszczeniu obserwuje się inny efekt. Po każdym kolejnym cyklu rozciągania wartość oporu elektrycznego próbki maleje. Spadek ten jest zauważalny w pierwszych cyklach rozciągania, jednakże znacznie spowalnia wraz z kolejnymi cyklami. Wartość spadku oporu elektrycznego przy tego typu obciążeniu jest

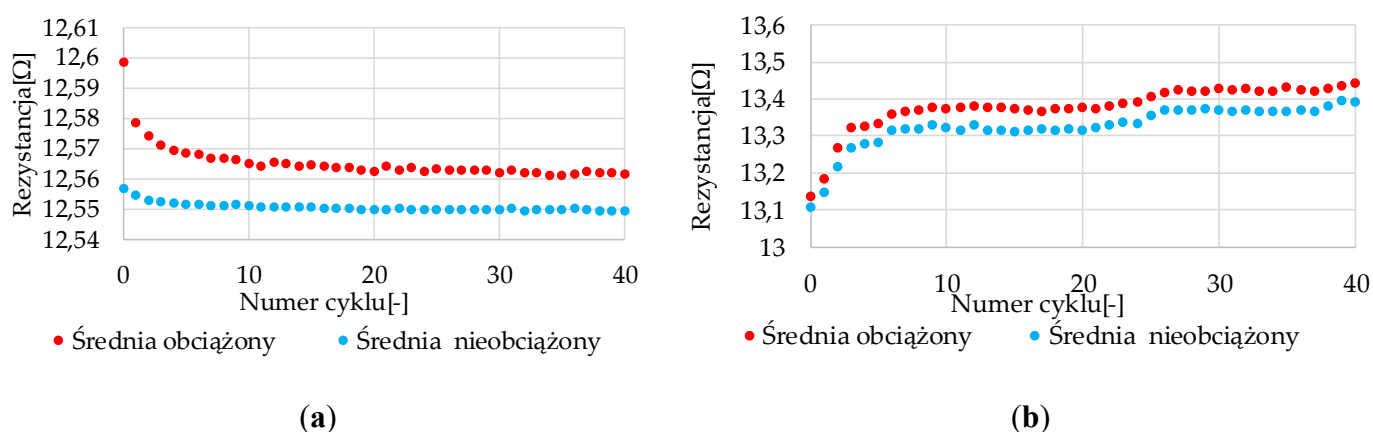
również o rząd wielkości mniejsza niż zmiana oporu przy obciążeniu o stałej sile. Przebieg wartości rezystancji elektrycznej próbki podczas rozciągania w typie obciążenia o stałym przemieszczeniu przedstawiono na rysunku 6.9.



Rysunek 6.9. Przebieg rezystancji elektrycznej dla typu obciążenia o stałym przemieszczeniu

6.1.3 Analiza wyników i dyskusja

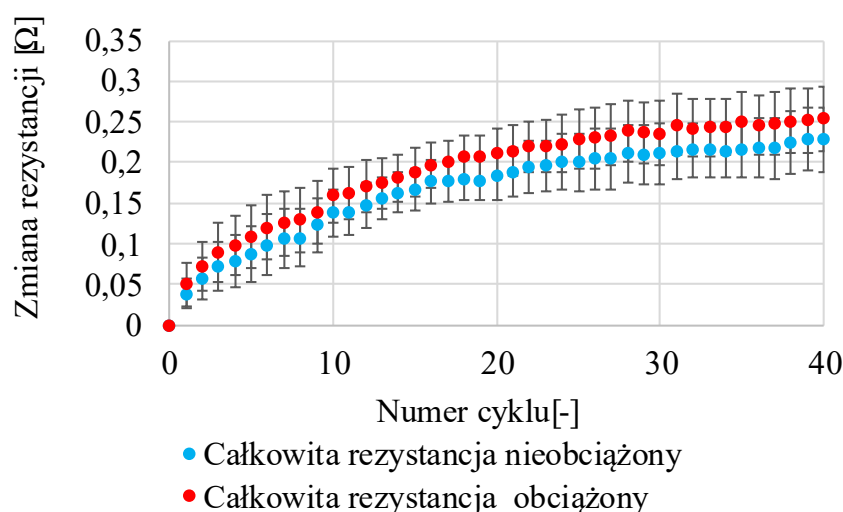
W celu przeprowadzenia szczegółowej analizy wyników każdy cykl został podzielony na dwie fazy (przy obu typach obciążenia): obciążoną i nieobciążoną. W obu fazach (czas trwania 1 s) każdego cyklu określono średnią wartość rezystancji elektrycznej próbek. Porównanie średnich wartości oporu elektrycznego podczas cykli rozciągania przy obu rodzajach obciążenia przedstawiono na rysunku 6.10.



Rysunek 6.10. Przykład średniej wartości rezystancji elektrycznej w zależności od cyklu rozciągania dla typu obciążenia: (a) ze stałym przemieszczeniem (b) ze stałą siłą

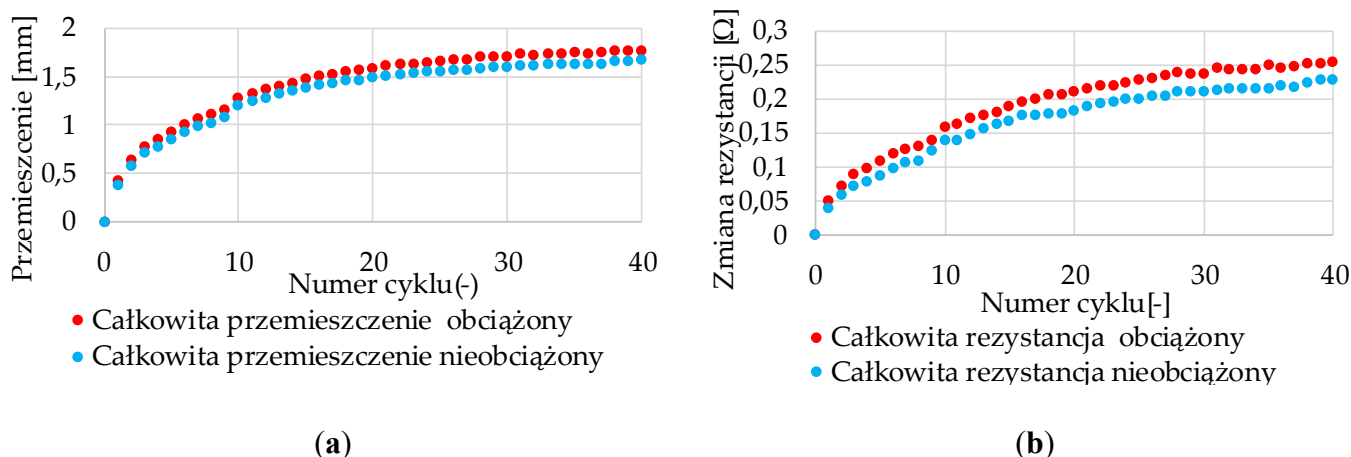
Tendencje te zaobserwowano we wszystkich badanych próbkach. Ze względu na różnicę w początkowej wartości rezystancji elektrycznej pomiędzy próbkami, średnie wartości rezystancji w kolejnych cyklach zostały odniesione do rezystancji przed pierwszym cyklem.

Metoda ta pozwoliła na porównanie wartości zmiany rezystancji podczas cyklicznego rozciągania pomiędzy próbkami przy danym typie obciążenia. W typie obciążenia ze stałą siłą dla wszystkich próbek zaobserwowano wzrost średniej wartości rezystancji elektrycznej w obu fazach cyklu. Zaobserwowano jednak znaczne rozbieżności w wartościach zmiany rezystancji elektrycznej w różnych próbkach po każdym cyklu. Najmniejszą wartość odchylenia standardowego zanotowano w pierwszym cyklu wynoszącą $0,27 \Omega$. Wartość ta w pozostałych cyklach wzrastała aż do $0,47 \Omega$ w ostatnim cyklu. Jest to związane ze znacznym odchyleniem standardowym obserwowanym w średnich wartościach rezystancji elektrycznej we wszystkich próbkach, szczególnie w odniesieniu do liczby cykli rozciągania. Wyznaczona wartość odchylenia standardowego średniej wartości rezystancji przekracza wartość różnicy między obciążonymi i nieobciążonymi etapami cyklu. Średnią wartość zmiany rezystancji we wszystkich badanych próbkach w zależności od liczby cykli rozciągania przedstawiono na rysunku 6.11.



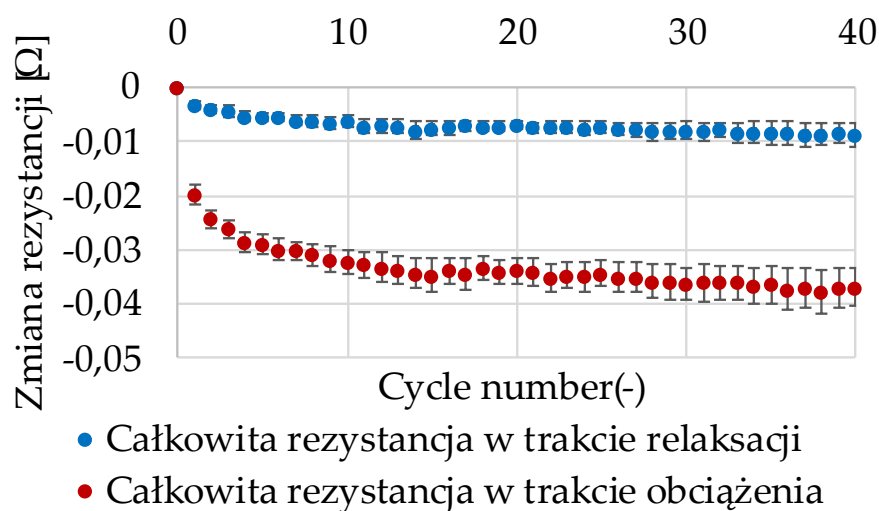
Rysunek 6.11. Średni wpływ cyklicznego rozciągania na opór elektryczny przy stałej sile

W przypadku obciążenia o stałej sile zaobserwowany trend jest obecny zarówno w wartości rezystancji, jak i odkształceniu badanej próbki. Porównanie średnich wyników pokazuje, że w obu mierzonych wartościach obserwuje się analogiczne charakterystyki. Korelacja między rezystancją elektryczną stopu NiTi a jego odkształceniem została wcześniej zaobserwowana w badaniach [165, 166] i jest obserwowalna także w tym badaniu. Występowanie tego zaobserwowanego trendu dla obu zmierzonych wartości jest wyraźniej widoczne, gdy uśrednione wartości są porównywane po każdym kolejnym cyklu. Porównanie powyższych danych przedstawiono na rysunku 6.12.



Rysunek 6.12. Uśredniony wpływ cyklicznego rozciągania przy obciążeniu stałą siłą na wartość: (a) przemieszczenia, (b) zmiany rezystancji elektrycznej próbek

W cyklach ze stałym odkształceniem zaobserwowano natomiast spadek rezystancji elektrycznej po każdym kolejnym cyklu rozciągania. Tendencja ta była obserwowalna we wszystkich próbkach, o czym świadczy uśrednienie spadku wartości rezystancji elektrycznej po każdym kolejnym cyklu. Wyniki uzyskane w typie obciążenia ze stałym przemieszczeniem wykazują znacznie zmniejszony rozrzut wartości, o czym świadczy znacznie mniejsze odchylenie standardowe wartości średniej po każdym cyklu. Minimalne rozproszenie danych obserwuje się w nieobciążonej fazie cyklu dla uśrednionych wyników. Średnią wartość zmiany rezystancji we wszystkich badanych próbkach w odniesieniu do liczby cykli rozciągania przedstawiono na rysunku 6.13.



Rysunek 6.13. Średni wpływ cyklicznego rozciągania na opór elektryczny przy stałym przemieszczeniu

Zaobserwowany efekt spadku rezystancji podczas cyklicznego rozciągania może być tylko w niewielkim stopniu związany z odkształceniem próbki. Wynika to z faktu, że zarówno wydłużenie drutu, jak i zmniejszenie średnicy (w przypadku cienkich drutów ze stopu NiTi jest to nieznaczny spadek) powinno prowadzić do wzrostu rezystancji (jak w przypadku obciążenia o stałej sile). Dlatego spadek rezystancji nie może być związany z odkształceniem próbki. Wydaje się najbardziej prawdopodobne, że zaobserwowany efekt wynika z przemiany wewnętrznej struktury wywołanej odkształceniem próbki.

W obu typach obciążenia efekt cyklicznego rozciągania jest najbardziej znaczący w początkowych cyklach, a następnie zmniejsza się z każdym kolejnym cyklem. W obu przypadkach obserwowana jest reorientacja struktury martenzytycznej, podczas gdy dla stałej siły wartość rezystancji elektrycznej nie spada, a wręcz wzrasta z każdym kolejnym cyklem. Jest to spowodowane wpływem innych czynników na zmianę rezystancji, przy czym głównym czynnikiem wywołującym zmianę rezystancji przy obciążeniu ze stałą siłą jest zmiana wydłużenia próbki. W związku z tym wpływ reorientacji struktury martenzytu pozostaje niewielki. Co więcej, większy wpływ odkształcenia na wyniki może tłumaczyć większe rozproszenie danych w próbkach poddanych rozciąganiu ze stałą siłą.

W obu rodzajach wymuszenia wartość zmiany rezystancji elektrycznej mierzona jest względem rezystancji próbki po pierwszym cyklu rozciągania. Dlatego mimo, że dla stałego przemieszczenia rezystancja po pierwszym cyklu wzrasta względem początkowej wartości, nie jest to widoczne na wykresach zmiany rezystancji w funkcji liczby cykli obciążenia.

6.1.4 Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały wpływ odkształcenia i reorientacji struktury na zmianę rezystancji cienkich drutów ze stopu NiTi. Badania obejmowały porównanie wpływu dwóch różnych rodzajów obciążenia na rezystancję elektryczną próbki. Porównano cykliczne rozciąganie drutu ze stałym przemieszczeniem (tj. próbka w każdym cyklu była rozciągana do osiągnięcia ustalonej pozycji) i ze stałą siłą (tj. próbka w każdym cyklu była rozciągana do osiągnięcia ustalonej siły). Podczas cyklicznego rozciągania próbki stopu NiTi ze stałym przemieszczeniem obserwuje się spadek rezystancji elektrycznej po każdym kolejnym cyklu rozciągania. Alternatywnie, podczas rozciągania ze stałą siłą wartość rezystancji elektrycznej wzrasta. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że różne czynniki wywierają różny wpływ na obserwowane zjawiska. W przypadku rozciągania ze stałą siłą próbka jest odkształcana w większym stopniu po każdym cyklu, co wiąże się ze wzrostem rezystancji. W przypadku rozciągania ze stałym przemieszczeniem odkształcenie próbki jest praktycznie pomijalne

(z wyjątkiem początkowego cyklu), a tym samym ma znikomy wpływ na wartość oporu w kolejnych cyklach rozciągania. I odwrotnie reorientacja struktury martenzytu stanowi istotny czynnik wpływający na rezystancję próbki w przypadku rozciągania ze stałym przemieszczeniem. W obu typach obciążenia największa zmiana wartości rezystancji jest obserwowana podczas początkowych cykli. Z każdym kolejnym cyklem obserwowane zmiany maleją. Zaobserwowane zjawiska pozwalają na monitorowanie stopnia zmęczenia strukturalnego, szczególnie w zastosowaniach o niskiej dynamice obciążenia.

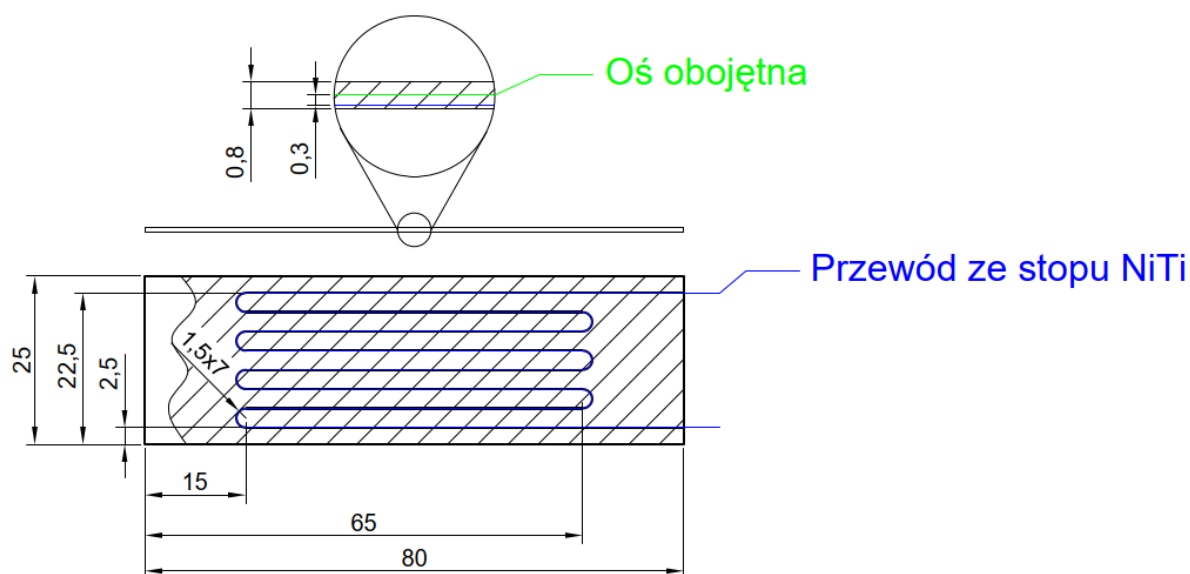
6.2 Ocena możliwości wykorzystanie zmian właściwości elektrycznych drutów ze stopów NiTi wewnątrz struktury kompozytowej w monitorowaniu strukturalnym

Kolejnym istotnym zadaniem badawczym zrealizowanym w ramach niniejszej pracy była ocena możliwości wykorzystania stopów NiTi do monitorowania strukturalnego konstrukcji kompozytowych. W tym celu opracowano metodę wykonywania kompozytów z PLA z zatopionym we wnętrzu drutem ze stopu NiTi. Do przeprowadzenia badania przygotowanych zostało 6 próbek. Głównym celem omawianego zadania badawczego było potwierdzenie, że zaobserwowaną w trakcie badań nieosłoniętych drutów ze stopów NiTi korelację pomiędzy spadkiem rezystancji a kolejnymi cyklami obciążenia można zaobserwować również w próbkach kompozytowych. Dokonano gruntownej przebudowy stanowiska badawczego tak, aby umożliwić cykliczne obciążenie kompozytu, a nie tylko drutów. Stanowisko badawcze zostało więc przebudowane w sposób umożliwiający cykliczne trójpunktowe zginanie próbki kompozytowej. Następnie na zmodyfikowanym stanowisku przeprowadzono właściwe badania cyklicznego zginania próbek kompozytowych. Wykazanie, że umieszczenie drutu NiTi wewnątrz struktury kompozytowej nie zakłóca obserwowanego efektu, otwiera możliwości dalszego rozwoju układów sensorycznych opartych na stopach NiTi. Umożliwia to również projektowanie wielowarstwowych kompozytów zintegrowanych z drutami NiTi, które mogą pełnić funkcję czujników do monitorowania stopnia degradacji struktury.

6.2.1 Metodyka

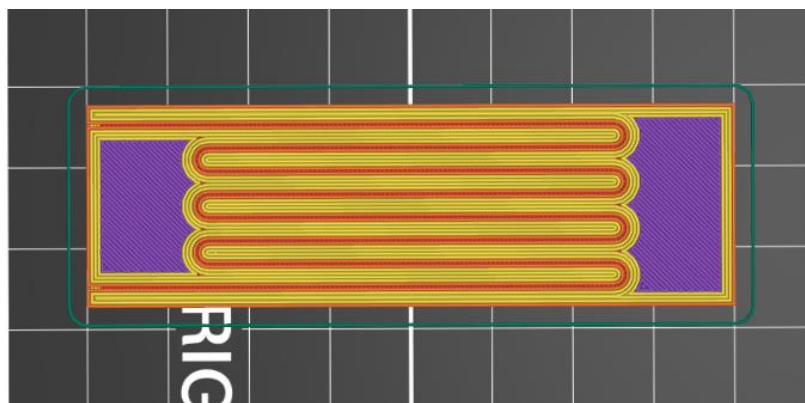
W celu wykonania próbek kompozytowych zastosowano autorską metodę wykorzystującą techniki addytywne. Metoda ta pozwala na wydajne wytwarzanie kompozytów w ramach małoseryjnej produkcji. Ponadto druk 3D jest kompatybilny z filamentami z materiałów SMP, które nadają się jako osnowa takiego kompozytu. Wysokość wydrukowanych próbek wynosiła

0,8 mm własności osnowy w minimalnym stopniu wpływały na druty ze stopu NiTi oraz aby osnowa zachowała dużą elastyczność. Płaszczyzna, w której został umieszczony drut, została odsunięta od płaszczyzny obojętnej o maksymalną wartość możliwą do uzyskania przy dostępnych możliwościach technologicznych 0,3 mm (wysokość warstwy przy wydruku z pomocą wykorzystanie drukarki 3d max 0,05 mm). Jak wykazano w poprzednich badaniach (patrz podrozdział 6.1), efekt spadku rezystancji wiąże się z reorientacją martenzytu, wynikającą z odkształcenia próbki. W związku z powyższym drut wewnątrz kompozytu powinien zostać poprowadzony w sposób umożliwiający rozciąganie pod wpływem zginania osnowy. Drut został poprowadzony w sposób inspirowany tensometrem, zakładając, iż będzie to efektywny sposób wykonania próbki, która ma mieć w ograniczonym stopniu podobne zadanie. Do wykonania próbki wykorzystano druty o średnicy 100 μm . Założenie to zweryfikowano poprzez symulacje numeryczne (patrz podrozdział 8.3). Na rysunku 6.14 w schematyczny sposób przedstawiono opracowaną próbkę.



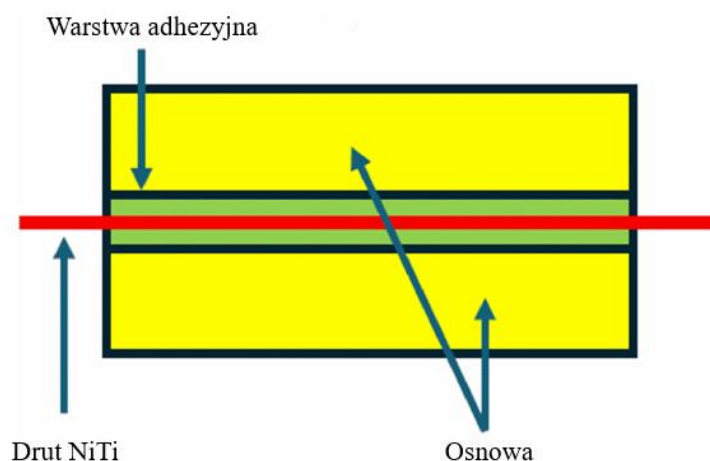
Rysunek 6.14. Schemat opracowanej próbki przedstawiające jej podstawowe wymiary

Na rysunku 6.15 przedstawiono wizualizację próbki wykonaną w programie PrusaSlicer w momencie zatrzymania wydruku w celu wprowadzenia do osnowy drutu ze stopu NiTi.



Rysunek 6.15. Wizualizacji rowka pod drut ze stopu NiTi

Aby w wyniku odkształcenia osnowy dochodziło również do odkształcenia drutu umieszczonego w jej wnętrzu, musi występować bezpośrednie połączenie pomiędzy tymi dwoma materiałami. W celu zweryfikowania czy siły tarcia i adhezji wystarczą do uzyskania takiego kontaktu przeprowadzono badania polegające na wprowadzaniu do różnych materiałów osnowy drutów ze stopów NiTi z dodatkową warstwą zwiększającą adhezję i bez tej warstwy. Drut taki następnie był siłowo wyciągany z osnowy z wykorzystaniem statywu. Badano różne materiały osnowy, w tym PLA, ABS oraz Iglidur® J260-PF. Sprawdzono również wpływ gęstości wypełnienia, z jaką drukowana była próbka, na wartość siły połączenia. Ową warstwę wykorzystaną w celu zwiększenia adhezji stanowił klej cyjanoakrylowy. Połączenie materiału osnowy z drutem ze stopu NiTi z wykorzystaniem dodatkowej warstwy adhezyjnej przedstawiono na rysunku 6.16.



Rysunek 6.16. Połączenie między drutem a osnową z wykorzystaniem dodatkowej warstwy adhezyjnej

Przeprowadzane badania wykazały, że rodzaj zastosowanej osnowy oraz gęstość wypełnienia ma wpływ na wartość siły połączenia pomiędzy drutem ze stopu NiTi a osnową.

Jednakże niezależnie od materiału wypełniana wartość siły połączenia pozostawała minimalna. Największy wpływ na wartość siły połączenia ma zastosowanie bądź niezastosowanie dodatkowej warstwy adhezyjnej, gdyż samo zastosowanie warstwy adhezyjnej zwiększa wartość siły potrzebnej do zerwania połączenia o dwa rzędy wielkości. Wartości siły potrzebne do zerwania połączenia pomiędzy stopem NiTi a osnową przedstawiono w tabeli 6.1.

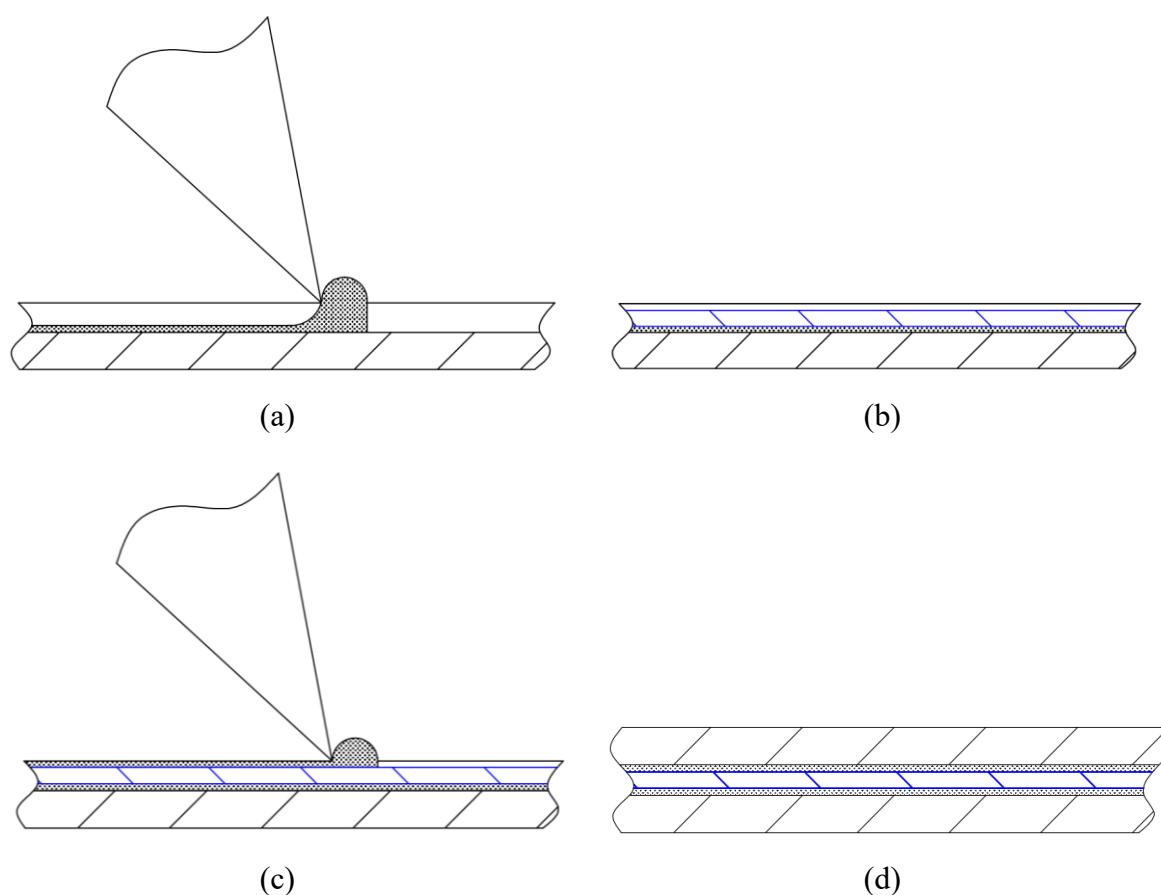
Tabela 6.1. Wpływ materiału osnowy, gęstości wypełnienia, rodzaju wypełnienia oraz zastosowania warstwy adhezyjnej na siłę potrzebną do zerwania połączenia pomiędzy stopem NiTi a osnową [167]

Dodatkowa warstwa adhezyjna	Materiał osnowy	Wzór wypełnienia	Wypełnienie [%]	Maks. siła wiązania [N]
Nie	PLA	Rectilinear	25	0,38
Nie	PLA	Rectilinear	50	0,62
Nie	PLA	Rectilinear	100	0,76
Nie	PLA	Cubic	25	0,6
Nie	PLA	Cubic	50	0,66
Nie	PLA	Cubic	90	0,96
Nie	PLA	Hilbert curve	25	0,43
Nie	PLA	Hilbert curve	50	0,67
Nie	PLA	Hilbert curve	100	0,72
Nie	ABS	Rectilinear	25	0,56
Nie	ABS	Rectilinear	50	0,56
Nie	ABS	Rectilinear	100	0,72
Nie	ABS	Cubic	25	0,23
Nie	ABS	Cubic	50	0,38
Nie	ABS	Cubic	90	0,75
Nie	ABS	Hilbert curve	25	0,25

Dodatkowa warstwa adhezyjna	Materiał osnowy	Wzór wypełnienia	Wypełnienie [%]	Maks. siła wiązania [N]
Nie	ABS	Hilbert curve	50	0,68
Nie	ABS	Hilbert curve	100	0,92
Nie	Iglidur J260-PF	Rectilinear	25	0,58
Nie	Iglidur J260-PF	Rectilinear	50	0,61
Nie	Iglidur J260-PF	Rectilinear	100	0,84
Nie	Iglidur J260-PF	Cubic	25	0,46
Nie	Iglidur J260-PF	Cubic	50	0,58
Nie	Iglidur J260-PF	Cubic	90	0,74
Nie	Iglidur J260-PF	Hilbert curve	25	0,53
Nie	Iglidur J260-PF	Hilbert curve	50	0,80
Nie	Iglidur J260-PF	Hilbert curve	100	0,87
Tak	PLA	Rectilinear	50	31,95
Tak	PLA	Rectilinear	100	24,85
Tak	PLA	Cubic	50	71,45
Tak	PLA	Cubic	90	63,65
Tak	ABS	Rectilinear	50	49,55
Tak	ABS	Rectilinear	100	43,40
Tak	ABS	Cubic	50	38,95
Tak	ABS	Cubic	90	53,35
Tak	Iglidur J260-PF	Rectilinear	50	95,85
Tak	Iglidur J260-PF	Rectilinear	100	35,20
Tak	Iglidur J260-PF	Cubic	50	68,45
Tak	Iglidur J260-PF	Cubic	90	72,15

Na podstawie przeprowadzonych badań przygotowawczych mających na celu wyznaczenie parametrów, przy których występuje największa trwałość połączenia osnowy z drutem,

opracowano metodę wykonywania próbek kompozytowych. Osnowa każdej wykonanej w ramach pracy próbki kompozytowej była drukowana na drukarce 3D, wykorzystując filament PLA firmy Prusa. Wydruk realizowano do osiągnięcia przez drukarkę wcześniej ustalonej w pliku z G-code'm warstwy (dla warstwy tej kończył się wydruk rowka pod drut). Po osiągnięciu zadanej wysokości drukarka wstrzymywała pracę, umożliwiając wprowadzenie drutu. Najpierw na powierzchni rowka rozprowadzana była warstwa adhezyjna, na którą następnie nakładany był drut ze stopu NiTi. Po równomiernym położeniu drutu na powierzchni próbki rozprowadzano równomiernie kolejną warstwę adhezyjną. Przed wyschnięciem górnej warstwy wznowiany był druk tak, aby następne warstwy związały się z umieszczonym pod nimi drutem ze stopu NiTi. Uproszczony schemat tego procesu przedstawiono na rysunku 6.17.

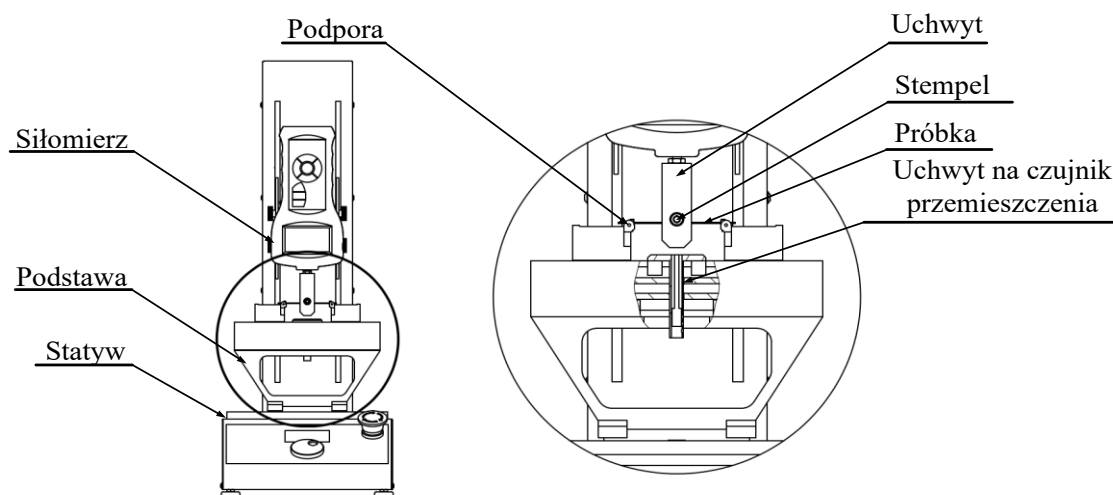


Rysunek 6.17. Proces przygotowania próbki z drutu NiTi we wnętrzu osnowy z PLA w kolejnych etapach: a) nałożenie pierwszej warstwy adhezyjnej, b) wprowadzenie drutu do wnętrza rowka, c) nałożenie drugiej warstwy adhezyjnej, d) wydrukowanie górnej części osnowy

W ramach omawianego zadania badawczego przeprowadzono badanie eksperymentalne, polegające na wielokrotnym zginaniu próbki kompozytowej z zatopionym drutem NiTi.

Konieczne było przeprojektowanie stanowiska badawczego w taki sposób, aby umożliwiała realizację trójpunktowego zginania próbki. Stanowisko wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 178, opisującą oznaczanie właściwości tworzyw sztucznych przy zginaniu [159]. Istotne jest, iż zgodnie z normą zostały wykonane uchwyty na stanowisku oraz zdefiniowano kluczowe wymiary (takie jak średnica stempla czy rozstaw podpór). Jednakże niezgodnie z normą wykonano same próbki, których wymiary dobrano tak, aby zwiększyć szanse na zaistnienie efektu obserwowanego w poprzednich badaniach (patrz podrozdział 6.1).

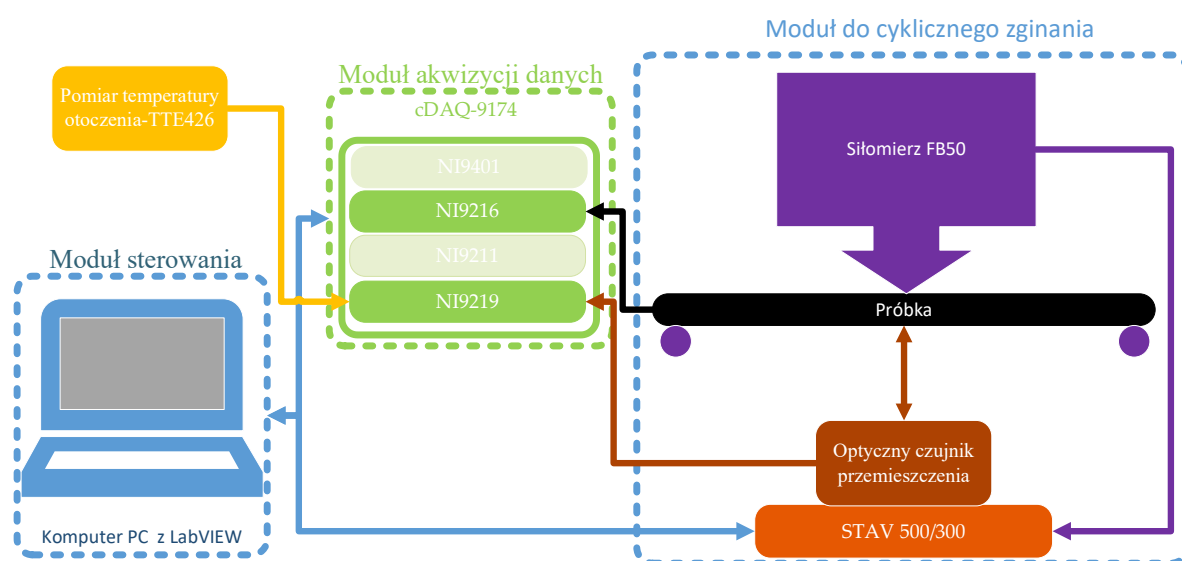
Tor pomiarowy, podobnie jak w poprzednio omówionych badaniach opracowano na podstawie wcześniej przygotowanych modułów. Elementem wykonawczym pozostał statyw STAV 500/300, pomiar siły w trakcie zginania ponownie realizowany był z wykorzystaniem siłomierza FB50. Rejestrację danych z termopary, optycznego czujnika przemieszczenia oraz właściwy pomiar rezystancji elektrycznej stopu przeprowadzono z wykorzystaniem systemu akwizycji danych cDAQ-9174 oraz odpowiednich kart pomiarowych NI9219 oraz NI9216. W niniejszym zadaniu badawczym do sterowania stanowiskiem wykorzystano algorytm sterowania zaimplementowany w środowisku LabVIEW. W badaniu tym natomiast pierwszy raz wykorzystano moduł cyklicznego zginania. Schemat użytego toru pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.18.



