

Politechnika Łódzka
Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów
Instytut Włókiennictwa

ROZPRAWA DOKTORSKA

**IDENTYFIKACJA PROCESU ROZCIĄGANIA NITEK
W EKSTREMALNYCH WARUNKACH
TECHNOLOGII DZIANIA**

mgr inż. Aleksandra Prążyńska

Promotor: dr hab. inż. Zbigniew Mikołajczyk, prof. uczelni

Łódź, 2024

Podziękowania

*Składam serdeczne podziękowania **Promotorowi Panu dr hab. inż. Zbigniewowi Mikołajczykowi, prof. uczelni** za okazaną pomoc, cenne wskazówki i sugestie na każdym etapie realizacji mojej rozprawy doktorskiej.*

Autor pracy pragnie również podziękować:

***Wszystkim pracownikom Zakładu Technologii Dziewiarskich i Maszyn Włókienniczych** za wsparcie i pomoc w trakcie powstawania niniejszej rozprawy.*

***Panu dr inż. Maciejowi Kucharowi** za poświęcony czas i pomoc związaną z wykonaniem badań symulacyjnych procesu dynamicznego rozciągania nitek w środowisku programu Autodesk Inventor.*

***Rodzinie** za wyrozumiałość i motywację do pracy.*

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI	1
STRESZCZENIE	3
ABSTRACT	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP	8
2. CEL I TEZA PRACY	10
3. PRZEGLĄD LITERATURY	12
3.1 Właściwości mechaniczne tekstyliów w warunkach dynamicznych	12
3.2 Podstawowe pojęcia reologii	23
3.2.1 Reologiczne równanie stanu	23
3.2.2 Reologia włókna – modele reologiczne	24
3.3 Reologia we włókiennictwie	34
3.4 Modelowanie numeryczne	52
4. MATERIAŁ I PROGRAM BADAŃ	56
4.1 Materiał badań	56
4.2 Program badań	58
5. BUDOWA STANOWISKA BADAWCZEGO DO POMIARU NAPIĘĆ W NITKACH PODCZAS DYNAMICZNEGO ROZCIĄGANIA	59
5.1 Budowa i opis stanowiska pomiarowego	61
5.2 Charakterystyka elementów elektronicznych układu pomiarowego	64
5.3 Charakterystyka elementów układu pomiarowego	65
5.3.1 Charakterystyka części analogowej układu pomiarowego	65
5.3.2 Charakterystyka karty akwizycji danych	67
6. METODY BADAWCZE/POMIAROWE	67
6.1 Badania (pomiar charakterystyk) dynamicznego rozciągania przędzy	67
6.2 Analiza wyników badań uzyskanych podczas dynamicznego rozciągania przędzy	72
7. ZWIĄZKI KONSTYTUTYWNE WYBRANYCH MODELI LEPKOSPŘŻYSTYCH	85
7.1 Charakterystyka modelu standardowego trójparametrowego 1, Zenera	87
7.2 Charakterystyka modelu Standardowego trójparametrowego 2	88
8. WYZNACZENIE STAŁYCH WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW SPRĘŻYSTOŚCI I WSPÓŁCZYNNIKA LEPKOŚCI	89
8.1 Wyznaczenie współczynnika sprężystości statycznej E_K	89
8.2 Wyznaczenie współczynnika sprężystości E_d przy dynamicznych obciążeniach nitki	91
8.3 Wyznaczanie współczynnika lepkości	92

8.4 Analiza porównawcza charakterystyk statycznego i dynamicznego rozciągania nitek	92
9. WRAŻLIWOŚĆ MODELI REOLOGICZNYCH PROCESU ROZCIĄGANIA NA PARAMETRY WEJŚCIOWE	95
9.1 Model Zenera	96
9.2 Model Standardowy 2	99
10. BUDOWA PRZYRZĄDU DO WYZNACZENIA WSPÓŁCZYNNIKA LEPKOŚCI POPRAZ POKIAR SIŁ PODCZAS RELAKSACJI NAPRĘŻEŃ W NITKACH	103
10.1 Budowa i opis stanowiska do pomiaru sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach ..	103
10.2 Charakterystyka elementów układu pomiarowego	104
11. WYZNACZENIE NIELINIOWYCH PARAMETRÓW MODELI REOLOGICZNYCH, WSPÓŁCZYNNIKÓW SPRĘŻYSTOŚCI I WSPÓŁCZYNNIKA LEPKOŚCI	105
11.1 Wyznaczenie współczynnika sprężystości statycznej E_K	105
11.2 Wyznaczenie współczynnika sprężystości E_d przy dynamicznych obciążeniach nitki	106
11.3 Metodyka pomiaru wartości sił podczas procesu relaksacji naprężeń w nitkach	108
11.4 Wyznaczanie współczynnika lepkości	110
12. MODELOWANIE DYNAMICZNEGO PROCESU ROZCIĄGANIA NITEK	112
12.1 Sprawdzenie poprawności działania wybranych modeli reologicznych w środowisku programu Autodesk® Inventor®	112
12.2 Symulacja numeryczna dynamicznego procesu rozciągania nitek dla nieliniowych parametrów wejściowych modeli reologicznych	116
13. ANALIZA PORÓWNAWCZA CHARAKTERYSTYK RZECZYWISTYCH Z MODELOWYMI PROCESU DYNAMICZNEGO ROZCIĄGANIA NITEK	124
13.1 Weryfikacja stopnia dopasowania charakterystyk modelowych do rzeczywistych ..	132
14. PODSUMOWANIE	134
15. WNIOSKI	136
LITERATURA	140
ZAŁĄCZNIKI	146
ZAŁĄCZNIK 1	147
ZAŁĄCZNIK 2	149
ZAŁĄCZNIK 3	153
ZAŁĄCZNIK 4	170
ZAŁĄCZNIK 5	172
ZAŁĄCZNIK 6	174
ZAŁĄCZNIK 7	176
ZAŁĄCZNIK 8	178

STRESZCZENIE

Streszczenie pracy ujmuje opis istotnych zagadnień w tym nowatorskich i oryginalnych rozwiązań w zakresie prowadzonych badań naukowych.

W niniejszej rozprawie podjęto tematykę identyfikacji właściwości dynamicznych mechaniki nitki w aspekcie procesów technologicznych dziania i użytkowania tekstyliów wraz z analizą eksperymentalną i teoretyczną modelowania numerycznego zmienności obciążeń w nitkach.

Przeprowadzone studium literaturowe obejmuje analizę badań materiałów tekstylnych w warunkach statycznego i dynamicznego procesu rozciągania z wykorzystaniem powszechnie stosowanych maszyn wytrzymałościowych oraz skonstruowanych urządzeń prototypowych. Przedstawiono także zagadnienia związane z identyfikacją właściwości mechanicznych procesów i materiałów włókienniczych dokonywaną z wykorzystaniem modeli reologicznych ciał lepko-sprężystych w tym modeli wieloparametrowych, trójczłonowych liniowych i nieliniowych oraz z uwzględnieniem elementów ciernych. W przeglądzie literatury poruszono również tematykę związaną z modelowaniem numerycznym, które umożliwia korzystanie z szerokiego rodzaju narzędzi informatycznych wykorzystywanych powszechnie do obliczeń inżynierskich związanych między innymi z rozwiązywaniem problemów dotyczących mechaniki ciała odkształcalnego, dynamiki czy też wytrzymałości materiałów.

W celu wykonania badań dynamicznego rozciągania zaprojektowano i zbudowano oryginalne stanowisko badawcze, unikatowe w ujęciu mechanicznym, elektronicznym oraz programowo - informatycznym oraz opracowano metodykę pomiaru i rejestracji wyników badań. Umożliwiło ono przeprowadzenie pomiarów w zakresie prędkości od 0,5 do 100 m/s oraz długości rozciąganych odcinków nitki od 200 do 1000 mm. Do pomiaru sił w nitce skonstruowano czujnik tensometryczny o wysokiej częstotliwości drgań własnych 11 kHz, a wyniki rejestrowano na komputerze wyposażonym w kartę akwizycji danych o taktowości 10 MHz umożliwiającą zapis odpowiedniej liczby punktów pomiarowych pozwalających na prawidłowe odwzorowanie charakterystyki przebiegu procesu rozciągania nitki z dużymi prędkościami. Badania przeprowadzono dla wielofilamentowych przędz syntetycznych, poliamidowych (PA6) o masie liniowej 56 i 156 dtex oraz poliestrowych o masie liniowej 55, 111 i 167 dtex, które są najbardziej rozpowszechnionym surowcem stosowanym w technologiach dziewiarskich. Wykonano serię badań empirycznych dynamicznego rozciągania nitki. Sumaryczna liczba wariantów pomiarów wynosiła 150.

Przeprowadzono analizę charakterystyk doświadczalnych, która wykazała, iż wzrost prędkości rozciągania powoduje spadek wartości sił w nitkach oraz wydłużenia względnego dla tej samej długości rozciąganego odcinka przędzy.

Na podstawie analizy literaturowej i badań własnych do przeprowadzenia symulacji numerycznej procesów zachodzących w nitkach poddanych obciążeniom dynamicznym wybrano dwa modele trójparametrowe model Zenera i Standardowy 2, które opisują proces rozciągania nitki w ujęciu ciała lepko-sprężystego odwzorowując jednocześnie zjawisko relaksacji i pełzania. Dla przyjętych modeli reologicznych określono ich czułość na zmiany wartości parametrów wejściowych tj. sztywności statycznej i dynamicznej oraz współczynnika lepkości.

W kolejnym etapie pracy w środowisku programu Autodesk® Inventor® zbudowano wirtualny model analogowy na bazie odpowiednio połączonych modułów modeli reologicznych Kelvina – Voigta, dla którego zdefiniowano parametry wejściowe

wytypowanych modeli reologicznych. Wykonano serię obliczeń symulacji dynamicznego procesu rozciągania nitek.

Nieliniowe współczynniki sprężystości statycznej i dynamicznej wyznaczono na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych w warunkach statycznych na maszynie wytrzymałościowej z prędkością 2 mm/min oraz w warunkach dynamicznych na skonstruowanym przyrządzie pomiarowym. Nieliniowy współczynnik lepkości obliczono w oparciu o dane odczytane z charakterystyk siły w funkcji czasu uzyskanych w wyniku pomiaru sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach. W celu przeprowadzenia niniejszych badań zaprojektowano i zbudowano oryginalne stanowisko badawcze. Przędze mocowano między dwoma zaciskami, nieruchomym i ruchomym, którego przesunięcie uzyskano poprzez przesuw tłoka siłownika pneumatycznego. Wartości sił mierzone były za pomocą czujnika tensometrycznego o częstotliwości drgań własnych 20 kHz. Długość rozciąganego odcinka przędzy wynosiła 1000 mm, a czas pomiaru 300 s.

Odmienność zachowań procesu statycznego i dynamicznego rozciągania nitek wykazano w oparciu o porównanie otrzymanych charakterystyk siły w funkcji odkształcenia dla wybranych warunków pomiarów.

Dokonano analizy porównawczej charakterystyk uzyskanych na podstawie badań eksperymentalnych i modelowych dla wszystkich wariantów pomiarów oraz wyznaczono współczynnik korelacji w celu weryfikacji stopnia ich dopasowania. Uzyskano bardzo dobrą zgodność krzywych doświadczalnych z krzywymi symulacji numerycznej, co skłania do konkluzji o przydatności wykorzystanych w pracy narzędzi fizycznego opisu procesu rozciągania nitek.

ABSTRACT

The summary of the work includes a description of important issues, including innovative and original solutions in the field of scientific research.