Rysunek 6.18. Schemat toru pomiarowego do realizacji cyklicznego trójpunktowego zginania próbki kompozytowej

Równie istotny jak układ mechaniczny stanowiska był układ elektryczny, który umożliwiał rejestrację rezystancji, odczyt napięcia z optycznego czujnika przemieszczenia oraz aktywację drutu. Pomiar rezystancji realizowany był metodą czteroprzewodową z wykorzystaniem karty pomiarowej NI9216, natomiast karta NI9219 służyła do rejestracji temperatury otoczenia

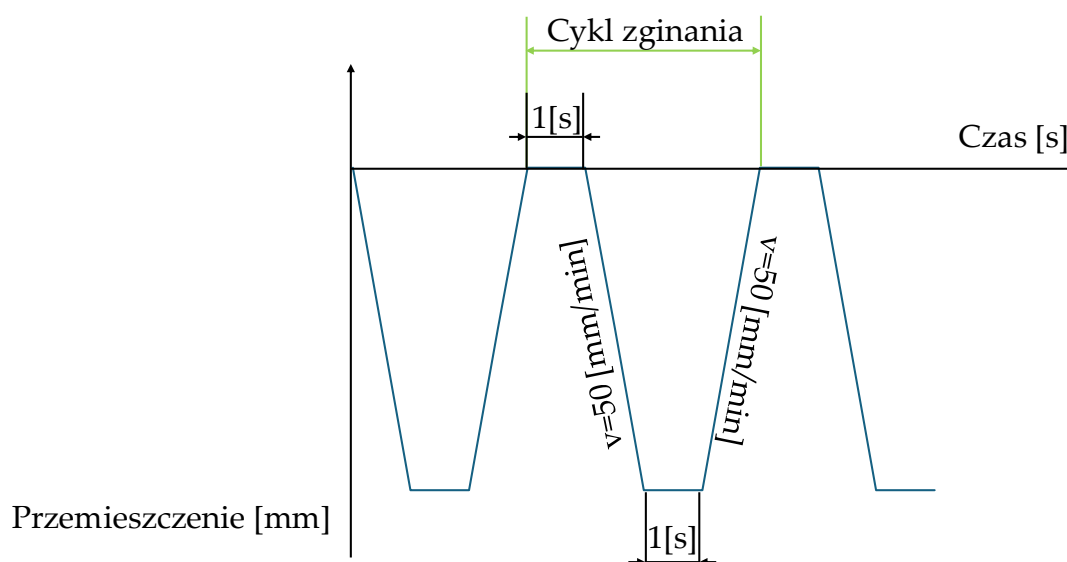
w trakcie pomiaru oraz odczytu napięcia zwracanego przez czujnik Philtec RC171 (patrz rozdział 5). Siłomierz FB50 tak ja w poprzednich badaniach, skomunikowany był ze statywem (patrz rozdział 5). Również analogicznie do poprzednich badań za aktywację próbki w ramach przygotowania przed próbami pomiarowymi odpowiadał zasilacz laboratoryjny DC. Podsumowując, stwierdza się że w torze pomiarowym wykorzystano moduł do cyklicznego zginania, moduł akwizycji danych, moduł sterowania oraz moduł roboczy. Z modułów pomocniczych wykorzystano moduł do pomiarów przemieszczenia Na rysunku 6.19 przedstawiono schemat wykorzystanych modułów oraz komunikacji między nimi.



Rysunek 6.19. schemat wykorzystanych modułów oraz komunikacji między nimi

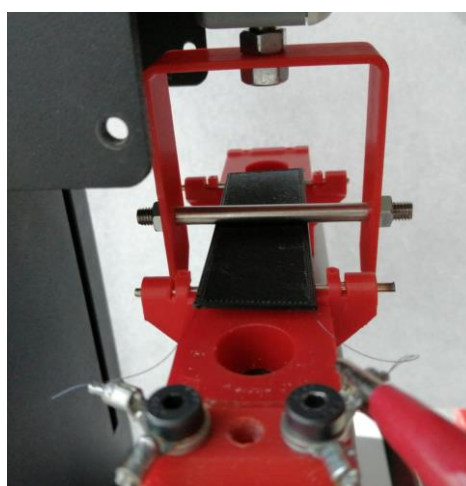
Badanie przeprowadzono na 6 wykonanych w jednakowy sposób próbkach. Wszystkie próbki zamocowano na stanowisku pomiarowym w analogiczny sposób poprzez umieszczenie ich symetrycznie na podporach. Istotna była też orientacja próbek względem stempli. Wszystkie próbki były zorientowane tak, aby drut umieszczony wewnątrz znajdował się po drugiej stronie płaszczyzny obojętnej od strony stempla. Takie ułożenie próbki oznacza, że w trakcie jej zginania drut był rozciągany, a nie ściskany. Druty wychodzące z próbki zakończone kontaktami elektrycznymi ani w trakcie ani przed pomiarami nie były obciążone, lecz swobodnie wisały. Przed każdym pomiarem próbki były aktywowane termicznie, aby w momencie rozpoczęcia procedury pomiarowej drut ze stopu NiTi pozostawał w fazie martenzytycznej. Następnie stempel umieszczano w bezpośrednim kontakcie z próbką bez jej obciążenia. Stanowiło to pozycję wyjściową do każdego kolejnego cyklu zginania. Po zakończeniu ruchów nastawczych rozpoczynane było cykliczne zginanie próbek. W pierwszym

etapie cyklu stempel ugiął próbkę, poruszając się ze stałą prędkością 50 mm/min (prędkość odkształcenia w zakresie quasi-statycznym, taka sama jak w przypadku wcześniej omawianych badań patrz podrozdział 6.1), wywołując przemieszczenie centralnej części próbki. Po osiągnięciu zadanego przemieszczenia wynoszącego 5 mm, stempel zatrzymywał się na 1 s, a następnie powracał do pozycji początkowej z tą samą prędkością. Każda z 6 próbek została poddana 90 cyklom obciążenia. Cykl zginania przedstawiono na rysunku 6.20.



Rysunek 6.20. Cykl zginania próbki kompozytowej

Zamocowanie próbki na stanowisku pomiarowym przed rozpoczęciem procedury pomiarowej przedstawiono na rysunku 6.21.



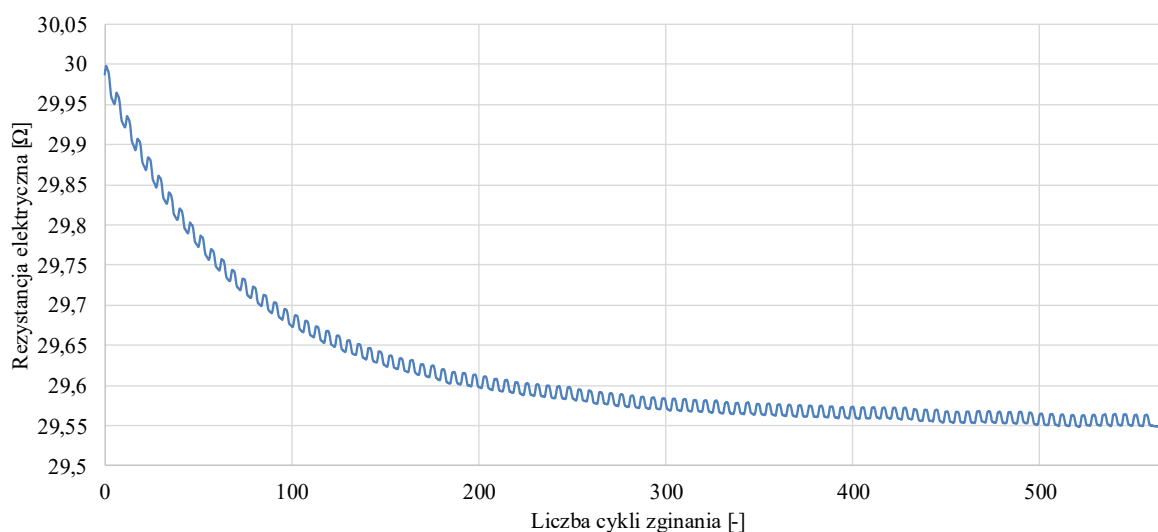
Rysunek 6.21. Próbkę zamocowaną na stanowisku pomiarowym

Wszystkie badane próbki były mocowane w analogiczny sposób. Pomiary były prowadzone w warunkach stojącego powietrza. W trakcie pomiarów monitorowana była również temperatura otoczenia. Podczas wszystkich przeprowadzonych prób pomiarowych temperatura była w przedziale od 23 do 24 °C. Można w związku z tym stwierdzić, iż warunki otoczenia miały znikomy wpływ na wyniki przeprowadzonych eksperymentów.

6.2.2 Rezultaty

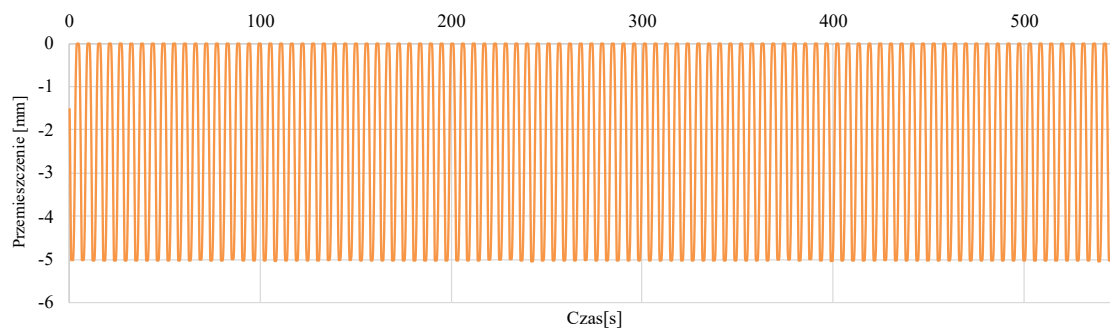
W ramach prowadzonych badań kompozytowe próbki wykonane z drutów NiTi zatopionych we wnętrzu osnowy z PLA poddano cyklicznemu zginaniu o trzech punktach podparcia. W trakcie procesu zginania próbki monitorowano rezystancję drutu ze stopu NiTi w celu określenia wpływu cyklicznego zginania na jej wartość.

We wszystkich próbkach zaobserwowano, że wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia spada rezystancja elektryczna próbki. W początkowych cyklach obciążenia zmiana rezystancji elektrycznej jest znacznie większa, lecz wraz z kolejnymi cyklami zmiana wartości rezystancji maleje. Na rysunku 6.22 przedstawiono przebieg rezystancji w czasie cyklicznego zginania.

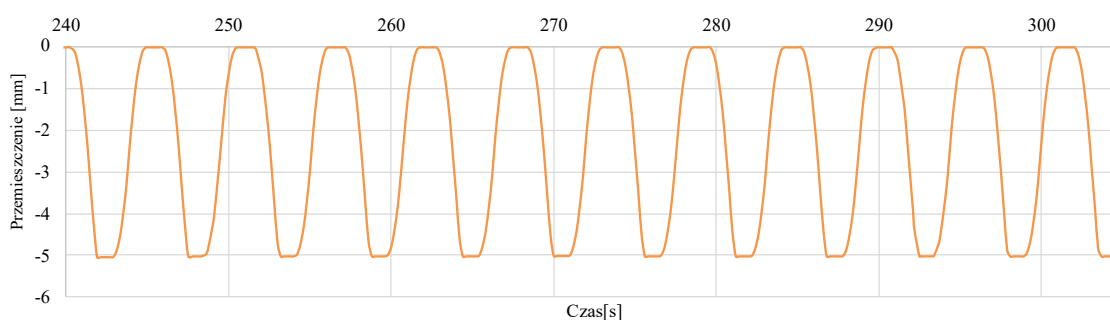


Rysunek 6.22. Przebieg rezystancji elektrycznej w trakcie cyklicznego zginania wybranej próbki(nr 2)

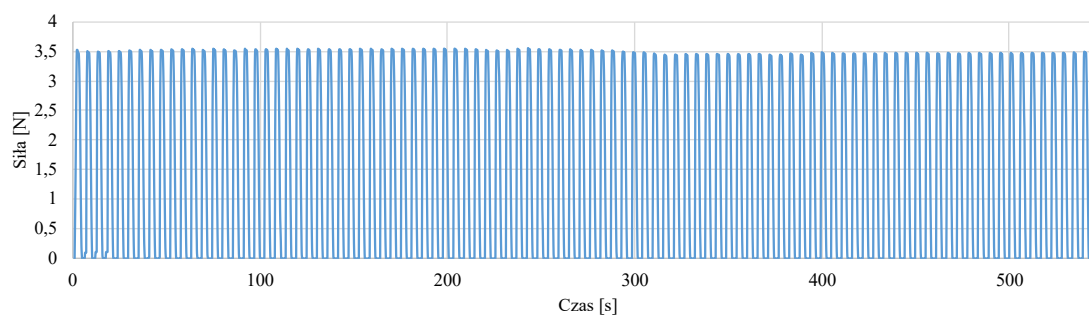
Na rysunku 6.23 przedstawiono przebiegi siły oraz przemieszczenia w trakcie cyklicznego zginania, uwidaczniając też wybrane fragmenty wykresów.



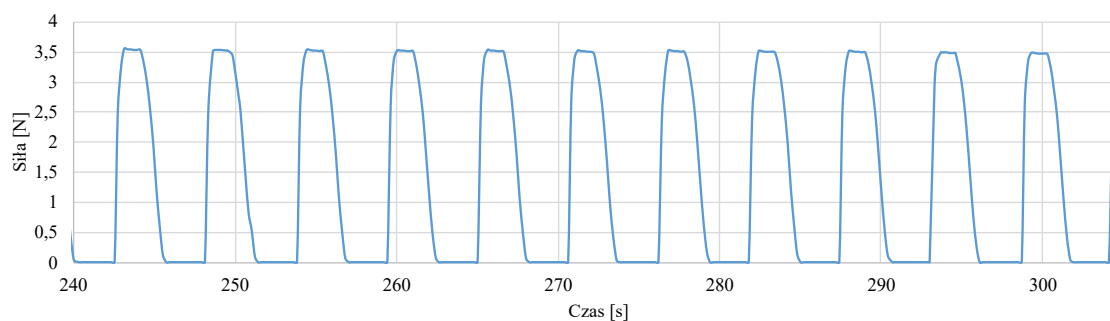
(a)



(b)



(c)



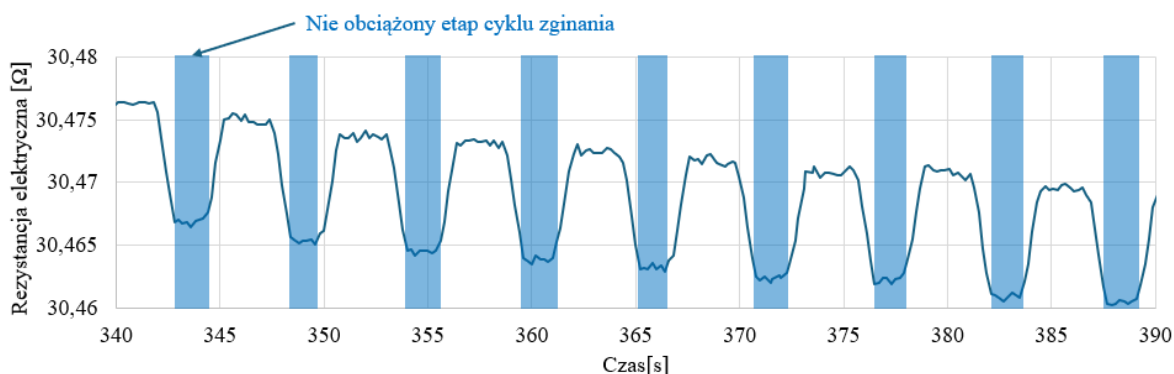
(d)

Rysunek 6.23. Przebieg: a) przemieszczenia oraz b) fragmenty przebiegu przemieszczenia, przebieg: c) siły w trakcie cyklicznego zginania próbki oraz d) fragmenty przebiegu siły dla wybranej próbki(nr 2)

Pomiary prowadzono ze stałym przemieszczeniem, co można zaobserwować na rysunku 6.23 a). Widać, że w kolejnych cyklach wartość przemieszczenia nie zmienia się. Pomimo faktu, iż wartość przemieszczenia w kolejnych cyklach nie ulega zmianie, to we wszystkich próbkach obserwowany jest niewielki spadek wartości siły zarejestrowanej w obciążonym etapie cyklu (spadek ten po poddaniu próbek 90 cyklom obciążenia dla żadnej próbki nie przekroczył 0,05 N). Zjawisko to możliwe było do zaobserwowania w większości próbek i wynika najprawdopodobniej z częściowej degradacji materiału osnowy wskutek cyklicznego obciążenia. Stopień tej degradacji przy względnie niewielkiej liczbie cykli obciążenia jest mocno ograniczony, o czym świadczy zmiana wartości siły przy ugięciu (dla wszystkich próbek poniżej 0,05 N) oraz brak możliwości do optycznego zdiagnozowania uszkodzeń próbki.

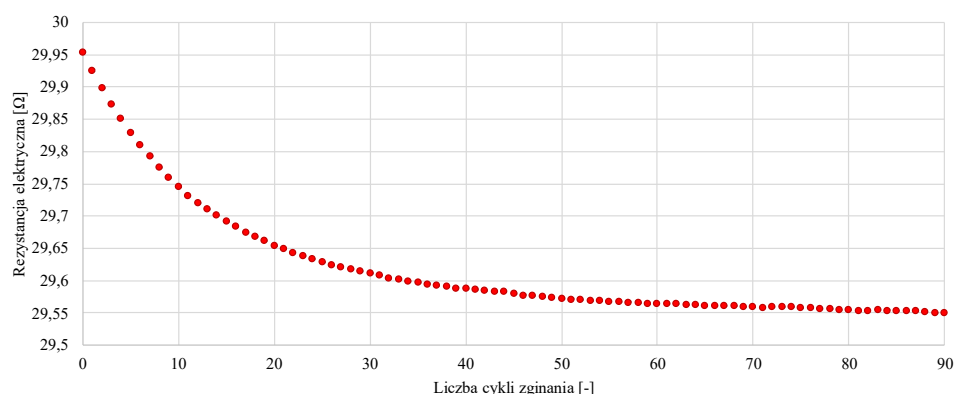
6.2.3 Analiza wyników i dyskusja

W celu dokładniejszej analizy danych z przebiegów rezystancji dotyczących wszystkich próbek wyodrębniono nieobciążone etapy każdego z cykli i wyznaczono średnią rezystancję elektryczną w trakcie każdego etapu. Metodę oznaczenia nieobciążonych etapów cyklu w trakcie zginania przedstawiono na rysunku 6.24.



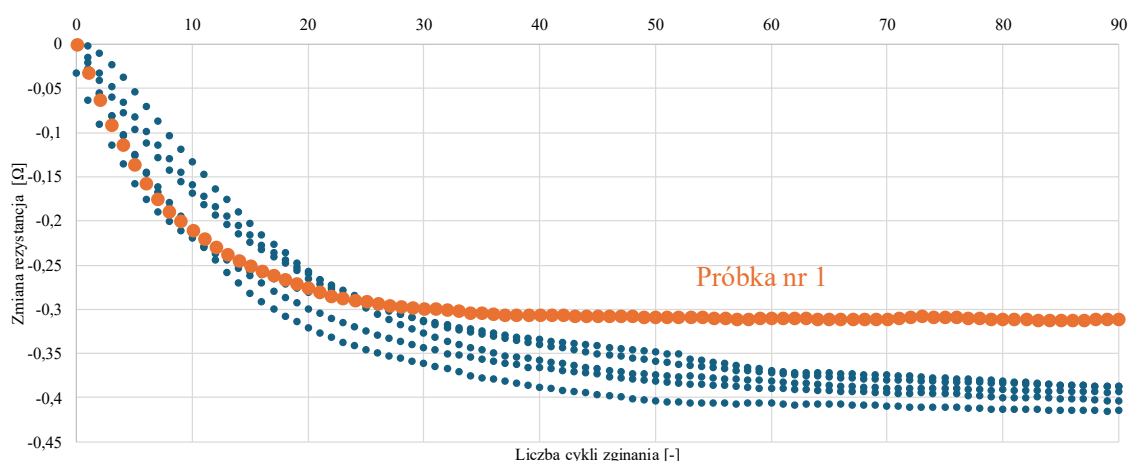
Rysunek 6.24. Fragment przebiegu rezystancji elektrycznej z oznaczonymi nieobciążanymi etapami cyklu zginania wybranej próbki(nr 2)

W każdym przedziale, w którym wyznaczono średnią rezystancję elektryczną, wyznaczono też odchylenie standardowe, aby zobrazować rozrzut danych w tych przedziałach. Wyznaczone w ten sposób wartości odchylenia standardowego w znacznej większości przedziałów były o kilka rzędów wielkości mniejsze od wartości średniej. To znaczy, że oscylację wartości rezystancji elektrycznej w trakcie nieobciążonego etapu cyklu są minimalne, co też jest dobrze widoczne na rysunku 6.25.



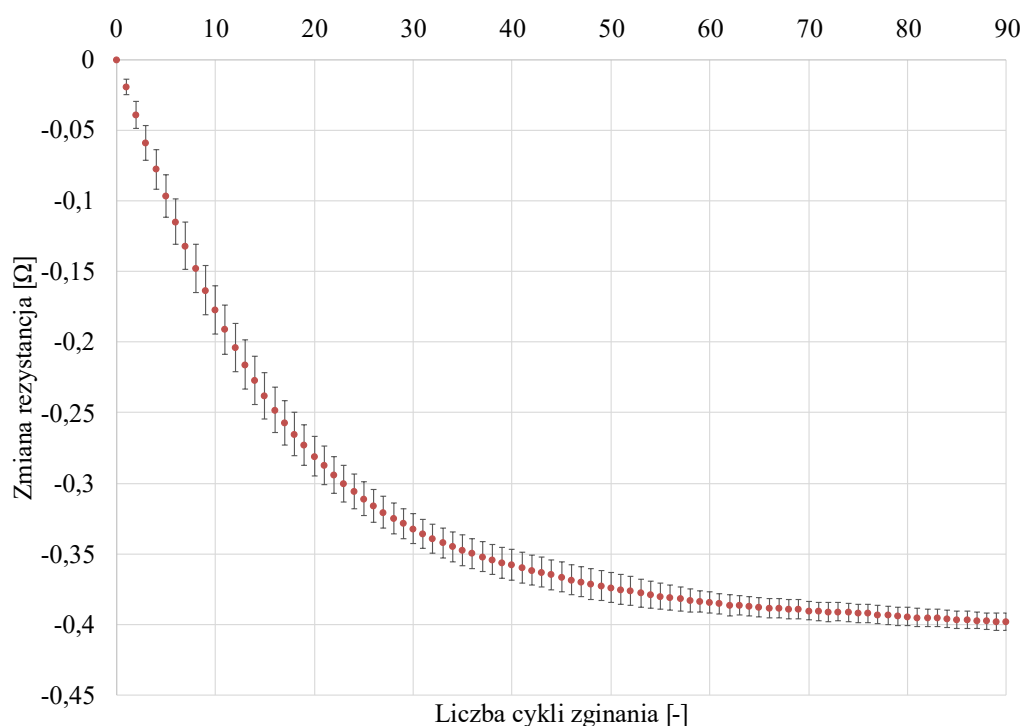
Rysunek 6.25. Średnia wartość rezystancji elektrycznej po każdym kolejnym cyklu obciążenia wybranej próbki (nr 2)

Aby porównać ze sobą próbki różniące się nieznacznie początkową rezystancją elektryczną średnią wartość rezystancji odniesiono do wartości po pierwszym cyklu wyznaczając w ten sposób spadek rezystancji po każdym kolejnym cyklu. Zbadano 6 identycznie przygotowanych próbek kompozytowych o osnowie z PLA i z zatopionym w niej drutem ze stopu NiTi. Jednakże wartość średniej rezystancji dla jednej z wykonanych w ten sposób próbek po przekroczeniu 20 cykli zaczęła znacząco odbiegać od pozostałych próbek. Zjawisko to może być związane z uszkodzeniem tej próbki za sprawą zbyt dużej temperatury w trakcie aktywacji stopu przed przeprowadzeniem właściwego pomiaru. Zjawisko to zaobserwowano tylko w jednej próbce i dlatego zarejestrowane wartości potraktowano jako błąd zgrubny i pominięto w dalszej analizie danych. Na rysunku 6.26 zestawiano ze sobą wyniki średnich wartości rezystancji elektrycznych w nieobciążonych etapach cyklu dla 6 próbek podczas cyklicznego zginania.



Rysunek 6.26. Zestawienie wyników zmiany rezystancji elektrycznych dla 6 próbek po każdym kolejnym cyklu z podkreśleniem próbki nr 1 obciążonej największym odchyleniem

Związku z powyżej opisanym zagadnieniem średnia wartość rezystancji po każdym kolejnym cyklu obciążenia dotyczącego wszystkich próbek została wyznaczona bez brania pod uwagę wyników dla próbki nr 1. Wyznaczony w ten sposób przebieg rezystancji w funkcji cyklu obciążenia potwierdza, iż dla każdej badanej próbki wartość rezystancji elektrycznej spada z kolejnymi cyklami obciążenia. Spadek ten jest najbardziej istotny w pierwszych cyklach obciążenia, jednakże jest on dalej możliwy do zmierzenia nawet po 90 cyklach. W każdym cyklu wyznaczono też wartość odchylenia standardowego, aby przedstawić rozrzut danych pomiędzy próbkami. Rozrzut ten jest największy w pierwszych cyklach co przejawia się w tym, że wartość odchylenia standardowego w drugim cyklu stanowi 28% wartości spadku rezystancji elektrycznej. Jednakże po przekroczeniu 10 cykli rozrzut wartości znacząco spada i średnio wynosi około 3%. Istotny rozrzut danych w początkowych cyklach pomiędzy różnymi próbkami prawdopodobnie jest spowodowany ograniczoną dokładnością, z jaką zostały wykonane poszczególne próbki badawcze. Dokładność wykonania ma największe znaczenie w początkowych cyklach. Średnia wartość rezystancji dla wszystkich próbek po każdym kolejnym cyklu przedstawiono na rysunku 6.27.



Rysunek 6.27. Uśredniona wartość zmiana rezystancji elektrycznej po każdym kolejnym cyklu obciążenia odnośnie do 5 próbek kompozytowych wzmocnionych drutem ze stopu NiTi

6.2.4 Podsumowanie

Przeprowadzone badania cyklicznego zginania próbek kompozytowych potwierdziły, że w drucie ze stopu NiTi umieszczonym we wnętrzu osnowy polimerowej (PLA) również obserwowany jest efekt spadku rezystancji po każdym kolejnym cyklu obciążenia. Ponadto zauważono, że efekt ten wynika ze wzrostu odkształcenia stopu NiTi, ponieważ został on zaobserwowany zarówno podczas rozciągania nieosłoniętych drutów, jak i przy trójpunktowym zginaniu. W obu badaniach druty odkształcano w zbliżonym stopniu. Przebiegi rezystancji zarejestrowane dla drutów umieszczonych we wnętrzu osnowy z PLA są też bardziej stabilne od przebiegów zarejestrowanych dla nieosłoniętych drutów, co jest prawdopodobnie związane z tym, iż drut ze stopu NiTi we wnętrzu osnowy jest w większym stopniu chroniony przed warunkami otoczenia, w tym zwłaszcza przed fluktuacjami powietrza. Ponadto w próbkach kompozytowych zaobserwowano znacznie większą liczbę cykli z mierzalną zmianą rezystancji niż w nieosłoniętych drutach. W wyniku tej obserwacji stwierdzono, że możliwe jest prowadzenie badań nawet dla 90 cykli obciążenia (czyli 3 razy więcej). Wynika to najprawdopodobniej z faktu, iż w próbce kompozytowej odkształceniu w trakcie cyklu ulega fragment drutu o znacznie większej długości, w związku z czym początkowa rezystancja elektryczna drutu jest nawet o rząd wielkości większa.

7 Badania zmian własności stopów NiTi wynikających z przemian fazowych

Rozdział ten grupuje badania analizujące wpływ przemian fazowych na właściwości drutów ze stopu NiTi. W pierwszym podrozdziale opisano badania aktuatora ze stopu NiTi, działającego w połączeniu szeregowym ze sprężyną. W drugim podrozdziale zanalizowano aktywację drutu wewnątrz osnowy polimerowej.

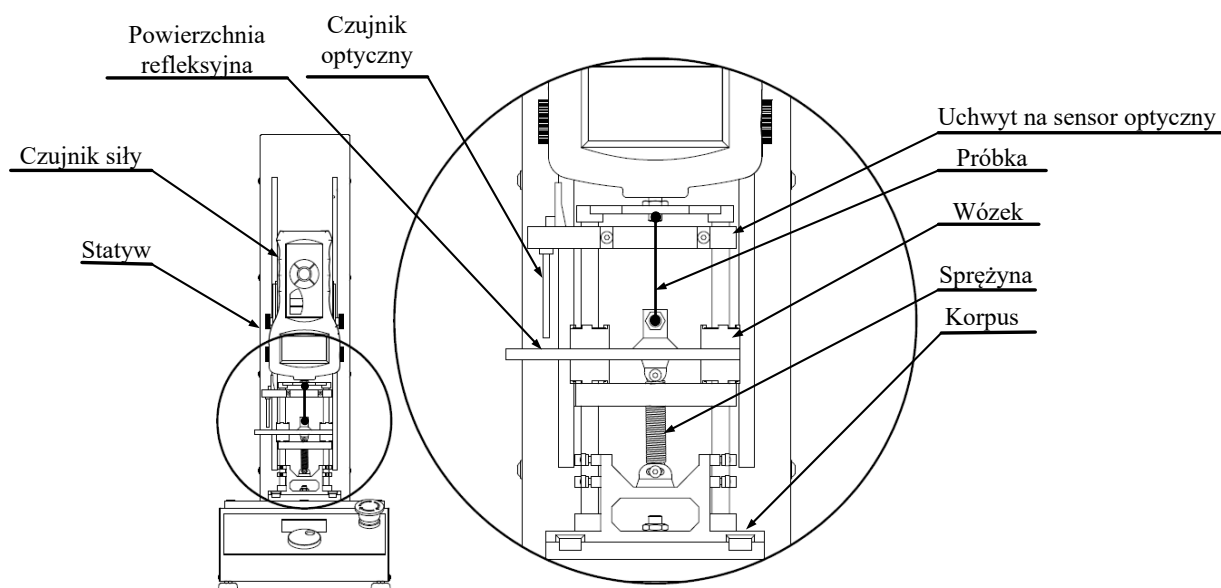
7.1 Wpływ przemiany fazowej na własności drutów ze stopu NiTi

Celem niniejszych badań eksperymentalnych było określenie zmian właściwości mechanicznych cienkich drutów ze stopu NiTi skorelowanych z przemianami fazowymi tego stopu. Podczas badań eksperymentalnych zmierzono zależność siły generowanej przez drut NiTi od prądu grzania i jego temperatury. Przeprowadzone badania pozwoliły na powiązanie czasów aktywacji z wartością natężenia prądu płynącego przez drut. Niniejsze badania pozwoliły na lepsze poznanie zmian właściwości wykorzystywanego stopu NiTi.

7.1.1 Metodyka

W rozdziale tym opisano tor pomiarowy oraz samą procedurę badawczą, pomijając natomiast przygotowania próbek, gdyż wykorzystywano próbki przygotowane zgodnie z tą samą metodą jak w badaniach w podrozdziale 6.1. Różnicę stanowił fakt, że w tym badaniu poza próbką o średnicy 100 μm wykorzystano też próbkę o średnicy 150 μm .

Wszystkie przygotowane próbki mocowano na stanowisku pomiarowym w szeregowym połączeniu ze sprężyną przeciwdziałającą skurczeniu się próbki. Próbki pomiarowe aktywowano w celu wyznaczenia generowanej przez nie siły w zależności od natężenia prądu płynącego przez drut (upraszczając dalej zwanego prądem grzania) oraz temperatury drutu. Dodatkowo podczas badania mierzone była zmiana wydłużenia przewodu (przy użyciu sensora optycznego) oraz rezystancja próbki. Jeden z końców próbki został przymocowany do wózka łączącego próbkę ze sprężyną. Natomiast drugi koniec próbki zamocowano do siłomierza umieszczonego na statywie. Uproszczony schemat ukończonego toru pomiarowego przedstawiono na rysunku 7.1.

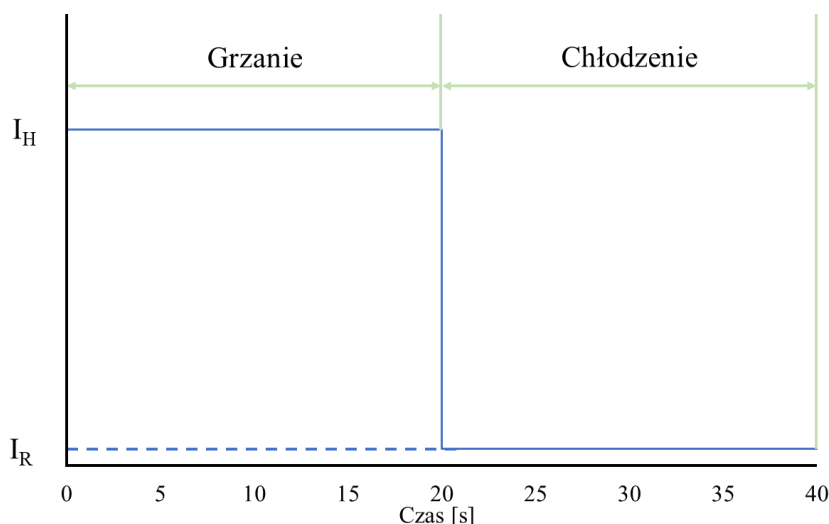


Rysunek 7.1. Schemat stanowiska badawczego

W badaniu wykorzystano moduł aktuatora w połączeniu szeregowym ze sprężyną o współczynniku sprężystości $0,3 \text{ N/mm}$ (patrz podrozdział 5.1). Składał się on z wózka poruszającego się wzdłuż dwóch prowadnic liniowych z wykorzystaniem pary ceramicznych łożysk ślizgowych, uchwytu na sensor optyczny oraz umożliwiającej mocowanie tych elementów podstawy. Wózek stanowił miejsce mocowania próbki badawczej oraz miejsce zamocowania powierzchni refleksyjnej dla sensora optycznego. Elementem przeciwdziałającym przemieszczeniu wózka była sprężyna zamocowana między wózkiem a podstawą. Do prowadnic liniowych przymocowano również uchwyt na sensor optyczny w taki sposób, aby głowica sensora znajdowała się w odległości 10 mm od powierzchni refleksyjnej (w zakresie pomiarowym czujnika).

W celu wykonania pomiaru siły generowanej przez drut ze stopu NiTi konieczne było wywołanie przemiany fazowej stopu. Przemiana fazowa dla SMA zachodzi wskutek zwiększenia temperatury materiału. Ponadto zmiana fazy NiTi z martenzytu w austenit wygeneruje siłę w układzie tylko wtedy jeśli ten stop jest wstępnie odkształcony. W związku z tym pojedynczy pomiar polegał na przemieszczeniu siłomierza (za pomocą napędu statywu), do którego przymocowany był jeden koniec próbki, co powodowało wygenerowanie siły w układzie, a następnie na nagrzewaniu stopu w celu wywołania przemiany fazowej. Przemiana prowadziła do skrócenia drutu, a tym samym do przemieszczenia wózka, które było mierzone za pomocą czujnika optycznego. Uzyskane przemieszczenie wózka, wywołane przemianą NiTi i skróceniem drutu upraszczając dalej określano jako przemieszczenie. Grzanie realizowane było

przez przepływ prądu w próbce. Pomiar trwał 40 s, na co składało się: 20s proces grzania, w czasie którego przez próbkę przepływał prąd pomiarowy oraz 20s proces chłodzenia, w czasie którego przez próbkę przepływał bardzo niewielki prąd umożliwiający pomiar rezystancji ($I_R=5$ mA). Przebieg prądu w próbce testowej w trakcie pomiaru przedstawiono na rysunku 7.2.