This thesis deals with the identification of dynamic properties of thread mechanics in the aspect of technological processes of knitting and using textiles, with an experimental and theoretical analysis of the numerical modeling of load variability in threads.

The conducted literature study includes an analysis of research of textile materials under static and dynamic stretching conditions using standard testing machines and originally designed prototype devices. Issues related to the identification of mechanical properties of textile processes and materials using rheological models of viscoelastic bodies, including multi-parameter, three-body linear and non-linear models, and taking into account friction elements were also presented. The literature review also touched upon topics related to numerical modeling, which enables the use of a wide range of IT tools commonly used for engineering calculations related to, among others, solving problems related to the mechanics of a deformable body, dynamics or strength of materials.

In order to perform dynamic stretching tests, an original research stand was designed and built, unique in terms of mechanical, electronic and information technology and a methodology for measuring and recording of research results was developed. It made it possible to carry out measurements in the speed range from 0.5 to 100 m/s and the length of stretched thread sections from 200 to 1000 mm. To measure forces in the thread, a strain gauge sensor with a high natural frequency of 11 kHz was constructed, and the results were recorded on a computer equipped with a 10 MHz data acquisition card enabling the recording of an appropriate number of measurement points allowing for the correct mapping of the characteristics of the thread stretching process at high speeds. The tests were carried out for multi-filament synthetic polyamide (PA6) yarns with a linear weight of 56 and 156 dtex and polyester yarns with a linear weight of 55, 111 and 167 dtex, which are the most common raw materials used in knitting technologies. A series of empirical tests on dynamic thread stretching was performed. The total number of measurement variants was 150.

An analysis of experimental characteristics was carried out, which showed that an increase in the stretching speed causes a decrease in the values of forces in the threads and the relative elongation for the same length of the stretched yarn section.

Based on the literature analysis and own research, two three-parameter models, the Zener model and the Standard 2 model, were selected to conduct numerical simulation of the processes occurring in threads subjected to dynamic loads and they describe the process of thread stretching in terms of a viscoelastic body, simultaneously imitating the phenomena of relaxation and creep. For the adopted rheological models, their sensitivity to changes in the values of the input parameters, i.e. static and dynamic stiffness and viscosity coefficient, was determined.

In the next stage of work in the Autodesk® Inventor® software environment, a virtual analog model was built based on appropriately connected Kelvin – Voigt rheological model modules, for which the input parameters of the selected rheological models were defined. A series of simulation calculations of the dynamic thread stretching process was performed.

The nonlinear static and dynamic elasticity coefficients were determined on the basis of the obtained results of experimental tests carried out in static conditions on a testing machine at a speed of 2 mm/min and in dynamic conditions on a constructed measuring device. The nonlinear viscosity coefficient was calculated based on data read from the force-time

characteristics obtained by measuring forces during stress relaxation in the threads. In order to conduct this research, an original research station was designed and built. The yarns were fastened between two clamps, a stationary one and a movable one and its displacement was achieved by moving the piston of a pneumatic actuator. The force values were measured using a strain gauge sensor with a natural frequency of 20 kHz. The length of the stretched yarn section was 1000 mm and the measurement time was 300 s.

The difference in the behaviour of the static and dynamic thread stretching processes was demonstrated by comparing the obtained force characteristics as a function of deformation for selected measurement conditions.

A comparative analysis of the characteristics obtained on the basis of experimental and model tests was performed for all measurement variants, and a correlation coefficient was determined to verify the degree of their matching. A very strong agreement between the experimental curves and the numerical simulation curves was obtained, which leads to the conclusion that the tools used in the work for the physical description of the thread stretching process are useful.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

ε	–	odkształcenie
ε_{spr}	–	odkształcenie powstające w sprężynie
$\varepsilon_{\text{tłum}}$	–	odkształcenie powstające w tłumiku
σ	–	naprężenie
E	–	moduł Younga
η	–	współczynnik lepkości
ε_0	–	odkształcenie początkowe
t	–	czas
τ	–	czas relaksacji
c	–	stała materiałowa
V	–	prędkość rozciągania
n	–	prędkość obrotowa elementu rozciągającego
d	–	średnica koła obrotowego
l	–	długość rozciąganego odcinka przędzy
L_0	–	długość początkowa próbki
$d\varepsilon/dt$	–	prędkość powstawania odkształceń
$d\sigma/dt$	–	prędkość narastania naprężenia rozciągającego
F	–	siła
F_{spr}	–	siła działająca na sprężynę
$F_{\text{tłum}}$	–	siła działająca na tłumik
F_{min}	–	wartość minimalna siły
F_{max}	–	wartość maksymalna siły
F_0	–	napiecie wstępne
Δl	–	wydłużenie
E_{1Z}, E_{2Z}	–	współczynnik sprężystości dla modelu standardowego 1, Zenera
ω	–	prędkość przyrostu wydłużenia względnego
E_{dZ}	–	współczynnik sprężystości wyznaczony dla modelu Zenera przy dynamicznych obciążeniach nitki
E_K	–	współczynnik sprężystości statycznej
E_{1S}, E_{2S}	–	współczynnik sprężystości dla modelu Standardowego 2
a_1, a_2, b_1, b_2	–	współczynniki w równaniu stanu modelu Standardowego 2
E_{dS}	–	współczynnik sprężystości wyznaczony dla modelu Standardowego 2 przy dynamicznych obciążeniach nitki
E_{dM}	–	współczynnik sprężystości wyznaczony dla modelu Maxwella przy dynamicznych obciążeniach nitki
R	–	współczynnik korelacji

1. WSTĘP

Ciągły rozwój technologii włókienniczych dąży do wzrostu wydajności produkcji oraz przystosowania maszyn do przerobu surowców znajdujących zastosowanie do wytwarzania tekstyliów o specjalnych właściwościach np. wyrobów technicznych. Skutkuje to tym, iż obecnie w procesach przędzenia, przewijania, snucia, tkania, dziania i szycia, surowce w postaci nitek i przędz ulegają wielokrotnym odkształceniom przy dużych prędkościach w bardzo krótkim czasie.

O trwałości surowców oraz wykonanych z nich wyrobów włókienniczych decydują głównie ich właściwości mechaniczne, które opisują siła i wydłużenie zrywające. Jedną z podstawowych metod wyznaczania tych parametrów jest proces jednokierunkowego rozciągania prowadzony na różnego typu maszynach wytrzymałościowych. W większości przypadków badania metrologiczne zmierzające do oceny porównawczej właściwości mechanicznych prowadzone są w warunkach statycznych przy zadanych umownych (znormalizowanych) parametrach wymuszeń przyrostów sił lub wydłużeń w czasie.

Wiele materiałów tekstylnych podczas procesów wytwarzania i użytkowania poddawanych jest rozciąganiu dynamicznemu. W nowoczesnych technologiach prędkości dziania zawierają się w zakresie od 1,2 do 7,5 m/s w zależności od typu maszyny i asortymentu dzianin. Na etapie przygotowania przędzy nitki nawijane są lub snute z prędkością od 3,5 do 20 m/s. W procesach konfekcjonowania prędkość nitki dochodzi do 4 m/s. Dynamiczne obciążenie nitek występuje również w eksploatacji wyrobów tekstylnych, w tym: technicznych dzianych siatek barierowych w granicach od 28 do 140 m/s, siatek sportowych od 38 do 58 m/s oraz w wyrobach balistycznych do około 950 m/s. W związku z tym istnieje potrzeba prowadzenia badań materiałów tekstylnych w aspekcie ich właściwości mechanicznych przy dużych prędkościach rozciągania. Metodyka takich pomiarów, zastosowane maszyny oraz sposób rejestracji uzyskanych wyników znacznie różnią się od metodologii i przyrządów stosowanych w testach statycznych. Zasadne jest zatem zgłębianie wiedzy w tym zakresie oraz tworzenie instrumentów do odwzorowania rzeczywistych warunków przerobu i użytkowania wyrobów włókienniczych.

Dynamicznie rozwijające się technologie dziewiarskie, swymi wydajnościami i innowacyjnością przewyższają inne techniki wytwarzania płaskich wyrobów tekstylnych. W związku z powyższym w niniejszej rozprawie zdecydowano się podjąć tematykę analizy procesów dziania, dla której niezbędne jest zdefiniowanie właściwości mechanicznych nitek czyli ich zachowanie w procesach wytwarzania na maszynach dziewiarskich z uwzględnieniem różnic surowcowych stosowanych przędz, prędkości dziania oraz długości stref rozciąganych nitek. Bogactwo tworzonych struktur, różnice w procesie technologicznym w zależności od typu maszyny generują różne wymuszenia na przerabianych nitkach. Ta analiza procesów wymaga teoretycznego opisu mechaniki rozciągania nitek, którą między innymi opisuje się modelami reologicznymi najczęściej dwu, trzy- parametrowymi i całkowymi stanowiącymi połączenia ciała Hooke'a i tłumiku Newtona. Wprowadza się również bardziej złożone modele uwzględniające ciała nieliniowo-sprężyste oraz elementy cierne ze stałym i nieliniowym tarcieniem suchym.

Rzeczywisty rozwój metod symulacji komputerowych w środowisku MES, spowodował, iż są one coraz częściej wykorzystywane w projektowaniu i modelowaniu technologicznym (nie tylko naukowym), dając dużą wiarygodność uzyskiwanych efektów obliczeniowych. Zastosowanie modeli otwartych w środowiskach programowych np. ANSYS, Autodesk Inventor, ABAQUS czy CATIA itd. wymaga wprowadzania parametrów wyznaczonych w oparciu o wyniki badań

eksperymentalnych. Należy podkreślić, iż dla identyfikacji i oceny zachowań mechaniki tekstyliów i procesów tekstylnych w ujęciu dynamicznym niezbędne i konieczne jest odnoszenie prowadzonych badań i analiz do rzeczywistych warunków parametrów zmian fizycznych środowiska, w którym przebiegają niniejsze procesy. W celu lepszego odwzorowania zjawisk zachodzących w nitkach podczas procesu dynamicznego rozciągania, w odróżnieniu od znanych opracowań, w których często symulacje numeryczne z zastosowaniem modeli reologicznych prowadzone są dla stałych wartości parametrów wejściowych, w przedstawionej rozprawie modelowanie numeryczne wykonano w oparciu o nieliniowe wartości współczynników sprężystości i współczynnika lepkości.

Niniejsze badania są zaczątkiem analiz w ujęciu rozwiązań z zastosowaniem sztucznej inteligencji AI, gdzie metodyka identyfikacji właściwości mechanicznych dynamiki procesu tekstyliów opiera się na wiedzy związanej z budową wieloczołowych modeli reologicznych wraz z bazą rzeczywistych charakterystyk mechanicznych badanych materiałów tekstylnych. Utworzony model można odnieść do procesu analogowo – numerycznego, gdzie algorytm budowy modeli reologicznych będzie tworzył optymalne rozwiązania w oparciu o oczekiwane efekty obliczeń w środowisku MES.

2. CEL I TEZA PRACY

Cel pracy doktorskiej

Celem pracy doktorskiej jest weryfikacja w rzeczywistym otoczeniu unikatowej metodyki identyfikacji właściwości mechanicznych procesu dynamicznego rozciągania nitki w ujęciu eksperymentalnym, jak i teoretycznym wykorzystując reologiczne nieliniowe modele rozwiązywane w matematycznym środowisku metod elementów skończonych MES.

Teza pracy

Identyfikacja w rzeczywistości realnie zdefiniowanego procesu dynamicznego rozciągania nitki w procesach technologicznych tekstyliów przynosi pozytywne rezultaty w efekcie prowadzonych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem niestandardowych, urządzeń pomiarowych, jak i badań teoretycznych aplikujących metodykę elementów skończonych w analizie nieliniowych modeli reologicznych.

Realizację przyjętego celu pracy zaplanowano w następujących etapach:

- studium literaturowe podejmowanych w pracy doktorskiej zagadnień związanych z badaniami właściwości mechanicznych tekstyliów w warunkach dynamicznych, opisem rzeczywistym i teoretycznym zachowania materiałów włókienniczych poddanych obciążeniom rozciągającym z wykorzystaniem modeli reologicznych oraz metod symulacji numerycznych,
- zdefiniowanie celu, tezy i planu pracy,
- przedstawienie i identyfikacja materiału badań,
- analiza empiryczna właściwości wytrzymałościowych procesu rozciągania przędzy na maszynie wytrzymałościowej w celu wyznaczenia nieliniowego parametru wejściowego sztywności statycznej,
- zaprojektowanie i zbudowanie oryginalnego urządzenia pomiarowego do dynamicznego rozciągania nitki w zakresie prędkości od $V = 0,5$ m/s do $V = 100$ m/s oraz opracowanie metodyki rejestracji wyników badań,
- przeprowadzenie serii badań empirycznych dynamicznego rozciągania nitki z wykorzystaniem zbudowanego urządzenia pomiarowego dla zróżnicowanych surowców, mas liniowych oraz prędkości rozciągania,
- zaprojektowanie i zbudowanie przyrządu do wyznaczenia nieliniowego współczynnika lepkości poprzez pomiar sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach, analiza empiryczna współczynnika lepkości,
- analityczne wyznaczenie nieliniowych parametrów wejściowych modeli reologicznych,
- wybór modeli reologicznych opisujących rzeczywisty proces rozciągania nitki w technologiach dziewiarskich,
- zdefiniowanie założeń modeli reologicznych opisujących proces rozciągania nitki w ujęciu ciała lepko-sprężystego uwzględniających wielkości wymuszeń technologicznych i użytkowych,
- analiza podatności modeli reologicznych w kontekście parametrów wejściowych tj. sztywności statycznej i dynamicznej oraz współczynnika lepkości,

- charakterystyka budowy wieloczłonowych modeli reologicznych dla potrzeb eksperymentu numerycznego w środowisku programu Autodesk Inventor® procesu rozciągania nitek, zdefiniowanie parametrów wejściowych modeli,
- przeprowadzenie serii obliczeń identyfikujących właściwości dynamiczne nitek,
- analiza porównawcza charakterystyk rzeczywistych i modelowych procesu dynamicznego rozciągania nitek w celu weryfikacji stopnia ich dopasowania,
- podsumowanie rezultatów badań i sformułowanie wniosków potwierdzających poprawność postawionej tezy pracy.

3. PRZERGLĄD LITERATURY

3.1 Właściwości mechaniczne tekstyliów w warunkach dynamicznych

Praktyczne znaczenie badania właściwości wytrzymałościowych materiałów na rozciąganie doprowadziło do powstania szeregu prac zarówno teoretycznych, jak i eksperymentalnych [1, 2]. W badaniu procesów dynamicznych szczególne trudności pojawiają się we włóknotwórczych materiałach polimerowych ze względu na czynnik jakim jest czas, ponieważ różne prędkości odkształcenia prowadzą do złożonych zależności pomiędzy siłą a powstawaniem poszczególnych rodzajów odkształceń w tych materiałach.

Wiele prac poświęconych jest eksperymentalnemu badaniu wpływu prędkości odkształcenia na właściwości mechaniczne polimerów, jednak stosunkowo niewiele spośród nich, opisuje jej wpływ na właściwości mechaniczne materiałów włókienniczych. Związane jest to nie tylko z brakiem dostępnych na rynku urządzeń przeznaczonych do prowadzenia procesu rozciągania z dużymi prędkościami, ale także ze złożonością samego eksperymentu. W praktyce większość badaczy umownie dzieli badania materiałów na statyczne (powolne rozciąganie) oraz dynamiczne lub udarowe (rozciąganie krótkotrwałe). Procesy rozciągania nazywane są dynamicznymi jeżeli prowadzone są na urządzeniach umożliwiających uzyskanie prędkości 1 m/s i wyższych.

Wewnętrzna struktura polimerów pod wpływem przyłożonego obciążenia ulega naglej i diametralnej zmianie. Polimery, podobnie jak metale, wykazują znaczną zależność właściwości mechanicznych od prędkości odkształcenia. Tworzywa polimerowe mają szereg zalet jednak podczas eksploatacji wiele z nich ulega zniszczeniu mimo, iż w przeprowadzanych laboratoryjnych pomiarach rozciągania ich odkształcenia wykazują charakter sprężysty. Dlatego też ogromne znaczenie ma wiedza na temat właściwości mechanicznych tych materiałów eksploatowanych w rzeczywistych warunkach użytkowania.

Do cech mechanicznych materiału określanych w testach rozciągania należą między innymi następujące wielkości: wytrzymałość na rozciąganie, naprężenie zrywające, moduł sprężystości Younga, praca zerwania i bezwzględne wydłużenie przy zerwaniu.

Wytrzymałość jest właściwością materiału, która charakteryzuje się odpornością na zniszczenie pod działaniem sił mechanicznych. Do ilościowego określenia tej właściwości wykorzystuje się między innymi wykres rozciągania.

Obciążenie zrywające P_p (kgf, N) to maksymalna wartość siły jaką uzyskuje przędza w momencie zerwania.

Naprężenie zrywające σ_p (kgf/mm², N/m²) to naprężenie, przy którym przędza ulega uszkodzeniu. Jeżeli P_p jest wyrażone w kgf lub N, to naprężenie oblicza się ze wzoru:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{S} = \frac{P_p \gamma}{T} \quad (3.1)$$

gdzie:

- S – pole przekroju próbki, mm²,
- γ – gęstość substancji (ciężar właściwy), mg/mm³, kg/m³,
- T – masa liniowa przędzy, tex.

Naprężenie zrywające nazywane jest wytrzymałością materiału na rozciąganie. Ta cecha jest wykorzystywana do ilościowego porównania wytrzymałości włókien i nici różnego rodzaju (różna masa liniowa i gęstość). Do jej wyznaczenia, należy wykorzystać charakterystykę względnego obciążenia zrywającego p_o (cN/tex) określanego wzorem:

$$p_o = \frac{P_p}{T} \quad (3.2)$$

Całkowite wydłużenie bezwzględne przy zerwaniu l_p (mm) to maksymalna wartość odkształcenia do czasu zerwania próbki:

$$l_p = L_K - L_o \quad (3.3)$$

gdzie:

L_o – początkowa długość próbki, mm,

L_K – końcowa długość próbki w momencie zerwania, mm.

Względne wydłużenie całkowite przy zerwaniu ε_p (%) określa wzór:

$$\varepsilon_p = \frac{l_p}{L_o} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Praca zerwania R_p charakteryzuje zdolność materiału do pochłaniania energii zużywanej na rozciąganie próbki i jest definiowana jako pole pod krzywą rozciągania:

$$R_p = \int_0^{\Delta L} F \cdot dL$$

gdzie:

F – siła rozciągająca próbkę,

ΔL – wydłużenie próbki.

Praca właściwa zerwania r_g , (kgf·cm/g, J/kg) to praca zerwania odniesiona do masy próbki w gramach:

$$r_g = \frac{R_p}{g} \quad (3.5)$$

gdzie:

g – masa próbki, g.

Początkowy moduł sztywności E_c jest to stosunek naprężenia odniesiony do wartości 1% odkształcenia całkowitego.

Początkowy moduł sztywności nitki E_N (kgf/mm², N/m²) jest określony wzorem:

$$E_N = \frac{P_{HY}}{T} \quad (3.6)$$

gdzie P_H jest siłą, jaka występuje w nitce, gdy jest ona odkształcona o 1% (określona na podstawie wykresu rozciągania). Początkowy moduł sztywności można również scharakteryzować wartością tangensa nachylenia krzywej rozciągania przy 1% wydłużeniu.

Jedną z najwcześniejszych prac z zakresu dynamicznego rozciągania z wykorzystaniem urządzenia wahadłowego jest praca I. V. Kragelsky'ego [3], który w 1932 roku badał włókna lnu, bawełny, jedwabiu naturalnego i wełny. Autor doszedł do wniosku, że praca zerwania włókien rozciąganych z dużą prędkością przewyższa pracę zerwania uzyskaną w testach statycznych. Zwrócił również uwagę na możliwość ustalenia współczynnika przeliczeniowego pomiędzy statyczną i dynamiczną pracą zerwania. Problem sprowadzał się do znalezienia współczynnika proporcjonalności K z następującego równania:

$$\int_0^l P_D dl_K = \int_0^l P_{st} dl_{st} \quad (3.7)$$

I. V. Kragelsky wyznaczył wartości współczynników charakteryzujących stosunek pracy statycznej zerwania przy prędkości 0,2 m/s do pracy dynamicznej przy prędkości testowej 2,92 m/s. Wykazał, iż praca przy dynamicznym rozciąganiu włókien jest o 1,89 do 4,23 wyższa od pracy zerwania przy rozciąganiu statycznym. Tłumaczy to tym, że testy statyczne charakteryzują się polem sił, które jest równomiernie rozłożone prostopadle do pola przekroju badanej próbki, a podczas testów dynamicznych naprężenie jest nierównomiernie rozłożone w objętości próbki. Dlatego praca zerwania podczas badań dynamicznych daje charakterystykę włókna, która jest bardziej zgodna z rzeczywistością niż statyczna praca zerwania.

Największą uwagę na właściwości materiałów włókienniczych poddanych naprężeniom dynamicznym zwrócono w czasie II wojny światowej. S. Newman i H. Wheeler [4], badając liny z Nylonu i sizalu na urządzeniu z opadającym ciężarkiem stwierdzili, że wydłużenie lin nie zależy od czasu trwania obciążenia. Badania wytrzymałości bawełnianych i nylonowych linek spadochronowych potwierdziły wcześniejszy wniosek I. V. Kragelsky'ego o wzroście pracy zerwania podczas badań dynamicznych.

Badania jedwabiu naturalnego, prowadzone przez prof. G. N. Kukina [5] pozwoliły stwierdzić, że wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wydłużenie przy zerwaniu próbek gwałtownie spada z 20,7% przy prędkości 0,003 m/s do 8% przy prędkości 2,71 m/s. Autor tłumaczy to zjawisko faktem, że ze względu na szybką propagację odkształcenia sprężystego prędkość przyłożonego obciążenia nie wpływa znacząco na wielkość odkształcenia rozciąganych włókien. Podczas prób statycznych można zaobserwować powolne narastanie odkształceń wysokoelastycznych i plastycznych, które w przypadku testów dynamicznych mają znacznie mniej czasu na ujawnienie się. W rezultacie całkowite odkształcenie przy dynamicznym wzroście naprężeń jest mniejsze niż przy statycznym.

Z danych eksperymentalnych uzyskanych przez W. Lyons'a [6] wynika, że praca zerwania wiskozowej i nylonowej tkaniny kordowej pod wpływem dynamicznego rozciągania przewyższa podobną pracę zerwania pod naprężeniem statycznym o nie więcej niż 5%. Ponadto przeprowadzono testy rozciągania statycznego oraz na urządzeniu wahadłowym próby dynamicznego rozciągania. Dla dwóch próbek kordu wiskozowego wartości wytrzymałości i pracy zerwania uzyskane pod wpływem dynamicznego naprężenia okazały się niższe niż w standardowych testach statycznych.