Rysunek 7.2. Przebieg procesu grzania

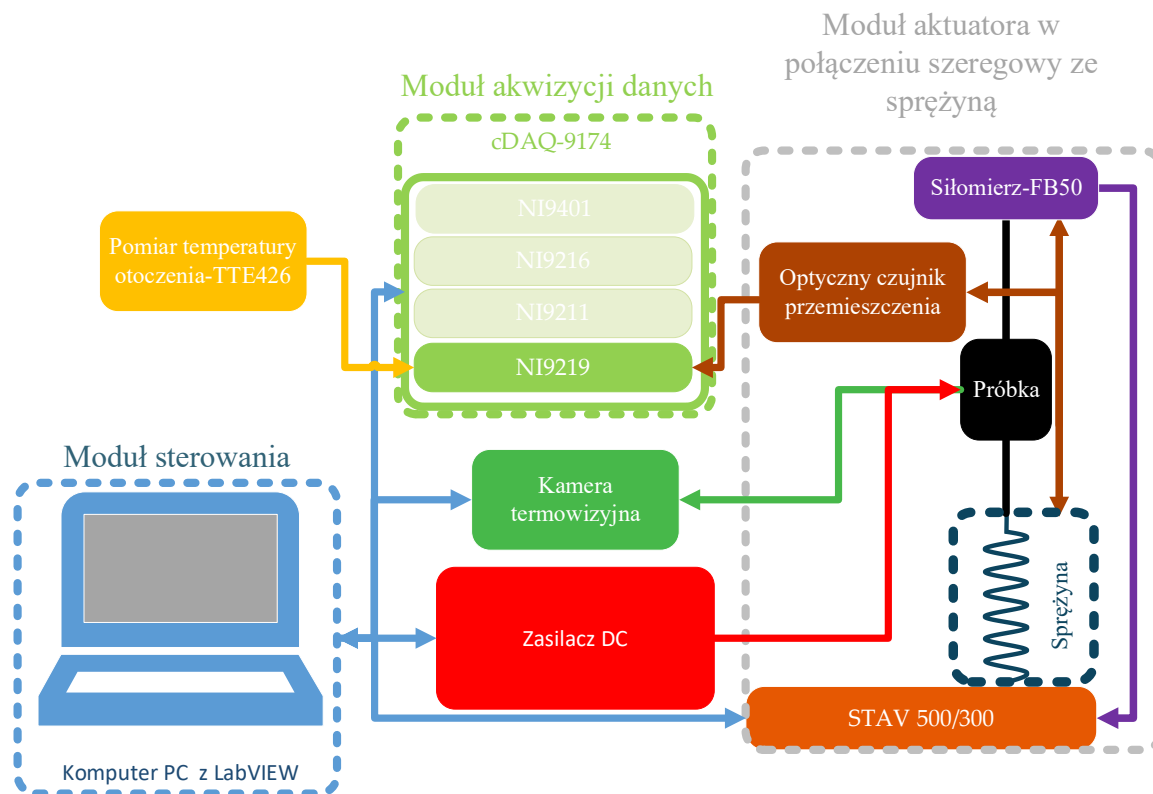
Pomiar dotyczył próbek o średnicach 100 μm oraz 150 μm . Dla próbek o obu średnicach wykonano pomiary dla różnych wartości prądu grzania dobranych tak, aby uwzględnić podaną przez producenta wartość prądu nominalnego. Prąd nominalny w odniesieniu do drut o danej średnicy oraz pomiarowe wartości prądu przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Wartość prądu grzania w trakcie pomiarów dla konkretnej próbki

Średnica [μm]	I_N [mA]	I_{Hmin} [mA]	I_{Hmax} [mA]	Zmiana [mA]
100	180	80	240	20
150	400	80	480	20

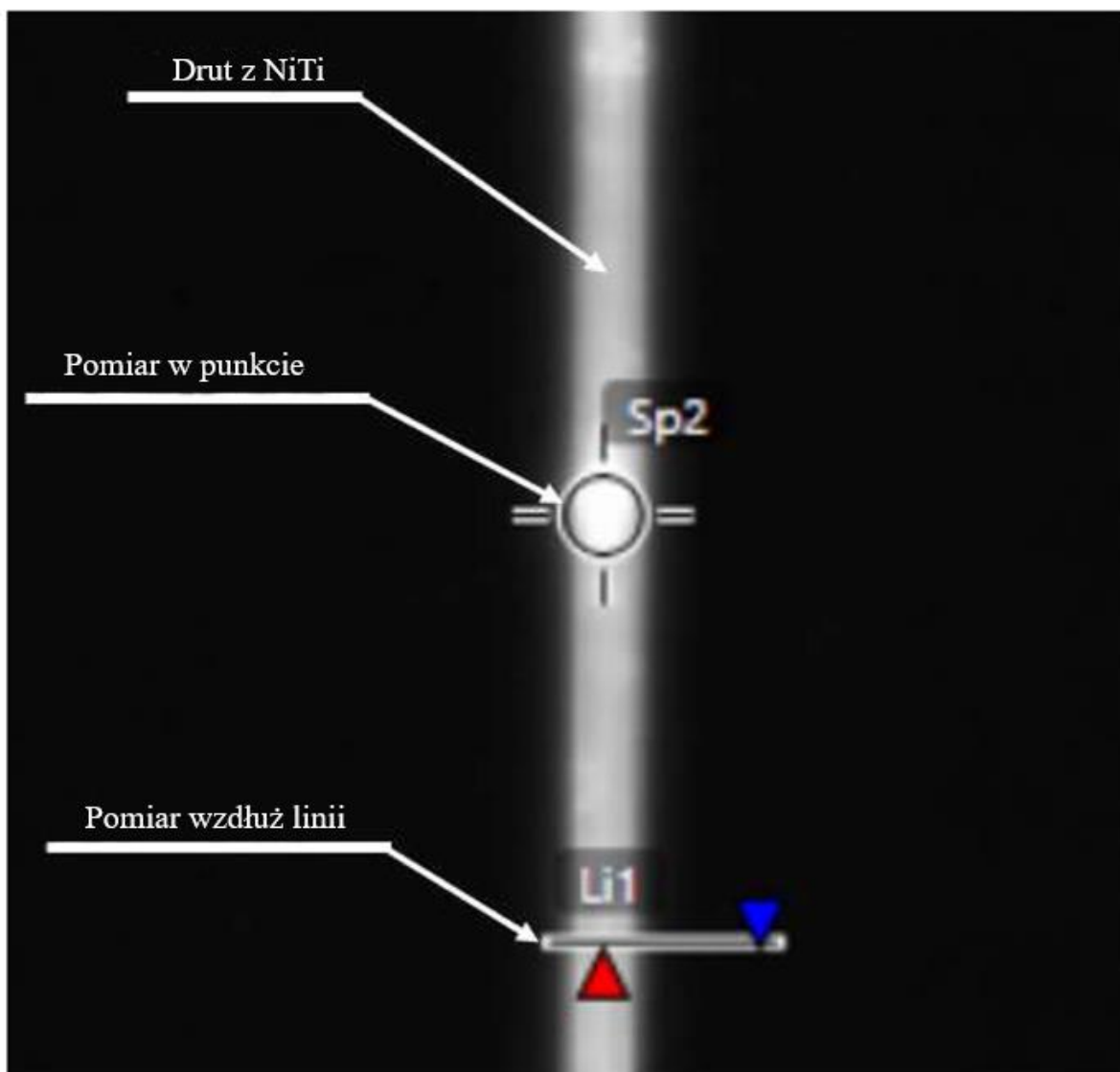
Tor pomiarowy składał się ze statywu STAV 500/300 przeznaczonego do zamocowania próbki, siłomierza FB50 pozwalającego na pomiar występujących sił, analogowego optycznego sensora RC171 do pomiaru przemieszczenia, zasilacza DC RS PRO RS-D3305P, generującego przepływ prądu w układzie, kamery termowizyjnej Flir A325 z soczewką Close-up x4 do bezdotykowego pomiaru temperatury próbki, termopary TTE426 do pomiarów temperatury otoczenia. W związku z powyższym w tym badaniu wykorzystano moduł aktuatora w połączeniu szeregowym ze sprężyną, moduł akwizycji danych, moduł sterowania, moduł

roboczy, moduł do pomiarów temperatury, moduł do pomiarów siły, moduł do pomiarów przemieszczenia. Na rysunku 7.3 przedstawiono schemat wykorzystanych modułów oraz komunikacji między nimi.



Rysunek 7.3. Schemat modułów oraz komunikacji

Nagrania z kamery termowizyjnej były analizowane za pomocą dedykowanego oprogramowania FLIR Tools (Teledyne FLIR LLC 27700 SW Parkway Avenue, Wilsonville, OR, USA). Temperaturę próbek mierzono za pomocą pomiarów punktowych i pomiarów liniowych. Pomiary punktowe odczytują wartość temperatury w określonym punkcie. Pomiary liniowe określają maksymalną, średnią i minimalną temperaturę wzdłuż wyznaczonej linii (jako wynik pomiaru brano pod uwagę temperaturę maksymalną). Współczynnik emisyjności podczas pomiarów wynosił 0,75. Wartość ta została wyznaczona eksperymentalnie (poprzez kontrolowane podgrzanie próbki do zadanej temperatury i kalibrację kamery). Teoretyczne określenie emisyjności było trudne ze względu na utlenianie powierzchni NiTi. Obrazy okna aplikacji przedstawiono na rysunku 7.4. W pomiarach liniowych maksymalna wartość temperatury jest oznaczona czerwoną strzałką, a minimalna wartość temperatury niebieską strzałką.



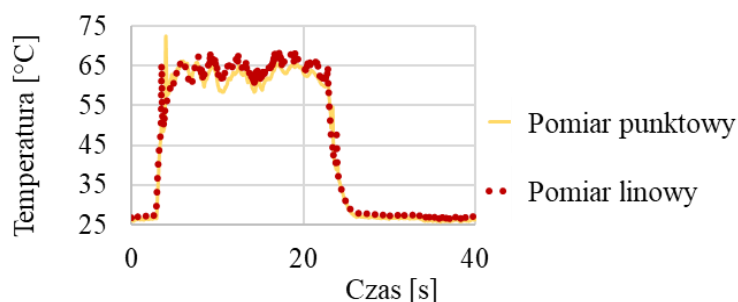
Rysunek 7.4. Metodyka pomiarów termograficznych

Podczas omawianego badania zmierzono przemieszczenie oraz siłę wynikającą z przemiany fazowej cienkich drutów ze stopu NiTi. Dodatkowo przeprowadzono bezdotkowy pomiar temperatury próbki testowej w trakcie przemiany. Temperatura otoczenia w trakcie pomiarów pozostawała w przedziale od 21 do 22 °C, oscylacja jej wartości była niewielka. Nie miała istotnego wpływu na przeprowadzone pomiary.

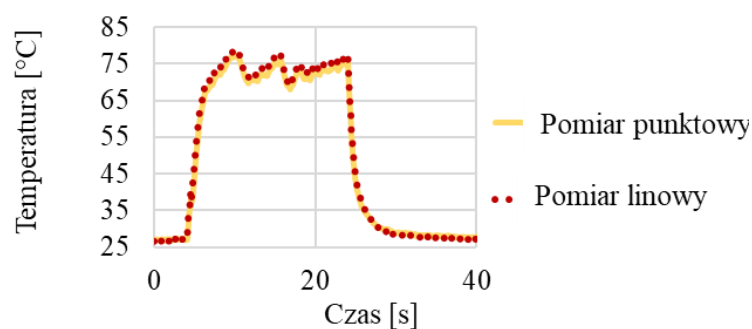
7.1.2 Rezultaty

Przebieg wartości temperatury próbki w trakcie badania dotyczący obu próbek przedstawiono na rysunku 7.5. Średnia wartość temperatury przy każdym kolejnym pomiarze spadała ze względu na mniejszą wartość prądu grzania. Czas narostu temperatury do wartości szczytowej danego pomiaru oraz czas spadku temperatury ulega jedynie niewielkim zmianom przy kolejnych pomiarach. W większości pomiarów różnica wartości między pomiarem

liniowym a punktowym była bardzo niewielka. Jednak w niektórych pomiarach wartość ta jest znacząco różna oraz obserwowane są nagłe skoki wartości temperatury.



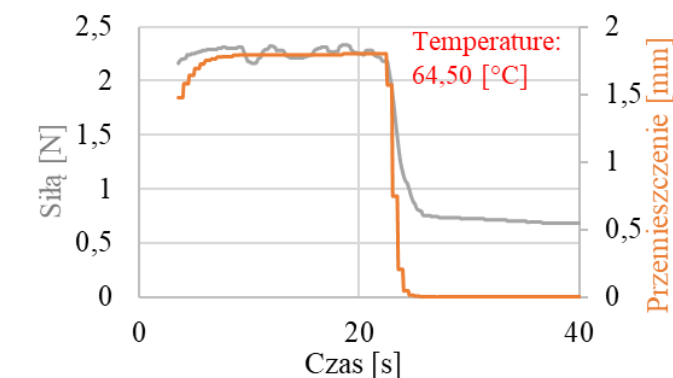
(a)



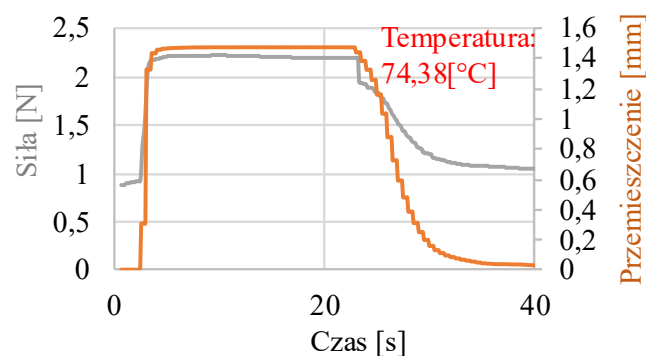
(b)

Rysunek 7.5. Przebieg temperatury próbki w trakcie grzania prądem nominalnym próbek o średnicy: a) 100 μm b) 150 μm

Na rysunku 7.6 przedstawiono przebiegi czasowe wartości przemieszczenia oraz siły wygenerowanej przez drut NiTi dotyczących dwóch średnic oraz nominalnego prądu grzania. Na wykresach przedstawiono również średnią temperaturę próbki po przemianie w odniesieniu do odpowiedniego pomiaru. Obserwowana jest zależność wygenerowanej siły oraz uzyskanego przemieszczenia od prądu grzania. Wraz ze spadkiem wartości prądu grzania spada wartość wygenerowanej siły oraz zmiany wydłużania. Początkowo spadek tych wartości mimo zmniejszania prądu grzania jest niewielki, jednak w miarę zbliżania się jego wartości do połowy prądu nominalnego tempo spadku wyraźnie przyspiesza. Uzyskana wartość przemieszczenia próbki jest stabilna w większości pomiarów. Wyjątek stanowią pomiary dotyczące prądów grzania zbliżonych do wartości połowy prądu znamionowego dla danej próbki. W próbce o średnicy 150 μm obserwowana jest duża stabilność wartości siły przy wysokich prądach grzania. Natomiast wraz ze spadkiem wartości prądu grzania spada też stabilność wartości siły. Efekt tego nie zauważa się w próbce o średnicy 100 μm , w której wygenerowana siła jest niestabilna w całym zakresie przemiany.



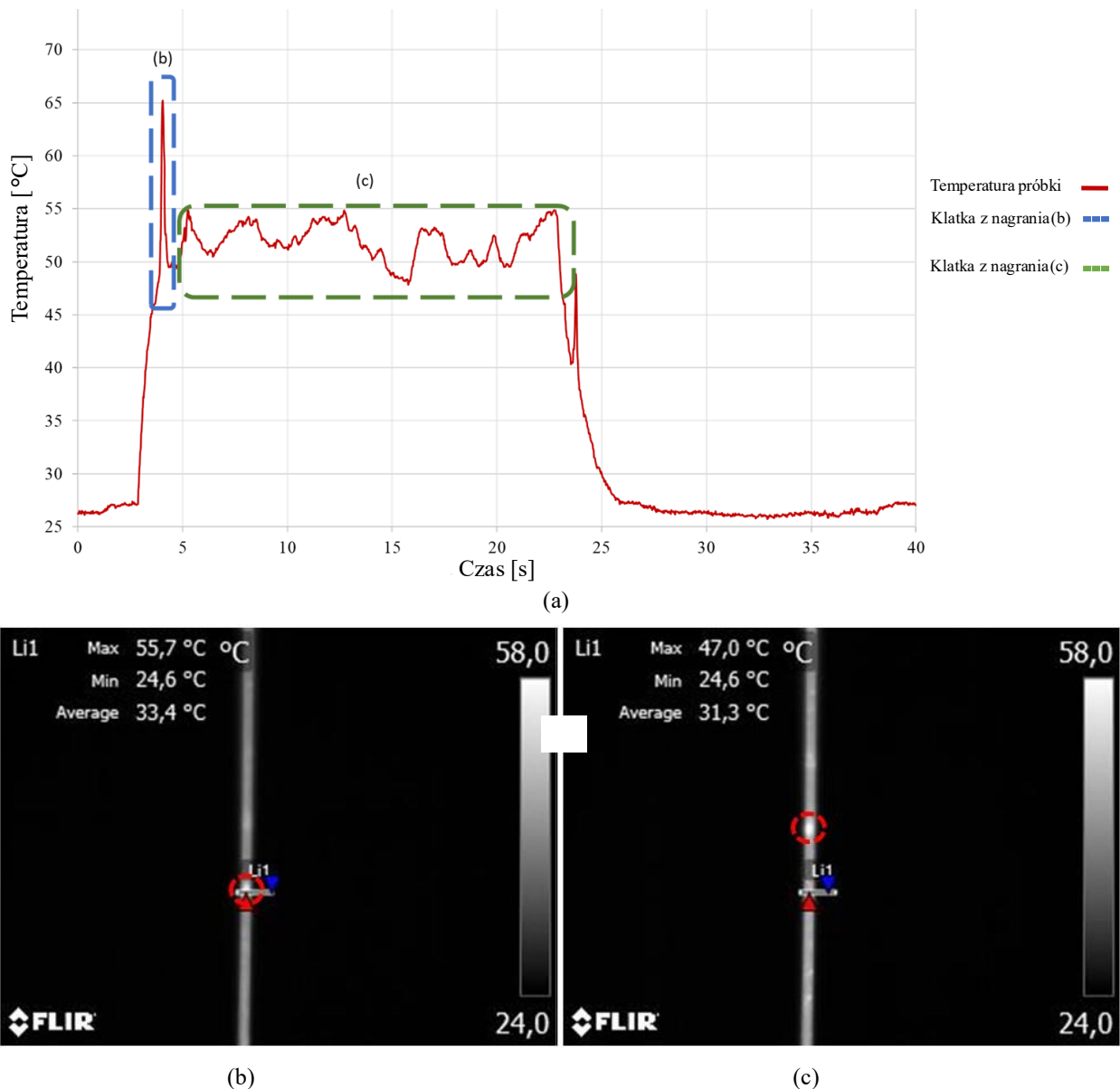
(a)



(b)

Rysunek 7.6. Przebieg wygenerowanej siły oraz przemieszczenia dotyczącego pomiaru z nominalną wartością prądu grzania próbek o średnicy: a) 100 μm b) 150 μm

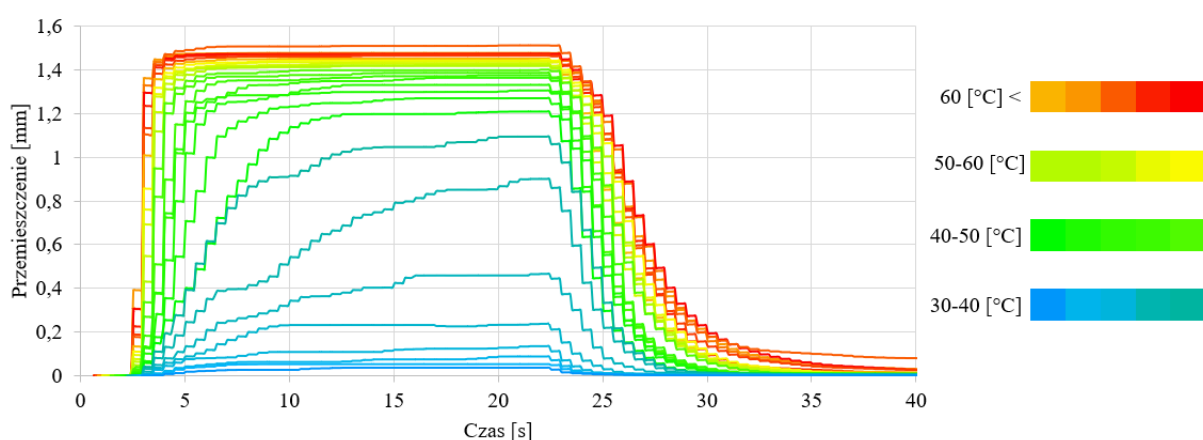
Podczas niektórych termograficznych pomiarów temperatury drutów ze stopów NiTi w czasie przemiany fazowej zaobserwowano nagłe zmiany wartości temperatury. W tych samych seriach pomiarowych zaobserwowano również znaczące różnice w uzyskanych wartościach temperatury z zastosowaniem różnych metod. Zjawisko to wynika z niejednorodności powierzchni próbek badawczych. Niejednorodność powierzchni próbki objawia się wysokimi różnicami w emitowanym widmie promieniowania cieplnego niektórych fragmentów powierzchni. Podczas skurczu próbki testowej wywołanego SME obszary niejednorodności zmieniały swoją pozycję względem obiektywu kamery. W niektórych przypadkach obszar niejednorodności nachodził na punkt pomiarowy. Wywoływało to nagłe skoki temperatur. Efekt ten zobrazowano na rysunku 7.7.



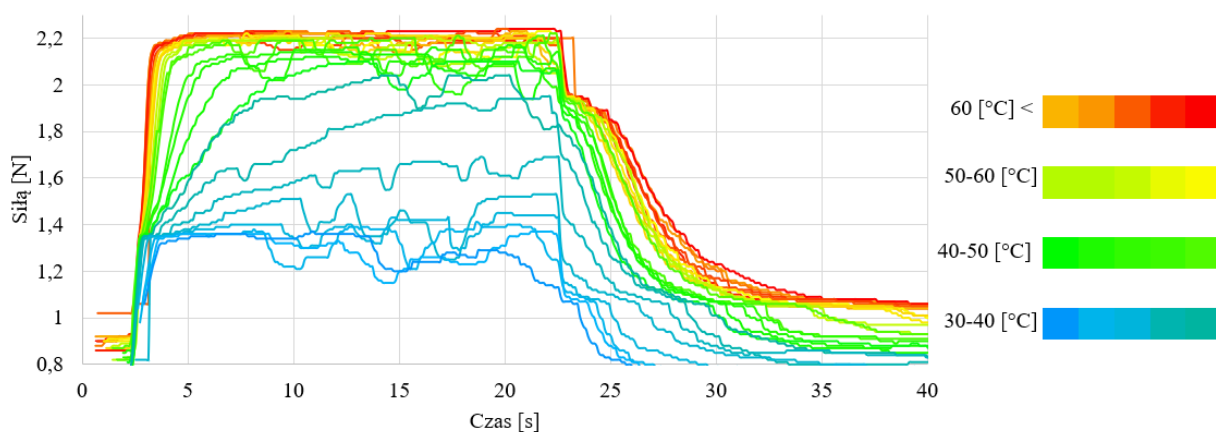
Rysunek 7.7. Wpływ niejednorodności powierzchni na pomiary temperatury. (a) Przebieg temperatury podczas pomiaru z prądem grzania 170 mA, (b) kadr z kamery termowizyjnej podczas pomiaru z prądem grzania 170 mA, przedstawiający niejednorodność powierzchni w obszarze pomiaru, (c) kadr z kamery termowizyjnej podczas pomiaru z prądem grzania 170 mA, przedstawiający niejednorodność powierzchni poza obszarem pomiaru

W niektórych seriach pomiarowych obszary niejednorodności pozostawały w jednym z punktów pomiaru temperatury wywołując znaczące różnice pomiędzy zmierzonymi wartościami. Zaobserwowano iż stopień niejednorodności powierzchni drutów o mniejszej średnicy (100 μm) jest znacznie większy. Wynika to z większej podatności cienkich drutów na uszkodzenia mechaniczne.

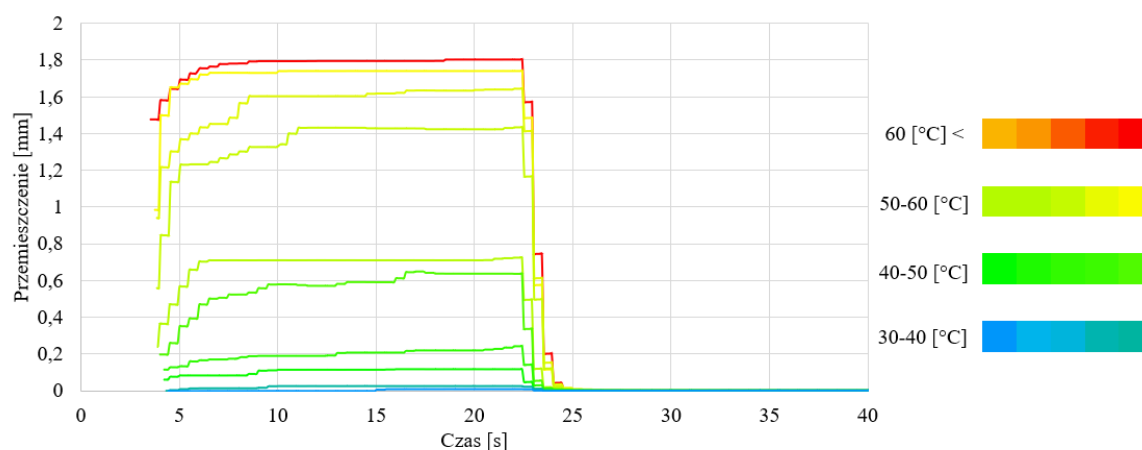
Średnia wartość wygenerowanej przez próbkę siły oraz uzyskanego przemieszczenia wynikającego z efektu pamięci kształtu zależna jest od prądu grzania. Spadek wartości siły oraz przemieszczenia początkowo są niewielkie. Szybkość tego spadku wzrasta wraz ze zbliżaniem się wartości prądu grzania do połowy wartości prądu znamionowego. Spowodowane jest to mniejszą wartością średniej temperatury próbki przy mniejszych prądach grzania. Przebiegi czasowe w trakcie pomiarów w zależności od temperatury próbki przedstawiono na rysunku 7.8 i rysunku 7.9 w odniesieniu do próbki o średnicy 150 μm oraz na rysunku 7.10 i rysunku 7.11 w odniesieniu do próbki o średnicy 100 μm .



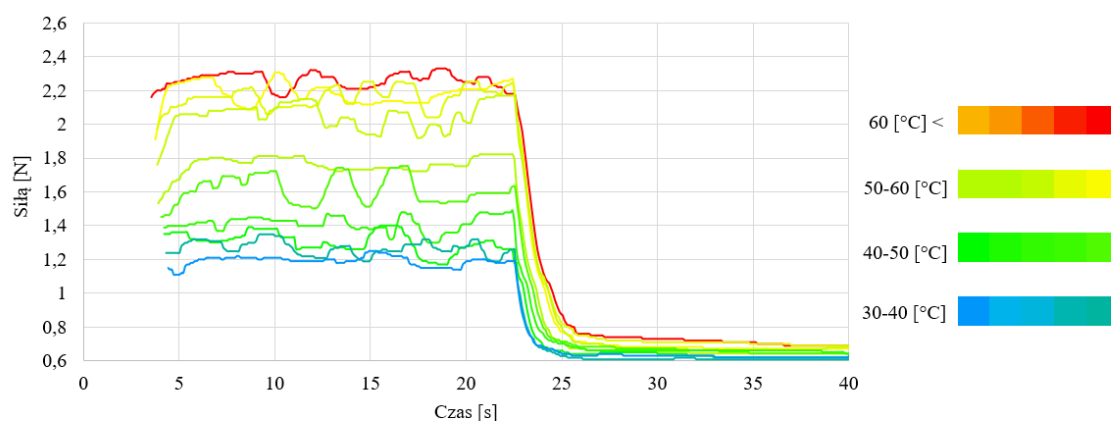
Rysunek 7.8. Przebieg czasowy przemieszczenia wygenerowanego przez próbkę w zależności od temperatury (średnica próbki 150 μm)



Rysunek 7.9. Przebieg czasowy siły wygenerowanego przez próbkę w zależności od temperatury (średnica próbki 150 μm)



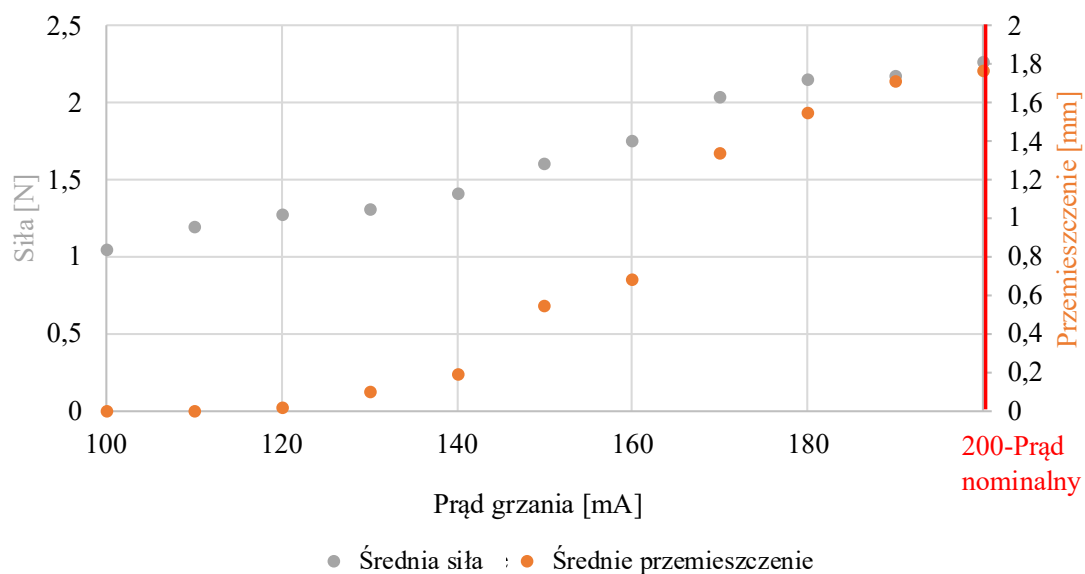
Rysunek 7.10. Przebieg czasowy przemieszczenia wygenerowanego przez próbkę w zależności od temperatury (średnica próbki 100 μ m)



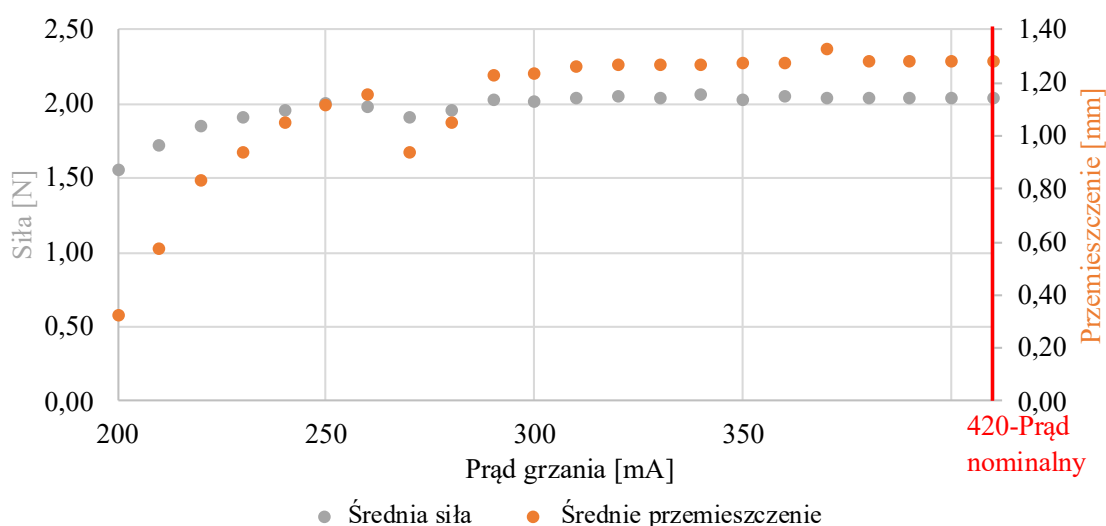
Rysunek 7.11. Przebieg czasowy siły wygenerowanego przez próbkę w zależności od temperatury (średnica próbki 100 μ m)

7.1.3 Analiza wyników i dyskusja

Przy mniejszych temperaturach nie następuje pełna przemiana fazowa próbki i dlatego nie uzyskiwany jest pełen powrotu do początkowej długości. W układzie szeregowym ze sprężyną zmniejsza się wartość generowanej siły. Średnie wartości siły i przemieszczenia podczas procesu grzania w zależności od prądu grzania przedstawiono na rysunkach 7.12 i 7.13.



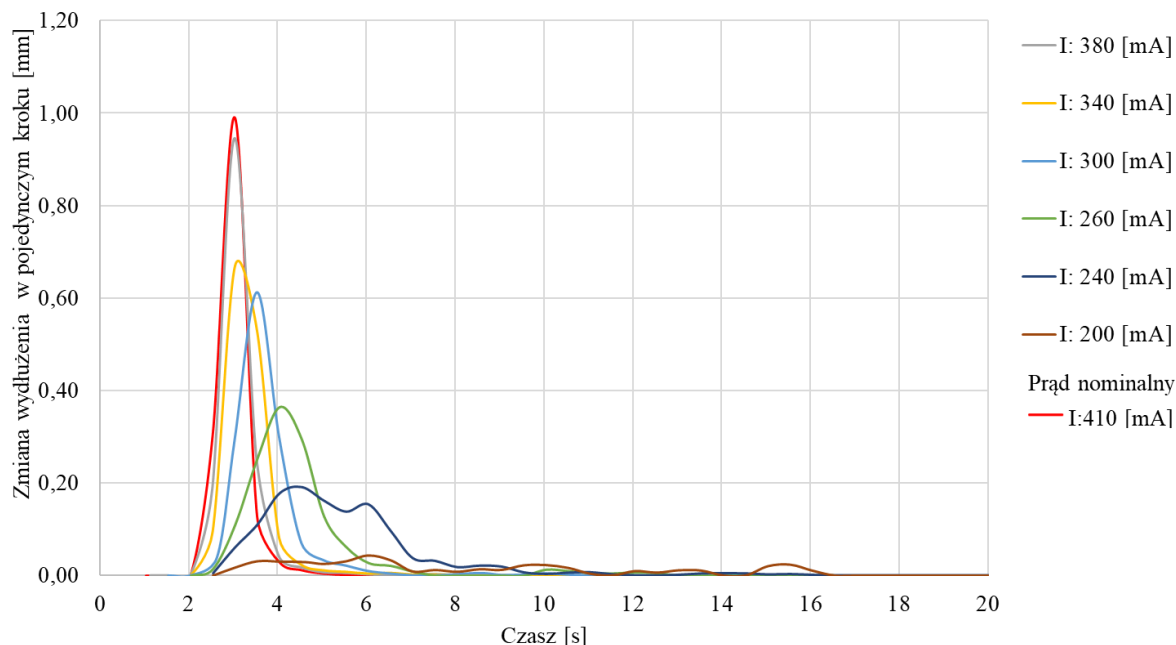
Rysunek 7.12. Zależność siły i przemieszczenia od prądu grzania (średnica próbki, 100 μm)



Rysunek 7.13. Zależność siły i przemieszczenia od prądu grzania (średnica próbki 150 μm)

Istotna zmiana wartości wygenerowanej siły przez próbkę oraz zmiany jej wydłużenia jest obserwowalna tylko w niewielkim przedziale prądów grzania. Uzyskana w przypadku niepełnej przemiany fazowej wartość przemieszczenia próbki jest mniej stabilna, a jej stabilność spada wraz z temperaturą próbki. Zjawisko to zaobserwowano również odnośnie do siły wygenerowanej przez próbkę. Jednak wartości siły dotycząca próbki o średnicy 100 μm cechują się zauważalnymi wahaniami w całym zakresie prądów grzania. Zjawisko to związane jest z wydłużeniem się czasu potrzebnego na przemianę przy niższych wartościach prądu grzania. Dłuższy czas aktywacji sprawia, że na uzyskane wartości większy wpływ mają zakłócenia zewnętrzne (w analizowanym zagadnieniu są to niewielkie fluktuacje temperatury otoczenia

oraz ruchy powietrza) ze względu na dłuższy czas potrzebny do ich skompensowania przez układ. Zmianę czasu aktywacji można ocenić na podstawie szybkości, z jaką układ uzyskuje maksymalne przemieszczenie przy danym prądzie grzania. Wartość zmiany wydłużenia okresami próbkowania odnośnie do drutu o średnicy 150 μm przy różnych prądach grzania przedstawiono na rysunku 7.14.



Rysunek 7.14. Zmiana wydłużenia w czasie pomiędzy okresami próbkowania odnośnie do drutu o średnicy 150 μm przy różnych prądach grzewczych

Czasy aktywacji próbki wydłużają się wraz ze spadkiem wartości prądu grzania tylko w odniesieniu do wartości prądów grzania mniejszych od prądu nominalnego. Czas ten wydłuża się pomimo faktu, iż przy niepełnej przemianie maksymalna zmiana wydłużenia próbki jest mniejsza. Czas aktywacji pozostaje jednak praktycznie taki sam wobec prądów grzania niewiele mniejszych od prądu nominalnego. Czas aktywacji wydłuża się dopiero przy o 10% mniejszym prądzie grzania i zaczyna znacząco się wydłużać wraz z dalszym spadkiem prądu grzania. Przy wartościach prądów grzania zbliżonych do połowy prądu nominalnego nie obserwowana jest pełna przemiana materiału a drut generuje jedynie drobne oscylacje.

7.1.4 Podsumowanie

Badania cienkich drutów ze stopu NiTi pracujących w układzie szeregowym ze sprężyną pozwoliły określić zmiany właściwości mechanicznych w trakcie przemiany oraz przy niepełnej przemianie martenzytu w austenit. Wykazano zależność zmiany wydłużenia drutu oraz generowanej przez niego siły od prądu grzania. Wykazano, że wraz ze spadkiem wartości

prądu grzania poniżej wartości prądu nominalnego oraz temperatury spada uzyskane skrócenie próbki oraz wygenerowana przez próbkę siła. Istotna zmiana generowanych przez próbkę wartości obserwowana jest tylko w bardzo wąskim zakresie prądów grzania. Wraz ze spadkiem prądu grzania spada też dynamika przemiany, co wiąże się z wydłużeniem czasu aktywacji drutu. Obniżenie dynamiki przemiany prowadzi do oscylacji generowanego przez próbkę przemieszczenia oraz siły wynikającej ze zwiększonego czasu kompensacji zakłóceń. W trakcie pomiarów zaobserwowano również większą podatność drutów o średnicy 100 μm na zakłócenia związane z wpływem temperatury otoczenia. Dodatkowo w czasie przeprowadzonych pomiarów termograficznych zaobserwowano obszary niejednorodności na powierzchni drutów ze stopu NiTi. Większy stopień niejednorodności był obserwowany dla drutów o mniejszej średnicy ze względu na jego większą podatność na uszkodzenia mechaniczne.