H. Schiefer [7] prowadził badania pracy zerwania w procesie statycznego i dynamicznego rozciągania sztucznych (wiskoza, octan) i syntetycznych (Nylon, winyl, polistyren, poliakrylonitryl) nici oraz jedwabiu naturalnego. Próby statyczne prowadzono przy prędkości rozciągania 300 mm/min (długość rozciąganych próbek wynosiła 250 mm), a próby dynamiczne wykonano na urządzeniu z opadającym ciężarem, co pozwoliło na uzyskanie prędkości rozciągania równej 2,5 m/s. Przeprowadzone badania wykazały, iż dla nici o niskiej wytrzymałości i bardzo dużym wydłużeniu, takich jak nici nylonowe o wydłużeniu $420 \div 550\%$ i nitki polietylenowe o wydłużeniu 750%, praca zerwania przy rozciąganiu dynamicznym jest prawie równa statycznej. Natomiast dla nici o dużej lub bardzo dużej wytrzymałości i normalnym wydłużeniu praca zerwania przy rozciąganiu dynamicznym jest znacznie większa niż praca zerwania uzyskana w testach statycznych. Dane uzyskane dla jedwabiu naturalnego wskazują również na wzrost pracy zerwania wraz ze wzrostem prędkości rozciągania, tj. dynamiczny współczynnik pracy zerwania wzrósł o 37,0%. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że w warunkach dynamicznego rozciągania praca zerwania dla nici o wydłużeniu 420% i wyższym jest praktycznie równa, a w niektórych przypadkach 10 – 20% mniejsza niż statyczna praca zerwania. Dla nici o małym (13%) i nieprzekraczającym 20% wydłużeniu praca dynamiczna zerwania znacznie przewyższa pracę statyczną.

A. A. Rogovina i V. A. Kargin [8] przeprowadzili badania różnych typów nitek kordu opony (bawełny, wiskozy i Nylonu) w warunkach zbliżonych do rzeczywistych z uwzględnieniem wpływu wilgotności i podwyższonej temperatury. Badania statyczne wykonano na dynamometrze przy prędkości rozciągania próbki równej 300 mm/min, natomiast badania dynamiczne na urządzeniu wahadłowym przy prędkości rozciągania 3,45 m/s. Czas do zerwania, w zależności od wydłużenia próbek, wynosił 5 – 10 s podczas badań statycznych i około 0,01 s podczas badań dynamicznych. Porównanie wyników przeprowadzonych badań wykazało, że wartości wydłużeń przy zerwaniu dla wszystkich rodzajów kordu zmieniają się nieznacznie. Na przykład, wydłużenie przy zerwaniu kordu bawełnianego w testach statycznych wyniosło 15,3%, a w dynamicznych 17,0%. Dla kordu wiskozowego dane te wyniosły odpowiednio 16,0 i 16,6%. Aby określić wpływ temperatury na właściwości mechaniczne kordu w trybie statycznym i dynamicznym, przetestowano nitki kordu o zawartości wilgoci $1 \div 2\%$ w temperaturze 100°C. Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że dynamiczna praca zerwania wszystkich typów nitek kordu przewyższa pracę statyczną. W podwyższonych temperaturach statyczna praca zerwania dla wszystkich rodzajów kordu gwałtownie spada. Jeśli chodzi o dynamiczną pracę zerwania, to w przypadku nici nylonowych praktycznie nie zmienia się wraz ze wzrostem temperatury, natomiast dla bawełny i wiskozy wzrasta, co tłumaczy się różnymi zmianami właściwości elastycznych porównywanych rodzajów nitek kordowych wraz ze zmianami temperatury. Zatem w ocenie porównawczej kordów o różnym składzie włóknistym, a także kordów poddanych obróbce, która może mieć wpływ na ich odporność cieplną zarówno dla przędz elementarnych, jak i skręcanych, wskazane jest prowadzenie badań w trybie statycznym i dynamicznym w temperaturach normalnych i podwyższonych.

R. Meredith [9, 10] badając krzywe zależności obciążenia i wydłużenia złożonych chemicznie przędz (wiskoza, octan, Nylon) i jedwabiu naturalnego, stwierdził, że napężenie w próbce jest tym większe, im wyższa jest prędkość odkształcenia za wyjątkiem przędz octanowych. Dynamiczny współczynnik wytrzymałości względnej dla wielowłókienkowej przędzy wiskozowej o masie liniowej 33 tex i liczbie filamentów $f = 50$ wzrasta do 75,8%, dla nici octanowej o tej samej masie liniowej i tej samej liczbie włókien elementarnych wynosi 47,3%, natomiast w przypadku przędzy nylonowej o grubości 15 tex osiąga wartość 63,2%. Pod względem odkształcalności inaczej zachowują się sztuczne przędze celulozowe (wiskozowe i octanowe). Dla przędzy wiskozowej, wraz ze wzrostem prędkości rozciągania, dynamiczny współczynnik wydłużenia przy zerwaniu wzrasta o 29,1%, natomiast dla przędz octanowych wydłużenie przy zerwaniu pozostaje niezmiennione zarówno w warunkach statycznego, jak i dynamicznego rozciągania. Dla nici nylonowych przy wyższych prędkościach rozciągania pozostaje w przybliżeniu na tym samym poziomie, co w testach statycznych, a dla niektórych próbek nawet spada. Chociaż nici nylonowe w czasie rozciągania 10 s mają pracę zerwania o 22% większą niż jedwab naturalny, to jednak w procesie odkształcenia przeprowadzanym w czasie 0,02 s stanowi ona tylko 47% pracy zerwania jedwabiu naturalnego. Należy to wziąć pod uwagę przy stosowaniu nici nylonowych, w szczególności do tkanin przeznaczonych do produkcji czaszy i linek spadochronów, które muszą wytrzymać działanie chwilowych obciążeń.

M. D. Talyzin [11] badał wpływ prędkości rozciągania na właściwości mechaniczne nici pochodzenia naturalnego i chemicznego. Próbkę przędzy bawełnianej, lnianej, wełnianej, jedwabiu naturalnego, a także wiskozy (o różnej masie liniowej) oraz nici octanowych, nylonowych, szklanych, miedzianych i aluminiowych poddawał procesowi rozciągania na urządzeniu DSM-E-3 w zakresie prędkości od 0,5 do 500 m/min. Na podstawie uzyskanych

wyników autor zauważył, że sposób rozciągania ma szczególnie silny wpływ na wydłużenie zerwania nici. W warunkach dynamicznego rozciągania obserwuje się znacznie większą różnicę między obciążeniami zrywającymi, a wydłużeniami zrywającymi niż w badaniach statycznych. Przy prędkości rozciągania 0,5 – 1,5 m/s wydłużenia przy zerwaniu włókien polimerowych pozostają niskie, ale wraz ze wzrostem prędkości gwałtownie wzrastają. Dla przędzy wełnianej krzywa zależności obciążenia od prędkości rozciągania charakteryzuje się równomiernym wzrostem obciążeń zrywających. W przypadku przędzy bawełnianej i lnianej obserwuje się stosunkowo powolny wzrost krzywej rozciągania, który dla przędzy bawełnianej szybko zanika, a nadal rośnie dla przędzy lnianej, aż do prędkości maksymalnych osiągniętych na urządzeniu. Gwałtowny i równomierny wzrost obciążeń zrywających charakteryzuje przędze wiskozowe i octanowe niezależnie od ich struktury. Ze względu na fakt, że wzrost wydłużeń w próbkach nici naturalnych i chemicznych przewyższa wzrost obciążeń Talyzin dochodzi do wniosku, że moduł sztywności maleje wraz ze wzrostem prędkości odkształcania.

R. Laible i H. Morgan [12] badali właściwości izotaktycznej przędzy polipropylenowej w szerokim zakresie czasów odkształcania (od 10^{-4} do 10 s) na maszynie wytrzymałościowej Instron oraz urządzeniu pneumohydraulicznym Mitex, zaprojektowanym i zbudowanym w Instytucie Technologii w Massachusetts. Autorzy stwierdzili, że wraz ze wzrostem prędkości rozciągania względna wytrzymałość przędzy polipropylenowej znacznie wzrasta, a wydłużenie przy zerwaniu maleje.

Celem badań E. Dogliottiego i W. Yellanda [13] było uzyskanie danych o właściwościach mechanicznych różnych rodzajów materiałów polimerowych w procesie rozciągania w postaci włókien w warunkach statycznych i przy średnich prędkościach rozciągania. Pomiarów statycznych przeprowadzono na zrywarce firmy Instron przy prędkości 127 mm/min, a testy przy wyższych prędkościach na maszynie pneumohydraulicznej Mitex. W obu przypadkach długość próbek wynosiła 127 mm. Badaniom poddano przędze poliakrylonitrylowe, poliamidowe, polipropylenowe, poliestrowe, poliuretanowe, włókna gumowe i szklane oraz polichlorek winylidenu. Nitki miały niski skręt, różną liczbę włókien i masę liniową. Polichlorek winylidenu badano zarówno w postaci monofilamentu, jak i w postaci folii, poliuretanu i gumy z opłotem i bez opłotu z przędzy bawełnianej. Liczba filamentów wybranych do badań przędz nie przekraczała $f = 175$. Podczas przeprowadzonych pomiarów wyznaczono: wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie względne przy zerwaniu, pracę zrywającą oraz początkowy moduł sztywności. Najprostszymi pod względem budowy chemicznej materiałami polimerowymi, badanymi przez E. Dogliottiego i V. Yellanda, były przędze poliestrowe i polipropylenowe. W testach dynamicznych przy prędkości 5,5 m/s oba materiały wykazały wzrost początkowego modułu sztywności i wytrzymałości względnej. Dynamiczne współczynniki wytrzymałości względnej i wydłużenia przy zerwaniu wyniosły odpowiednio 14,3 i 44,5%, co charakteryzuje wzrost naprężenia i gwałtowny spadek wydłużenia. Analizując krzywe wydłużenia charakteryzujące zależność pomiędzy wytrzymałością względną i wydłużeniem przędz poliamidowych, można zauważyć, że zmodyfikowany nylon NT-1 ma znacznie wyższy moduł sztywności i mniejsze wydłużenie przy zerwaniu niż PA6.6. W testach dynamicznego rozciągania obie nici zwiększają swoją względną wytrzymałość i zmniejszają wydłużenie przy zerwaniu. Dynamiczny współczynnik wytrzymałości względnej dla nici nylonowej PA6.6 wynosi 23,8%, a współczynnik wydłużenia 26,9%. Wysoka wytrzymałość Nylonu wynika z obecności wiązań wodorowych między łańcuchami cząsteczek. Aby połączenie to było trwałe, konieczne jest zorientowanie łańcuchów wzdłuż osi, co jest realizowane przez kontrolowane rozciąganie włókien po ich wytworzeniu ze stopu. W przypadku nici

poliestrowych wraz ze wzrostem prędkości rozciągania znacznie wzrasta wytrzymałość względna (współczynnik dynamiczny wynosi 38,6%), a wydłużenie przy zerwaniu nieznacznie maleje (współczynnik 3,6%). Celuloza i szkło mają złożoną strukturę chemiczną zatem włókna wykonane z tych materiałów polimerowych są podobne i charakteryzują się niskim wydłużeniem, a ich początkowy moduł sztywności waha się od wartości średnich do wysokich. W przypadku przędzy bawełnianej i włókna szklanego poddanych procesowi rozciągania dynamicznego, moduł sztywności i wytrzymałość względna wzrastają, natomiast maleje wydłużenie przy zerwaniu i praca zerwania. Badania nici wykonanych z włókien winylowych wykazały, że wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wzrasta względna wytrzymałość, moduł sztywności i praca zerwania, a wydłużenie maleje. W niniejszej pracy autorzy wykazali, że wzrost prędkości odkształcenia prowadzi do wzrostu naprężenia zrywającego i początkowego modułu sztywności wszystkich nici, z wyjątkiem gumy. Zmianom tym najczęściej, choć nie zawsze, towarzyszy zmniejszenie wydłużenia przy zerwaniu. O właściwościach mechanicznych przędz poddanych różnym prędkościom odkształcenia w małym stopniu decyduje rodzaj nici (masa liniowa, liczba filamentów) natomiast znacząco budowa chemiczna cząsteczek polimeru i ich struktura fizyczna. Tak więc zachowanie jedwabiu naturalnego, który zawiera znaczną ilość łańcuchów bocznych przyłączonych do głównego łańcucha polimeru, wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia bardzo różni się od zachowania poliamidów, w których nie ma łańcuchów bocznych.