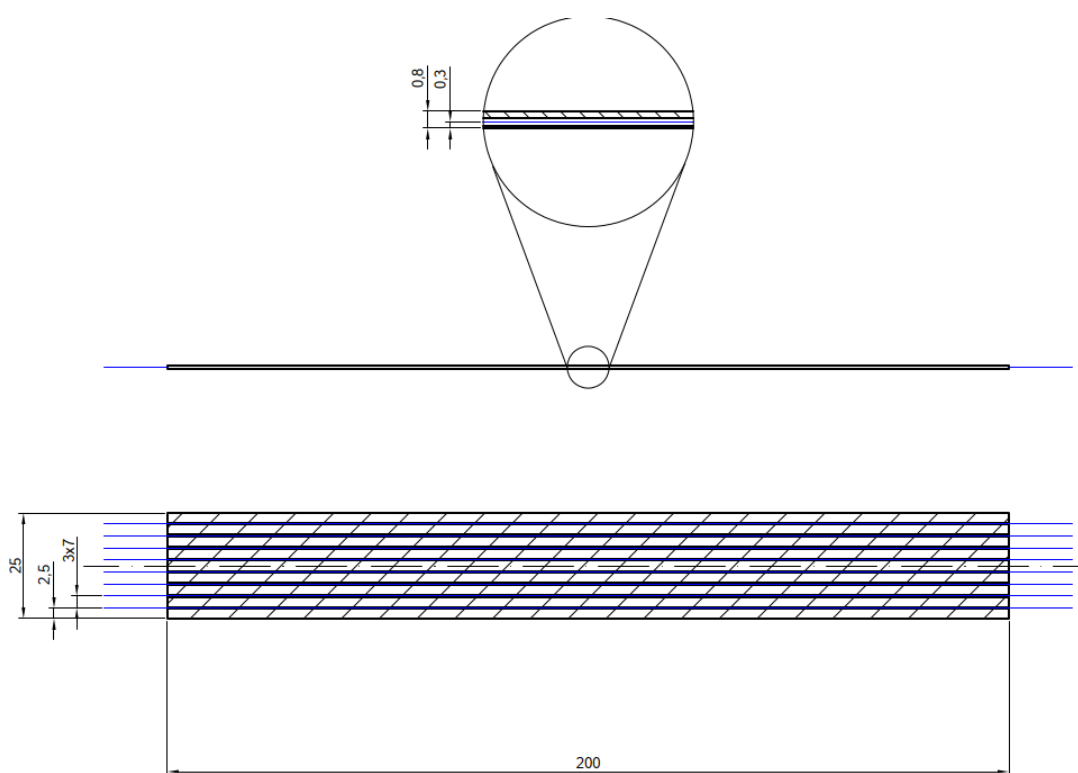
7.2 Badanie aktuatora na bazie drutu ze stopu NiTi w osnowie z PLA

Po opracowaniu kompozytowych próbek o osnowie z PLA oraz z zatopionym drutem ze stopu NiTi podjęto próbę wykonania kompozytu wykorzystującego efekt pamięci kształtu i mogącego pełnić rolę aktuatora wykonanego w sposób analogiczny do poprzednich próbek. Docelowo tak opracowany kompozyt na podstawie zmiany rezystancji elektrycznej mógłby wykrywać odkształcenie struktury kompozytowej i dążyć do jej kompensacji, wykorzystując efekt pamięci kształtu. Opracowanie takich próbek wymagało wprowadzenia modyfikacji w procesie ich przygotowania (patrz podrozdział 6.2.1) tak, aby zmaksymalizować wydajność tej struktury pod względem pracy w roli aktuatora. Wyniki tego eksperymentu pozwoliły na dokonanie walidacji skalibrowanego w niniejszej pracy modelu materiałowego stopu NiTi. W badaniu wykorzystano też dwie średnice drutów ze stopu NiTi, aby potwierdzić, że efekt jest skalowalny i kompozyt tego typu może być projektowany pod pracę przy różnych obciążeniach. Ponadto w badaniu wykorzystano oprogramowanie TEMA pozwalające na analizę ruchu w zarejestrowanym obrazie w celu zaproponowania innej metody badania aktywnych kompozytów wzmacnianych drutami ze stopów NiTi.

7.2.1 Metodyka

W opisanym badaniu wykorzystano większość założeń dotyczących wykonywania próbek kompozytowych opisanych w podrozdziale 6.2.1. Wyjątkiem są przede wszystkim gabaryty próbki oraz sposób prowadzenia drutu ze stopu NiTi. Wynika to z faktu, iż drut gięty we wnętrzu osnowy zmienia swoją długość w niekontrolowany sposób, wywołując uszkodzenie próbki. W konfiguracji optymalnej odnośnie do aktuatora, usunięto zagięcia i poprowadzono

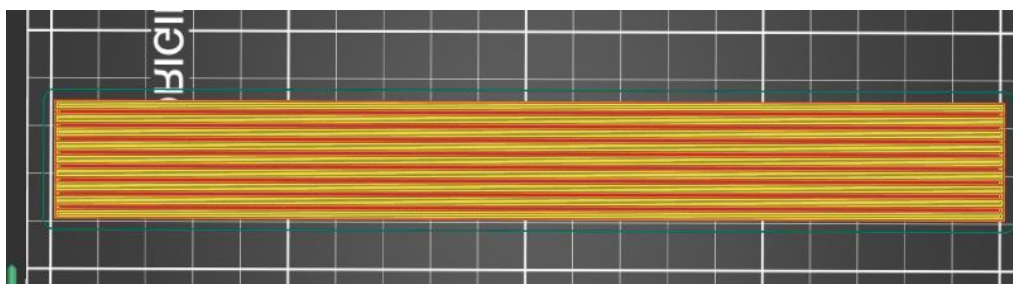
druty równoległe do siebie. Aby uzyskać zamknięty obwód, konieczne jest połączenie drutów na ich końcach wychodzących poza osnowę kompozytu. Jednakże zebranie drutów w jednej tulejce albo połączonych ze sobą elektrycznie wiązałoby się z tym, że prąd z zasilacza DC w większości przepływałby przez drut o najmniejszej rezystancji co realnie prowadziłoby do aktywacji tylko jednego drutu. W związku z powyższym konieczne było połączenie drutów w sposób gwarantujący zamknięty obwód elektryczny, łączący po kolei wszystkie wykorzystane druty ze stopów NiTi. W próbce umieszczono 8 równoległe poprowadzonych drutów. Była to maksymalna liczba, która zmieściła się w próbce o szerokości 25 mm ze względu na ograniczenia wykorzystanej drukarki 3D. Uproszczony schemat opracowanej próbki z oznaczonymi wymiarami przedstawiono na rysunku 7.15.



Rysunek 7.15. Schemat opracowanej próbki przedstawiające jej podstawowe wymiary

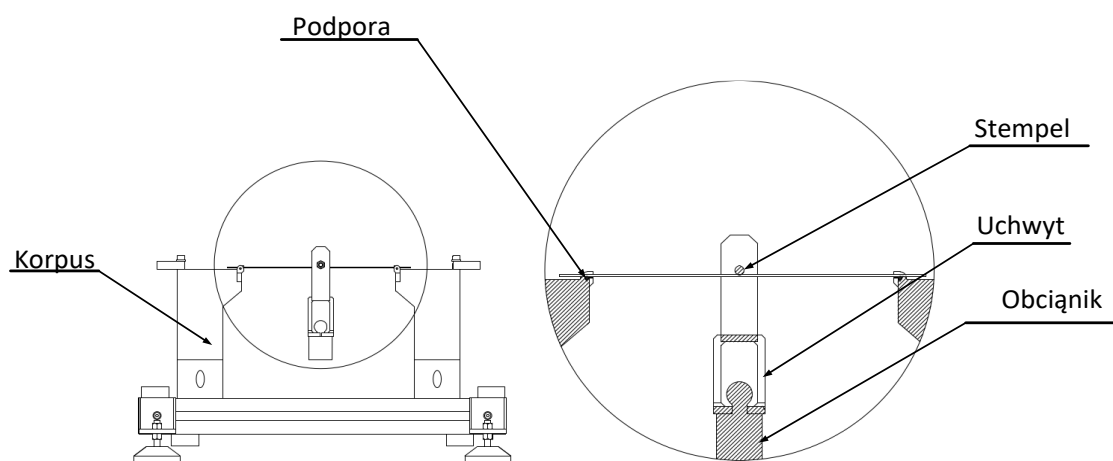
Wymiary próbki są znacząco inne od wymiarów jakie powinna mieć próbka zgodnie z normą dotyczącą oznaczania właściwości przy zginaniu dla tworzyw sztucznych [159]. Ponieważ opisywane badanie eksperymentalne nie ma na celu wyznaczenia właściwości badanego materiału, a jedynie ma dokonać walidacji modelu materiałowego, wobec tego nie ma konieczności trzymania się konkretnych zapisów tej normy (tak jak w przypadku poprzedniego badania z wykorzystaniem kompozytów patrz podrozdział 6.2). W omawianym badaniu zastosowano też inną średnicę drutu 150 μm oraz 375 μm . Pod względem pozostałych

aspektów próbki została wykonana w sposób zgodny z metodą opisaną w podrozdziale 6.2. Również w sposób analogiczny osnowa została wydrukowana za pomocą drukarki 3D. Wizualizacja procesu drukowania próbki została przedstawiona na rysunku 7.16.



Rysunek 7.16. Wizualizacji wydruku rowka pod drut ze stopu NiTi

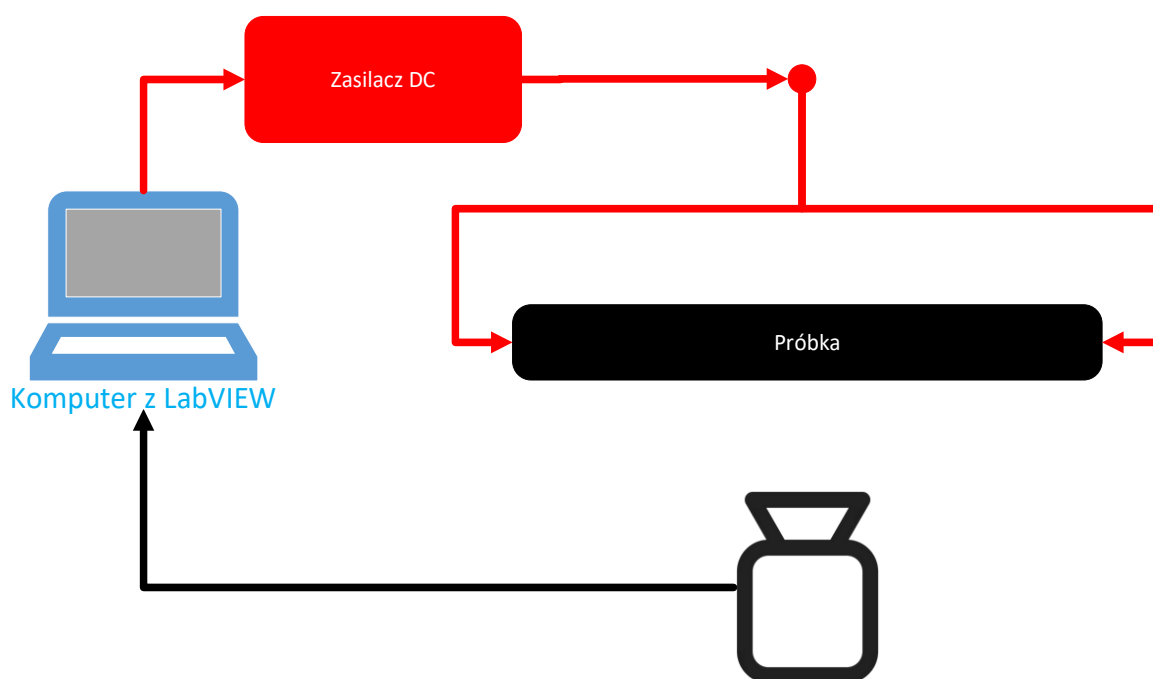
Aby dokonać walidacji modelu numerycznego, przeprowadzono badanie eksperymentalne na specjalnie opracowanym do tego celu uzupełniającym stanowisku badawczym. Ponieważ obciążenie realizowane przez moduł roboczy nie było dla tego badania potrzebne STAV 500/300 nie został w tym przypadku wykorzystany podobnie jak większość modułów pomocniczych. Jedyne aktywny element stanowił tu moduł zasilania przeznaczony do aktywacji próbki. Stanowisko składało się też z podpór do trójpunktowego zginania oraz stempla i obciążnika o stałej masie stanowiącego stałe obciążenie wywołujące odkształcenie struktury kompozytowej. Stanowisko opracowane na potrzeby opisywanego badania przedstawiono na rysunku 7.17.



Rysunek 7.17. Uproszczony schemat stanowiska pomiarowego

Układ pomiarowy przeznaczony do badań jest też znacznie prostszy względem pozostałych układów pomiarowych omawianych w niniejszej pracy. Podstawowym elementem jest zasilacz DC, wspomniany już w tym rozdziale, przeznaczony do aktywacji próbki, co umożliwia

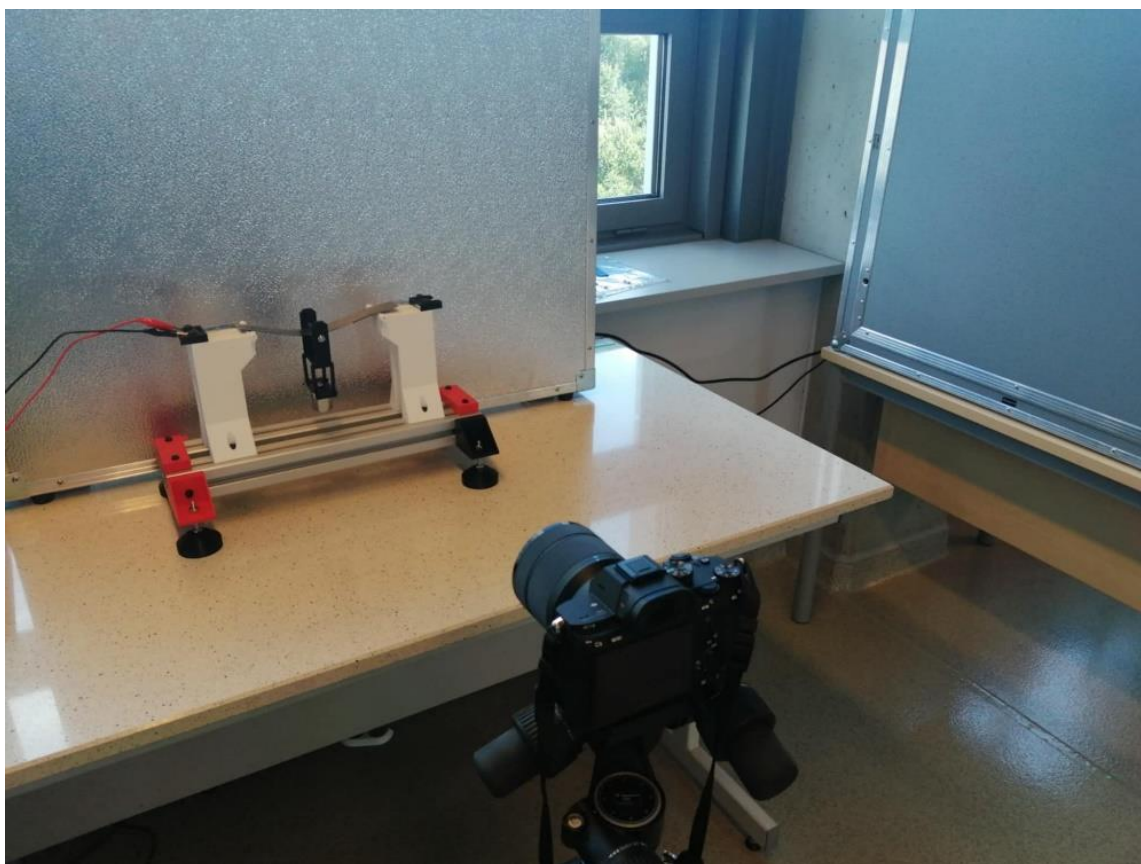
wywołanie efektu pamięci kształtu w drucie umieszczonym wewnątrz osnowy. Ostatecznie będzie to prowadziło do kompensacji odkształcenia układu wynikającego ze stałego obciążenia. Ostatni element stanowiła kamera SONY A7, pozwalająca na zarejestrowanie zmiany kształtu próbki w trakcie jej aktywacji. Z wykorzystaniem oprogramowania TEMA CLASSIC (Image Systems AB (HQ) Snickaregatan 40 SE-582 26 Linköping, Szwecja) możliwe było także późniejsze odczytanie konkretnej wartości pomieszczenia stempla. Wykorzystano tylko jeden moduł stanowiący element głównego stanowiska badawczego i był to moduł aktywacji. Uproszczony schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 7.18.



Rysunek 7.18. Uproszczony schemat elektryczny oraz komunikacji urządzeń wchodzący w skład układu pomiarowego

Próbka po przygotowaniu została zamocowana na stanowisku pomiarowym w taki sposób, aby środek próbki znajdował się w równej odległości od obu podpór. Następnie uchwyty zamocowane na końcach drutów przykręcono do stanowiska tak, aby po obciążeniu próbki także przenosiły obciążenie. Na zamocowaną w ten sposób próbkę założono stały obciążnik o ciężarze 1,35 [N] (wartość stanowi ciężar obciążnika, uchwytu, stempla oraz elementów mocujących), wywołujący ugięcie próbki. Masa obciążnika została dobrana na podstawie

wstępnych testów wykonanych na stanowisku. Próbkę zamocowaną na stanowisku pomiarowym przed rozpoczęciem pomiaru przedstawiono na rysunku 7.19.

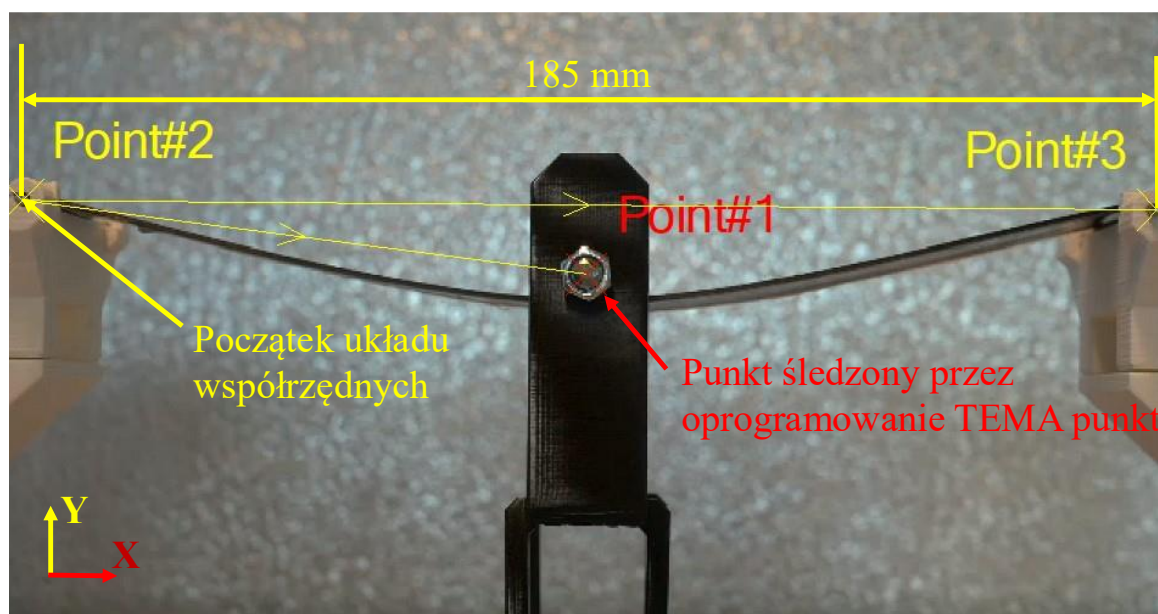


Rysunek 7.19. Stanowisko pomiarowe

Właściwa procedura pomiarowa rozpoczynała się od aktywacji drutów zatopionych w osnowie z wykorzystaniem grzania prądem elektrycznym w na podstawie prawa Joule'a–Lenza. Grzanie było realizowane z wykorzystaniem prądu nominalnego wobec wykorzystanej średnicy drutu i wynosiło 0,410 A dla drutu o średnicy 150 μm oraz 2.2A dla średnicy 375 μm [42]. W momencie aktywacji drutów rozpoczynała się też rejestracja danych pomiarowych oraz wyzwalane było nagrywanie zachowania próbki z wykorzystaniem aparatu cyfrowego SONY A7.

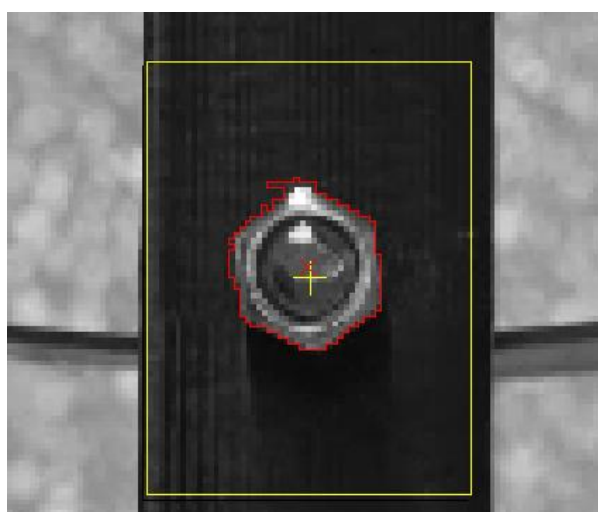
Z wykorzystaniem oprogramowania TEMA śledzono ruch centralnej części stempla, ponieważ przemieszczenie tego elementu bezpośrednio wynikało ze zmiany kształtu próbki. Zastosowane oprogramowanie wymagało odczytania z nagrania stałej wielkości, która następnie umożliwia analizę przemieszczenia komponentów w każdej kolejnej klatce. W badaniu wykorzystano rozstaw pomiędzy podporami, ponieważ była to precyzyjnie ustalona odległość która wynosiła 185 [mm]. Wartość ta została dobrana do gabarytów próbki

wynikających z zastosowania drukarki 3D. Ponadto same podpory znajdowały się w płaszczyźnie, w której znajdował się też koniec wału stempla, co niwelowało niedokładność pomiarów. W miejscu przymocowania jednej z podpór ustalono pozycję początku układu współrzędnych, wykorzystaną w późniejszej analizie przemieszczenia. Na rysunku 7.20 przedstawiono odległość pomiędzy podporami oraz pozycję śledzonego punktu.



Rysunek 7.20. Metodyka rejestracji przemieszczenia próbki

Pozycję punktu środkowego stempla w oprogramowaniu TEMA ustalano dynamicznie w trakcie nagrania z wykorzystaniem algorytmu progowania obrazu. Metodę wykrywania pozycji stempla przedstawiono na rysunku 7.21.

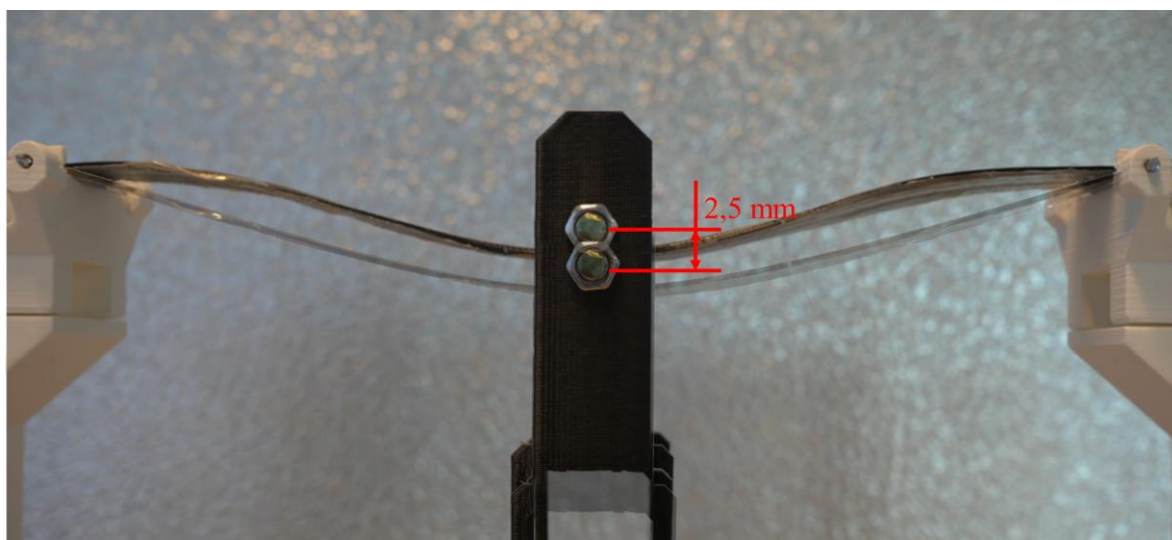


Rysunek 7.21. Ustalenie punktu środkowego na podstawie algorytmu progowania w oprogramowaniu TEMA

Punkty, w których zlokalizowane były podpory, nie przemieszczały się podczas pomiarów i zostały wykryte automatycznie przez oprogramowanie. Wartość przemieszczenia centralnej części próbki została ustalona poprzez odjęcie od zmierzonego przemieszczenia stempla połowy jego średnicy oraz grubości próbki.

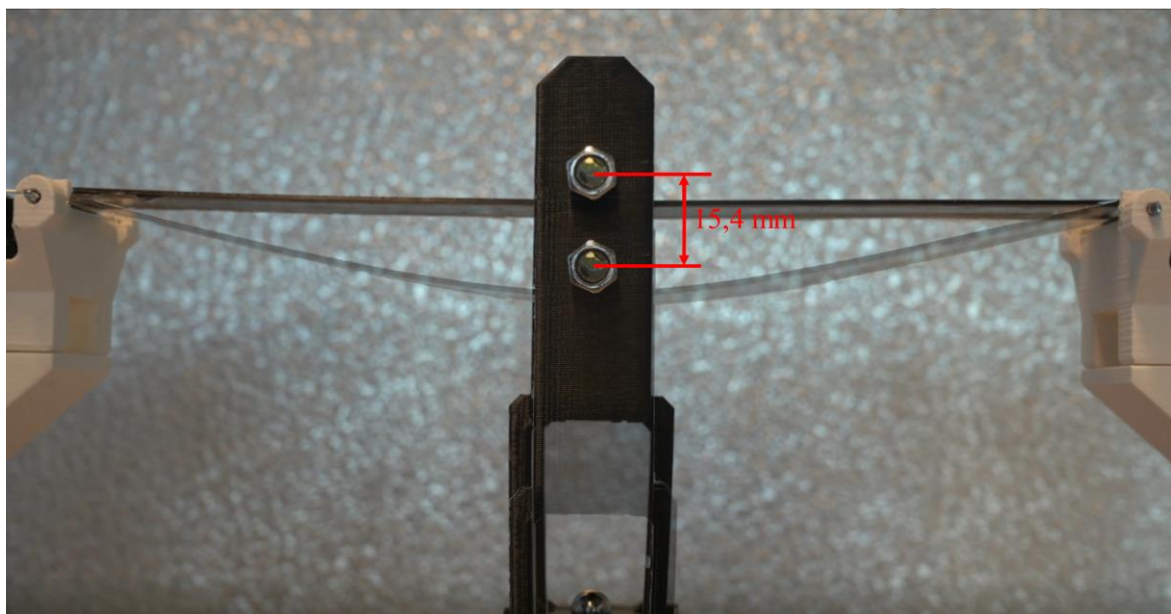
7.2.2 Rezultaty i dyskusja

Wyznaczono wartość kompensacji przemieszczenia możliwego do uzyskania przez próbkę kompozytową o osnowie z PLA wraz z zatopionym drutem ze stopu NiTi. Wskutek obciążenia próbki z drutem o średnicy 150 μm stemplem uzyskano przemieszczenie się centralnej części próbki o wartość 16 mm. Po aktywacji drutu udało się częściowo skompensować uzyskane ugięcie, osiągając wartość 13,5 mm. W ramach eksperymentu zarejestrowano więc kompensację przemieszczenia o 2,5 mm, co oznacza kompensację o około 16%. Na rysunku 7.22 przedstawiono klatki nagrania przed i po aktywacji próbki.



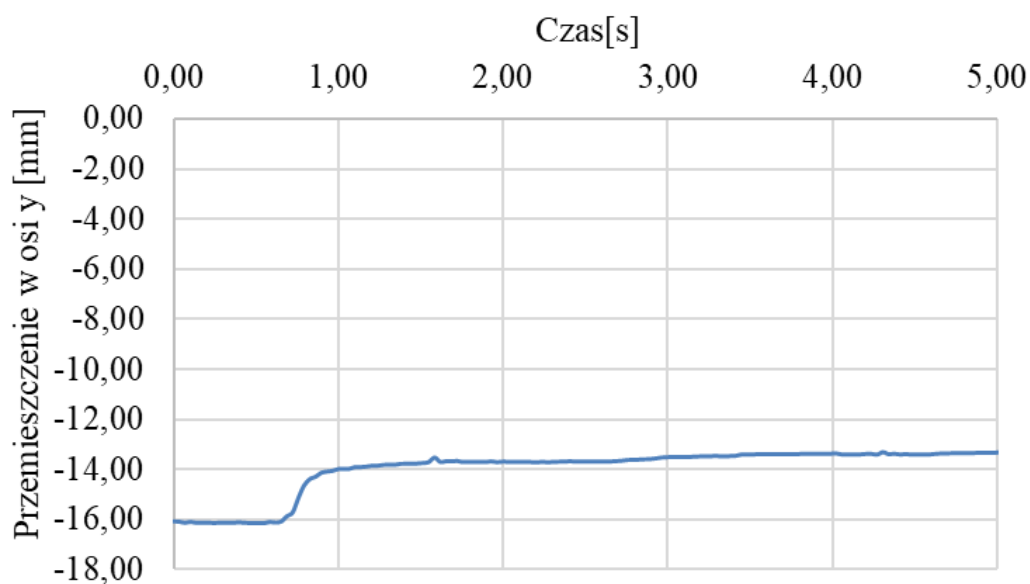
Rysunek 7.22. Nałożone na siebie klatki z nagrania dla dwóch skrajnych pozycji dla próbki wzmocnionej drutem 150 μm

Odnosnie do próbki wzmocnionej drutem ze stopu NiTi o średnicy 375 μm uzyskano mniejsze przemieszczenie początkowe, wynoszące 15,4 mm. Po aktywacji próbki uzyskano znacznie większą kompensację przemieszczenia, bo w tym przypadku osiągnięto wartość 0 mm, co oznacza 100% kompensacji. Na rysunku 7.23 przedstawiono klatki nagrania przed i po aktywacji próbki.

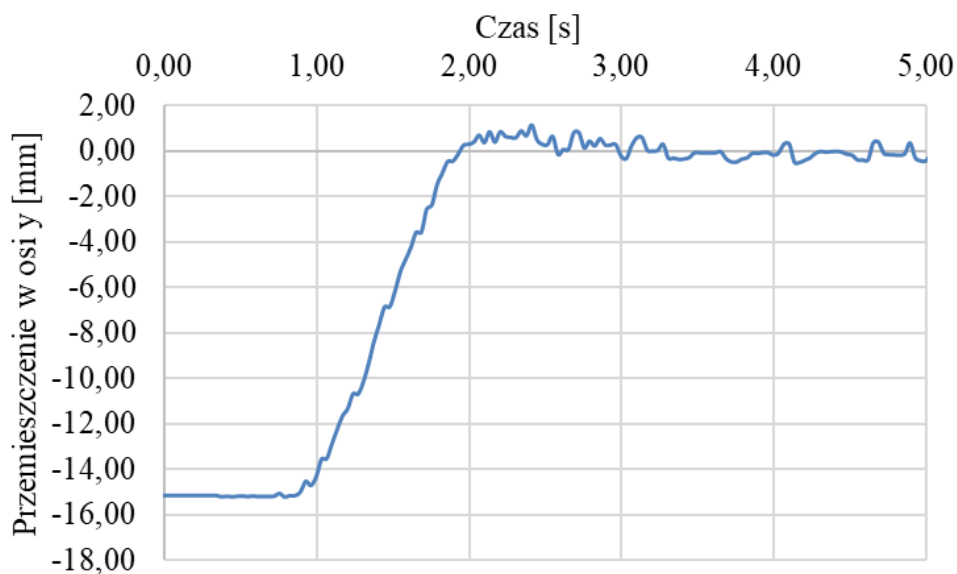


Rysunek 7.23. Nałożone na siebie klatki z nagrania w odniesieniu do dwóch skrajnych pozycji próbki wzmocnionej drutem 375 μm

Zastosowane oprogramowanie pozwoliło też na śledzenie pozycji stępa, umożliwiając wygenerowanie przebiegu przemieszczenia w osi Y (przemieszczenie w tej osi było mierzone w badaniu). Na rysunku 7.24 i 7.25 przedstawiono przebiegi przemieszczenia w osi Y odpowiednio odnośnie do próbek wzmocnionych drutem o średnicy 150 μm oraz o średnicy 375 μm .



Rysunek 7.24. Przebieg przemieszczenia próbki w osi Y wzmocnionej drutem o średnicy 150 μm



Rysunek 7.25. Przebieg przemieszczenia próbki w osi Y wzmocnionej drutem o średnicy 375 μm

Na zarejestrowanych z pomocą oprogramowania TEMA przebiegach widać czas aktywacji kompozytu oraz oscylacje występujące w trakcie pomiarów. Można zaobserwować, że przemiana w drutach w obu przypadkach rozpoczęła się w podobnym czasie (odnośnie do próbki 150 μm było to w około 0,7 s, natomiast próbki 375 μm 0,8 s). Próbka o średnicy 150 μm osiąga końcowy kształt po około 3 s pomiarów natomiast próbka o średnicy 375 μm po 2 s. Wynika to z faktu, iż zastosowane obciążenie jest zbyt duże wobec pierwszej próbki i nie następuje pełna przemiana w austenit, ponieważ w trakcie pomiarów dochodzi do indukowania się martenzytu pod wpływem naprężeń. W próbce o średnicy 375 μm występuje pełna transformacja która cechuje się znacznie większą dynamiką. Z tego wynikają też oscylacje obserwowane przede wszystkim na przebiegu przemieszczenia odnośnie do drugiej próbki. Konieczne jest też, aby zauważyć, że na wartość zarejestrowanych drgań wpływa również błąd pomiarowy, wynikający z nieprawidłowego wykrycia pozycji stępa przez oprogramowanie. Błędy te są jednak minimalne i nie przekraczają 1% wartości mierzonej.

Na rysunku 7.24 widać, że po upływie czasu 3 s w niewielkim stopniu (o 0,2 mm w czasie 2 s) zmienia się przemieszczenie próbki. Wynika to z nagrzewania się PLA i jego uplastyczniania. Pozostawienie próbek na dłuższy czas (około 1 min) w trakcie aktywacji prowadzi do ich zniszczenia z powodu całkowitego uplastycznienia się PLA.

7.2.3 Podsumowanie

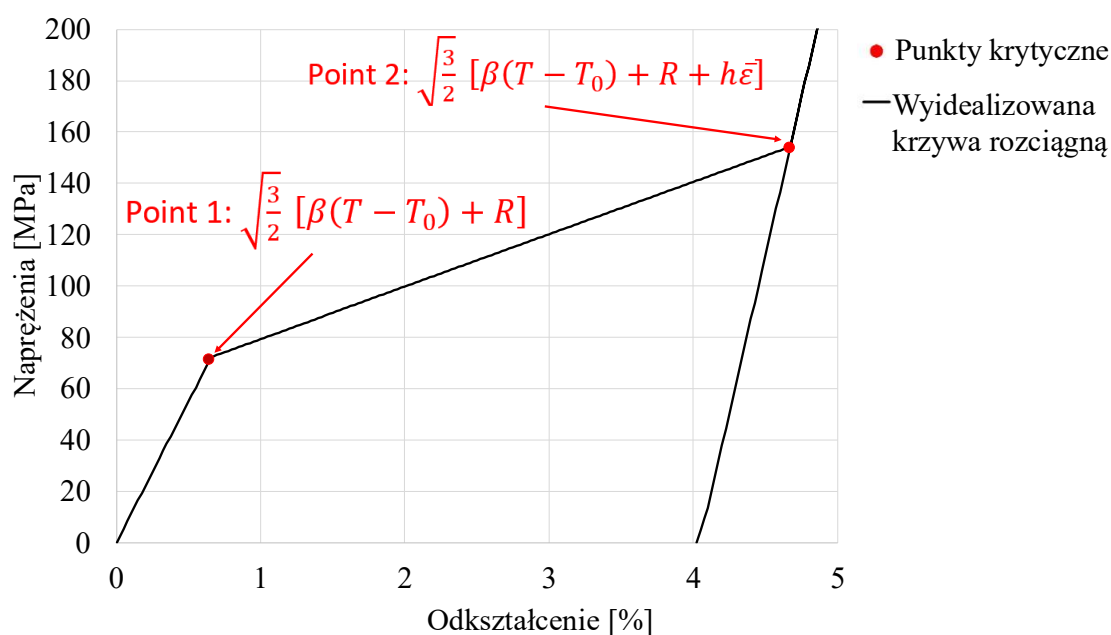
W omawianym badaniu przeprowadzono aktywację próbek kompozytowych o osnowie z PLA z zatopionym wewnątrz drutem ze stopu NiTi. Przede wszystkim w tym badaniu wyznaczono wartość, o jaką zmieniało się przemieszczenie próbki kompozytowej, wywołane stałym obciążeniem przyłożonym do próbki w trakcie aktywacji drutu. Wskutek aktywacji próbki wzmocnionej drutem o średnicy 150 μm nie udało się skompensować całego przemieszczenia, jednakże zmalało ono o wartość 2,5 mm, co stanowi około 16% początkowej wartości przemieszczenia. Analogiczne badanie przeprowadzono odnośnie do próbki wzmocnionej drutami ze stopu NiTi o średnicy 375 μm , uzyskując pełną kompensację przemieszczenia. Potwierdza to fakt, iż taki kompozyt może być łatwo dostosowany do różnych aplikacji poprzez zmianę średnicy drutu. Ponadto uzyskane dane stanowią dobry materiał do przeprowadzenia walidacji modelu numerycznego. Proces walidacji został opisany w podrozdziale 8.4. W ramach badania zaproponowano też metodę testowania aktywnych kompozytów na bazie stopów NiTi z wykorzystaniem optycznej analizy ruchu. Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu można stwierdzić, że zaproponowane rozwiązanie pozwala na łatwy i precyzyjny pomiar przemieszczeń w trakcie aktywacji kompozytu

8 Badania numeryczne drutów ze stopów NiTi

Ze względu na wyjątkowe właściwości stopów NiTi jak SME oraz SE nie jest możliwe wykorzystanie do symulowania tych stopów uniwersalnych modeli materiałowych. Z tego samego powodu istnieje wiele publikacji proponujących nowe modele, które mogą być wykorzystane do odwzorowania efektów SME oraz SE (patrz rozdział 3.1). Celem niniejszej pracy nie jest zaproponowanie nowych metod modelowania. Symulacje numeryczne stanowiły jedynie pomoc w projektowaniu kolejnych próbek oraz elementów testowych. Z tego powodu nie było konieczności tworzenia nowego modelu albo korzystania z zaawansowanych modeli materiałowych NiTi, wykorzystano model udostępniony w ramach komercyjnego oprogramowania. Jednak aby wykonane z pomocą takiego modelu symulacje w odpowiednim stopniu odwzorowywały rzeczywistość, konieczne jest właściwe zdefiniowanie parametrów modelu. W tej kwestii praca mogła opierać się na badaniach przeprowadzonych przez innych autorów. Jednak jak wcześniej wspomniano (patrz podrozdział 3.1), między poszczególnymi artykułami istnieją istotne rozbieżności w zaprezentowanych wynikach badań. Ponadto bardzo duży wpływ na własności NiTi mają metody produkcji. Z tego powodu zdecydowano się na wyznaczenie tych parametrów na podstawie badań eksperymentalnych. W rozdziale tym przedstawiono krótki opis wykorzystanego modelu oraz opisano eksperyment pozwalający na identyfikację jego parametrów.

8.1 Model materiałowy

Omawiany w niniejszej pracy model materiałowy SMA został opracowany na podstawie kilku prac badawczych [142-145]. Jest to model wykorzystywany w środowisku Ansys do symulacji SME oraz efektu SE. Model materiałowy umożliwia symulację efektu pamięci kształtu poprzez odpowiednie odwzorowanie charakterystyki naprężeń do odkształceń. Przykładową wyidealizowaną krzywą rozciągania stosowaną dla tego modelu materiałowego przedstawiono na rysunku 8.1.