J. Hall [14] badał właściwości przędz chemicznych oraz jedwabiu naturalnego poddanych obciążeniom zrywającym. Wykorzystane nici odznaczały się bardzo małym skrętem (2 skręty na 1 cm). Do określenia wpływu prędkości odkształcenia na charakterystykę rozciągania nici wykorzystano zrywarke firmy Instron (testy statyczne przy prędkości rozciągania $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s) oraz metodę obciążenia wybuchowo-balistycznego (rozciąganie dynamiczne przy prędkości 20 m/s). Pomiaru dla próbek o długości 50 mm przeprowadzono w warunkach klimatu normalnego. Z analizy właściwości mechanicznych przebadanych przędz wynika, że dla nitki z włókien celulozowych przy wzroście prędkości odkształcenia charakterystyczny jest wzrost wytrzymałości względnej i spadek wydłużenia przy zerwaniu. Na przykład, dla nici Triacetate 31,1 tex, dynamiczny współczynnik wytrzymałości względnej wynosi 40,3%, dynamiczny współczynnik wydłużenia wynosi 38%, a dla nici wiskozowej o masie liniowej 27,8 tex współczynniki te wynoszą odpowiednio 57,7% i 15,5%. We wszystkich przypadkach wartość pracy zerwania podczas testów dynamicznych jest wyższa niż podczas testów wykonanych na zrywarce Instron. Włókna naturalne pochodzenia białkowego i chemiczne nici winylowe charakteryzują się wzrostem wytrzymałości względnej i spadkiem wydłużenia w procesie dynamicznego rozciągania. Dynamiczny współczynnik wytrzymałości względnej dla przędzy winylowej 26,7 tex wynosi 45,5%, a dynamiczny współczynnik wydłużenia przy zerwaniu kształtuje się na poziomie 22%. W przypadku przędzy winylowej początkowy moduł sztywności przy wysokim współczynniku rozciągania znacznie przewyższa ten uzyskany podczas testu statycznego. Spośród przebadanych przędz jedwab naturalny jest jedynym surowcem, który osiąga większe wydłużenie przy rozciąganiu dynamicznym niż przy statycznym. Względna wytrzymałość jedwabiu naturalnego, podobnie jak innych nici, wzrasta z 31,6 do 47,8 gf/tex wraz ze wzrostem prędkości rozciągania. Badania przędz poliamidowych Hall przeprowadził w zakresie prędkości przekraczających prędkość rozciągania statycznego o $4 \cdot 10^4$ razy. Dla wszystkich nici z tej grupy wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wzrasta wytrzymałość względna, wydłużenie przy zerwaniu maleje, praca zerwania zmniejsza się, a początkowy moduł sztywności wzrasta. Spośród wszystkich badanych przędz przędze nylonowe charakteryzowały się najwyższymi wartościami pracy zerwania w testach

dynamicznych, chociaż dla każdej z nich jej wartość była istotnie niższa od odpowiadającej jej wartości uzyskanej w konwencjonalnych testach statycznych. Ponadto zaobserwowano, że odkształcalność poliamidu PA6 jest ogólnie wyższa przy niskich i wysokich prędkościach rozciągania niż w przypadku poliamidu PA6.6, a wartość liczbowa pracy zerwania i modułu sztywności dynamicznej PA6 jest wyższa niż PA6.6. Przy niskich prędkościach rozciągania praktycznie nie ma różnicy w charakterystyce właściwości mechanicznych włókien. Badania przędzy poliestrowych o różnych masach liniowych wskazują również na wzrost wytrzymałości i zmniejszenie ich wydłużenia przy zerwaniu w warunkach dynamicznego rozciągania. Dla Terylenu o wysokiej wytrzymałości i masie liniowej 13,9 tex oraz Terylenu o średniej wytrzymałości (11,1 tex) współczynniki dynamicznej wytrzymałości względnej wynoszą odpowiednio 27,8 i 6,1%. Dla obu nici wydłużenie przy zerwaniu przy prędkości rozciągania 20 m/s zmniejsza się o 43%. Praca zerwania nici poliestrowych również maleje wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia o 37 % dla Terylenu o wysokiej wytrzymałości i o 31% w przypadku Terylenu o średniej wytrzymałości. W przypadku nici z grupy poliakrylonitrylowych wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wzrasta względny wskaźnik wytrzymałości, a wydłużenie przy zerwaniu maleje. W przypadku przędzy poliolefinowych wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wzrasta względna wytrzymałość i maleje wydłużenie przy zerwaniu. Praca zerwania przędzy poliolefinowych zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości rozciągania. Na przykład dla nici polipropylenowych i polietylenowych przy prędkości rozciągania 20 m/s praca zerwania jest mniejsza o około 63%. Na podstawie uzyskanych wyników badań Hall stwierdził, iż dla przędzy zróżnicowanych surowcowo o małym skręcie podczas prób prowadzonych z dużą prędkością rozciągania względny wskaźnik wytrzymałości oraz wydłużenie przy zerwaniu wzrasta w porównaniu z konwencjonalnymi próbami rozciągania, za wyjątkiem jedwabiu naturalnego. Praca zerwania zwiększa się lub maleje, ale dla wszystkich nici tego samego rodzaju zmienia się w tym samym kierunku, za wyjątkiem polichlorku winylu.

O. Neil [15] badał wpływ prędkości rozciągania i temperatury na siłę zrywającą i pracę zerwania trzech rodzajów kordu oponowego: z wiskozy, Nylonu i poliestru oraz kordu z włókna szklanego. Testy statyczne wykonano na maszynie wytrzymałościowej firmy Instron przy prędkości rozciągania 5 mm/s, a testy dynamiczne przy prędkościach do 17,8 m/s. Ocenę uzyskanych wyników przeprowadzono poprzez porównanie ich z wynikami testów drogowych. W obu przypadkach procesowi rozciągania poddano próbki o długości 254 mm. Analiza wyników badań kordu wykazała, że przy rozciąganiu statycznym wartości obciążeń zrywających dla wszystkich typów kordu są równoważne, natomiast w warunkach dynamicznych przy maksymalnej prędkości rozciągania siła zrywająca kordu wytworzonego z włókna szklanego gwałtownie wzrasta (współczynnik dynamiczny wynosi 34,0%), dla kordu wiskozowego i poliestrowego następuje nieznaczny wzrost siły zrywającej o około 16 – 17%, a dla kordu nylonowego prawie się nie zmienia. Najwyższe wartości względnej pracy zerwania otrzymano dla kordu poliestrowego i nylonowego zaś włókno szklane, które ma małe wydłużenie przy zerwaniu charakteryzuje się najniższą pracą zerwania. Wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wzrasta praca zerwania każdego rodzaju kordu we wszystkich przypadkach, przy czym współczynniki dynamiczne wykazują zależność zbliżoną do obciążenia zrywającego.

Opony eksploatowane są nie tylko przy dużych prędkościach, ale także w podwyższonych temperaturach od około 82 ÷ 121°C. Wysokie temperatury mają destrukcyjny wpływ na surowce z których wykonana jest opona, w tym włókien stosowanych do ich wzmocnienia oraz połączenia między nimi. Dlatego bardzo ważne jest badanie wpływu temperatury

na właściwości mechaniczne kordu. Neil zbadał wpływ temperatury (od temperatury pokojowej do 176°C) na wytrzymałość i pracę zerwania kordu w szerokim zakresie prędkości rozciągania. Autor określił zależności wytrzymałości czterech rodzajów nitów kordowych od temperatury podczas badań statycznych i dynamicznych. W badanym zakresie temperatur (od 22 do 150°C) siła zrywająca kordu z włókna szklanego praktycznie się nie zmieniała. W przypadku wszystkich innych nici kordowych, wraz ze wzrostem temperatury, obciążenie zrywające malało zarówno przy niskich, jak i wysokich prędkościach rozciągania (12,5 m/s). Podczas dynamicznego rozciągania w temperaturze 104°C obciążenie zrywające kordów wiskozowych, nylonowych i poliestrowych zmniejsza się odpowiednio o 9, 22 i 10%, a w temperaturze 176°C wynosi 18, 42 i 27% mniej od wartości uzyskanych w temperaturze normalnej (22 °C).

Analizując charakter wpływu warunków temperaturowych na przebieg zrywania badanych próbek nitów kordowych można zauważyć, że podczas badań statycznych praca zerwania wszystkich próbek, za wyjątkiem nici z włókna szklanego, zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Zatem przy prędkości testowej 5 mm/s wpływ temperatury na pracę zerwania nitów kordu jest podobny do jego wpływu na wartość siły zrywającej. W testach statycznych i temperaturze normalnej kord nylonowy ma najwyższą wytrzymałość na rozciąganie, natomiast znacznie mniejszą od kordu wiskozowego i poliestrowego przy prędkości rozciągania 12,5 m/s i temperaturze 150°C. Temperatura praktycznie nie ma wpływu na siłę zrywającą i pracę zerwania kordu z włókna szklanego, natomiast prędkość rozciągania znacząco je zmienia.

Neil, biorąc pod uwagę, że prędkość rozciągania ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne kordu, podjął próbę przeprowadzenia testów opon, zarówno metodą obciążenia balistycznego, jak i metodą grawitacyjną wykorzystując wahadło. W trakcie badań wykonano testy statyczne i dynamiczne w zakresie prędkości rozciągania od 5 mm/min do 10 m/s. Analiza krzywych rozciągania badanych nici pokazuje, że dla wszystkich prędkości poddanych dynamicznemu rozciąganiu, w przeciwieństwie do testów statycznych, naprężenie zrywające wzrasta, a wydłużenie przy zerwaniu maleje.

Do oceny materiałów włókienniczych powinno się uwzględnić ich właściwości mechaniczne wyznaczane podczas procesu rozciągania z dużą prędkością [2]. W nowoczesnych technologiach tekstylnych surowce i półfabrykaty poddawane są dynamicznym odkształceniom, w związku z tym szczególne znaczenie ma badanie wpływu prędkości rozciągania na właściwości mechaniczne przędzy o różnym składzie i strukturze.

Rozciąganiu poddano próbki przędzy odcinkowej bawełnianej, wiskozowej i poliamidowej na maszynie wytrzymałościowej oraz urządzeniu do rozciągania z dużymi prędkościami ASSR-30-ZKB, które umożliwiają badania przy stałej prędkości odkształcenia. Testy statyczne przeprowadzono dla prędkości rozciągania 47 i 644 mm/min, a próby dynamiczne przy prędkości 5 m/s. We wszystkich przypadkach przyjęto długość rozciągania próbek równą 200 mm. Wyniki pomiarów wykazały, iż najbardziej wytrzymała jest przędza bawełniana o masie liniowej 25 tex, a najsłabsza przędza nylonowa o grubości 100 tex o niskim skręcie. Analizując wpływ prędkości rozciągania na wytrzymałość przędzy bawełnianej w warunkach statycznego rozciągania, można zauważyć, że wraz ze wzrostem prędkości wytrzymałość gwałtownie wzrasta (o 16%), natomiast podczas testów dynamicznych praktycznie się nie zmienia. Jeśli chodzi o wydłużenie przy zerwaniu, jego wartości dla przędzy bawełnianej wahają się w zakresie od 10% przy prędkości minimalnej do 7,5% przy prędkości 5 m/s.