Rysunek 8.1 Parametry wykorzystanego modelu materiałowego [142-145].

Parametry modelu materiałowego umożliwiające kalibrację krzywej rozciągania zostały przedstawione w Tabeli 8.1.

Tabela 8.1 Parametry wykorzystanego modelu materiałowego [142-145].

Właściwości modelu materiałowego	Symbol	Jednostka
Parametr utwardzania	h	GPa
Granica elastyczności	R	MPa
Maksymalne odkształcenie transformacji	$\bar{\epsilon}$	$\frac{1}{mm}$
Współczynnik proporcjonalności	β	$\frac{MPa}{^{\circ}C}$
Temperatura odniesienia	T_0	$^{\circ}C$
Temperatura elementu	T	$^{\circ}C$

Powyższe parametry definiują konkretny układ wyidealizowanego odwzorowania krzywej rozciągania stopu NiTi. Poprzez odpowiednie określenie wartości tych parametrów możliwe jest określenie współrzędnych punktów 1 i 2, w rozprawie dla uproszczenia nazwanymi punktami krytycznymi. Punkt pierwszy jest to punkt, w którym następuje utwardzanie

materiału (jest to nomenklatura wykorzystywana w publikacjach opisujących ten model) natomiast punkt drugi oznacza zakończenie utwardzania. Współrzędne tych punktów określone są przez równania przedstawione na rysunku 8.1. Współczynnik h nazwany parametrem utwardzania odnosi się do fragmentu krzywej o niewielkim pochyleniu (między punktami 1 i 2) i w kontekście fizycznym odnosi się do obszaru, w którym następuje reorientacja martenzytu i przy niewielkim wzroście naprężeń znacząco wzrastają odkształcenia. Parametr R nazwany granicą elastyczności wpływa na graniczną wartość naprężeń określających początek reorientacji, za czym idą też współrzędne punktu pierwszego. Maksymalne odkształcenie transformacji oznaczone symbolem $\bar{\epsilon}$ określa natomiast punkt przecięcia krzywej z osią x , wpływając na współrzędne drugiego punktu. Parametr β nazwany współczynnikiem proporcjonalności pozwala na ustalenie stopnia wpływu wzrostu temperatury na pozycję obydwu punktów i wraz ze współczynnikiem T_0 pozwala na ustalenie temperatur: M_S , M_F , A_S , A_F . Najważniejsza jest temperatura T , określona w pracy jako temperatura elementu. Jest to warunek brzegowy definiowany w ramach symulacji, które pozwalają na dynamiczną zmianę własności materiału, co się wiąże z odwzorowaniem efektu SME.

8.2 Eksperymentalne wyznaczenie parametrów modelu materiałowego

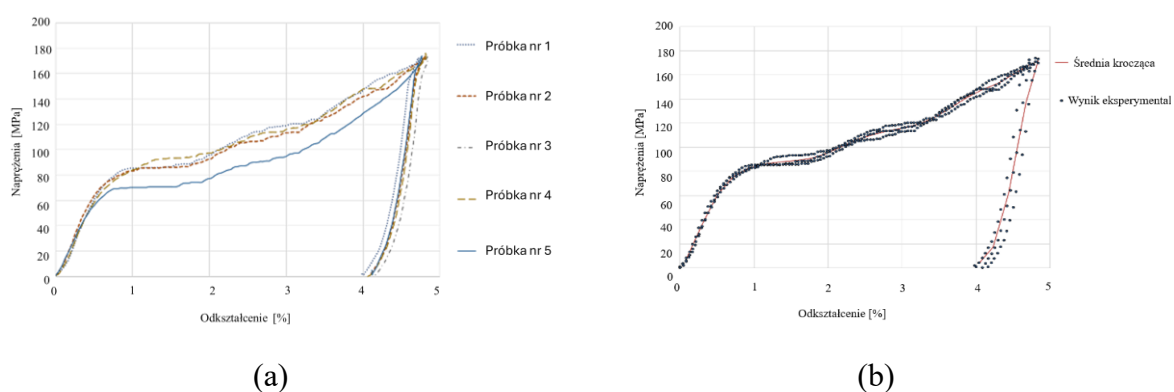
Przed rozpoczęciem badań numerycznych konieczne jest prawidłowe skalibrowanie modelu materiałowego tak, aby przyszłe badania były miarodajne. W literaturze brakuje badań eksperymentalnych określających wymagane właściwości modelu materiałowego wykorzystywanego w niniejszej pracy, które mogłyby zostać zastosowane w analizach numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych (MES).

W celu przeprowadzenia kalibracji modelu materiałowego wyznaczono krzywą rozciągania drutu ze stopu NiTi. Do przeprowadzenia procesu rozciągania wykorzystano podstawową wersję stanowiska pomiarowego (patrz rozdział 5), składającą się z: modułu roboczego oraz siłomierza FB50, pozwalającego na pomiar występujących sił. Próbkami badawczymi były cienkie druty ze stopu NiTi o średnicy 150 μm oraz długości wynoszącej 150 mm. Przed badaniem próbka została zamocowana w odpowiednich uchwytach mających ograniczyć wpływ mocowania na wyniki badania.

Dokonano więc identyfikacji parametrów materiałowych poprzez odwzorowanie doświadczalnie wyznaczonej charakterystyki zależności naprężeń od odkształceń, bazując na wyznaczonych na jej podstawie parametrach modelu. Badania doświadczalne zostały

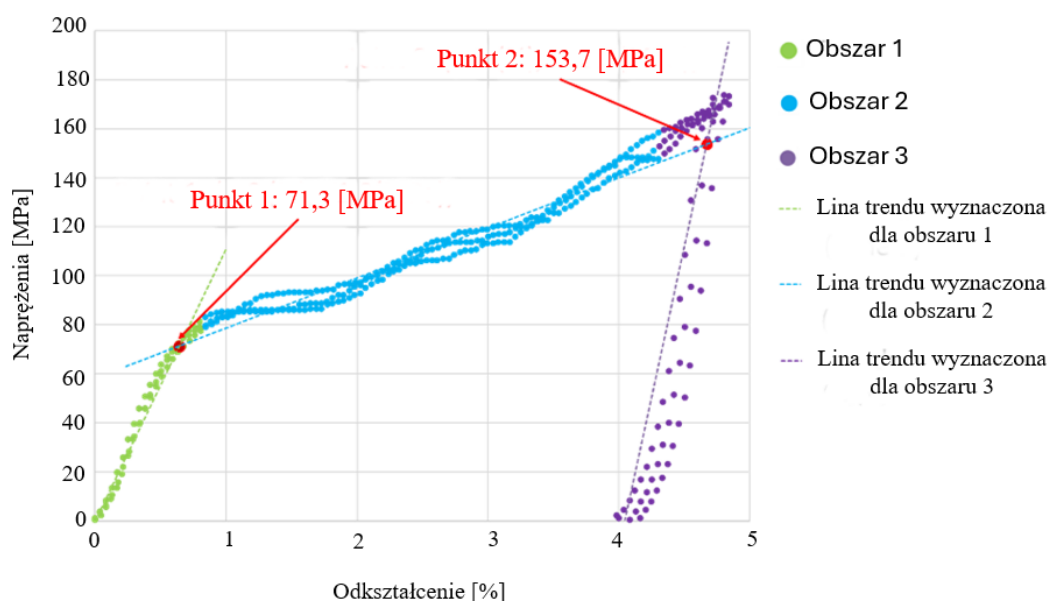
przeprowadzone w temperaturze pokojowej w warunkach stojącego powietrza w niewentylowanym pomieszczeniu.

W trakcie pomiarów doświadczalnych dotyczących pięciu próbek pomiarowych wyznaczono krzywą rozciągania cienkiego drutu ze stopów NiTi. Następnie z wyznaczonej puli odrzucono skrajne przebiegi. Dla nieodrzuconych pomiarów wyznaczony został średni przebieg krzywej rozciągania z wykorzystaniem średniej kroczącej. Wyniki wszystkich pomiarów oraz wartość średniej kroczącej przedstawiono na rysunku 8.2.



Rysunek 8.2. a) Wyniki pomiarów dla poszczególnych prób rozciągania b) Wyniki pomiarów porównane z średnią kroczącą

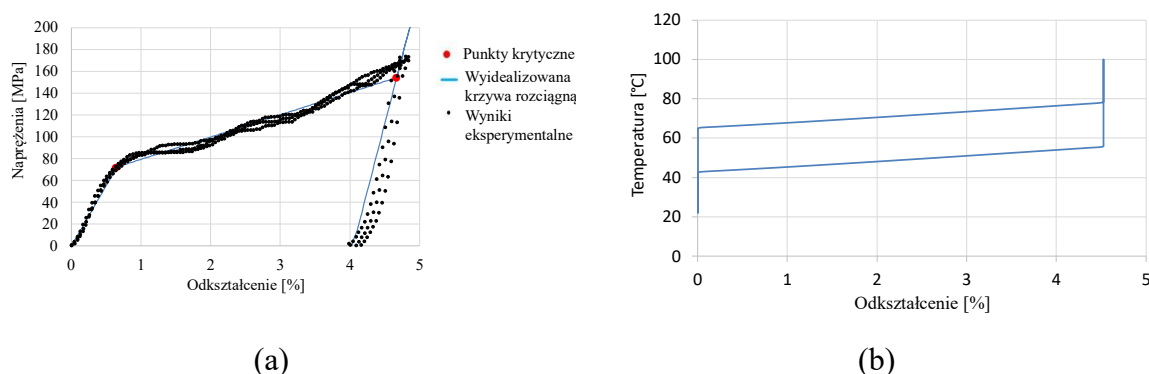
Wyniki kolejnych pomiarów nawet w odniesieniu do odrzuconych przebiegów są do siebie zbliżone i nie odbiegają w znaczącym stopniu od wyznaczonej wartości średniej. Uzyskany przebieg jest też zgodny z przewidywaniami opartymi na wcześniejszych pracach naukowych (patrz rozdział 2 oraz 3). Możliwe jest wyodrębnienie kolejnych obszarów charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej, powiązanych ze zmianami struktury krystalicznej stopu NiTi. W pierwszym obszarze następuje sprężyste rozciąganie martenzytu. Następnie (jak widać na rysunku 8.2b) po przekroczeniu około 0,6% odkształcenia) struktura krystaliczna ulega przemianom z martenzytu do martenzytu zbliźniaczonego, co przejawia się dużym wzrostem odkształceń przy niewielkim wzroście naprężeń. Dalsze odkształcenie próbki wiązało się już całkowicie z rozciąganiem zbliźniaczonego martenzytu aż do osiągnięcia zadanego naprężenia. W ostatnim etapie próbka była odciążana poprzez powrót statywu do położenia początkowego. Podział na poszczególne obszary wraz z wyznaczoną dla nich regresją liniową przedstawiono na rysunku 8.3.



Rysunek 8.3. Wynik rozciągania drutu NiTi wraz z liniami trendu wyznaczonymi dla każdego etapu obciążenia

Punkty przecięcia się linii trendu określają wartości niezbędne do wyznaczenia parametrów modelu. Punkt 1 (odkształcenie: 0,6 [%], naprężenia 71,3 [MPa]) określa rozpoczęcie utwardzania materiału, natomiast punkt 2 (odkształcenie: 4,7 [%], naprężenia 153,7 [MPa]) zakończenie utwardzania.

Wygenerowana przez skalibrowany model numeryczny charakterystyka naprężeń do odkształceń, porównana do wyników eksperymentów, oraz charakterystyka temperatury do odkształceń zostały przedstawione na rysunku 8.4.



Rysunek 8.4. Wyniki eksperymentalne uzyskane podczas rozciąg NiTi porównana do krzywej wygenerowanej przez model numeryczny (b) charakterystyka temperatura-odkształcenie wygenerowana przez model numeryczny przy maksymalnym obciążeniu 172 MPa

Uzyskana krzywa rozciągania stanowi bliskie odwzorowanie wyników eksperymentalnych co dobrze jest widoczne na rysunku 8.4a). Ponadto model skalibrowano tak, aby pełna przemiana miała miejsce w przedziale temperatury od 40 do 78 stopni °C przy maksymalnym odkształceniu wynoszącym 4,5%. Zakres przemiany dobrze widoczny jest na rysunku 8.4b).

8.3 Badania numeryczne struktur kompozytowych wykonanych na bazie stopów NiTi w osnowie z poliaktydu

Celem przeprowadzonych badań było określenie charakteru obciążenia drutu ze stopu NiTi zatopionego wewnątrz struktury kompozytowej poddanej trójpunktowemu zginaniu. Symulacja numeryczna została przeprowadzona z wykorzystaniem metody elementów skończonych i miała na celu odtworzenie rozkładu naprężeń oraz odkształceń występujących w trakcie analizowanego zjawiska, ze szczególnym uwzględnieniem zachowania się drutu ze stopu NiTi w trakcie procesu zginania. Analiza pozwala na wstępne określenie, w jakim stopniu drut ze stopu NiTi bierze udział w przenoszeniu obciążenia i jak wpływa na naprężenia występujące we wnętrzu osnowy. Możliwe było również zweryfikowanie, czy wybrany dla wykorzystywanych próbek układ drutu jest odpowiedni z punktu widzenia prac jako sensor przy zginaniu kompozytu. Dodatkowo przeprowadzenie symulacji pozwoliło na określenie, jakie powinno być przemieszczenie stempla, aby drut ze stopu NiTi był odkształcany w tym samym zakresie jak w przypadku nieosłoniętych próbek.

8.3.1 Wykorzystane oprogramowanie

W ramach przeprowadzonych badań do symulacji numerycznej wykorzystano oprogramowanie Ansys, a konkretnie moduł Static Structural (moduł pozwalający na statyczną analizę konstrukcji bez uwzględniania efektów zależnych od czasu) wchodzący w skład tego oprogramowania. Wybór tego modułu wynikał z faktu, iż dynamiczna odpowiedź materiału nie była wymagana.

8.3.2 Materiał

W symulacji wykorzystano dwa modele materiałowe. Pierwszym, wykorzystany do symulowania PLA, pozwalał na symulację jedynie elastycznego zachowania materiału. Przybliżenie to jest akceptowalne, ponieważ prowadzony eksperyment był realizowany w zakresie właśnie takich odkształceń. Drut ze stopu NiTi natomiast został odwzorowany przy użyciu wcześniej skalibrowanego modelu materiałowego stopu NiTi (patrz podrozdział 8.1), który uwzględnia charakterystyczne dla tego materiału efekty nieliniowe, takie jak przemiany

fazowe i efekt pamięci kształtu. Model ten został przygotowany na wcześniejszym etapie pracy i oparty na dostępnych danych eksperymentalnych. Osnowę kompozytową wykonano z materiału PLA, którego model materiałowy pochodził z biblioteki programu Ansys. Został on skalibrowany zgodnie z danymi materiałowymi dostarczonymi przez producenta filamentu PLA użytego w badaniach doświadczalnych. Wykorzystane dane materiałowe przedstawiono w tabeli 8.2.

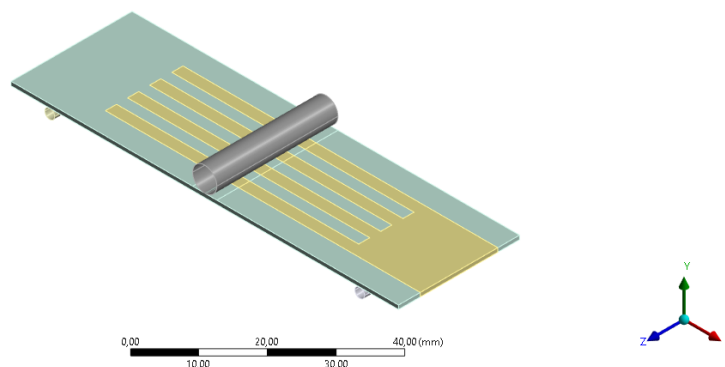
Tabela 8.2. Dane materiałowe, z którymi zgodnie skalibrowano model materiałowy osnowy [163]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Gęstość	g/cm ³	1,24
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	60
Granica plastyczności	MPa	53
Wydłużenie przy zerwaniu	%	6
Moduł sprężystości	GPa	3,8

W modelu wykorzystano również ciała sztywne, które zastosowano do odwzorowania podpór oraz stempla. Zarówno podpory, jak i stempel zostały zdefiniowane jako części powłokowe o geometrii zgodnej z układem eksperymentalnym. Zastosowanie ciał sztywnych w tych elementach pozwoliło na uproszczenie obliczeń bez wpływu na dokładność odwzorowania rzeczywistych warunków kontaktu między elementami układu.

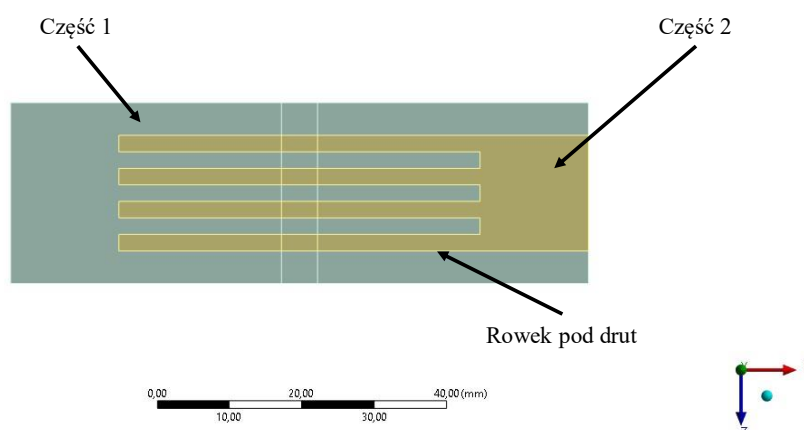
8.3.3 Model numeryczny

Opracowano model numeryczny odwzorowujący rzeczywistą próbkę poddawaną zginaniu. Model ten składał się z dwóch części typu solid, które reprezentowały osnowę kompozytową, ośmiu części belkowych symulujących zatopiony wewnątrz osnowy drutów NiTi oraz trzech części powłokowych, dwóch podpór i stempla odpowiedzialnych za realizację obciążenia. Taka konfiguracja modelu umożliwiła szczegółową analizę rozkładu naprężeń i odkształceń w całej strukturze. Na rysunku 8.5 przedstawiono rzut izometryczny opracowanego modelu numerycznego.



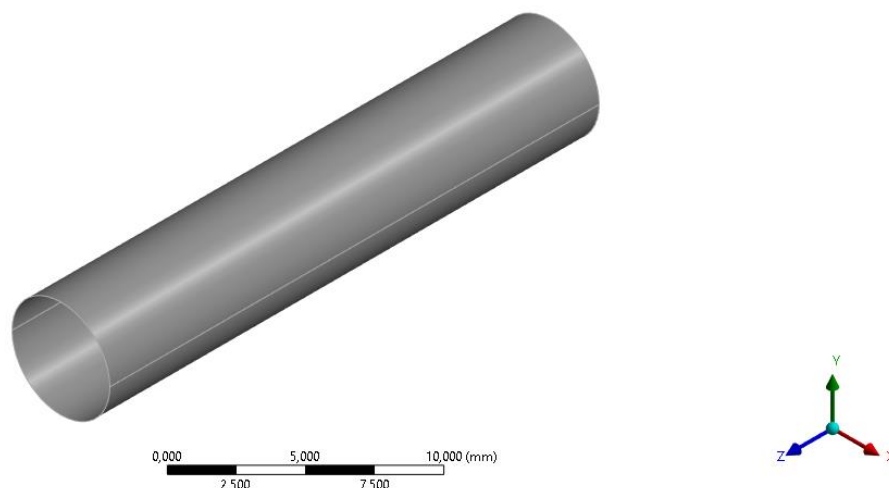
Rysunek 8.5. Izometryczny rzut modelu numerycznego próbki kompozytowej z zatopionym drutem NiTi, wraz z podporami i stemplem

Osnowa została podzielona na dwie oddzielne bryły, co umożliwiło wprowadzenie pomiędzy nie elementów belkowych reprezentujących zatopiony drut NiTi. Taki podział pozwolił na zdefiniowanie odpowiedniego kontaktu między drutem a otaczającym go materiałem kompozytowym. Na rysunku 8.6 przedstawiono rzut z góry na osnowę.

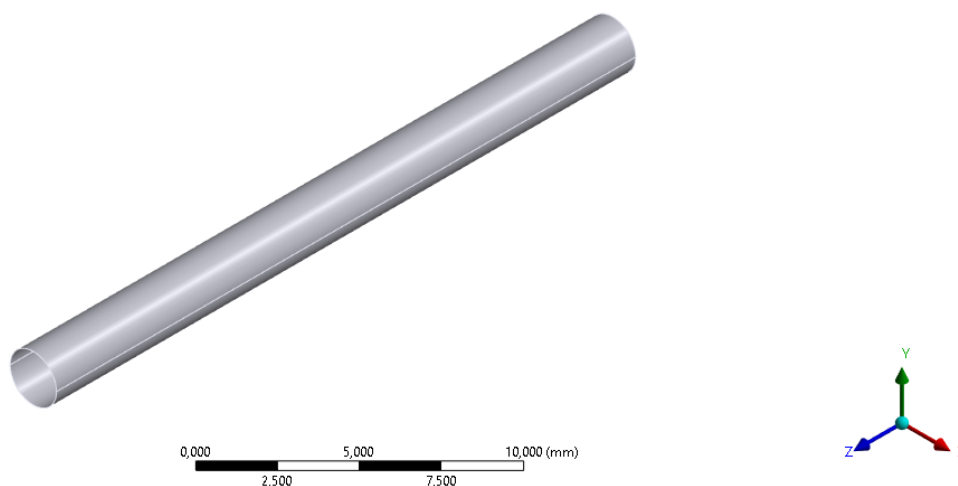


Rysunek 8.6. Widok z góry na osnowę modelu numerycznego wykonaną z materiału PLA

W skład modelu wchodziły również części powłokowe odwzorowujące podpory oraz stempel. Stempel i podpory miały kształt walców o średnicy odpowiednio 5 mm, 2 mm, zgodnie z warunkami eksperymentu doświadczalnego. Umieszczono je symetrycznie względem środka próbki, w stałej odległości, zapewniając odpowiednie warunki podparcia dla trójpunktowego schematu zginania. Stempel również zdefiniowany jako element powierzchniowy, był umieszczony centralnie nad próbką i odpowiadał za wywoływanie obciążenia. W trakcie symulacji przemieszczał się w kierunku osi próbki, powodując jej zginanie. Stempel oraz podpory zostały przedstawione na odpowiednio rysunku 8.7 i rysunku 8.8.



Rysunek 8.7 Model stempla.



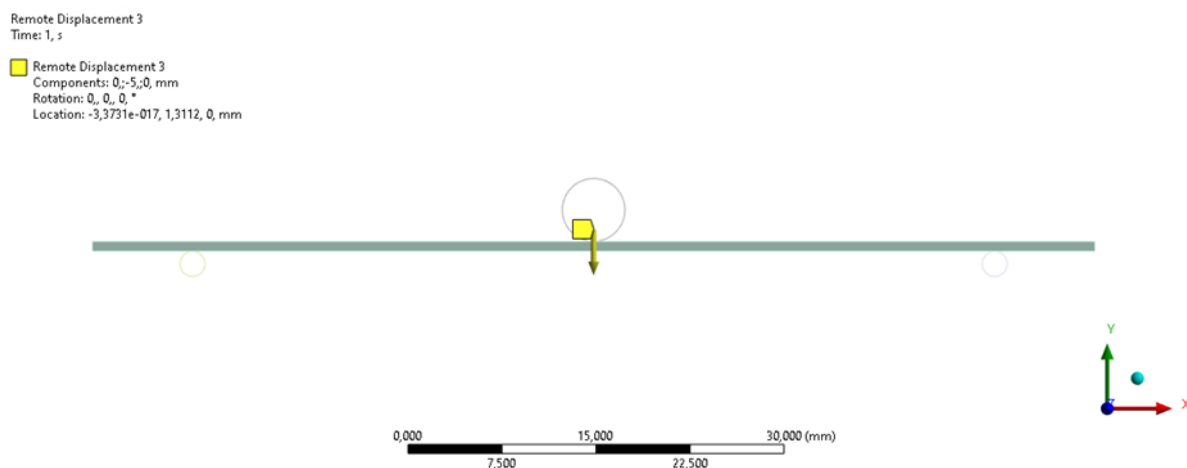
Rysunek 8.8. Model podpory zastosowany w symulacji trójpunktowego zginania

Uwzględnienie rzeczywistych kształtów i wymiarów podpór oraz stempla w modelu numerycznym pozwoliło na wierne odwzorowanie warunków brzegowych i dokładniejsze porównanie wyników symulacji z danymi eksperymentalnymi.

8.3.4 Metodyka symulacji numerycznej

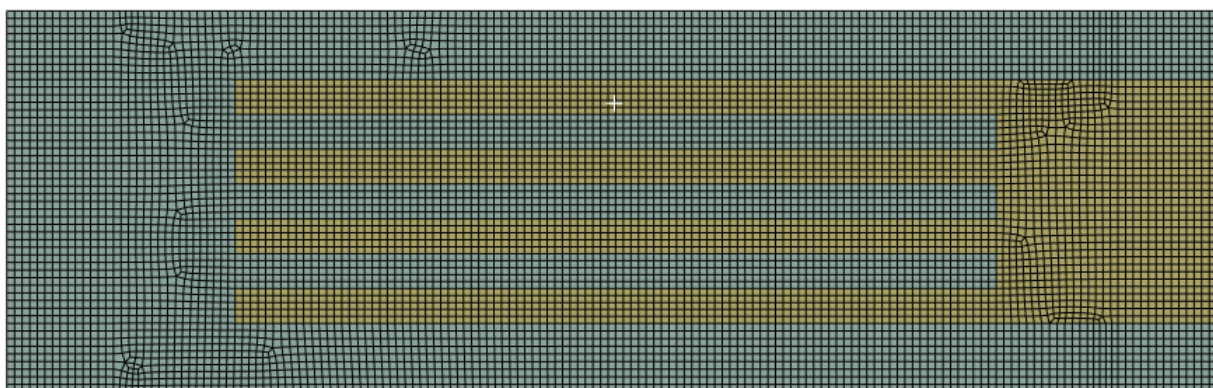
Warunki brzegowe w modelu numerycznym zostały sprowadzone do zastosowania dwóch ograniczeń na przemieszczenie elementów powłokowych. Pierwszy z nich, odbierający wszystkie stopnie swobody, został nałożony na podpory podtrzymujące próbkę w sposób odwzorowujący rzeczywiste warunki eksperymentu. Drugi warunek brzegowy zdefiniowano z przemieszczeniem w kierunku osi zginania, został przypisany do stempla, dzięki czemu możliwe było wymuszenie obciążenia próbki. Na osnowę kompozytową oraz drut NiTi nie

nakładano dodatkowych warunków brzegowych poza zdefiniowanymi kontaktami między elementami modelu, co pozwoliło na odwzorowanie rzeczywistych warunków. Kierunek przemieszczenia zadanego na stempel przedstawiono na rysunku 8.9.



Rysunek 8.9. Warunek brzegowy nałożono na stempel w celu wymuszenia zginania próbki

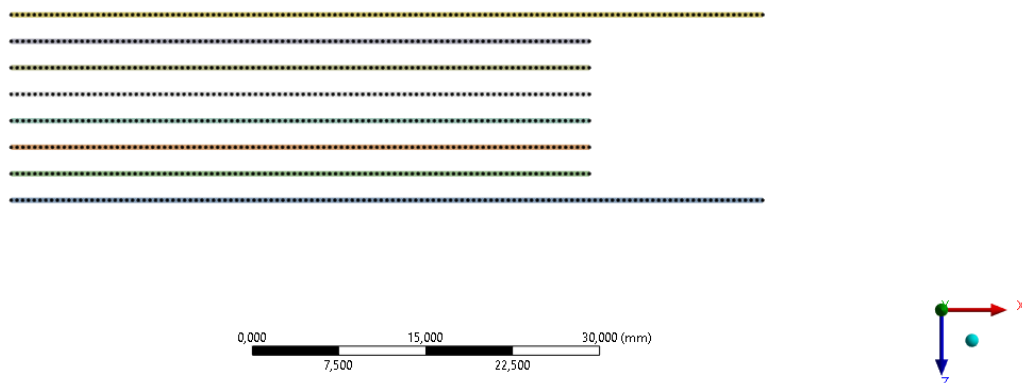
Model numeryczny próbki kompozytowej został zdyskretyzowany przy użyciu siatki elementów skończonych składającej się z 182 tys. węzłów. Części bryłowe, tworzące osnowę kompozytu, zostały zamodelowane z wykorzystaniem elementów typu Hexahedral Quadami o długości krawędzi wynoszącej 0,5 mm, generując siatkę składającą się z 175 tys. węzłów. Siatka nałożona na model osnowy została przedstawiona na rysunku 8.10.



Rysunek 8.10. Model osnowy próbki kompozytowej z zatopionym drutem NiTi, zdyskretyzowany elementami skończonymi typu hexahedralnego

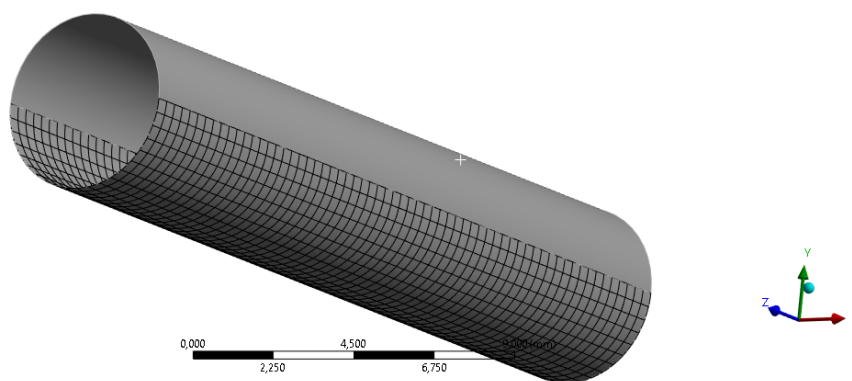
Części belkowe, reprezentujące zatopiony wewnątrz kompozytu drut NiTi, odwzorowano za pomocą elementów skończonych o oznaczeniu nr. 188 [168]. Elementy te składają się z dwóch węzłów. Długość pojedynczego elementu belkowego ustalono na 0,5 mm. Węzły elementów

belkowych zostały rozmieszczone w taki sposób, aby dokładnie pokrywały się z węzłami siatki osnowy. Siatka nałożona na części belkowe została przedstawiona na rysunku 8.11.

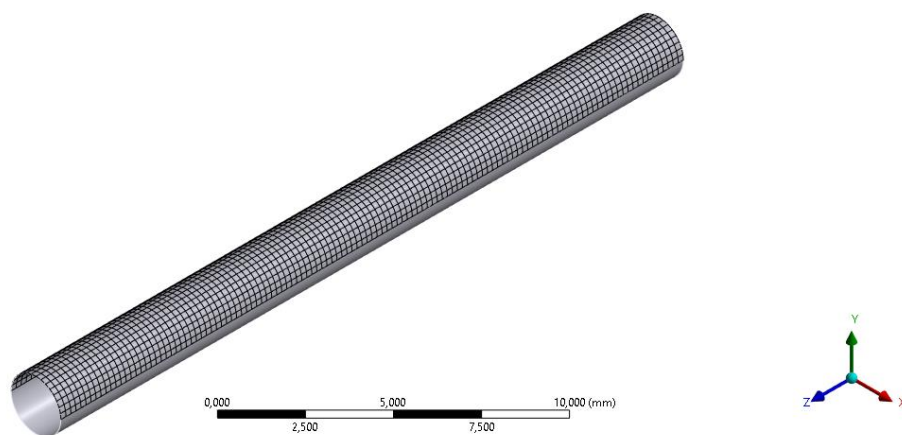


Rysunek 8.11. Części belkowe odwzorowujące zatopiony w osnowie drut NiTi

Części powłokowe modelu, stempel oraz podpory, odwzorowano za pomocą powłokowych elementów skończonych typu 281 [169], posiadających 8 węzłów. Siatkę nałożono tylko na powłoki wykorzystane w symulacji. Siatkę nałożoną na części powłokowe przedstawiono na rysunku 8.12 oraz 8.13.

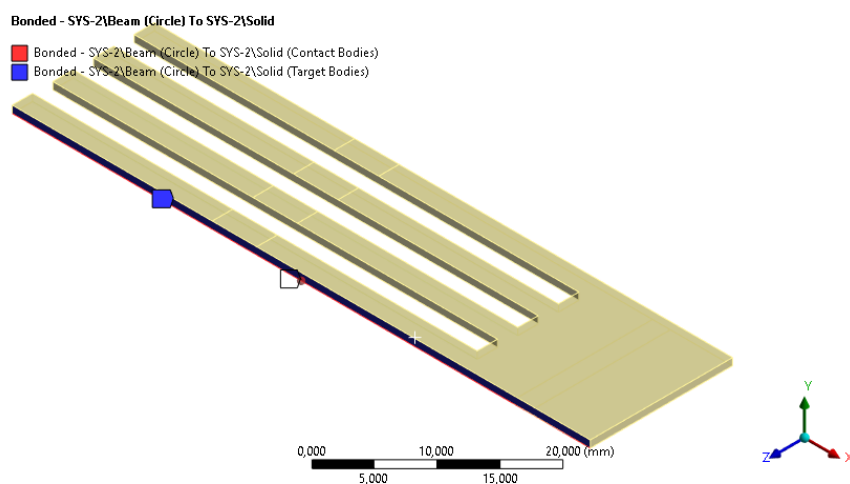


Rysunek 8.12. Siatka elementów skończonych nałożona na element powierzchniowy modelujący stempel



Rysunek 8.13. Siatka elementów skończonych nałożona na element powierzchniowy reprezentujący podporę

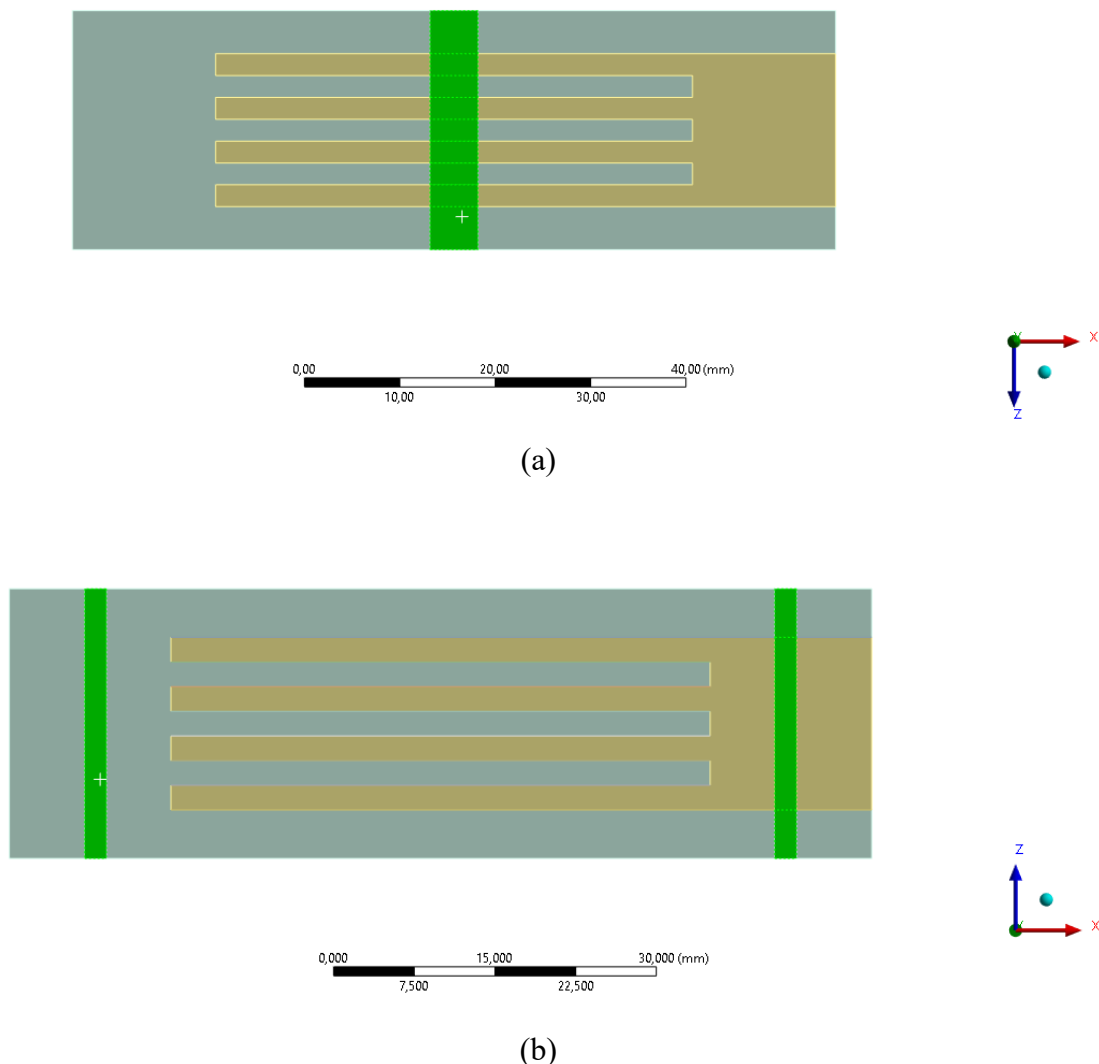
Na osnowę nie nałożono żadnych warunków brzegowych. Element został ograniczony całkowicie przez kontakty ze stępem i podporami, co odwzorowuje rzeczywiste warunki eksperymentu. Kontakt pomiędzy osnową kompozytową a elementami belkowymi, reprezentującymi drut ze stopu NiTi, został zdefiniowany jako kontakt typu Bonded odwzorowujący połączenie nierozłączne połączenie pomiędzy osnową a drutem. Na rysunku 8.14 przedstawiono wybraną powierzchnię, dla której został zdefiniowany kontakt z jednym z elementów belkowych.



Rysunek 8.14. Kontakt pomiędzy elementem belkowym a osnową kompozytu w modelu numerycznym

Kontakt pomiędzy stępem i podporami a osnową został zdefiniowany jako kontakt uwzględniający tarcie pomiędzy częściami modelu. W celu ograniczenia obliczeń związanych z obsługą tego kontaktu przez solver, zdefiniowano go do specjalnie w tym celu wydzielonych

powierzchni. W tym samym celu podzielono też w połowie elementy powierzchniowe. Miejsca rozmieszczenia powierzchni pod kontakt przedstawia rysunek 8.15.