Badając wpływ prędkości rozciągania na właściwości mechaniczne przędzy wiskozowej (25 tex), zauważono tendencję do wzrostu naprężenia zrywającego i zmniejszenia

wydłużenia przy zerwaniu. W badaniach statycznych i dynamicznych zmiany prędkości odkształcenia powodują wzrost naprężenia rozciągającego, który jest bardziej widoczny dla przędzy bawełnianej. Dla przędzy poliamidowej (100 tex) zaobserwowano również tendencję do zwiększania naprężenia zrywającego i zmniejszania wydłużenia przy zerwaniu wraz ze wzrostem prędkości rozciągania. Wydłużenie przy zerwaniu wraz ze zwiększeniem małych prędkości rozciągania o jeden rząd wielkości, pozostaje na poziomie 15%, a przy prędkości 5 m/s spada do 11%. Wartości początkowego modułu sztywności zmieniają się znacząco podczas testu statycznego wraz ze wzrostem prędkości rozciągania od 47 do 644 mm/min. Dla przędzy bawełnianej zwiększają się od 0,52 do 4,2 kgf/mm², dla przędzy wiskozowej od 0,32 do 3,0 kgf/mm². Wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia wartości tych wskaźników zmieniają się nieznacznie. Zarówno w badaniach statycznego jak i dynamicznego procesu rozciągania początkowy moduł sztywności przędzy poliamidowej odcinkowej zmienia się w niewielkim stopniu. Zatem najbardziej widoczne różnice we właściwościach mechanicznych podczas badania odmiennych surowcowo rodzajów przędzy zauważyć można w testach statycznych w zakresie prędkości rozciągania od 47 do 644 mm/min.

Przedstawiony powyżej materiał [2] pozwala zgłębić wiedzę na temat wpływu prędkości rozciągania na właściwości mechaniczne nici tekstylnych o różnym składzie włókien i strukturze, pomimo dużych rozbieżności w uzyskanych przez poszczególnych badaczy wynikach oraz w interpretacji tych wyników.

Z uwagi na fakt, iż badane próbki pochodziły od różnych producentów, niemożliwe jest dokonanie bezpośrednich porównań między próbkami wykonanymi z tych samych surowców. Warunki prowadzenia eksperymentów w pracach różnych autorów również nie są identyczne, podczas testów dynamicznych obserwuje się wyraźne różnice w wartościach prędkości maksymalnych, a temperatura i wilgotność względna powietrza często nie są kontrolowane. W wielu artykułach niedostateczną uwagę poświęcono rozważaniom na temat technik eksperymentalnych. Jednocześnie można zauważyć pewną rozbieżność w kwestii wrażliwości urządzeń służących do pomiaru siły na prędkość rozciągania, wyboru metody i sposobu obciążania próbek. Dlatego też w wielu przypadkach wiarygodność uzyskiwanych wartości wskaźników siły i wydłużenia budzi wątpliwości ze względu na niezasadność wybranej metody rejestracji tych parametrów w procesie dynamicznego rozciągania. W różny sposób określana jest także prędkość rozciągania, wyrażana w jednym przypadku jako prędkość poruszania się zacisku ruchomego układu testowego w m/s lub w obr/min urządzenia napędowego, a w drugim przypadku w jednostkach czasu lub procentach wydłużenia próbek.

Znaczny rozrzut wyników uzyskanych przez różnych autorów świadczy o dużej trudności w ustaleniu prawidłowych zależności między właściwościami mechanicznymi materiałów włókienniczych w badaniach statycznego i dynamicznego procesu rozciągania. Zatem porównując dane wielu badaczy analizujących charakter zmiany wydłużenia przy zerwaniu nici wiskozowych wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia, można zauważyć, że zmiana ta wraz ze wzrostem naprężenia zrywającego ma inny charakter. W niektórych przypadkach rośnie, a w innych maleje. Taką samą zależność można zaobserwować dla innych parametrów na przykład pracy zerwania.

Podobne rozbieżności w uzyskanych wynikach można zaobserwować dla nici octanowych, gdzie w niektórych opracowaniach wraz ze wzrostem prędkości rozciągania siła rośnie a wydłużenie maleje, natomiast w innych wydłużenie rośnie lub nie zmienia się.

Wyraźniejszy obraz dają badania przędzy poliamidowych. W zdecydowanej większości przypadków stwierdzono, że w dynamicznych próbach rozciągania zwiększa się naprężenie

zrywające nitek, natomiast maleje wydłużenie zrywające. Natomiast współczynniki dynamiczne wahają się w szerokim zakresie, nawet w pracach tego samego autora. Choć wyniki poszczególnych autorów są zbieżne pod względem charakteru zmiany wytrzymałości względnej i wydłużenia przy zrywaniu, istnieją sprzeczności w analizie pracy zrywania przędzy poliamidowych. Na przykład u niektórych autorów wartość pracy zerwania wzrasta, a w innych przypadkach dynamiczny współczynnik pracy zerwania jest ujemny, co wskazuje na spadek wartości tego wskaźnika podczas badań dynamicznych. To z kolei dowodzi, że stopień wzrostu naprężeń zrywających i spadku wydłużenia w pracach różnych autorów nie jest taki sam.

W przypadku nici syntetycznych (poliester, poliakrylonitryl, poliolefina) większość autorów odnotowuje wzrost naprężenia zrywającego i spadek wydłużenia przy zerwaniu wraz ze wzrostem prędkości rozciągania, jednak dane dotyczące charakteru zmiany pracy zerwania są rozbieżne.

Analiza danych uzyskanych na podstawie badań eksperymentalnych pozwala zaobserwować dla wszystkich rodzajów nici ogólną tendencję do wzrostu naprężeń zrywających, złożonego charakteru zmian wartości wydłużeń podczas testów ze średnimi prędkościami rozciągania oraz ich zmniejszenie podczas testów dynamicznych. Moduł sztywności w dużej mierze zależy od czasu rozciągania próbki i wzrasta wraz ze wzrostem prędkości odkształcania, chociaż wahania wartości tych zmian są znaczące nawet dla włókien otrzymanych na bazie tego samego polimeru. To ponownie potwierdza potrzebę prowadzenia badań przy dużych prędkościach odkształcania. Stosowanie urządzeń do prowadzenia pomiarów rozciągania nitek z dużymi prędkościami wymaga rozwiązania szeregu złożonych problemów, w tym pomiarów w bardzo krótkich odstępach czasu, gdy proces odbywa się w ciągu kilku milisekund lub mikrosekund.

Zerwanie włókien polimerowych, wiąże się z pokonaniem sił interakcji między atomami i grupami atomowymi na powierzchni pęknięcia. Jeśli określimy te siły dla danego materiału, to możemy wyznaczyć teoretyczną wartość naprężenia potrzebnego do jego zniszczenia, która jest znacznie wyższa od wytrzymałości rzeczywistej. Właśnie tę rozbieżność po raz pierwszy próbował wyjaśnić Griffith wyznaczając teoretyczną wytrzymałość kruchych ciał stałych zawierających defekty [16]. Każdy materiał posiada dużą ilość defektów makroskopowych w postaci małych pęknięć, szczelin lub porów. Przyłożone obciążenia rozciągające, koncentrują się w pobliżu krawędzi pęknięć, powodując powstawanie w tych miejscach bardzo dużych naprężeń wielokrotnionych na ich wierzchołkach. W momencie, gdy obciążenie na wierzchołku przynajmniej jednego z najdłuższych i najbardziej niekorzystnie zlokalizowanych pęknięć osiągnie wartość krytyczną następuje niekontrolowane rozprzestrzenianie szczeliny tzn. kruche pękanie. Wraz ze wzrostem długości szczeliny maleje wartość obciążenia krytycznego, potrzebnego do zainicjowania jej propagacji. Rozważania Griffith'a zachowują znaczenie do dziś zawierając wszystkie elementy współczesnej teorii zniszczenia ciał idealnie sprężystych (jest to tzw. LINIOWO-SPRĘŻYSTA MECHANIKA PĘKANIA).

Z dostępnych danych literaturowych wynika, że mechanizm niszczenia zorientowanych włókien pod wpływem pojedynczych i wielokrotnych uderzeń mechanicznych jest związany ze zrywaniem wiązań chemicznych w cząsteczkach łańcucha. Zerwanie tych wiązań jest załącznikiem pęknięć, które rozwiną się w przyszłości. Przy rozciąganiu jednoosiowym czynnikiem decydującym o zniszczeniu włókna jest zerwanie znacznej liczby łańcuchów molekularnych w objętości jednego z najsłabszych odcinków włókna. Z powyższych rozważań wynika, że pęknięcie łańcucha głównego polimeru, odbywa się poprzez powstawanie pęknięć, podobnie jak w przypadku zniszczenia dowolnego ciała stałego. Istotna różnica między

materiałami polimerowymi polega na tym, że sama struktura materiału może ulec zmianie pod wpływem naprężeń mechanicznych rozwijających się na wierzchołku pęknięcia.

Zazwyczaj charakter zniszczenia materiałów określa się w zależności od tego, jakie rodzaje deformacji poprzedzają proces zniszczenia [17, 18]. W zależności od stanu polimeru, zgodnie z krzywą termomechaniczną, rozróżnia się mechanizmy pęknięcia kruchego, sprężystego i plastycznego. Cechą charakterystyczną mechanizmu zerwania sprężystego jest to, że rozwija się on w wyniku stopniowego zrywania poszczególnych wiązań powstających w trakcie deformacji. Pęknięcie plastyczne powstaje w wyniku dużych odkształceń w postaci rozciągania i przewężania, a zerwanie następuje wzdłuż najsłabszych z nich. [19].

Cechą materiałów polimerowych jest to, że procesy relaksacji odgrywają istotną rolę w rozkładzie naprężeń, które uniemożliwiają zwiększenie pojedynczego pęknięcia, a jednocześnie obserwuje się wzrost liczby pęknięć przed rozpoczęciem pęknięcia kruchego. Ze względu na fakt, że stan szklisty polimerów jest podzielony na podstany szklisty kruchy i szklisty z wymuszoną elastycznością charakteryzują się one różnymi mechanizmami procesów odkształcania. Gdy pęknięcie próbki poprzedzone jest znacznym odkształceniem, prowadzącym do zmian w jej strukturze, zakłada się pęknięcie kruche.

Teoria molekularno-kinetyczna wytrzymałości polimerów proponuje rozważenie uszkodzenia mechanicznego jako procesu, zachodzącego w czasie i związanego z fluktuacjami energii cieplnej, pod wpływem którego wiązania chemiczne są w sposób ciągły zrywane i przywracane.

Zależność wytrzymałości od temperatury i czasu wskazuje na stopniowy przebieg procesu niszczenia:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{u_0 - \gamma \sigma}{RT}} \quad (3.8)$$

gdzie:

- τ – trwałość polimeru,
- τ_0 – czynnik przedwykładniczy, w przybliżeniu równy okresowi drgań termicznych atomów, $10^{-12} \div 10^{-13}$ s,
- u_0, γ – parametry materiałowe,
- σ – stałe napięcie,
- R – uniwersalna stała Boltzmanna gazu, równa $1,3805 \times 10^{-23}$ J/K,
- T – temperatura absolutna (bezwzględna).