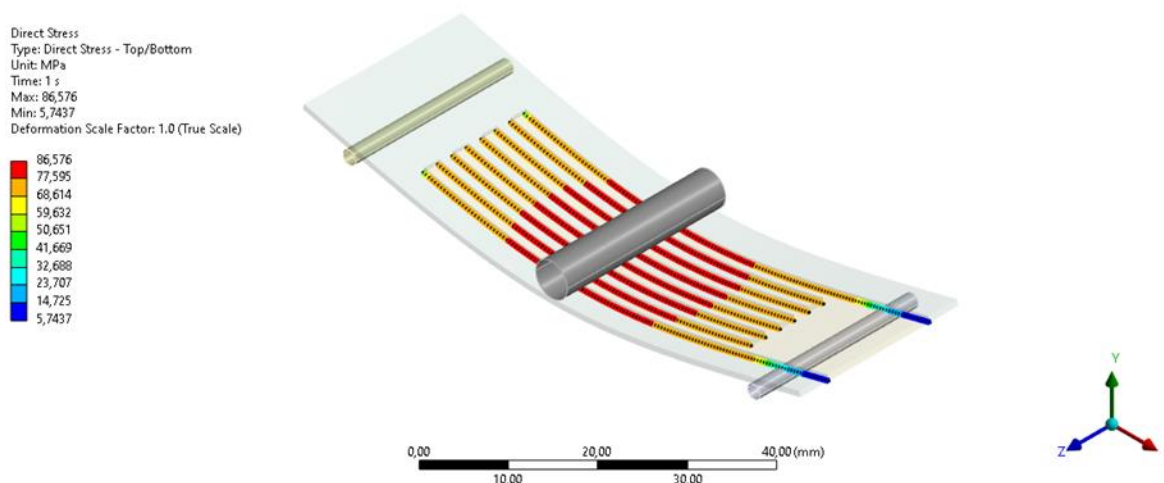


Rysunek 8.15. Obszar kontaktu: a) pomiędzy stemplem a osnową w modelu numerycznym, b) kontakt pomiędzy osnową kompozytu a podporami.

Podzielenie osnowy na dwie oddzielne części wynikało z konieczności wymuszenia utworzenia węzłów siatki osnowy w konkretnych punktach, aby możliwe było prawidłowe zdefiniowanie kontaktu pomiędzy osnową a drutem ze stopu NiTi. Jednakże nie stanowi to odwzorowania rzeczywistej osnowy. W związku z powyższym, aby uniknąć zduplikowanych węzłów oraz uzyskać lepsze przybliżenie badań eksperymentalnych, węzły siatki na powierzchniach styku zostały połączone.

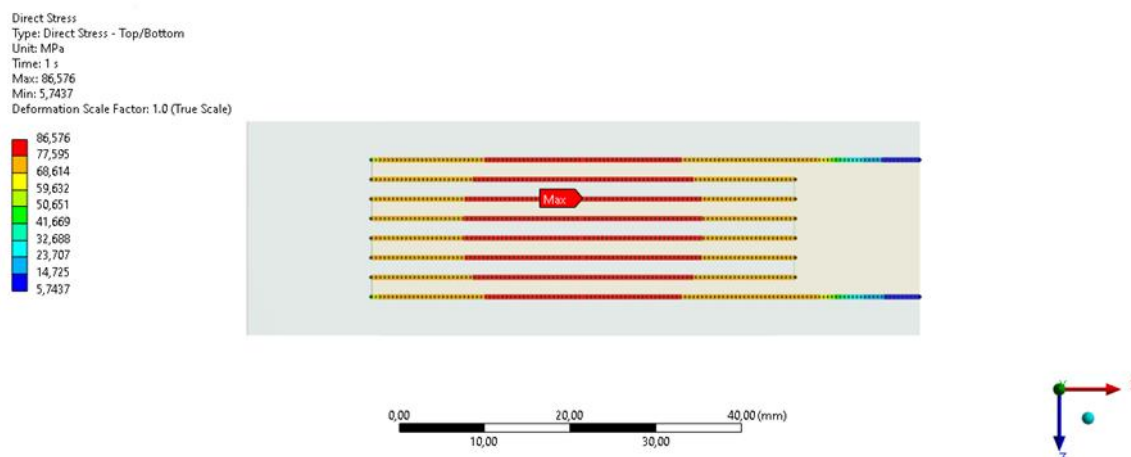
8.3.5 Rezultaty i dyskusja

Przeprowadzona symulacja odwzorowuje pojedynczy cykl gięcia próbki kompozytowej składającej się z osnowy z PLA z zatopionym wewnątrz drutem ze stopu NiTi (patrz podrozdział 6.2). Symulacja precyzyjnie odwzorowywała ugięcie następujące w trakcie pojedynczego cyklu zginania w celu zobrazowania zachowania drutu umieszczonego we wnętrzu osnowy. Symulacja pozwoliła na oszacowanie rozkładu naprężeń w drucie oraz na określenie jego deformacji w trakcie zginania. Wykorzystanie innych metod obliczeniowych niż numeryczne było utrudnione ze względu na skomplikowanie zagadnienia. Skrajna pozycja modelu (po osiągnięciu 5 mm ugięcia) w trakcie zginania, została przedstawiona na rysunku 8.16.



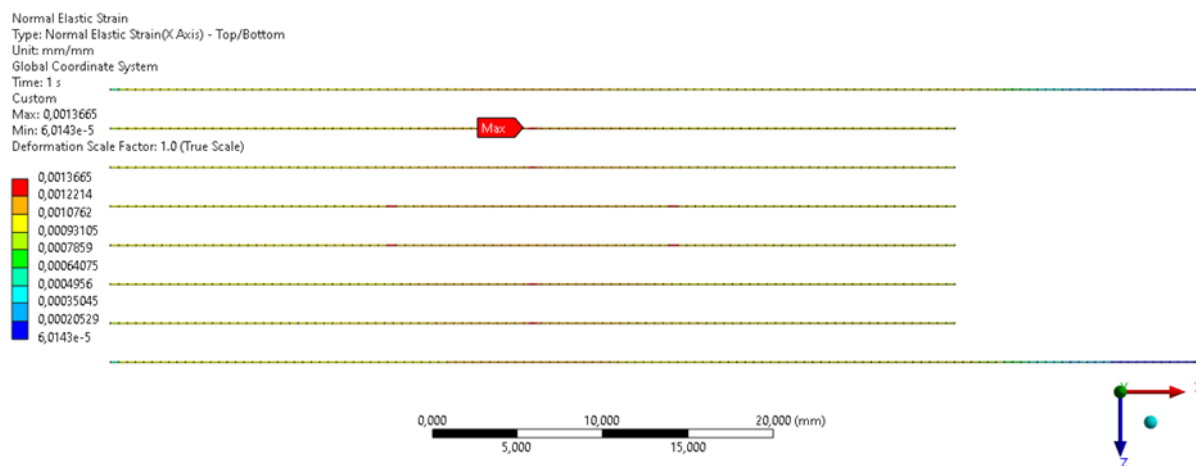
Rysunek 8.16. Wyniki symulacji przedstawiające skrajną pozycję

W ramach symulacji wykazano, iż w trakcie zginania naprężenia kumulują się w centralnej części próbki. Oznacza to, że to właśnie te fragmenty drutu biorą największy udział w przenoszeniu obciążenia. W związku z powyższym ulegają też one największym odkształceniom wywołującym reorientację struktury martenzytu, powiązaną z omawianym w poprzednich rozdziałach efektem spadku rezystancji w funkcji cykli obciążenia. Oszacowany na bazie symulacji rozkład naprężeń potwierdza zasadność wybranego układu prowadzenia drutów ze stopu NiTi (inspirowanego rozetą tensometryczną). Mapę naprężeń stanowiącej wynik symulacji przedstawiono na rysunku 8.17.



Rysunek 8.17. Wyniki symulacji przedstawiające mapę naprężeń drutu NiTi podczas zginania

Symulacja pozwoliła również na określenie wartości odkształcenia drutu w kierunku osi X. Wyznaczona wartość odkształcenia nie przekroczyła 0,014%. Oznacza to, że na podstawie szacunków wynikających z przeprowadzonej symulacji, w trakcie zginania z ugięciem 5 mm odkształcenie drutu nie przekracza wartości 0,5%, co jest istotne z punktu widzenia badanego zjawiska.



Rysunek 8.18. Wyniki symulacji przedstawiające mapę odkształceń zgodnie z kierunkiem osi x (wzdłuż drutu NiTi) podczas zginania

8.3.6 Podsumowanie

Przeprowadzenie niniejszej symulacji pozwoliło na odniesienie się do pewnych założeń poczynionych w trakcie prowadzenia eksperymentu opisanego w podrozdziale 6.2. Kluczowe było określenie czy dobrany układ drutu (inspirowany tensometrem) jest odpowiedni z punktu

widzenia monitorowania odkształcenia konstrukcji. Na podstawie wyników symulacji można więc stwierdzić, iż w trakcie zginania najbardziej obciążone są druty prowadzone równolegle do siebie wzdłuż kompozytu. Te fragmenty drutu ulegają więc reorientacji struktury martenzytu, z czego wynika efekt spadku rezystancji w funkcji cykli obciążenia. Potwierdza to, iż taki układ jest poprawny a także pozwala na stwierdzenie, że uzyskanie większej zmiany rezystancji przy każdym cyklu jest możliwe poprzez zagęszczenie prowadzonych równolegle fragmentów drutu. Nie zostało to jednak wykonane w niniejszej pracy, gdyż promień gięcia drutu dla takiego układu był już bliski maksymalnemu. Symulacja pozwoliła też na oszacowanie, czy odkształcenia badanego drutu w trakcie gięcia całej próbki kompozytowej były zbliżone do wartości badanych próbek z nieosłoniętych drutów ze stopu NiTi (patrz podrozdział 6.1). Zgodnie z wynikami symulacji odkształcenie drutu wzdłuż osi X nie przekroczyło 0,3%, co oznacza, że mieściło się w zakresie wcześniej prowadzonych badań czyli poniżej 0,5%. Ponadto potwierdzono, iż z wykorzystaniem MES możliwe jest wyznaczanie charakteru obciążenia drutu zatopionego we wnętrzu osnowy, znając warunki obciążenia kompozytu. Może to pozwolić na wykonywanie sensorów zoptymalizowanych pod konkretne zastosowanie.

8.4 Model numeryczny aktuatora na bazie drutu ze stopu NiTi w osnowie z PLA

W trakcie realizacji pracy zostały wyznaczone parametry materiałowe modelu numerycznego stopów NiTi tak, aby model ten w symulacjach numerycznych pozwolił na odwzorowanie rzeczywistego zachowania wykorzystywanego w tej pracy stopu NiTi (patrz podrozdział 8.1). Ten model materiałowy poddano wstępnej walidacji poprzez porównanie krzywej rozciągania wygenerowanej wykorzystując symulacje z wynikami eksperymentalnymi. Jednakże dopiero porównanie wyników bardziej złożonego przypadku pozwoli na przeprowadzenie właściwej walidacji. W związku z powyższym przeprowadzono symulację numeryczną odwzorowującą warunki eksperymentu badającego pracę aktuatora wykorzystującego druty ze stopu NiTi zatopionego w osnowie polimerowej. Potwierdzenie, iż w pracy wykorzystywany jest model materiałowy o prawidłowo dobranych parametrach, pozwoli na wykonywanie symulacji numerycznych umożliwiających prowadzenie szerokiej gamy analiz potencjalnych aplikacji wykorzystujących tego typu aktulatory.

8.4.1 Wykorzystane oprogramowanie

Do przeprowadzenia omawianego badania numerycznego wykorzystano oprogramowanie Ansys. Spośród dostępnych w tym środowisku modułów zastosowano moduł Static Structural, który zapewnia stabilność rozwiązania oraz stosunkowo krótki czas symulacji. Moduł ten nie

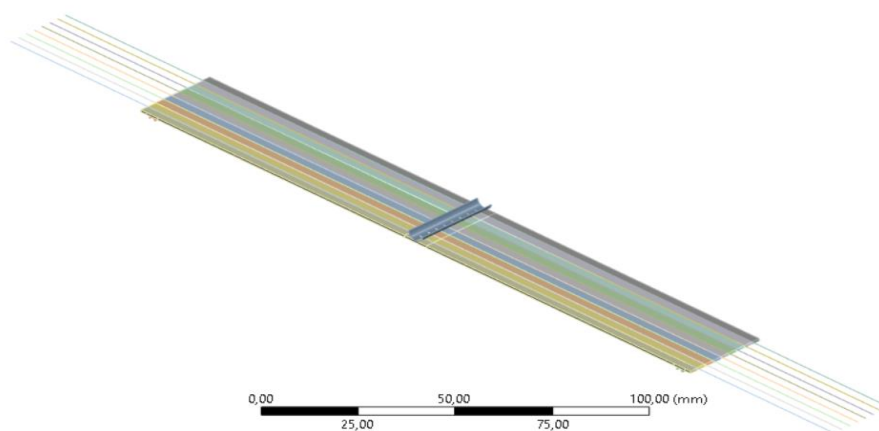
bierze pod uwagę dynamicznego zachowania materiału, pozwalając jedynie na analizę statyczną. Jednakże głównym celem symulacji jest porównanie zmiany ugięcia próbki przed aktywacją i w trakcie aktywacji drutu, co nie wiąże się z analizą dynamiczną.

8.4.2 Materiał

W badaniach eksperymentalnych dotyczących trójpunktowego zginania próbki kompozytowej (patrz podrozdział 6.2) oraz aktuatora (patrz podrozdział 7.2) wykorzystano takie same materiały czyli stop NiTi od firmy Dynalloy oraz PLA od firmy Prusa research. Z tego powodu w omawianym badaniu numerycznym również wykorzystano te same modele materiałowe co dla symulacji trójpunktowego zginania. Aby nie powielać tych samych informacji, niniejszy podrozdział odsyła jedynie do miejsca, w którym parametry materiału zostały opisane (patrz podrozdział 8.3.2).

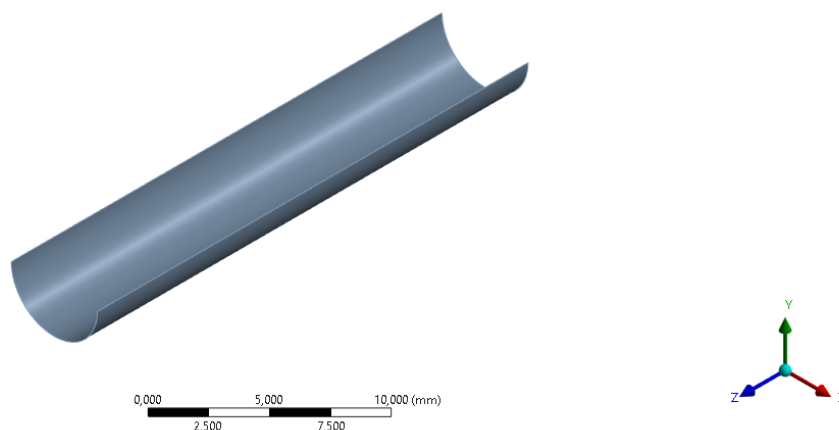
8.4.3 Model numeryczny

Opracowany model aktuatora wykorzystującego druty ze stopów NiTi zatopione w osnowie polimerowej złożony został z 9 części bryłowych, ośmiu części belkowych oraz trzech części powłokowych. Części bryłowe stanowią odwzorowanie osnowy, która została podzielona na mniejsze fragmenty, aby wymusić prawidłowe nałożenie siatki na powierzchniach w których zdefiniowano kontakt pomiędzy osnową a drutem ze stopu NiTi. Częściom bryłowym przypisano materiał PLA stanowiący materiał, z jakiego wykonana jest rzeczywista osnowa próbki. Zadaniem części belkowych było odwzorowanie drutu ze stopu NiTi, który w rzeczywistym układzie stanowi część aktywną opracowanego aktuatora. Części powłokowe odwzorowywały działanie stempla i podpór. Na rysunku 8.19 przedstawiono opracowany model numeryczny.

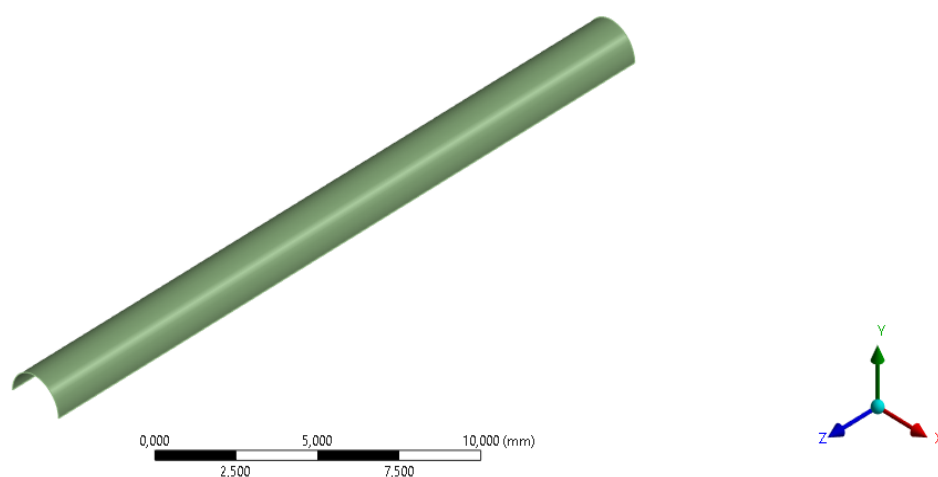


Rysunek 8.19. Izometryczny rzut modelu numerycznego aktuatora kompozytowego wykorzystującego druty ze stopu NiTi oraz osnowę z PLA

Podpory oraz stempel nie zostały zamodelowane w całości. Zamodelowano jedynie powierzchnie wchodzące w kontakt z pozostałą częścią modelu. Jest to dopuszczalne ponieważ elementy te zostały potraktowane jako ciało sztywne i w badaniach numerycznych nie wyznacza się dla nich naprężeń ani odkształceń. Stempel został zasymulowany jako powierzchnia połowy wału o średnicy 5 mm, natomiast podpory jako połowa wału o średnicy 2 mm. Części powłokowe przedstawiono na rysunku 8.20 oraz 8.21.



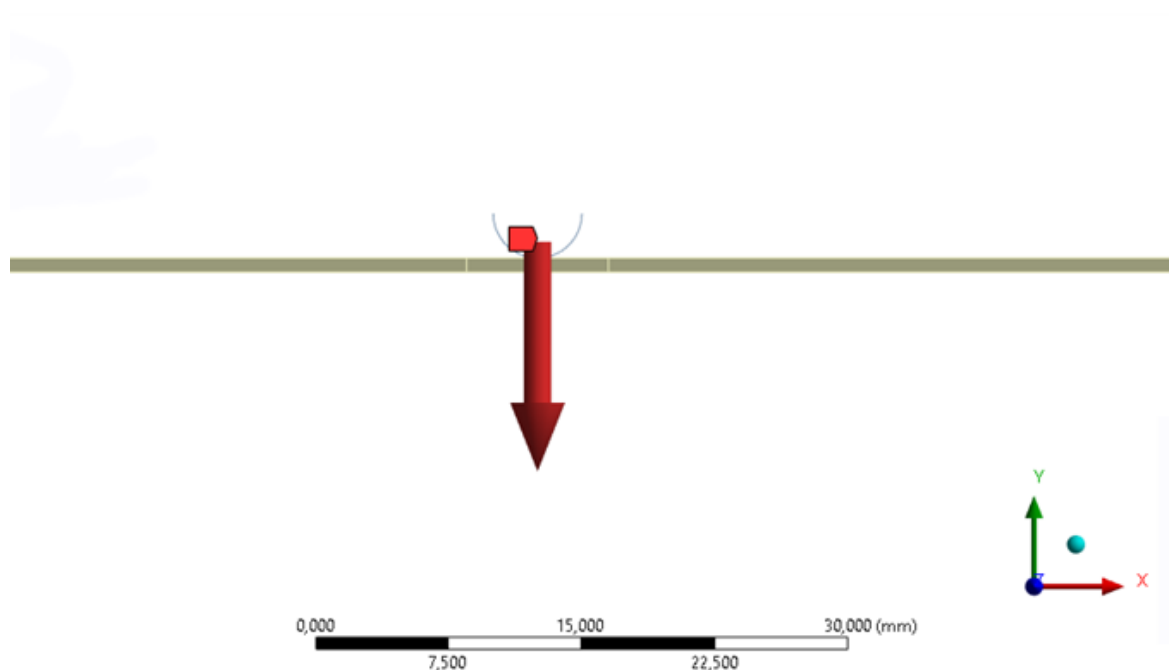
Rysunek 8.20. Model powłoki stempla wchodzącej w kontakt z osnową



Rysunek 8.21. Model powłoki podpory wchodzącej w kontakt z osnową

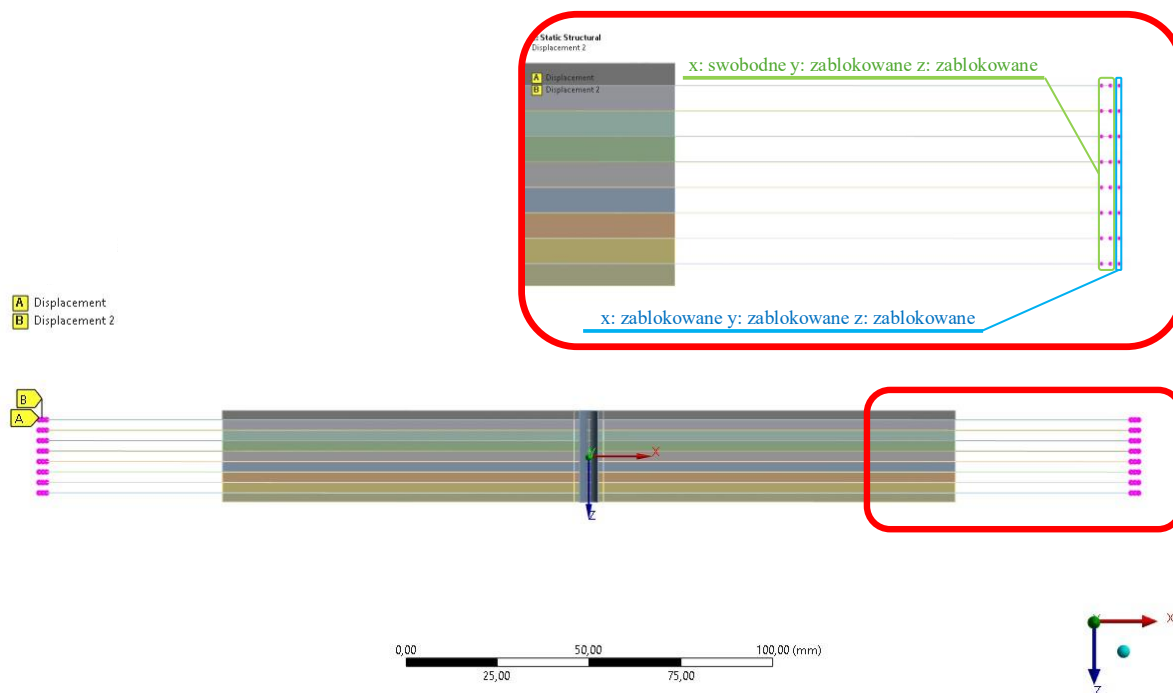
8.4.4 Metodyka badań numerycznych

W opracowanej symulacji zastosowano cztery rodzaje warunków brzegowych. Warunek ograniczający ruch części oraz określający obciążenie siłą zostały użyte na częściach powłokowych w celu odwzorowania zachowania podpór oraz stępła. Podporom odebrano wszystkie stopnie swobody, natomiast dla stępła pozostawiono możliwość przemieszczenia w osi Y. W tym kierunku przeciwnym do osi przyłożono siłę o wartości 1,35 N, odpowiadającą ciężarowi obciążenia zastosowanego w badaniach eksperymentalnych (patrz podrozdział 7.2). Na rysunku 8.22 przedstawiono kierunek i zwrot wektora przyłożonej siły.



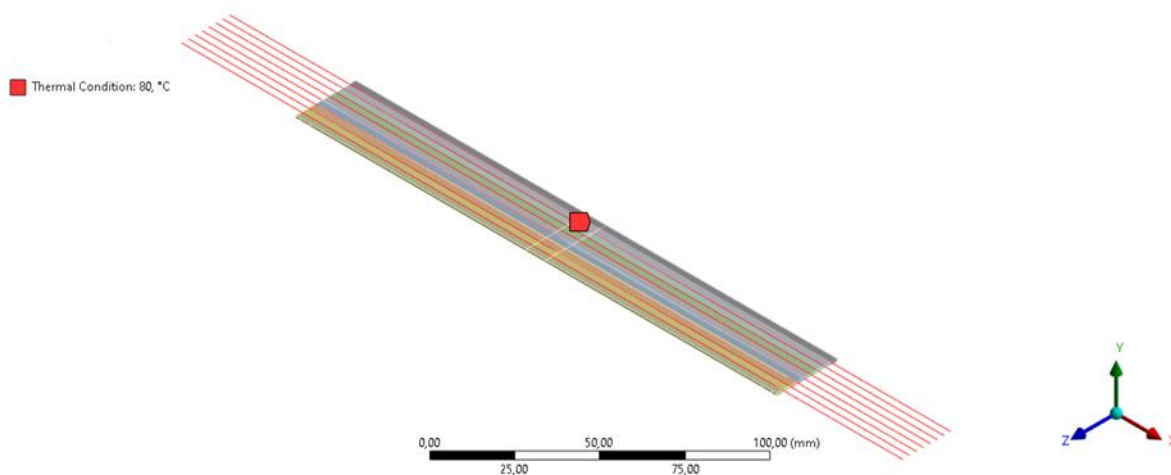
Rysunek 8.22. Kierunek i zwrot wektora siły rozłożonej na powierzchni stępła

Warunek odbierający możliwość przemieszczenia pojedynczych węzłów został nałożony na graniczne węzły drutów, aby odwzorować ich umocowanie wewnątrz tulejek zaciskowych. Skrajnym zewnętrznym węzłom odebrano stopnie swobody w trzech osiach. Natomiast węzłom oddalonym od końca drutu o dystans równy 2mm (długość tulejki zaciskowej) odebrano jedynie stopnie swobody w osi z i y pozostawiając swobodę przemieszczenia w osi x. Węzły, na które nałożono omawiany warunek brzegowy, przedstawiono na rysunku 8.23.



Rysunek 8.23. Węzły stanowiące część elementów belkowych, na które nałożono warunki brzegowe

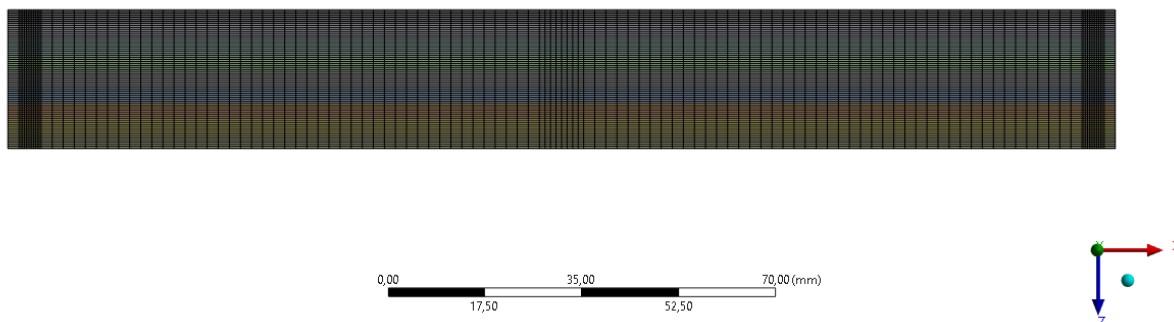
Ostatni warunek brzegowy stanowił zmienną wartość temperatury nałożoną na wszystkie druty ze stopu NiTi równomiernie na całej długości. Temperatura narastała w sposób liniowy w ciągu całego drugiego etapu symulacji (1s) od 20 °C do 80 °C (w ramach tego przedziału ma miejsce pełna przemiana fazowa wykorzystywanego stopu NiTi). Warunek został nałożony na całą długości każdego drutu, co przedstawiono na rysunku 8.24.



Rysunek 8.24. Warunek brzegowy zmieniający wartość temperatury drutów ze stopu NiTi

Nałożona na opracowany model numeryczny siatka elementów skończonych składała się z 223 tys. węzłów. Elementy bryłowe zdyskretyzowano przy użyciu elementów typu

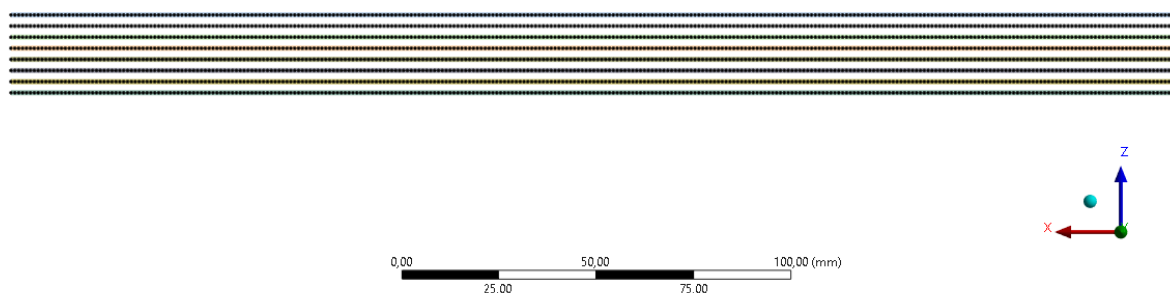
Hexahedral Quadami(215 tys. węzłów) o długości krawędzi 2 mm z lokalnym zagęszczeniem siatki w miejscach występowania kontaktów z innymi częściami modelu. Na rysunku 8.25 przedstawiono siatkę nałożoną na elementy bryłowe.



Rysunek 8.25. Model próbki kompozytowej z zatopionym drutem NiTi, zdyskretyzowany elementami skończonymi typu hexahedralnego

Węzły elementów belkowych zostały rozmieszczone w taki sposób, aby dokładnie pokrywały się z węzłami siatki osnowy. Dla powierzchni wykorzystanej do kontaktu z stemplem wymagało to zagęszczenia siatki do 0,5 mm, natomiast dla podpór do 0,36 mm. Wartości te wynikają z konieczności prawidłowego odwzorowania łuku przez siatkę elementu powierzchniowego.

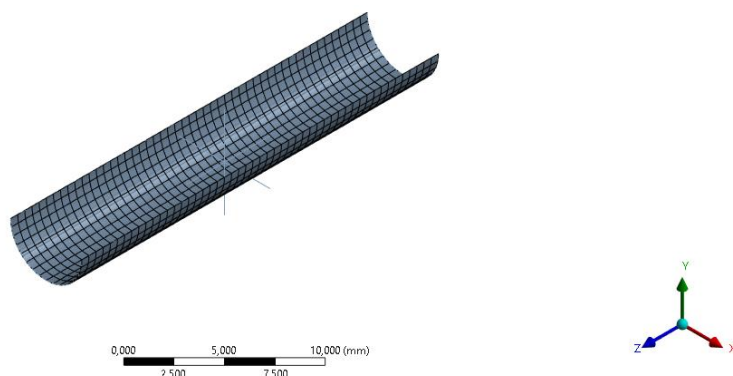
Części belkowe zdyskretyzowano z wykorzystaniem elementu belkowego typu 188 [168] 3D o dwóch węzłach ulokowanych na zakończeniach elementu. Długość pojedynczego elementu wynosiła 1 mm (5 tys. węzłów). Siatka nałożona na elementy belkowe została przedstawiona na rysunku 8.26.



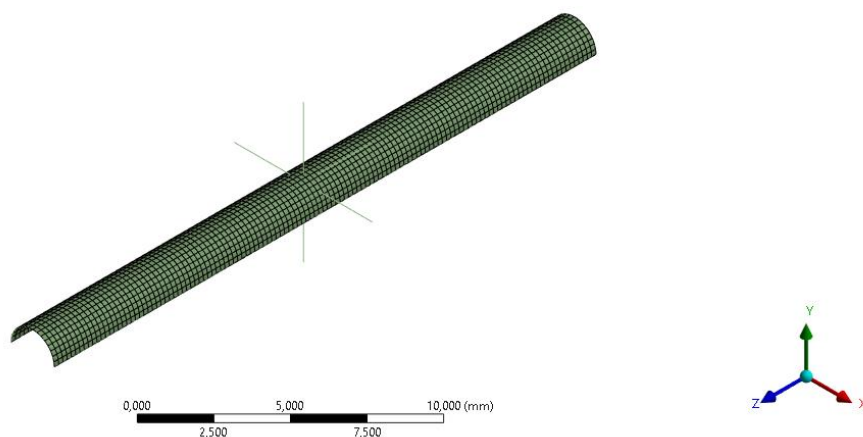
Rysunek 8.26. Elementy belkowe odwzorowujące zatopiony w osnowie drut NiTi

Pozostałe części modelu stanowiące stempel i podpory zdyskretyzowano z wykorzystaniem powłokowych elementów skończonych typu 281 [169]. Wymiary siatki dobrano tak, aby zapewnić 16 elementów na obwodzie łuków stanowiących stempel oraz podpory. 16 elementów

to minimum pozwalające na prawidłowe odwzorowanie łuku. Wygenerowaną siatkę nałożoną na elementy powierzchniowe przedstawiono na rysunku 8.27 oraz 8.28.



Rysunek 8.27. Siatka elementów skończonych nałożona na element powierzchniowy modelujący stempel

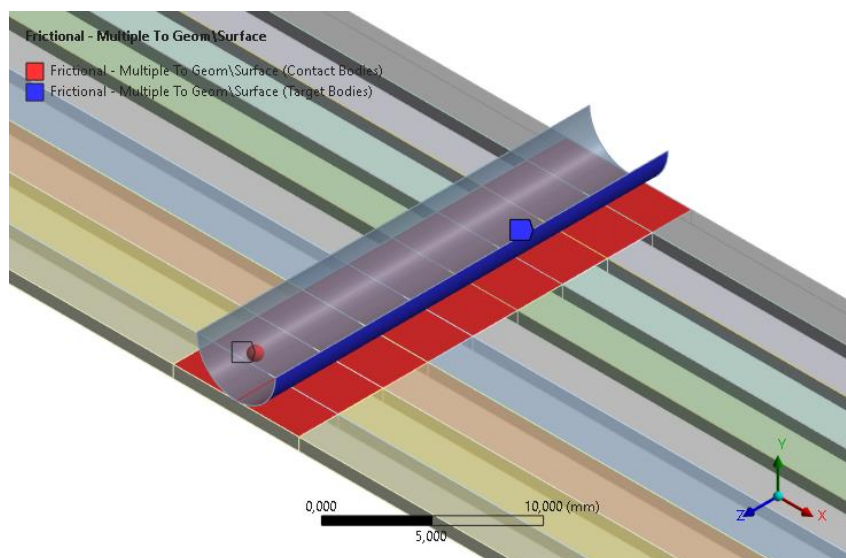


Rysunek 8.28. Siatka elementów skończonych nałożona na element powierzchniowy reprezentujący podporę

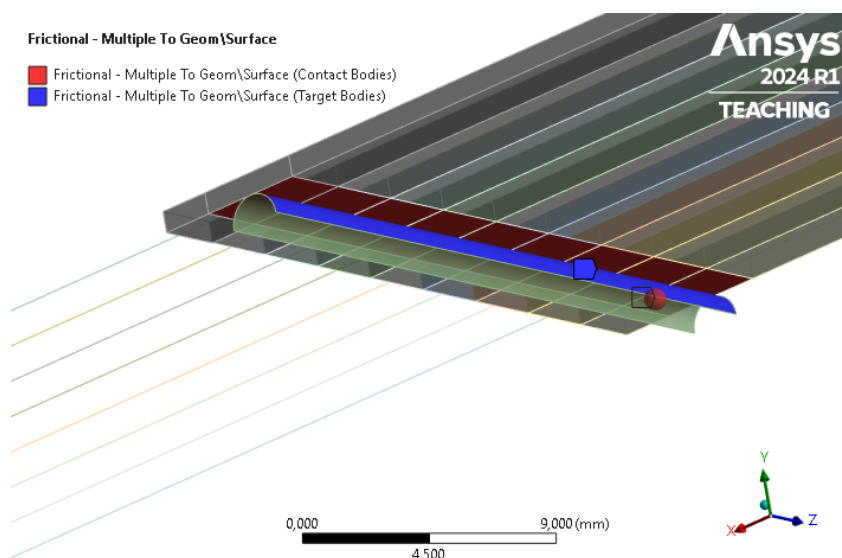
Kontakt pomiędzy osnową a drutami ze stopu NiTi wpływał na prawidłowe przeprowadzenie symulacji działania aktuatora. Wynikało to z faktu, iż właśnie druty ze stopu NiTi są częściami wykonawczymi w analizowanym kompozycie. Kontakt został zdefiniowany jako kontakt sztywno wiążący ze sobą te części modelu.

Kontakt pomiędzy stemplem a osnową oraz osnową a podporami został zdefiniowany jako kontakt pozwalający na przesuwanie się części po swojej powierzchni z uwzględnieniem tarcia. W celu ograniczenia obliczeń związanych z obsługą tego kontaktu przez solver, zdefiniowano go do specjalnie w tym celu wydzielonych powierzchni. Ponadto, aby poprawić dokładność

obliczeń, w miejscach wystąpienia tych kontaktów zagęszczono siatkę osnowy. Miejsca rozmieszczenia powierzchni pod kontakt przedstawiono na rysunku 8.29.