Według autorów zniszczenie ciała stałego następuje wraz z pokonaniem barier energetycznych, które uniemożliwiają zerwanie wiązań chemicznych. Obecność naprężeń zwiększa prawdopodobieństwo fluktuacji pęknięć, ponieważ zmniejszają one całkowitą barierę energetyczną ($u_0 - \gamma \sigma$), przyczyniając się do przyspieszenia zniszczenia ciała stałego. Tak więc, zgodnie z koncepcją Acada i Zhurkova, wytrzymałość włókna charakteryzuje się trwałością materiału, tj. żywotnością ciała stałego, która z kolei zależy od wielkości przyłożonego naprężenia, temperatury i budowy chemicznej łańcucha polimerowego.

Teoria S. N. Zhurkova służyła w wielu pracach [20, 21] jako podstawa do obliczenia wartości teoretycznej wytrzymałości materiałów polimerowych.

W procesie rozciągania początkowa struktura materiału zawsze nieco się zmienia w wyniku rozciągania i rozrywania włókien. Przegrupowanie strukturalne dotyczy wszystkich poziomów organizacji molekularnej i nadmolekularnej i w zależności od rodzaju materiału polimerowego może być konsekwencją rozwoju mikropęknięć, przegrupowania i wzajemnego przemieszczenia dużych elementów struktury nadmolekularnej, zmian kształtu poszczególnych

makrocząsteczek do ich zerwania i nieodwracalnego przemieszczenia w wyniku zerwania wiązań chemicznych i międzycząsteczkowych. W układach silnie zorientowanych, które obejmują włókna tekstylne, zerwanie wiązań chemicznych w głównym łańcuchu makrocząsteczek jest łatwiejsze niż zerwanie dużej grupy wiązań międzycząsteczkowych wzdłuż łańcuchów. Orientacja materiału poddanego procesowi rozciągania może prowadzić zarówno do wzrostu, jak i zmniejszenia wydłużenia przy zerwaniu, w zależności od prędkości przeprowadzania testu. Przy dużych prędkościach rozciągania wydłużenie przy zerwaniu może się zmniejszyć, ze względu na fakt, iż elementy sprężyste i plastyczne nie mają czasu, aby w pełni się ujawnić. Podczas przeprowadzania testów statycznych zachodzące w materiale zmiany mogą zachodzić w jego głębszych warstwach powodując między innymi wzrost wydłużenia zrywającego.

Analiza danych literaturowych charakteryzujących wpływ prędkości rozciągania na podstawowe właściwości mechaniczne materiałów włókienniczych pokazuje, że określanie ich przy małych prędkościach odkształcenia nie pozwala przewidzieć, jakie będą właściwości danego materiału, gdy poddany zostanie on dynamicznemu rozciąganiu. Zależność właściwości mechanicznych materiałów włókienniczych od prędkości rozciągania podkreśla wagę i konieczność prowadzenia badań przy prędkościach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacji i technologicznej obróbki tych materiałów.

3.2 Podstawowe pojęcia reologii

Reologia jest nauką opisującą zachowanie się ciał rzeczywistych pod wpływem przyłożonych do nich naprężeń [22]. Badania właściwości reologicznych są niezmiernie ważne w wielu dziedzinach nauki między innymi w inżynierii procesowej, inżynierii materiałów, biotechnologii czy bioinżynierii. Na ich podstawie uzyskujemy dane niezbędne podczas projektowania wielu urządzeń, kontrolowania jakości produktów począwszy od elementów składowych po produkt końcowy.

3.2.1 Reologiczne równanie stanu

Ciało obciążone układem sił deformuje się doznając zarówno wydłużeń względnych jak i odkształceń postaciowych. Występowanie wzajemnych zależności stanu naprężenia i stanu odkształcenia wykazują badania doświadczalne. Zależności te nazywamy reologicznym równaniem stanu [23]. Uwzględniając wpływ czasu na zmianę naprężeń i odkształceń, reologiczne równania stanu przedstawia się w postaci:

$$R_i(\sigma, \varepsilon, t) = 0 \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.9)$$

gdzie:

- σ – składowe naprężenia,
- ε – składowe odkształcenia,
- n – liczba równań stanu.

Z punktu widzenia reologicznych równań stanu w reologii można wyróżnić trzy główne rodzaje problemów:

- dla znanych reologicznych równań stanu ciała analizuje się jego zachowanie przy zadanym obciążeniu,
- dla określonych reologicznych równań stanu poszukuje się, względnie wytwarza ciało o właściwościach opisanych takimi równaniami,

- dla ciał o znanych właściwościach poszukuje się reologicznych równań stanu.

W pierwszym przypadku wymagane jest rozwiązanie równania stanu (3.9) dla zadanego naprężenia $\sigma = \sigma(t)$ lub wymuszenia odkształcenia $\varepsilon = \varepsilon(t)$. Drugim z powyższych zagadnień zajmuje się inżynieria materiałowa, której zadaniem jest opracowanie technologii pozwalającej na wytworzenie ciała o określonych właściwościach. W trzecim, z wyżej wymienionych problemów poszukuje się zarówno postaci reologicznego równania stanu jak i współczynników występujących w tym równaniu. Wymaga to przeprowadzenia wielu badań doświadczalnych rejestrujących naprężenie i odkształcenie zmieniające się w czasie pod wpływem przyłożonej siły. Mają one na celu wykrycie podstawowych właściwości takich jak: sprężystość, plastyczność, lepkość, pełzanie, relaksację, rozproszenie energii wewnętrznej i tłumienie drgań ciała. Na podstawie otrzymanych wyników, literatury oraz własnych doświadczeń wybierana jest odpowiednia postać równania.

Większość rzeczywistych ciał posiada w pewnym stopniu wszystkie właściwości reologiczne. Ciała, w których występuje przewaga jednych właściwości nad drugimi nazywamy ciałami idealnymi. Ilustracją takich ciał są modele reologiczne budowane za pomocą znanych mechanicznych elementów, takich jak np. sprężyny, tłumiki. Każdy model opisuje odpowiadające mu reologiczne równanie stanu.

3.2.2 Reologia włókna – modele reologiczne

Właściwości mechaniczne tekstyliów uzależnione są od właściwości mechanicznych włókien i w większości przypadków wpływają na trwałość wyrobu włókienniczego podczas jego użytkowania [24]. W odniesieniu do praktyki użytkowania materiałów tekstylnych najistotniejsze znaczenie ma odkształcenie włókien powstające podczas rozciągania osiowego. W przypadku działania małych sił rozciągających, o wartościach nie większych niż 10 – 15% wartości siły zrywającej włókno uwidaczniają się odkształcenia sprężyste, których wielkość zgodnie z prawem Hooke'a „jest wprost proporcjonalna do wielkości działającego naprężenia rozciągającego i odwrotnie proporcjonalna do cech sprężystych, wyrażonych modułem Younga”.

$$\varepsilon_{spr} = \frac{\sigma}{E} \quad (3.10)$$

gdzie:

- ε_{spr} – odkształcenie sprężyste,
- σ – naprężenie,
- E – moduł Younga.

Odształcenia sprężyste charakteryzuje całkowita i natychmiastowa rewersyjność, uwidaczniają się one natychmiast po przyłożeniu naprężeń rozciągających i zanikają natychmiast po ich ustąpieniu co oznacza, że nie są zależne od czasu ich działania. Modelem reologicznym, który ilustruje powstawanie, zmianę i zanikanie odkształceń sprężystych jest Model Hooke'a przedstawiony na rysunku 3.2.2.1. Jest to rozciągnięta lub ściśnięta sprężyna spiralna z drutu o stałej średnicy i stałym skoku, który wykonany jest ze stali o module Younga E .



Rys. 3.2.2.1 Model reologiczny Hooke'a
Źródło: [24]

Zbadane właściwości wskazują, że ciało Hooke’a (którego modelem mechanicznym jest model Hooke’a) jest ciałem idealnie sprężystym, gdyż „nie ma zdolności do pełzania i relaksacji, nie rozprasza energii i nie tłumi drgań” [23].

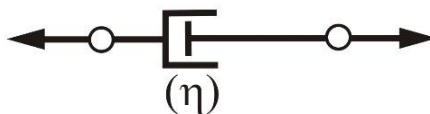
Odształcenia trwałe powstają w trzeciej kolejności przy narastaniu siły rozciągającej po ujawnieniu się odkształceń sprężystych i lepko-sprężystych [24]. Warunkiem ich uzewnętrznienia jest przekroczenie wartości granicznej przez siłę rozciągającą. Odształcenia te, jak sama nazwa mówi, mają charakter nieodwracalny. Prędkość powstawania odkształceń trwałych jest wprost proporcjonalna do wielkości działającego naprężenia rozciągającego i odwrotnie proporcjonalna do cech lepkich tworzywa wyrażających się współczynnikiem η .

$$\frac{d\varepsilon_{tr.}}{dt} = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma \quad (3.11)$$

gdzie:

- $d\varepsilon_{tr.}/dt$ – prędkość zwiększania odkształceń trwałych,
- σ – naprężenie,
- η – współczynnik lepkości tworzywa.

Zachowanie odkształceń trwałych we włóknie ilustruje Model Newtona (rys. 3.2.2.2), który stanowi tłumik składający się z cylindra wypełnionego cieczą (lepka, nieściśliwa ciecz o współczynniku lepkości η), w którym porusza się tłok z otworami.



Rys. 3.2.2.2 Model reologiczny Newtona
Źródło: [24]

Zbadane właściwości wskazują, że ciało Newtona (którego modelem mechanicznym jest model Newtona) „jest lepkie, pełza ze stałą prędkością; pętlą histerezy jest elipsa i energia ulega rozproszeniu, tłumienie drgań ciała jest bardzo duże” [23].

Do elementarnych modeli reologicznych należy również model Saint Venanta (rys. 3.2.2.3), którego modelem mechanicznym jest suwak o określonym oporze ruchu [24].



Rys. 3.2.2.3 Model reologiczny Saint-Venanta
Źródło: [24]

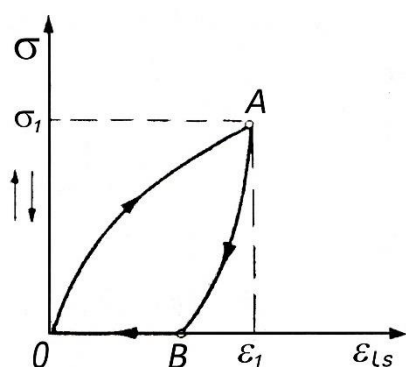
Wymienione powyżej modele, będące elementarnymi składnikami bardziej złożonych modeli mechanicznych ciał, są modelami fenomenologicznymi. Nie zależą one od wewnętrznej budowy ciała a jedynie odzwierciedlają jego zachowanie się w zależności od czasu i działającego naprężenia. Cała trudność polega na zbudowaniu modelu, dla którego matematycznie zapisane związki naprężenia i odkształcenia będą najdokładniej opisywały rzeczywiste zachowanie się badanego ciała w czasie. W miarę rozbudowy modeli mechanicznych wzrasta rząd równań stanu, co znacząco komplikuje ich rozwiązanie.

Budowanie bardziej złożonych modeli mechanicznych nie nastręcza większych trudności, kłopoty rozpoczynają się dopiero przy rozwiązywaniu odpowiadających im równań stanu [23].