(a)



(b)

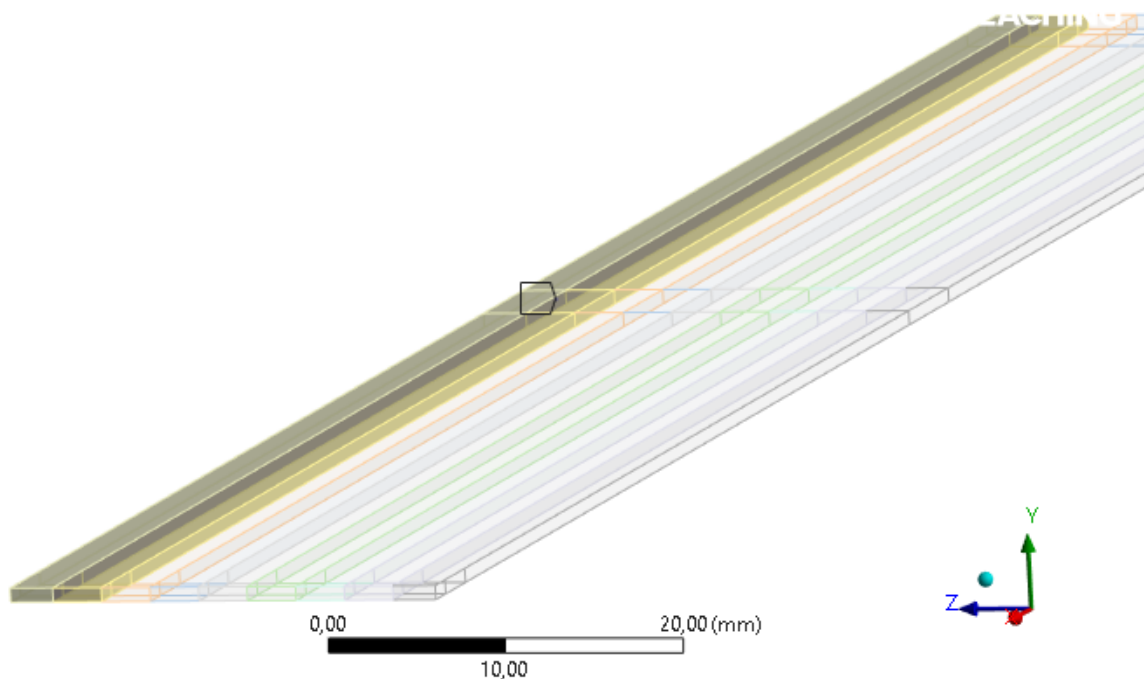
Rysunek 8.29. Obszar kontaktu: a) pomiędzy stemplem a osnową w modelu numerycznym, b) kontakt pomiędzy osnową kompozytu a podporami

Aby wygenerować siatkę pozwalającą na prawidłowe odwzorowanie kontaktu pomiędzy drutem a osnową, konieczne było podzielenie jej na 9 mniejszych fragmentów. Jednakże nie jest to odwzorowanie warunków eksperymentu, badany kompozyt nie był w żaden sposób podzielony. Dlatego też, aby lepiej odwzorować rzeczywiste warunki, węzły na ścianach dzielących poszczególne części osnowy zostały połączone, likwidując w ten sposób

zduplikowane węzły. Przykładowe powierzchnie, na których dokonano łączenia węzłów przedstawione na rysunku 8.30

Node Merge

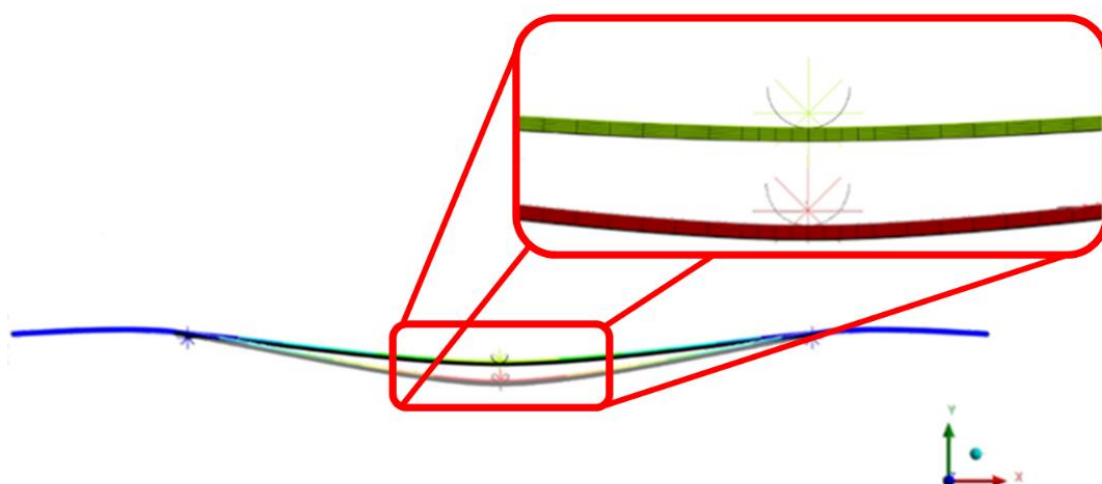
■ Node Merge



Rysunek 8.30. Powierzchnie, względem których połączono części osnowy kompozytu

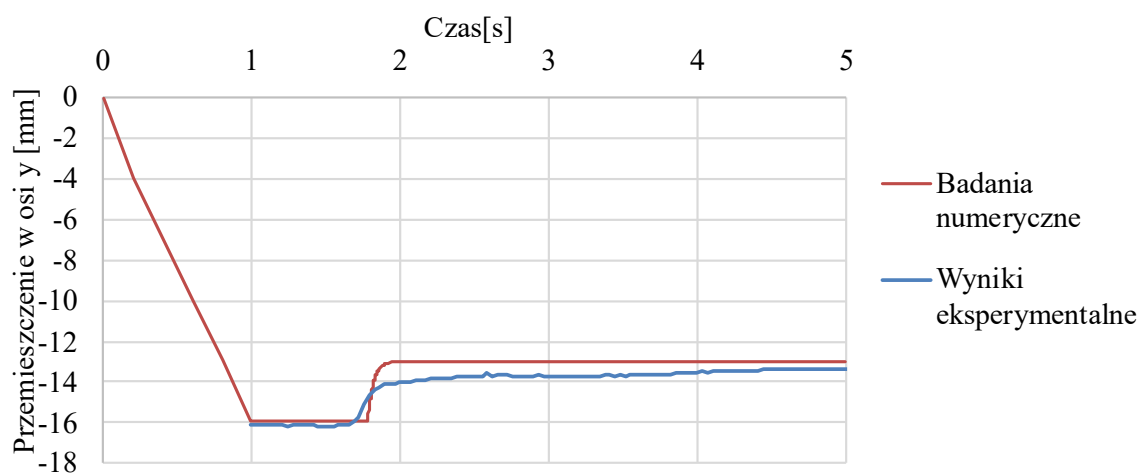
8.4.5 Rezultaty i dyskusja

Obciążenie modelu wywołało przemieszczenie centralnej części próbki o 16 mm. Zgodnie z oczekiwaniami wynikającymi z badań eksperymentalnych zaobserwowano, że po aktywacji termicznej drutu ze stopu NiTi aktuator częściowo kompensuje przemieszczenie wynikające z zewnętrznego obciążenia. Wyniki symulacji odnośnie do dwóch pozycji przed i po aktywacji aktuatora przedstawiono na rysunku 8.31.



Rysunek 8.31. Wyniki badań numerycznych dla dwóch nałożonych na siebie pozycji badanego aktuatora

Na podstawie wyników symulacji można stwierdzić, że ma miejsce częściowa kompensacja ugięcia kompozytu wynikająca z obciążenia. Uzyskana zmiana pozycji dotycząca najbardziej przemieszczonego punktu wyniosła około 3 mm, co stanowi zmniejszenie przemieszczenia próbki o około 19%. Przemieszczenie stempla w trakcie symulacji wraz z nałożonymi wynikami z eksperymentu przedstawiono na rysunku 8.32.



Rysunek 8.32. Nałożone na siebie przebiegi przemieszczenia centralnej części próbki z badań eksperymentalnych oraz badań numerycznych

Uzyskano dobrą zgodność wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji. Różnica w całkowitej zmianie pozycji centralnej części próbki po aktywacji, pomiędzy wartością uzyskaną w symulacji a wartością eksperymentalną, wynosi 0,5 mm, co stanowi około 4%.

8.4.6 Podsumowanie

Przeprowadzone badanie numeryczne stanowią potwierdzenie, że zastosowane metody pozwalają na prowadzenie symulacji numerycznych stopów NiTi wewnątrz osnowy polimerowej. Omówiona symulacja stanowiła odwzorowanie badania eksperymentalnego (patrz podrozdział 7.2), w ramach którego uzyskano kompensację przemieszczenia centralnej części próbki wynoszącą około 16%. Natomiast w przypadku symulacji wielkość ta wynosiła 19%. Różnica między zmianą pozycji centralnej części próbki w trakcie eksperymentu oraz symulacji po 5 s wynosiła 0,5 mm co stanowiło błąd symulacji wynoszący 4%. Najprawdopodobniej przyczyną tego faktu jest wykorzystanie do zamodelowania osnowy parametrów materiałowych PLA pochodzących z katalogu producenta, a nie wyznaczonych na podstawie konkretnych badań materiałowych próbek wydrukowanych na drukarce 3D użytej w niniejszej pracy. Ponadto symulacja nie pozwoliła na odwzorowanie efektu uplastyczniania się materiału PLA (zaobserwowanego podczas eksperymentu patrz podrozdział 7.2), co wpływa na ograniczenie dokładności odwzorowania rzeczywistego zachowania próbki.

9 Podsumowanie

W trakcie realizacji niniejszej pracy przeprowadzono szereg badań doświadczalnych na drutach ze stopu NiTi o niewielkiej średnicy, nieprzekraczającej 375 μm . Podjęto zarówno zagadnienia wykorzystania stopów NiTi w układach sensorycznych, jak i w aktuatorach, a także problematykę łączącą oba te zagadnienia. Praca została podzielona na trzy kluczowe etapy. W pierwszej części opisano badania z zakresu wpływu obciążenia mechanicznego na właściwości elektryczne cienkich (o średnicy poniżej 150 μm) drutów ze stopu NiTi nieosłoniętych oraz w osnowie polimerowej. W kolejnej części praca podejmuje zagadnienia badań wpływu przemiany fazowej na zmiany właściwości mechanicznych cienkich drutów ze stopu NiTi oraz opartych na ich bazie kompozytów. Trzeci etap natomiast skoncentrowany został na badaniach numerycznych. W etapie tym przeprowadzono proces identyfikacji parametrów modelu materiałowego oraz badania numeryczne, których celem była walidacja wykorzystanego modelu.

W pierwszym, omówionym w niniejszej pracy, badaniu skupiono się na właściwościach elektrycznych stopów NiTi możliwych do wykorzystania w układach sensorycznych. Pierwsze badanie wykazało wpływ odkształcenia i reorientacji struktur na zmianę rezystancji cienkich drutów ze stopu NiTi. Badania obejmowały porównanie wpływu dwóch różnych rodzajów obciążenia na rezystancję elektryczną próbki. Porównano cykliczne rozciąganie drutów ze stałym przemieszczeniem (tj. próbka w każdym cyklu była rozciągana do osiągnięcia ustalonej pozycji) i ze stałą siłą (tj. próbka w każdym cyklu była rozciągana do osiągnięcia ustalonej siły). Podczas cyklicznego rozciągania próbki stopu NiTi ze stałym przemieszczeniem obserwuje się spadek rezystancji elektrycznej po każdym kolejnym cyklu rozciągania. Alternatywnie, podczas rozciągania ze stałą siłą, wartość rezystancji elektrycznej wzrasta. Wynika to prawdopodobnie z faktu, iż różne czynniki wywierają różny wpływ na obserwowane zjawiska. W przypadku rozciągania ze stałą siłą, próbka jest odkształcana w większym stopniu po każdym cyklu, co wiąże się ze wzrostem rezystancji. W przypadku rozciągania ze stałym przemieszczeniem odkształcenie próbki jest praktycznie pomijalne (z wyjątkiem początkowego cyklu), a tym samym ma znikomy wpływ na wartość oporu w kolejnych cyklach rozciągania. I odwrotnie, reorientacja struktury martenzytu stanowi istotny czynnik wpływający na rezystancję próbki w przypadku rozciągania ze stałym przemieszczeniem. W obu typach obciążenia największa zmiana wartości rezystancji jest obserwowana podczas początkowych cykli. Z każdym kolejnym cyklem obserwowane zmiany maleją, ale pozostają wymierne.

Dalsze badania właściwości elektrycznych stopów NiTi skupiły się już na strukturach kompozytowych. W tym celu opracowano próbki stanowiące proste kompozyty o osnowie z PLA z zatopionym wewnątrz drutem ze stopu NiTi. Zatopiony drut został ułożony w sposób analogiczny do rozety tensometrycznej, przy założeniu, że jest to najbardziej optymalny układ dla badanego zagadnienia. Przeprowadzone badania cyklicznego zginania próbek kompozytowych potwierdziły, iż dla drutu ze stopu NiTi umieszczonego w wnętrzu osnowy polimerowej (PLA) również obserwowany jest efekt spadku rezystancji po każdym kolejnym cyklu obciążenia. Ponadto zauważono, że efekt jest przede wszystkim powiązany z odkształceniem, gdyż niezależnie od rodzaju wymuszenia przy stałych odkształceniach jest on obserwowany. Przebiegi rezystancji zarejestrowane dla drutów umieszczonych we wnętrzu osnowy z PLA są też bardziej stabilne od przebiegów zarejestrowanych dla nieosłoniętych drutów, co jest prawdopodobnie związane z tym, iż drut ze stopu NiTi we wnętrzu osnowy jest w większym stopniu chroniony przed warunkami otoczenia, w tym zwłaszcza przed fluktuacjami powietrza. Ponadto w próbkach kompozytowych zarejestrowano znacznie większy zakres cykli dla których zmiana rezystancji jest mierzalna niż dla nieosłoniętych drutów co pozwoliło przeprowadzić badania nawet dla 90 cykli obciążenia (czyli 3 razy więcej). Wynika to najprawdopodobniej z faktu, iż w próbce kompozytowej odkształceniu w trakcie cyklu ulega fragment drutu o znacznie większej długości, przy czym początkowa rezystancja elektryczna drutu jest nawet o rząd wielkości większa.

W badaniu, omówionym w niniejszej pracy, przeprowadzonym na drutach ze stopu NiTi pracujących w układzie szeregowym ze sprężyną, uwidoczniło się zmianę właściwości mechanicznych w trakcie przemiany oraz przy niepełnej przemianie martenzytu w austenit. Wykazano zależność skurczu drutu oraz generowanej przez drut siły od temperatury drutu, w związku z czym także od prądu grzania. Wykazano, że wraz ze spadkiem wartości prądu grzania poniżej wartości prądu nominalnego oraz temperatury spada uzyskane skrócenie oraz wygenerowana przez próbkę siła. Istotna zmiana generowanych przez próbkę wartości obserwowana jest tylko przy bardzo wąskim zakresie prądów grzania. Wraz ze spadkiem prądu grzania spada też dynamika przemiany, co wiąże się z wydłużeniem czasu aktywacji drutu.

Aby ułatwić projektowanie aktuatorów wykorzystujących stopy NiTi, dokonano też wyznaczenia parametrów modelu materiałowego stopu NiTi. W tym celu eksperymentalnie wyznaczono krzywą rozciągania stopu NiTi. Pierwsze przeprowadzone symulacje potwierdziły dobrą zbieżność modelu z wynikami eksperymentalnymi.

Opracowano aktuator będący prostym kompozytem składającym się z zatopionego we wnętrzu osnowy drutu ze NiTi obciążono stałą siłą przyłożoną z pomocą stempla w centralnej części próbki. Odkształcenie wywołane obciążeniem zostało częściowo skompensowane poprzez aktywację aktuatora wywołując przemiany stopu NiTi. Na podstawie niniejszego badania możliwe było też przeprowadzenie walidacji skalibrowanego wcześniej modelu numerycznego. Wyniki symulacji okazały się zbliżone do wyników eksperymentalnych potwierdzając możliwość wykorzystania opracowanego modelu numerycznego w szerokim zakresie badań numerycznych.

Wykorzystując opracowany na poprzednim etapie pracy model numeryczny przeprowadzono badania mające na celu określenie czy dobrany układ drutu (inspirowany rozetą tensometryczną) jest odpowiedni z punktu widzenia monitorowania odkształceń hipotetycznej konstrukcji. W ramach tych badań numerycznych odwzorowano więc warunki eksperymentu polegające na cyklicznym zginaniu próbki kompozytowej. Na podstawie wyników symulacji można więc stwierdzić, że w trakcie zginania najbardziej obciążone są druty prowadzone równolegle do siebie wzdłuż dłuższej ściany kompozytu. Te fragmenty drutu ulegają więc reorientacji struktury martenzytu z czego najprawdopodobniej wynika efekt spadku rezystancji w funkcji cykli obciążenia. Potwierdza to, iż taki układ jest poprawny a także pozwala na stwierdzenie, że uzyskanie większej zmiany rezystancji przy każdym cyklu jest możliwe poprzez zagęszczenie prowadzonych równolegle fragmentów drutu. Nie zostało to jednak wykonane w niniejszej pracy, gdyż promień gięcia drutu dla takiego układu był już bliski maksymalnemu. Symulacja pozwoliła też na oszacowanie czy odkształcenia badanego drutu w trakcie gięcia całej próbki kompozytowej były zbliżone do wartości badanych dla próbek z nieosłoniętych drutów ze stopu NiTi.

10 Wnioski

Stopy NiTi cechują się wyjątkowymi właściwościami, pozwalającymi na wykorzystanie ich w szerokim zakresie aplikacji od sensorów po aktuatory typu „self-sensing”. W przedstawionej pracy zwrócono uwagę na potencjalne zastosowanie tych materiałów w układach sensorycznych oraz w aktuatorach stanowiących część konstrukcji kompozytowych. Rozległa liczba badań eksperymentalnych, którym poddano stopy NiTi, pozwoliła na poszerzenie wiedzy na temat ich właściwości materiałowych związanych z przemianami fazowymi, począwszy od składu wykorzystywanego materiału wraz z analizą jego zanieczyszczenia tlenkami aż po analizę własności elektrycznych i ich zmian wynikających z przemian struktury wewnętrznej NiTi. Badania te w większości zostały przeprowadzone na autorskim stanowisku badawczym umożliwiającym identyfikację właściwości elektromechanicznych. Opracowana aparatura badawcza pozwoliła na prowadzenie szerokiego zakresu eksperymentów dotyczących stopów NiTi, zapewniając dużą powtarzalność wyników pomiarowych. Wykonane stanowisko stanowi istotny wkład w rozwój badań nad własnościami stopów NiTi.

Badania potwierdziły możliwość wykorzystania stopów NiTi w układach sensorycznych wykorzystujących zmiany rezystancji stopu do monitorowania odkształcenia całej struktury. Ponadto pozwoliły stwierdzić, że stopy NiTi mogą być zastosowane w strukturach kompozytowych w roli włókien wzmacniających, które zależnie od potrzeb mogą zmieniać swoje właściwości użytkowe. Włókna tego typu można wykorzystać w roli układu sensorycznego, wykrywającego na podstawie zmiany rezystancji deformację struktury, a zarazem pozwalającego na jej kompensację. W niniejszej pracy omówiono także zagadnienie monitorowania strukturalnego z wykorzystaniem stopów NiTi. Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że możliwe jest wytworzenie tego typu systemów. Projektowanie takich układów wymagałoby jednak rozwiązania kilku istotnych problemów.

Stopy NiTi cechują się wyjątkowymi właściwościami, dlatego cieszą się dużym zainteresowaniem naukowym. Dzięki temu materiał ten posiada potencjał do wykorzystania w licznych aplikacjach. Jednakże wiąże się to także z wieloma problemami, które muszą być rozwiązane na etapie projektowania układów wykorzystujących ten stop. W ramach pracy rozwiązano wiele tego typu zagadnień, począwszy od tak podstawowego jak uchwyt przeznaczony do montażu próbki, pozwalający jednocześnie na monitorowanie zmian jej rezystancji, który nie może być bezpośrednio przylutowany do stopu ze względu na tlenki

osadzające się na jego powierzchni. Następnie rozważono problem monitorowania temperatury w trakcie pracy aktuatora ze stopu NiTi, który ze względu na swoją wrażliwość utrudnia bezpośrednie oraz kontaktowe monitorowanie temperatury. W pracy w tym celu użyto kamery termowizyjnej o dużym przybliżeniu, gwarantującym gęstość pikseli rzędu $0,25\ \mu\text{m}$ na piksel. Zakończono na problemie związanym z adhezją między drutem ze stopu NiTi a osnową kompozytu. Przeprowadzone badania ujawniły dodatkowe problemy związane z tymi materiałami. Podstawowym problemem dla niniejszej pracy jest liczba cykli obciążenia, dla których obserwowany jest badany efekt spadku rezystancji elektrycznej. Dla badań na próbkach kompozytowych wykazano, że efekt ten jest łatwo mierzalny dla 90 cykli obciążenia. Potwierdza to możliwość wykorzystania tego typu układów do wykrywania pojedynczych obciążeń przekraczających dopuszczalne parametry pracy danej konstrukcji. Jednak w kontekście monitorowania strukturalnego pod względem zmęczenia materiału oznacza to bardzo niewielką liczbę cykli, gdyż w takich zagadnieniach najczęściej rozważa się dziesiątki tysięcy cykli obciążenia. Badania wykazały jednak możliwość zwiększenia liczby cykli poprzez modyfikacje w projekcie samego układu sensorycznego. Na przykład wykonanie próbek kompozytowych, przy których badany był dłuższy fragment przewodu osłonięty przed warunkami atmosferycznymi, pozwoliło na trzykrotne zwiększenie liczby cykli obciążenia z obserwowaną istotną zmianą rezystancji względem nieosłoniętych drutów.

Zaprezentowana praca stanowi początek badań nad potencjalnym wykorzystaniem stopów NiTi w układach sensorycznych oraz potwierdza możliwość ich zastosowania w kompozytach polimerowych, które dzięki wewnętrznemu aktuatorowi mogą zmieniać swoje właściwości mechaniczne. Praca ta otworzyła drogę do dalszych badań struktur kompozytowych wzmocnionych stopem NiTi. Jednym z obiecujących kierunków dalszych badań wydaje się opracowanie wielowarstwowego kompozytu wzmocnionego drutem ze stopu NiTi, który przy odpowiednim układzie sterowania pozwalałby na wykrycie odkształcenia oraz jego kompensację poprzez aktywację termiczną stopu NiTi. W pracy prowadzono badania na niewielkich obciążeniach, jednak wykazano, że możliwe jest skalowanie kompozytu pod konkretne zastosowanie poprzez modyfikację średnicy drutu oraz ich liczby. Na podstawie wniosków z niniejszej pracy można także stwierdzić, że istnieje potencjał w rozwoju układów sensorycznych wykorzystujących zmianę rezystancji stopu NiTi, w tym również do monitorowania strukturalnego.

Wykorzystany w pracy model materiałowy stopu NiTi został poddany walidacji, uzyskując dobrą zbieżność wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji. Zastosowanie tego

modelu pozwala na znaczące uproszczenie dalszych prac badawczych. W pracy wykazano, że dzięki wykorzystaniu tego modelu możliwa jest analiza pracy sensorów oraz aktuatorów, co umożliwia łatwe projektowanie takich układów „na miarę” pod konkretne zastosowanie.

Ważniejsze publikacje powiązane z pracą doktorską

1. Hartwich, J.; Sławski, S.; Kciuk, M.; Duda, S. Determination of Thin NiTi Wires' Mechanical Properties during Phase Transformations. *Sensors* 2023, 23, 1153. <https://doi.org/10.3390/s23031153>
2. Hartwich J., Sławski S., Duda S. Identification of nickel-titanium alloy material model parameters based on experimental research. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024;62(2):415-419. doi:10.15632/jtam-pl/186510.
3. Hartwich, J.; Duda, S.; Sławski, S.; Kciuk, M.; Woźniak, A.; Gembalczyk, G. Experimental Investigation of the Impact of Loading Conditions on the Change in Thin NiTi Wire Resistance during Cyclic Stretching. *Materials* 2024, 17, 4577. <https://doi.org/10.3390/ma17184577>

Ważniejsze referaty powiązane z pracą doktorską

1. XVI Konferencja Naukowo-Techniczna TKI2022 TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII 18–21 października 2022. Tytuł referatu: Doświadczalne wyznaczenia właściwości stopów z pamięcią kształtu.
2. 5th Polish Congress of Mechanics-25th International Conference on Computer Methods in Mechanics. Tytuł referatu: Self-sensing actuator and structural health monitoring with NiTi alloy Gliwice, 2023 Tytuł referatu: Self-sensing actuator and structural health monitoring with NiTi alloy.
3. 25th International Conference Applied Mechanics 2024 Tytuł referatu: Experimental determination of shape memory alloys' properties.
4. 43rd Solid Mechanics Conference – SolMech 2024, Wrocław, Poland, 16–18 September 2024; Tytuł referatu: Experimental and Numerical Research of the 3D Printed PLA Based Composite Structures with Thin NiTi Wires inside.
5. XXXIX Konferencja Naukowa Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych 2026. Tytuł referatu: Identyfikacja właściwości stopów NiTi związanych z przemianami fazowymi i reorientacją struktury krystalicznej (akceptacja referatu).

Bibliografia

1. Spaggiari, A.; Castagnetti, D.; Golinelli, N.; Dragoni, E.; Scirè Mammano, G. Smart Materials: Properties, Design and Mechatronic Applications. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 2019, 233, 734–762.
2. Bahl, S.; Nagar, H.; Singh, I.; Sehgal, S. Smart Materials Types, Properties and Applications: A Review. In Proceedings of the Materials Today: Proceedings; Elsevier, January 1 2020; Vol. 28, pp. 1302–1306.
3. Zareie, S.; Issa, A.S.; Seethaler, R.J.; Zabihollah, A. Recent Advances in the Applications of Shape Memory Alloys in Civil Infrastructures: A Review. *Structures* 2020, 27, 1535–1550.
4. Khoo, Z.X.; Teoh, J.E.M.; Liu, Y.; Chua, C.K.; Yang, S.; An, J.; Leong, K.F.; Yeong, W.Y. 3D Printing of Smart Materials: A Review on Recent Progresses in 4D Printing. *Virtual Phys. Prototyp.* **2015**, 10, 103–122, doi:10.1080/17452759.2015.1097054.
5. Zachariadis, T. The Effect of Improved Safety on Fuel Economy of European Cars. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2008**, 13, 133–139, doi:10.1016/J.TRD.2007.12.002.
6. Fortuna, L.; Buscarino, A. Smart Materials. *Mater.* 2022, Vol. 15, Page 6307 **2022**, 15, 6307, doi:10.3390/MA15186307.
7. Kutz, M. Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design: Third Edition. *Mech. Eng. Handb. Mater. Mech. Des. Third Ed.* **2006**, 1, 1–1341, doi:10.1002/0471777447.
8. Ölander, A. An Electrochemical Investigation of Solid Cadmium-Gold Alloys. *J. Am. Chem. Soc.* **1932**, 54, 3819–3833, doi:10.1021/JA01349A004/ASSET/JA01349A004.FP.PNG_V03.
9. wo MER, M.; Attorney, B.Y. Process of Manufacturing Articles of Thermoplastic Synthetic Resins. **1937**, 234, 993.
10. Mohd Jani, J.; Leary, M.; Subic, A.; Gibson, M.A. A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities. *Mater. Des.* **2014**, 56, 1078–1113, doi:10.1016/J.MATDES.2013.11.084.

11. Cederström, J.; Humbeeck, J. Van Relationship Between Shape Memory Material Properties and Applications. *Le J. Phys. IV* **1995**, *05*, C2-335, doi:10.1051/JP4:1995251.
12. Hodgson, D.E.; Wu, M.H.; Biermann, R.J. Shape Memory Alloys. *Prop. Sel. Nonferrous Alloy. Spec. Mater.* **1990**, 897–902, doi:10.31399/ASM.HB.V02.A0001100.
13. Wilkes, K.E.; Liaw, P.K. Fatigue Behavior of Shape-Memory Alloys. *JOM* **2000**, *52*, 45–51, doi:10.1007/S11837-000-0083-3/METRICS.
14. McWilliams A. Smart Materials and Their Applications:... - Google Scholar Available online: <https://scholar.google.com/scholar?q=McWilliams A. Smart materials and their applications%3A technologies and global markets. BCC Research Advanced Materials Report%3B> 2011. p. 161. #d=gs_cit&t=1758565483374&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3ArBhq0GlhP8IJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26hl%3Dpl (accessed on 22 March2025).
15. Fortuna, L.; Buscarino, A. Smart Materials. *Mater. 2022, Vol. 15, Page 6307* **2022**, *15*, 6307, doi:10.3390/MA15186307.
16. Abel, E.; Luo, H.; Pridham, M.; Slade, A. Issues Concerning the Measurement of Transformation Temperatures of NiTi Alloys. *Smart Mater. Struct.* **2004**, *13*, 1110, doi:10.1088/0964-1726/13/5/016.
17. Patel, S.K.; Swain, B.; Roshan, R.; Sahu, N.K.; Behera, A. A Brief Review of Shape Memory Effects and Fabrication Processes of NiTi Shape Memory Alloys. *Mater. Today Proc.* **2020**, *33*, 5552–5556, doi:10.1016/J.MATPR.2020.03.539.
18. Barbarino, S.; Saavedra Flores, E.L.; Ajaj, R.M.; Dayyani, I.; Friswell, M.I. A Review on Shape Memory Alloys with Applications to Morphing Aircraft. *Smart Mater. Struct.* **2014**, *23*, 063001, doi:10.1088/0964-1726/23/6/063001.
19. Zhang, Y.; Zhang, X.; Jiang, J.; Zhang, Q.; Ke, Y.; Qiu, S. Actuation Response of Typical Biased Shape Memory Alloy Wire under Variable Electric Heating Rates: Experimental Investigation and Modeling. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2023**, *34*, 1932–1946, doi:10.1177/1045389X231157356.

20. Zanotti, C.; Giuliani, P.; Tuissi, A.; Arnaboldi, S.; Casati, R. Response of NiTi SMA Wire Electrically Heated. *Eur. Symp. Martensitic Transform.* **2009**, 06037, doi:10.1051/ESOMAT/200906037.
21. Sun, L.; Huang, W.M. Nature of the Multistage Transformation in Shape Memory Alloys upon Heating. *Met. Sci. Heat Treat.* **2009**, 51, 573–578, doi:10.1007/S11041-010-9213-X/METRICS.
22. Polytechnica, P.; Eng, S.M. FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS AND DESIGN METHOD FOR NICKEL-TITANIUM SHAPE MEMORY ALLOY. *Period. Polytech. Mech. Eng.* **2001**, 45, 75–86, doi:n/a.
23. Guo, Y.; Klink, A.; Fu, C.; Snyder, J. Machinability and Surface Integrity of Nitinol Shape Memory Alloy. *CIRP Ann.* **2013**, 62, 83–86, doi:10.1016/J.CIRP.2013.03.004.
24. Kim, H.C.; Yoo, Y.I.; Lee, J.J. Development of a NiTi Actuator Using a Two-Way Shape Memory Effect Induced by Compressive Loading Cycles. *Sensors Actuators A Phys.* **2008**, 148, 437–442, doi:10.1016/J.SNA.2008.08.019.
25. LExcellent, C.; Leclercq, S.; Gabry, B.; Bourbon, G. The Two Way Shape Memory Effect of Shape Memory Alloys: An Experimental Study and a Phenomenological Model. *Int. J. Plast.* **2000**, 16, 1155–1168, doi:10.1016/S0749-6419(00)00005-X.
26. Liu, Y.; Liu, Y.; Van Humbeeck, J. Two-Way Shape Memory Effect Developed by Martensite Deformation in NiTi. *Acta Mater.* **1998**, 47, 199–209, doi:10.1016/S1359-6454(98)00325-5.
27. Falvo, A.; Furguele, F.M.; Maletta, C. Functional Behaviour of a NiTi-Welded Joint: Two-Way Shape Memory Effect. *Mater. Sci. Eng. A* **2008**, 481–482, 647–650, doi:10.1016/J.MSEA.2006.11.178.
28. Lahoz, R.; Puértolas, J.A. Training and Two-Way Shape Memory in NiTi Alloys: Influence on Thermal Parameters. *J. Alloys Compd.* **2004**, 381, 130–136, doi:10.1016/J.JALLCOM.2004.03.080.
29. Wada, K.; Liu, Y. On the Mechanisms of Two-Way Memory Effect and Stress-Assisted Two-Way Memory Effect in NiTi Shape Memory Alloy. *J. Alloys Compd.* **2008**, 449, 125–128, doi:10.1016/J.JALLCOM.2006.01.128.

30. Atli, K.C.; Karaman, I.; Noebe, R.D.; Gaydos, D. The Effect of Training on Two-Way Shape Memory Effect of Binary NiTi and NiTi Based Ternary High Temperature Shape Memory Alloys. *Mater. Sci. Eng. A* **2013**, *560*, 653–666, doi:10.1016/J.MSEA.2012.10.009.
31. Otsuka, K.; Ren, X. Physical Metallurgy of Ti–Ni-Based Shape Memory Alloys. *Prog. Mater. Sci.* **2005**, *50*, 511–678, doi:10.1016/J.PMATSCI.2004.10.001.
32. Elahinia, M.H.; Hashemi, M.; Tabesh, M.; Bhaduri, S.B. Manufacturing and Processing of NiTi Implants: A Review. *Prog. Mater. Sci.* **2012**, *57*, 911–946, doi:10.1016/J.PMATSCI.2011.11.001.
33. Zeleznik, N.; Hinojos, A.; Gao, X.; Nematollahi, M.; Moghaddam, N.S.; Saedi, S.; Zhang, W.; Elahinia, M.; Karaca, H.; McGuffin-Cawley, J.; et al. Modeling the Pseudoelastic Design Space of NiTi Fabricated by Laser Powder Bed Fusion. *Addit. Manuf.* **2023**, *66*, 103472, doi:10.1016/J.ADDMA.2023.103472.
34. Liu, Y.; Galvin, S.P. Criteria for Pseudoelasticity in Near-Equiatomic NiTi Shape Memory Alloys. *Acta Mater.* **1997**, *45*, 4431–4439, doi:10.1016/S1359-6454(97)00144-4.
35. Plietsch, R.; Ehrlich, K. Strength Differential Effect in Pseudoelastic NiTi Shape Memory Alloys. *Acta Mater.* **1997**, *45*, 2417–2424, doi:10.1016/S1359-6454(96)00354-0.
36. Predki, W.; Klönne, M.; Knopik, A. Cyclic Torsional Loading of Pseudoelastic NiTi Shape Memory Alloys: Damping and Fatigue Failure. *Mater. Sci. Eng. A* **2006**, *417*, 182–189, doi:10.1016/J.MSEA.2005.10.037.
37. Šittner, P.; Landa, M.; Lukáš, P.; Novák, V. R-Phase Transformation Phenomena in Thermomechanically Loaded NiTi Polycrystals. *Mech. Mater.* **2006**, *38*, 475–492, doi:10.1016/J.MECHMAT.2005.05.025.
38. Frost, M.; Jury, A.; Heller, L.; Sedlák, P. Experimentally Validated Constitutive Model for NiTi-Based Shape Memory Alloys Featuring Intermediate R-Phase Transformation: A Case Study of Ni₄₈Ti₄₉Fe₃. *Mater. Des.* **2021**, *203*, 109593, doi:10.1016/J.MATDES.2021.109593.
39. Wang, L.; Feng, P.; Xing, X.; Wu, Y.; Liu, Z. A One-Dimensional Constitutive Model for NiTi Shape Memory Alloys Considering Inelastic Strains Caused by the R-Phase Transformation. *J. Alloys Compd.* **2021**, *868*, 159192, doi:10.1016/J.JALLCOM.2021.159192.

40. Todoroki, T.; Tamura, H. Effect of Heat Treatment after Cold Working on the Phase Transformation in TiNi Alloy. *Trans. Japan Inst. Met.* **1987**, *28*, 83–94, doi:10.2320/MATERTRANS1960.28.83.
41. Wang, X.B.; Verlinden, B.; Van Humbeeck, J. R-Phase Transformation in NiTi Alloys. *Mater. Sci. Technol.* **2014**, *30*, 1517–1529, doi:10.1179/1743284714Y.0000000590.
42. Flexinol F1140Rev M NICKEL-TITANIUM ALLOY PHYSICAL PROPERTIES.
43. Suzuki, Y.; Horikawa, H. Thermal Hysteresis in Ni-Ti and Ni-Ti-X Alloys and Their Applications. *MRS Proc.* **1991**, *246*, 389–398, doi:10.1557/PROC-246-389/METRICS.
44. Polytechnica, P.; Eng, S.M. FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS AND DESIGN METHOD FOR NICKEL-TITANIUM SHAPE MEMORY ALLOY. *Period. Polytech. Mech. Eng.* **2001**, *45*, 75–86, doi:n/a.
45. Sreekumar, M.; Nagarajan, T.; Singaperumal, M. Application of Trained NiTi SMA Actuators in a Spatial Compliant Mechanism: Experimental Investigations. *Mater. Des.* **2009**, *30*, 3020–3029, doi:10.1016/J.MATDES.2008.12.017.
46. Mertmann, M.; Vergani, G. Design and Application of Shape Memory Actuators. *Eur. Phys. J. Spec. Top. 2008 1581* **2008**, *158*, 221–230, doi:10.1140/EPJST/E2008-00679-9.
47. Otsuka, K. Shape Memory Materials (General Applications of Shape Memory Alloys and Smart Materials). *Shape Mem. Mater.* **1999**, 220–239.
48. Vaidyanathan, R. Shape-Memory Alloys. *Kirk-Othmer Encycl. Chem. Technol.* **2002**, doi:10.1002/0471238961.1908011619030805.A01.PUB2.
49. Singh, D.; Choudhury, R.; Mukherjee, M.; Singh, Y. Development of Non-Linear Models to Evaluate the NiTi SMA Spring Actuator. *J. Mech. Eng. Sci.* **2022**, *16*, 8754–8769, doi:10.15282/JMES.16.1.2022.09.0692.
50. Matsui, R.; Tobushi, H.; Furuichi, Y.; Horikawa, H. Tensile Deformation and Rotating-Bending Fatigue Properties of a Highelastic Thin Wire, a Superelastic Thin Wire, and a Superelastic Thin Tube of NiTi Alloys. *J. Eng. Mater. Technol.* **2004**, *126*, 384–391, doi:10.1115/1.1789952.

51. Matsui, R.; Tobushi, H.; Horikawa, H.; Furuichi, Y. Fatigue Properties of Highelastic Thin Wire and Superelastic Thin Tube of NiTi Alloy. *Trans. Mater. Res. Soc. Japan* **2004**, *29*, 3053–3056.
52. Gall, K.; Tyber, J.; Brice, V.; Frick, C.P.; Maier, H.J.; Morgan, N. Tensile Deformation of NiTi Wires. *J. Biomed. Mater. Res. Part A* **2005**, *75A*, 810–823, doi:10.1002/JBM.A.30464.
53. Liu, Y.; Tan, G.S. Effect of Deformation by Stress-Induced Martensitic Transformation on the Transformation Behaviour of NiTi. *Intermetallics* **2000**, *8*, 67–75, doi:10.1016/S0966-9795(99)00079-5.
54. Orgéas, L.; Favier, D. Stress-Induced Martensitic Transformation of a NiTi Alloy in Isothermal Shear, Tension and Compression. *Acta Mater.* **1998**, *46*, 5579–5591, doi:10.1016/S1359-6454(98)00167-0.
55. Gollerthan, S.; Young, M.L.; Neuking, K.; Ramamurty, U.; Eggeler, G. Direct Physical Evidence for the Back-Transformation of Stress-Induced Martensite in the Vicinity of Cracks in Pseudoelastic NiTi Shape Memory Alloys. *Acta Mater.* **2009**, *57*, 5892–5897, doi:10.1016/J.ACTAMAT.2009.08.015.
56. Favier, D.; Louche, H.; Schlosser, P.; Orgéas, L.; Vacher, P.; Debove, L. Homogeneous and Heterogeneous Deformation Mechanisms in an Austenitic Polycrystalline Ti–50.8 at.% Ni Thin Tube under Tension. Investigation via Temperature and Strain Fields Measurements. *Acta Mater.* **2007**, *55*, 5310–5322, doi:10.1016/J.ACTAMAT.2007.05.027.
57. Elahinia, M.H.; Hashemi, M.; Tabesh, M.; Bhaduri, S.B. Manufacturing and Processing of NiTi Implants: A Review. *Prog. Mater. Sci.* **2012**, *57*, 911–946.
58. Krishna, B.V.; Bose, S.; Bandyopadhyay, A. Laser Processing of Net-Shape NiTi Shape Memory Alloy. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* **2007**, *38*, 1096–1103, doi:10.1007/S11661-007-9127-4/METRICS.
59. Pelton, A.R.; DiCello, J.; Miyazaki, S. Optimisation of Processing and Properties of Medical Grade Nitinol Wire. *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.* **2000**, *9*, 107–118, doi:10.3109/13645700009063057.
60. Frenzel, J.; George, E.P.; Dlouhy, A.; Somsen, C.; Wagner, M.F.X.; Eggeler, G. Influence of Ni on Martensitic Phase Transformations in NiTi Shape Memory Alloys. *Acta Mater.* **2010**, *58*, 3444–3458, doi:10.1016/J.ACTAMAT.2010.02.019.

61. Kaynak, Y.; Karaca, H.E.; Jawahir, I.S. Cutting Speed Dependent Microstructure and Transformation Behavior of NiTi Alloy in Dry and Cryogenic Machining. *J. Mater. Eng. Perform.* **2015**, *24*, 452–460, doi:10.1007/S11665-014-1247-6/METRICS.
62. Krishna, B.V.; Bose, S.; Bandyopadhyay, A. Laser Processing of Net-Shape NiTi Shape Memory Alloy. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* **2007**, *38*, 1096–1103, doi:10.1007/S11661-007-9127-4/METRICS.
63. Frenzel, J.; George, E.P.; Dlouhy, A.; Somsen, C.; Wagner, M.F.X.; Eggeler, G. Influence of Ni on Martensitic Phase Transformations in NiTi Shape Memory Alloys. *Acta Mater.* **2010**, *58*, 3444–3458, doi:10.1016/J.ACTAMAT.2010.02.019.
64. Mohd Jani, J.; Leary, M.; Subic, A. Designing Shape Memory Alloy Linear Actuators: A Review. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2017**, *28*, 1699–1718, doi:10.1177/1045389X16679296/ASSET/30FAA481-DF14-45B8-82BC-114B6F823AF3/ASSETS/IMAGES/10.1177_1045389X16679296-IMG12.PNG.
65. Tyc, O.; Heller, L.; Vronka, M.; Šittner, P. Effect of Temperature on Fatigue of Superelastic NiTi Wires. *Int. J. Fatigue* **2020**, *134*, 105470, doi:10.1016/J.IJFATIGUE.2020.105470.
66. Figueiredo, A.M.; Modenesi, P.; Buono, V. Low-Cycle Fatigue Life of Superelastic NiTi Wires. *Int. J. Fatigue* **2009**, *31*, 751–758, doi:10.1016/J.IJFATIGUE.2008.03.014.
67. Abel, E.; Luo, H.; Pridham, M.; Slade, A. Issues Concerning the Measurement of Transformation Temperatures of NiTi Alloys. *Smart Mater. Struct.* **2004**, *13*, 1110, doi:10.1088/0964-1726/13/5/016.
68. Karunakaran, S.; Abang, D.L.; Majid, A. Induction Heating Method for Thermomechanical Study of NiTi Shape Memory Alloy Wire. *J. Aeronaut. Astronaut. Aviat.* **2025**, *57*, 593–603, doi:10.6125/JoAAA.202505_57(3S).32.
69. Vaijapurkar, V.B.; Ravinder, Y. Electrical Resistance Modeling of Shape Memory Alloy Wire Using an Efficient Performance Analysis Approach. *Shape Mem. Superelasticity* **2022**, *8*, 168–182, doi:10.1007/S40830-022-00369-Y/METRICS.
70. Toptas, E.; Celebi, M.F.; Ersoy, S. Measurement of Temperature and Displacement with NiTi Actuators under Certain Electrical Conditions. *J. Meas. Eng.* **2021**, *9*, 87–94, doi:10.21595/JME.2021.21841.

71. Šittner, P.; Heller, L.; Pilch, J.; Curfs, C.; Alonso, T.; Favier, D. Young's Modulus of Austenite and Martensite Phases in Superelastic NiTi Wires. *J. Mater. Eng. Perform.* **2014**, *23*, 2303–2314, doi:10.1007/S11665-014-0976-X/METRICS.
72. Antonucci, V.; Faiella, G.; Giordano, M.; Mennella, F.; Nicolais, L. Electrical Resistivity Study and Characterization during NiTi Phase Transformations. *Thermochim. Acta* **2007**, *462*, 64–69, doi:10.1016/J.TCA.2007.05.024.
73. Bhargaw, H.N.; Ahmed, M.; Sinha, P. Thermo-Electric Behaviour of NiTi Shape Memory Alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **2013**, *23*, 2329–2335, doi:10.1016/S1003-6326(13)62737-5.
74. Li, H.; Mao, C.-X.; Ou, J.-P. Strain Self-Sensing Property and Strain Rate Dependent Constitutive Model of Austenitic Shape Memory Alloy: Experiment and Theory. *J. Mater. Civ. Eng.* **2005**, *17*, 676–685, doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(676).
75. Lu, Y.; Zhang, R.; Xu, Y.; Wang, L.; Yue, H. Resistance Characteristics of SMA Actuator Based on the Variable Speed Phase Transformation Constitutive Model. *Mater.* **2020**, *13*, Page 1479 **2020**, *13*, 1479, doi:10.3390/MA13061479.
76. Guan, J.H.; Pei, Y.C.; Wu, J.T. A Driving Strategy of Shape Memory Alloy Wires with Electric Resistance Modeled by Logistic Function for Power Consumption Reduction. *Mech. Syst. Signal Process.* **2021**, *160*, 107839, doi:10.1016/J.YMSSP.2021.107839.
77. Guan, J.H.; Pei, Y.C.; Wu, J.T. A Driving Strategy of Shape Memory Alloy Wires with Electric Resistance Modeled by Logistic Function for Power Consumption Reduction. *Mech. Syst. Signal Process.* **2021**, *160*, 107839, doi:10.1016/J.YMSSP.2021.107839.
78. LI, J.; HARADA, H. Phase Resistance Feedback Control and Displacement-Resistance Model for Thick SMA Actuator. *J. Syst. Des. Dyn.* **2013**, *7*, 197–209, doi:10.1299/JSDD.7.197.
79. Lee, S.H.; Kim, S.W. Improved Position Control of Shape Memory Alloy Actuator Using the Self-Sensing Model. *Sensors Actuators A Phys.* **2019**, *297*, 111529, doi:10.1016/J.SNA.2019.111529.
80. Ma, N.; Song, G.; Lee, H.J. Position Control of Shape Memory Alloy Actuators with Internal Electrical Resistancefeedback Using Neural Networks. *Smart Mater. Struct.* **2004**, *13*, 777, doi:10.1088/0964-1726/13/4/015.

81. Gurung, H.; Banerjee, A. Self-Sensing SMA Actuator Using Extended Kalman Filter and Artificial Neural Network. *Procedia Eng.* **2016**, *144*, 629–634, doi:10.1016/J.PROENG.2016.05.054.
82. Shi, Z.; Tian, J.; Luo, R.; Zhao, G.; Wang, T. Multifeedback Control of a Shape Memory Alloy Actuator and a Trial Application. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.* **2018**, *48*, 1106–1119, doi:10.1109/TSMC.2016.2641465.
83. Gurley, A.; Lambert, T.R.; Beale, D.; Broughton, R. Dual Measurement Self-Sensing Technique of NiTi Actuators for Use in Robust Control. *Smart Mater. Struct.* **2017**, *26*, 105050, doi:10.1088/1361-665X/AA8B42.
84. Pilate, F.; Toncheva, A.; Dubois, P.; Raquez, J.M. Shape-Memory Polymers for Multiple Applications in the Materials World. *Eur. Polym. J.* **2016**, *80*, 268–294, doi:10.1016/J.EURPOLYMJ.2016.05.004.
85. Miaudet, P.; Derré, A.; Maugey, M.; Zakri, C.; Piccione, P.M.; Inoubli, R.; Poulin, P. Shape and Temperature Memory of Nanocomposites with Broadened Glass Transition. *Science* (80-.). **2007**, *318*, 1294–1296, doi:10.1126/SCIENCE.1145593/SUPPL_FILE/MIAUDET.SOM.PDF.
86. Fejos, M.; Romhány, G.; Karger-Kocsis, J. Shape Memory Characteristics of Woven Glass Fibre Fabric Reinforced Epoxy Composite in Flexure. *J. Reinf. Plast. Compos.* **2012**, *31*, 1532–1537, doi:10.1177/0731684412461541.
87. Ni, Q.Q.; Zhang, C. sheng; Fu, Y.; Dai, G.; Kimura, T. Shape Memory Effect and Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Shape Memory Polymer Nanocomposites. *Compos. Struct.* **2007**, *81*, 176–184, doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.08.017.
88. Wang, W.; Liu, D.; Liu, Y.; Leng, J.; Bhattacharyya, D. Electrical Actuation Properties of Reduced Graphene Oxide Paper/Epoxy-Based Shape Memory Composites. *Compos. Sci. Technol.* **2015**, *106*, 20–24, doi:10.1016/J.COMPSCITECH.2014.10.016.
89. Kim, J.T.; Jeong, H.J.; Park, H.C.; Jeong, H.M.; Bae, S.Y.; Kim, B.K. Electroactive Shape Memory Performance of Polyurethane/Graphene Nanocomposites. *React. Funct. Polym.* **2015**, *88*, 1–7, doi:10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2015.01.004.

90. Kumar Patel, K.; Purohit, R. Improved Shape Memory and Mechanical Properties of Microwave-Induced Thermoplastic Polyurethane/Graphene Nanoplatelets Composites. *Sensors Actuators A Phys.* **2019**, *285*, 17–24, doi:10.1016/J.SNA.2018.10.049.
91. Lu, H.; Liang, F.; Yao, Y.; Gou, J.; Hui, D. Self-Assembled Multi-Layered Carbon Nanofiber Nanopaper for Significantly Improving Electrical Actuation of Shape Memory Polymer Nanocomposite. *Compos. Part B Eng.* **2014**, *59*, 191–195, doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2013.12.009.
92. Gall, K.; Dunn, M.L.; Liu, Y.; Finch, D.; Lake, M.; Munshi, N.A. Shape Memory Polymer Nanocomposites. *Acta Mater.* **2002**, *50*, 5115–5126, doi:10.1016/S1359-6454(02)00368-3.
93. Lu, H.; Yao, Y.; Huang, W.M.; Leng, J.; Hui, D. Significantly Improving Infrared Light-Induced Shape Recovery Behavior of Shape Memory Polymeric Nanocomposite via a Synergistic Effect of Carbon Nanotube and Boron Nitride. *Compos. Part B Eng.* **2014**, *62*, 256–261, doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2014.03.007.
94. Ponyrko, S.; Donato, R.K.; Matějka, L. Tailored High Performance Shape Memory Epoxy–Silica Nanocomposites. Structure Design. *Polym. Chem.* **2016**, *7*, 560–572, doi:10.1039/C5PY01450F.
95. Xie, F.; Huang, L.; Leng, J.; Liu, Y. Thermoset Shape Memory Polymers and Their Composites. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2016**, *27*, 2433–2455, doi:10.1177/1045389X16634211.
96. Melly, S.K.; Liu, L.; Liu, Y.; Leng, J. Active Composites Based on Shape Memory Polymers: Overview, Fabrication Methods, Applications, and Future Prospects. *J. Mater. Sci.* **2020**, *55*, 10975–11051, doi:10.1007/S10853-020-04761-W.
97. Herath, H.M.C.M.; Epaarachchi, J.A.; Islam, M.M.; Al-Azzawi, W.; Leng, J.; Zhang, F. Structural Performance and Photothermal Recovery of Carbon Fibre Reinforced Shape Memory Polymer. *Compos. Sci. Technol.* **2018**, *167*, 206–214, doi:10.1016/J.COMPSCITECH.2018.07.042.
98. Xie, H.; Li, L.; Deng, X.Y.; Cheng, C.Y.; Yang, K.K.; Wang, Y.Z. Reinforcement of Shape-Memory Poly(Ethylene-Co-Vinyl Acetate) by Carbon Fibre to Access Robust Recovery Capability under Resistant Condition. *Compos. Sci. Technol.* **2018**, *157*, 202–208, doi:10.1016/J.COMPSCITECH.2018.01.031.

99. Ohki, T.; Ni, Q.Q.; Ohsako, N.; Iwamoto, M. Mechanical and Shape Memory Behavior of Composites with Shape Memory Polymer. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **2004**, *35*, 1065–1073, doi:10.1016/J.COMPOSITESA.2004.03.001.
100. Rahman, A.A.; Ikeda, T.; Senba, A. Memory Effects Performance of Polyurethane Shape Memory Polymer Composites (SMPC) in the Variation of Fiber Volume Fractions. *Fibers Polym.* **2017**, *18*, 979–986, doi:10.1007/s12221-017-6687-9.
101. Aurrekoetxea, J.; Zurbitu, J.; Ortiz De Mendibil, I.; Agirregomezkorta, A.; Sánchez-Soto, M.; Sarrionandia, M. Effect of Superelastic Shape Memory Alloy Wires on the Impact Behavior of Carbon Fiber Reinforced in Situ Polymerized Poly(Butylene Terephthalate) Composites. *Mater. Lett.* **2011**, *65*, 863–865, doi:10.1016/J.MATLET.2010.12.020.
102. Pinto, F.; Meo, M. Mechanical Response of Shape Memory Alloy–Based Hybrid Composite Subjected to Low-Velocity Impacts. *J. Compos. Mater.* **2015**, *49*, 2713–2722, doi:10.1177/0021998314554119.
103. Khalili, S.M.R.; Shiravi, M.; Nooramin, A.S. Mechanical Behavior of Notched Plate Repaired with Polymer Composite and Smart Patches - Experimental Study. *J. Reinf. Plast. Compos.* **2010**, *29*, 3021–3037, doi:10.1177/0731684410363179.
104. El-Tahan, M.; Dawood, M. Fatigue Behavior of a Thermally-Activated NiTiNb SMA-FRP Patch. *Smart Mater. Struct.* **2015**, *25*, 015030, doi:10.1088/0964-1726/25/1/015030.
105. Zheng, B.; Dawood, M. Fatigue Crack Growth Analysis of Steel Elements Reinforced with Shape Memory Alloy (SMA)/Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Patches. *Compos. Struct.* **2017**, *164*, 158–169, doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.12.077.
106. El-Tahan, M.; Dawood, M.; Song, G. Development of a Self-Stressing NiTiNb Shape Memory Alloy (SMA)/Fiber Reinforced Polymer (FRP) Patch. *Smart Mater. Struct.* **2015**, *24*, 065035, doi:10.1088/0964-1726/24/6/065035.
107. Abdy, A.I.; Hashemi, M.J.; Al-Mahaidi, R. Fatigue Life Improvement of Steel Structures Using Self-Prestressing CFRP/SMA Hybrid Composite Patches. *Eng. Struct.* **2018**, *174*, 358–372, doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.07.072.
108. Amano, M.; Okabe, Y.; Takeda, N. Evaluation of Crack Suppression Effect of TiNi SMA Foil Embedded in CFRP Cross-Ply Laminates with Embedded Small-Diameter FBG

Sensor. *JSME Int. J. Ser. A Solid Mech. Mater. Eng.* **2005**, *48*, 443–450, doi:10.1299/JSMEA.48.443.

109. Psarras, G.C.; Parthenios, J.; Galiotis, C. Adaptive Composites Incorporating Shape Memory Alloy Wires Part I Probing the Internal Stress and Temperature Distributions with a Laser Raman Sensor. *J. Mater. Sci.* **2001**, *36*, 535–546, doi:10.1023/A:1004869613018/METRICS.

110. Zhao, L.M.; Feng, X.; Mi, X.J.; Li, Y.F.; Xie, H.F.; Yin, X.Q. The Interfacial Strength Improvement of SMA Composite Using ZnO with Electrochemical Deposition Method. *Appl. Surf. Sci.* **2014**, *320*, 670–673, doi:10.1016/J.APSUSC.2014.09.125.

111. Song, G.; Kelly, B.; Agrawal, B.N. Active Position Control of a Shape Memory Alloy Wire Actuated Composite beam. *Smart Mater. Struct.* **2000**, *9*, 711, doi:10.1088/0964-1726/9/5/316.

112. Zhou, G.; Lloyd, P. Design, Manufacture and Evaluation of Bending Behaviour of Composite Beams Embedded with SMA Wires. *Compos. Sci. Technol.* **2009**, *69*, 2034–2041, doi:10.1016/J.COMPSCITECH.2009.01.017.

113. Friend, C.M.; Morgan, N. The Actuation Response of Model SMA Hybrid Laminates. *Le J. Phys. IV* **1995**, *05*, C2-415, doi:10.1051/JP4:1995264.

114. Lelieveld, C.; Jansen, K.; Teuffel, P. Mechanical Characterization of a Shape Morphing Smart Composite with Embedded Shape Memory Alloys in a Shape Memory Polymer Matrix. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2016**, *27*, 2038–2048, doi:10.1177/1045389X15620035.

115. Baz, A.M.; Chen, T.-H. Performance of Nitinol-Reinforced Drive Shafts. <https://doi.org/10.1117/12.152810> **1993**, *1917*, 791–808, doi:10.1117/12.152810.

116. Ke, J.; Gao, J.; Wu, Z. yu; Xiang, Z.; Hu, X. dong Vari-Stiffness Characteristics of a 3D SMA Hybrid Basalt Woven Composite. *Compos. Struct.* **2022**, *285*, 115192, doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115192.

117. Baburaj, V.; Matsuzaki, Y. Material Damping Analysis of a Smart Hybrid Composite Lamina. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **1994**, *5*, 647–653, doi:10.1177/1045389X9400500508.

118. Bidaux, J.-E.; Bernet, N.; Sarwa, C.; Manson, J.-A.E.; Gotthardt, R. Vibration Frequency Control of a Polymer Beam Using Embedded Shape-Memory-Alloy Fibres. *J. Phys. IV* **1995**, *05*, C8-1177, doi:10.1051/JP4/1995581177.

119. Bidaux, J.-E.; Manson, J.-A.E.; Gotthardt, R. Active Modification of the Vibration Frequencies of a Polymer Beam Using Shape Memory Alloy Fibres. <https://doi.org/10.1117/12.237171> **1996**, 2779, 517–522, doi:10.1117/12.237171.
120. Schetky, L.M.; Liang, C.; Rogers, C.A. Hybrid Composite Materials Using Shape Memory Alloy Actuators to Provide Vibration and Acoustic Control. <https://doi.org/10.1117/12.175203> **1994**, 2190, 422–433, doi:10.1117/12.175203.
121. Lau, K. Vibration Characteristics of SMA Composite Beams with Different Boundary Conditions. *Mater. Des.* **2002**, 23, 741–749, doi:10.1016/S0261-3069(02)00069-9.
122. Malekzadeh, K.; Mozafari, A.; Ghasemi, F.A. Free Vibration Response of a Multilayer Smart Hybrid Composite Plate with Embedded SMA Wires. *Lat. Am. J. Solids Struct.* **2014**, 11, 279–298, doi:10.1590/S1679-78252014000200008.
123. Lee, S.H.; Kim, S.W. Self-Sensing-Based Deflection Control of Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP)-Based Shape Memory Alloy Hybrid Composite Beams. *Compos. Struct.* **2020**, 251, 112544, doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112544.
124. Rodinò, S.; Curcio, E.M.; Sgambitterra, E.; Maletta, C. SMA-Polymer Composite Made by 3D Printing: Modelling and Experiments. *Procedia Struct. Integr.* **2023**, 47, 579–588, doi:10.1016/J.PROSTR.2023.07.066.
125. Lalegani Dezaki, M.; Bodaghi, M.; Serjouei, A.; Afazov, S.; Zolfagharian, A. Adaptive Reversible Composite-Based Shape Memory Alloy Soft Actuators. *Sensors Actuators A Phys.* **2022**, 345, 113779, doi:10.1016/J.SNA.2022.113779.
126. Wang, W.; Rodrigue, H.; Kim, H. Il; Han, M.W.; Ahn, S.H. Soft Composite Hinge Actuator and Application to Compliant Robotic Gripper. *Compos. Part B Eng.* **2016**, 98, 397–405, doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2016.05.030.
127. Song, S.H.; Lee, H.; Lee, J.G.; Lee, J.Y.; Cho, M.; Ahn, S.H. Design and Analysis of a Smart Soft Composite Structure for Various Modes of Actuation. *Compos. Part B Eng.* **2016**, 95, 155–165, doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2016.03.087.
128. Sreesha, R.B.; Ladakhan, S.H.; Mudakavi, D.; M Adinarayanappa, S. An Experimental Investigation on Performance of NiTi-Based Shape Memory Alloy 4D Printed Actuators for Bending Application. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2022**, 122, 4421–4436, doi:10.1007/S00170-022-09875-W/FIGURES/17.

129. Pyo, Y.; Kang, M.; Jang, J. young; Park, Y.; Son, Y.H.; Choi, M.C.; Ha, J. wan; Chang, Y.W.; Lee, C.S. Design of a Shape Memory Composite(SMC) Using 4D Printing Technology. *Sensors Actuators A Phys.* **2018**, *283*, 187–195, doi:10.1016/J.SNA.2018.08.049.
130. Bodkhe, S.; Vigo, L.; Zhu, S.; Testoni, O.; Aegerter, N.; Ermanni, P. 3D PRINTING TO INTEGRATE ACTUATORS INTO COMPOSITES. *Addit. Manuf.* **2020**, *35*, 101290, doi:10.1016/J.ADDMA.2020.101290.
131. Saleh, M.A.; Kempers, R.; Melenka, G.W. 3D Printed Continuous Wire Polymer Composites Strain Sensors for Structural Health Monitoring. *Smart Mater. Struct.* **2019**, *28*, 105041, doi:10.1088/1361-665X/AAFDEF.
132. Frost, M.; Kruisová, A.; Šáněl, V.; Sedlák, P.; Haušild, P.; Kabla, M.; Shilo, D.; Landa, M. Characterization of Superelastic NiTi Alloys by Nanoindentation: Experiments and Simulations. *Acta Phys. Pol. A* **2015**, *128*, 664–669, doi:10.12693/APHYSPOLA.128.664.
133. Mutter, D.; Nielaba, P. Simulation of the Shape Memory Effect in a NiTi Nano Model System. *J. Alloys Compd.* **2013**, *577*, S83–S87, doi:10.1016/J.JALLCOM.2012.01.095.
134. Chowdhury, P.; Patriarca, L.; Ren, G.; Sehitoglu, H. Molecular Dynamics Modeling of NiTi Superelasticity in Presence of Nanoprecipitates. *Int. J. Plast.* **2016**, *81*, 152–167, doi:10.1016/j.ijplas.2016.01.011.
135. Evangelista, V.; Marfia, S.; Sacco, E. Phenomenological 3D and 1D Consistent Models for Shape-Memory Alloy Materials. *Comput. Mech.* **2009**, *44*, 405–421, doi:10.1007/s00466-009-0381-8.
136. Falk, F. Model Free Energy, Mechanics, and Thermodynamics of Shape Memory Alloys. *Acta Metall.* **1980**, *28*, 1773–1780, doi:10.1016/0001-6160(80)90030-9.
137. Arghavani, J. Thermo-Mechanical Behavior of Shape Memory Alloys under Multi-Axial Loadings at Small and Finite Strains: Constitutive Modeling and Numerical Implementation A Dissertation by Sharif University of Technology , Tehran , Iran in Partial Fulfillment of the R. **2010**.
138. Jalali, M.; Mohammadi, K.; Movahhedy, M.R.; Karimi, F.; Sadrnezhad, S.K.; Chernyshikhin, S. V.; Shishkovsky, I. V. SLM Additive Manufacturing of NiTi Porous Implants: A Review of Constitutive Models, Finite Element Simulations, Manufacturing, Heat Treatment, Mechanical, and Biomedical Studies. *Met. Mater. Int.* **2023**, *29*, 2458–2491.

139. Saedi, S.; Saghaian, S.E.; Jahadakbar, A.; Shayesteh Moghaddam, N.; Taheri Andani, M.; Saghaian, S.M.; Lu, Y.C.; Elahinia, M.; Karaca, H.E. Shape Memory Response of Porous NiTi Shape Memory Alloys Fabricated by Selective Laser Melting. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* **2018**, *29*, 1–12, doi:10.1007/s10856-018-6044-6.
140. Thériault, P.; Terriault, P.; Brailovski, V.; Gallo, R. Finite Element Modeling of a Progressively Expanding Shape Memory Stent. *J. Biomech.* **2006**, *39*, 2837–2844, doi:10.1016/j.jbiomech.2005.09.018.
141. Razali, M.F.; Mahmud, A.S.; Mokhtar, N.; Abdullah, J. Finite-Element Analysis of NiTi Wire Deflection during Orthodontic Levelling Treatment. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2016; Vol. 114.
142. Auricchio, F. A Robust Integration-Algorithm for a Finite-Strain Shape-Memory-Alloy Superelastic Model. *Int. J. Plast.* **2001**, *17*, 971–990, doi:10.1016/S0749-6419(00)00050-4.
143. Souza, A.C.; Mamiya, E.N.; Zouain, N. Three-Dimensional Model for Solids Undergoing Stress-Induced Phase Transformations. *Eur. J. Mech. A/Solids* **1998**, *17*, 789–806, doi:10.1016/S0997-7538(98)80005-3.
144. Auricchio, F.; Taylor, R.L.; Lubliner, J. Shape-Memory Alloys: Macromodelling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **1997**, *146*, 281–312, doi:10.1016/S0045-7825(96)01232-7.
145. Auricchio, F.; Petrini, L. Improvements and Algorithmical Considerations on a Recent Three-Dimensional Model Describing Stress-Induced Solid Phase Transformations. *Int. J. Numer. Methods Eng.* **2002**, *55*, 1255–1284, doi:10.1002/NME.619.
146. Pathan, M.; Devaramani, R.; Adinarayanappa, S.M. Modelling, Simulation, and Experiments of 4D Printed Twisting Actuator. *Mater. Today Proc.* **2024**, *101*, 43–50, doi:10.1016/J.MATPR.2023.03.004.
147. Alazzawi, S.; Filip, P. Modeling the Transient Behavior of the NiTi Shape Memory Actuator Using Finite Element Analysis: Parametric Study of the Rate Effects. *Results Mater.* **2019**, *1*, 100015, doi:10.1016/j.rinma.2019.100015.
148. Kim, S.; Hawkes, E.; Cho, K.; Jolda, M.; Foley, J.; Wood, R. Micro Artificial Muscle Fiber Using NiTi Spring for Soft Robotics. *2009 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS 2009* **2009**, 2228–2234, doi:10.1109/IROS.2009.5354178.

149. Yang, H.; Xu, M.; Li, W.; Zhang, S. Design and Implementation of a Soft Robotic Arm Driven by SMA Coils. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2019**, *66*, 6108–6116, doi:10.1109/TIE.2018.2872005.
150. Liu, Q.; Ghodrati, S.; Jansen, K.M.B. Modelling and Mechanical Design of a Flexible Tube-Guided SMA Actuator. *Mater. Des.* **2022**, *216*, 110571, doi:10.1016/J.MATDES.2022.110571.
151. Sagar, S.N.K.; Sreekumar, M. Miniaturized Flexible Flow Pump Using SMA Actuator. *Procedia Eng.* **2013**, *64*, 896–906, doi:10.1016/J.PROENG.2013.09.166.
152. Khan, S.; Pydi, Y.S.; Mani Prabu, S.S.; Palani, I.A.; Singh, P. Development and Actuation Analysis of Shape Memory Alloy Reinforced Composite Fin for Aerodynamic Application. *Sensors Actuators A Phys.* **2021**, *331*, 113012, doi:10.1016/J.SNA.2021.113012.
153. Wang, W.; Rodrigue, H.; Ahn, S.H. Smart Soft Composite Actuator with Shape Retention Capability Using Embedded Fusible Alloy Structures. *Compos. Part B Eng.* **2015**, *78*, 507–514, doi:10.1016/j.compositesb.2015.04.007.
154. Josephine Selvarani Ruth, D.; Sunjai Nakshatharan, S.; Dhanalakshmi, D. Differential Resistance Feedback Control of a Self-Sensing Shape Memory Alloy Actuated System. *ISA Trans.* **2014**, *53*, 289–297, doi:10.1016/j.isatra.2013.11.002.
155. Liu, Y.; Li, L.; Xiao, F.; Hou, R.; Lin, Z.; Cai, X.; Zuo, S.; Zhou, Y.; Hua, S.; Chen, Y.; et al. Braided NiTi Alloys Microfilaments with Near-Linear Responses: Toward Flexible High-Pressure Sensors. *J. Mater. Sci. Technol.* **2025**, *229*, 269–278, doi:10.1016/j.jmst.2024.12.058.
156. Mehrpouya, M.; Bidsorkhi, H.C. MEMS Applications of NiTi Based Shape Memory Alloys: A Review. *Micro Nanosyst.* **2017**, *8*, 79–91, doi:10.2174/1876402908666161102151453.
157. Fu, Y.Q.; Luo, J.K.; Hu, M.; Du, H.J.; Flewitt, A.J.; Milne, W.I. Micromirror Structure Actuated by TiNi Shape Memory Thin Films. *J. Micromechanics Microengineering* **2005**, *15*, 1872–1877, doi:10.1088/0960-1317/15/10/012.
158. Sławski, S.; Kciuk, M.; Klein, W. Assessment of SMA Electrical Resistance Change during Cyclic Stretching with Small Elongation. *Sensors* **2021**, *21*, 6804, doi:10.3390/s21206804.

159. PN-EN 451-1:2017-06 - Wersja Angielska Available online: <https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-178-2019-06e.html> (accessed on 08 March2025).
160. Hartwich, J.; Duda, S.; Sławski, S.; Kciuk, M.; Woźniak, A.; Gembalczyk, G. Experimental Investigation of the Impact of Loading Conditions on the Change in Thin NiTi Wire Resistance during Cyclic Stretching. *Materials (Basel)*. **2024**, *17*, 4577, doi:10.3390/ma17184577.
161. Statyw Automatyczny Pionowy STAV500/300 Available online: <https://www.axis.pl/pl/stav/743-statyw-automatyczny-pionowy-stav-500300.html> (accessed on 20 March2025).
162. Fiberoptic Sensor-Reflectance Compensated*.
163. Drukarki 3D Original Prusa Bezpośrednio Od Josefa Prusy Available online: <https://www.prusa3d.com/pl/product/buddy3d-pla-black-1kg/#downloads> (accessed on 23 March2025).
164. Tilak, T.K.; Jayaprakasam, S.; Padmanabhan, K.A.; Misochenko, A.A.; Stolyarov, V. V. On the Tensile Behaviour of Coarse and Ultrafine Grained NiTi. *Mater. Charact.* **2019**, *149*, 41–51, doi:10.1016/J.MATCHAR.2019.01.007.
165. Ferčec, J.; Anžel, I.; Rudolf, R. Stress Dependent Electrical Resistivity of Orthodontic Wire from the Shape Memory Alloy NiTi. *Mater. Des.* **2014**, *55*, 699–706, doi:10.1016/J.MATDES.2013.10.041.
166. Chen, Y.; Tyc, O.; Kadeřávek, L.; Molnárová, O.; Heller, L.; Šittner, P. Temperature and Microstructure Dependence of Localized Tensile Deformation of Superelastic NiTi Wires. *Mater. Des.* **2019**, *174*, 107797, doi:10.1016/j.matdes.2019.107797.
167. Sławski, S.; Hartwich, J.; Bartusiak, R.; Duda, S. Assessment of the Bonding Force between the Thin NiTi Wire and 3D Printed Polymeric Matrix. In Proceedings of the 2024 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2024 - Proceeding; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024; pp. 73–77.
168. 5.3. Beam and Link (Truss) Elements Available online: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans_elem/Hlp_E_BeamElements.html (accessed on 23 March2025).

169. SHELL281 Available online:
https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans_elem/Hlp_E_SHELL281.html?q=SHELL281 (accessed on 23 March 2025).

Streszczenie

Praca dotyczy możliwości wykorzystania stopów NiTi w układach sensorycznych oraz aktuatorach wykonanych z kompozytów polimerowych. W trakcie pracy doktorskiej przeprowadzono szereg badań doświadczalnych na autorskim stanowisku badawczym, z wykorzystaniem drutów ze stopu NiTi o niewielkiej średnicy, nieprzekraczającej 375 μm . Podjęto zarówno zagadnienia dotyczące wykorzystania stopów NiTi w układach sensorycznych, jak i w aktuatorach, a także problematykę łączącą oba te obszary. Praca została podzielona na trzy kluczowe etapy. W pierwszej części opisano badania dotyczące wpływu obciążenia mechanicznego na właściwości elektryczne cienkich drutów ze stopu NiTi (o średnicy poniżej 150 μm), zarówno nieosłoniętych, jak i umieszczonych w osnowie polimerowej. W kolejnej części przedstawiono badania wpływu przemiany fazowej na zmiany właściwości mechanicznych cienkich drutów ze stopu NiTi oraz kompozytów opartych na ich bazie. Trzeci etap skoncentrowano na badaniach numerycznych, obejmujących proces identyfikacji parametrów modelu materiałowego oraz jego walidację. Pierwsze badania wykazały wpływ odkształcenia i reorientacji struktur na zmianę rezystancji cienkich drutów ze stopu NiTi. Podczas cyklicznego rozciągania próbki stopu NiTi ze stałym przemieszczeniem obserwowano spadek rezystancji elektrycznej po każdym kolejnym cyklu rozciągania. Dalsze badania właściwości elektrycznych stopów NiTi skupiły się na strukturach kompozytowych. W tym celu opracowano próbki stanowiące proste kompozyty o osnowie z PLA z zatopionym wewnątrz drutem ze stopu NiTi. Przeprowadzone badania cyklicznego zginania próbek kompozytowych potwierdziły, że dla drutu ze stopu NiTi umieszczonego wewnątrz osnowy polimerowej (PLA) również obserwowany jest efekt spadku rezystancji po każdym kolejnym cyklu obciążenia. Badając aktuatory ze stopów NiTi w układzie szeregowym ze sprężyną, wykazano zależność skurczu drutu oraz generowanej przez niego siły od temperatury drutu, a tym samym od natężenia prądu, którym nagrzewano drut. Wykazano, że wraz ze spadkiem wartości natężenia prądu poniżej wartości nominalnej oraz temperatury zmniejsza się uzyskane skrócenie oraz wygenerowana siła. Opracowano aktuator będący prostym kompozytem, składającym się z zatopionego wewnątrz osnowy drutu ze stopu NiTi, obciążonego stałą siłą przyłożoną za pomocą stempla w centralnej części próbki. Odkształcenie wywołane obciążeniem zostało częściowo skompensowane poprzez aktywację aktuatora, wywołującą przemiany w stopie NiTi. Aby ułatwić projektowanie aktuatorów oraz sensorów wykorzystujących stopy NiTi, dokonano wyznaczenia parametrów modelu materiałowego stopu NiTi. W tym celu eksperymentalnie określono krzywą rozciągania stopu NiTi. Pierwsze przeprowadzone symulacje potwierdziły dobrą zbieżność modelu z wynikami eksperymentalnymi.

Abstract

The research concerns the potential application of NiTi alloys in polymer composite sensor systems and actuators. A series of experiments were conducted on a proprietary test stand during the doctoral thesis, using NiTi alloy wires with a diameter of no more than 375 μm . The issues related to the use of NiTi alloys in sensor systems and actuators were addressed, as were issues connecting these two areas. The work was divided into three key stages. The first stage involved researching the impact of mechanical loading on the electrical properties of thin NiTi alloy wires with a diameter of less than 150 μm , both uncoated and embedded in a polymer matrix. The second part presents research on the impact of phase transformation on changes in the mechanical properties of thin NiTi alloy wires and composites based on them. The third stage focused on numerical research, including identifying and validating material model parameters. The first research examined how deformation and reorientation of structures affects the resistance of thin NiTi alloy wires. During cyclic stretching of NiTi alloy samples with constant displacement, a decrease in electrical resistance was observed after each successive cycle. Further research investigating the electrical properties of NiTi alloys focused on composite structures. For this purpose, samples were developed consisting of simple composites with a PLA matrix embedded with a NiTi alloy wire. Cyclic bending experiments on these composite samples confirmed that the NiTi alloy wire embedded in the PLA matrix also exhibited a decrease in resistance after each successive load cycle. A relationship was demonstrated between the contraction of the wire and the force it generates, the temperature of the wire and the current used to heat the wire by testing NiTi alloy actuators in a series arrangement with a spring. It was shown that, as the current intensity falls below the nominal value and the temperature decreases, the resulting shortening and generated force also decrease. A simple composite actuator was developed consisting of a NiTi alloy wire embedded in a matrix. A constant force was applied to the central part of the sample using a stamp. The deformation caused by the load was partially compensated for by activating the actuator, which caused changes in the NiTi alloy. To facilitate the design of actuators and sensors using NiTi alloys, the parameters of the NiTi alloy material model were determined. To this end, the tensile curve of the NiTi alloy was determined experimentally. The first simulations confirmed the model's good convergence with the experimental results.