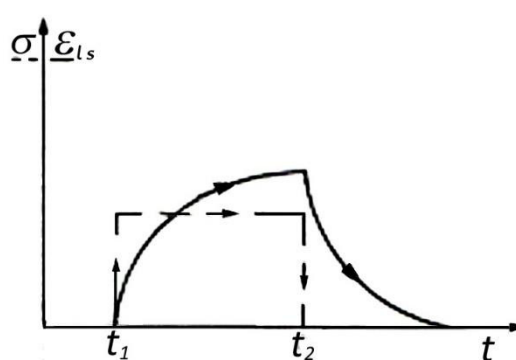
Modele Hooke'a oraz Newtona reprezentujące właściwości sprężyste i lepkie stanowią podstawę do budowania modeli złożonych tzw. lepko-sprężystych [24, 25, 26, 27].

Przy średnich siłach rozciągających o wartościach przekraczających tzw. granicę sprężystości włókna powstają odkształcenia lepko-sprężyste. Wielkość ich uzależniona jest od wartości przyłożonego naprężenia rozciągającego oraz czasu jego działania. Zależność odkształceń lepko-sprężystych od czasu powoduje, iż „odkształcenia te narastają z pewnym opóźnieniem w stosunku do narastania naprężeń i maleją z pewnym opóźnieniem w stosunku do zanikania naprężeń”. Odkształcenia lepko-sprężyste są zatem odkształceniami rewersyjnymi opóźnionymi.

Graficznie przebieg odkształceń lepko-sprężystych możemy zobrazować krzywymi zależności $\sigma = f(\epsilon_{ls})$, $\epsilon_{ls} = f(\text{czas})$ dla $\sigma = \text{const.}$



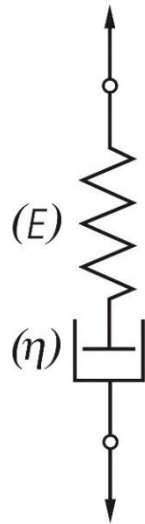
Rys. 3.2.2.4 Charakterystyka zmienności odkształcenia lepko-sprężystego włókna w układzie $\epsilon = f(\sigma)$
Źródło: [24]



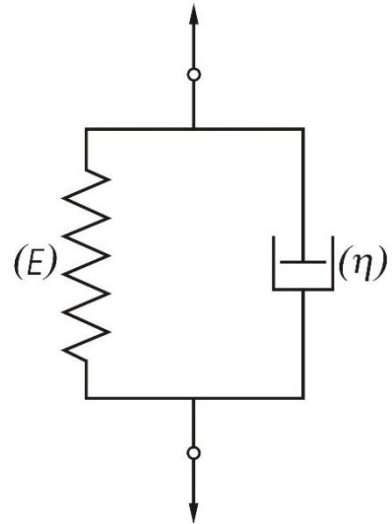
Rys. 3.2.2.5 Charakterystyka czasowa zmienności odkształceń lepko-sprężystych włókna dla $\sigma = \text{const.}$ w przedziale czasowym $t_1 - t_2$
Źródło: [24]

W całkowitym odkształceniu włókien i tekstyliów dominują odkształcenia lepko-sprężyste, które w głównym stopniu wpływają na ich wytrzymałość zmęczeniową. W ramach odkształceń lepko-sprężystych zachodzą zjawiska takie jak relaksacja naprężeń wewnętrznych oraz pełzanie.

Najczęściej stosowanymi do opisu zachowania odkształceń lepko-sprężystych modelami reologicznymi są: model Maxwella (rys. 3.2.2.6), model Kelvina – Voigta (rys. 3.2.2.7), model Eyringa (rys. 3.2.2.8) oraz model Standardowy trójparametrowy, Zenera (rys. 3.2.2.9).



Rys. 3.2.2.6 Model dwuparametrowy
Maxwella
Źródło: [24]



Rys. 3.2.2.7 Model dwuparametrowy
Kelvina – Voigta
Źródło: [24]

Reologiczne równania stanu dla poszczególnych modeli przyjmują postać:

- model Maxwella

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \quad (3.12)$$

- model Kelvina – Voigta

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.13)$$

- model Zenera

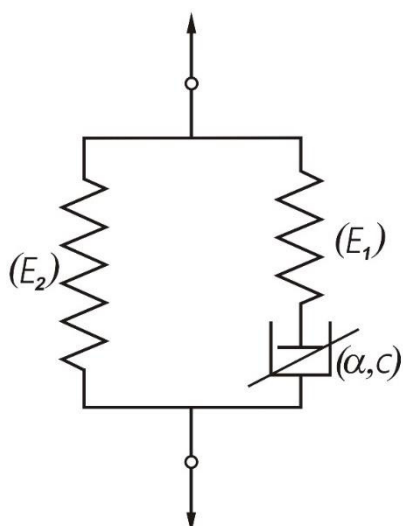
$$(E_1 + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\tau_1} \varepsilon = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\tau_1} \sigma \quad (3.14)$$

- model Eyringa, w skład którego wchodzi hydrauliczny tłumik opisany stałymi α i c

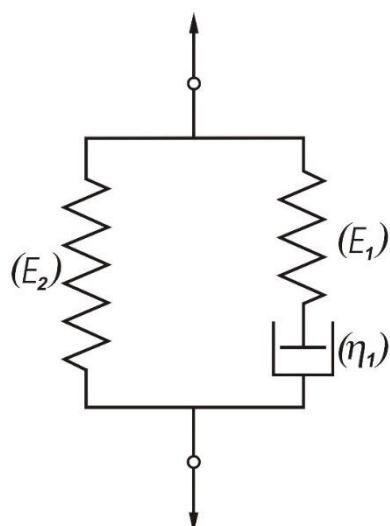
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = c \cdot \sinh(\alpha \cdot \sigma) \quad (3.15)$$

gdzie:

- $d\varepsilon/dt$ – prędkość powstawania odkształceń,
- E, E_1, E_2 – moduł sprężystości liniowej (Younga),
- $d\sigma/dt$ – prędkość narastania naprężenia rozciągającego,
- η – współczynnik lepkości tworzywa włókna,
- σ – naprężenie rozciągające,
- ε – odkształcenie włókna,
- τ_1 – czas relaksacji elementu Maxwella.



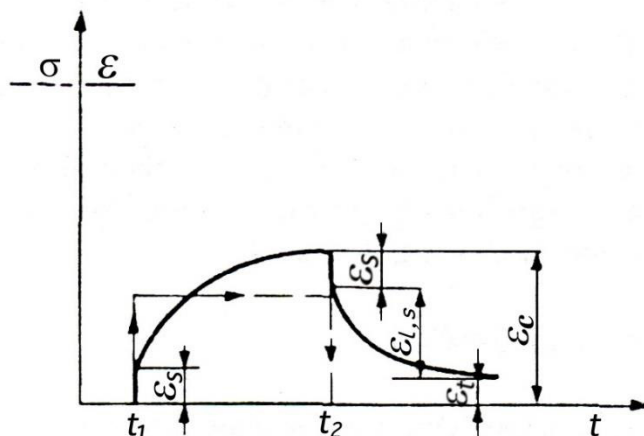
Rys. 3.2.2.8 Model Eyringa
Źródło: [24]



Rys. 3.2.2.9 Model Standardowy
trójparametrowy I, Zenera
Źródło: [24]

Omówione powyżej rodzaje odkształceń składowych, mogące powstawać podczas działania na prędkę siły rozciągającej pozwalają na przedstawienie pełnej charakterystyki graficznej odkształcalności prędkę.

Biorąc pod uwagę działanie dostatecznie dużego naprężenia rozciągającego, które warunkuje powstawanie wszystkich trzech rodzajów odkształceń otrzymujemy charakterystykę graficzną przedstawioną na rysunku 3.2.2.10.

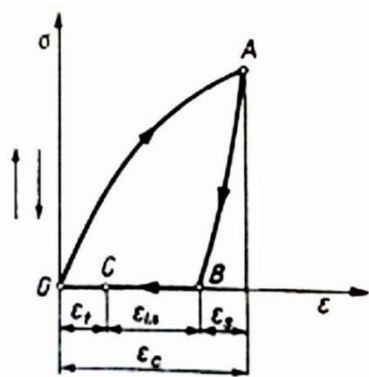


Rys. 3.2.2.10 Charakterystyka czasowa pełnej odkształcalności prędkę dla przypadku działania naprężenia rozciągającego $\sigma = \text{const.}$, ϵ_s – odkształcenie sprężyste, ϵ_{ls} – odkształcenie lepko-sprężyste, ϵ_{trw} – odkształcenie trwałe, ϵ_{calk} – odkształcenie całkowite

Źródło: [24]

Z przedstawionej charakterystyki wynika, że dla programowanego w opisany sposób obciążenia w pierwszym momencie jego działania występuje gwałtowny skokowy przyrost wydłużenia. W miarę upływu czasu narastanie odkształceń ulega zwolnieniu i odbywa się zgodnie z krzywą wykładniczą.

W układzie $\epsilon = f(\sigma)$ przy działaniu dostatecznie dużej siły rozciągającej, aby mogły uzewnętrznić się wszystkie trzy rodzaje odkształceń, charakterystyką prędkę może być krzywa przedstawiona na rysunku 3.2.2.11.



Rys. 3.2.2.11 Charakterystyka pełnej odkształcalności przędzy w układzie $\epsilon = f(\sigma)$

Źródło: [24]

Istotą procesu relaksacji jest zanikanie naprężeń wewnętrznych w czasie przy stałej wartości temperatury T oraz odkształcenia lepko-sprężystego $\epsilon_{ls} = \text{const}$. Relaksacja związana jest z tzw. termorelaksacją polegającą na zanikaniu wewnętrznych naprężeń we włóknie podczas stałego odkształcenia lepko-sprężystego oraz wzrostu wartości temperatury.

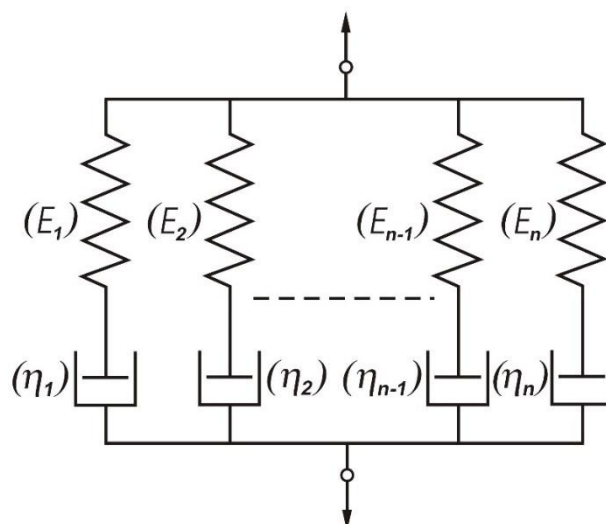
Pierwsze próby opisanego procesu relaksacji naprężeń wewnętrznych we włóknach przeprowadzono w oparciu o równanie relaksacji dla modelu Maxwella. Założono, że odkształcenie modelu nastąpiło bardzo szybko, zatem naprężenie początkowe uzależnione jest wyłącznie od rozciągnięcia sprężyny.

$$\sigma_t = E \epsilon_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.16)$$

gdzie:

- σ_t – naprężenie wewnętrzne w czasie relaksacji t ,
- E – moduł Younga sprężyny,
- ϵ_0 – odkształcenie początkowe,
- t – czas odkształcenia modelu,
- τ – czas relaksacji.

Procesy relaksacyjne we włóknach zachodzą różnie w związku z ich zróżnicowaną budową oraz ulegają zmianie w zależności od wielkości wydłużenia lepko-sprężystego. Całkowita relaksacja włókna składa się z wielu cząstkowych procesów relaksacyjnych opisanych widmem czasów relaksacji, czyli zbiorem ich wartości, a nie pojedynczą wartością τ , jak ma to miejsce w przypadku modelu Maxwella. Zatem powyższe równanie nie odzwierciedla w pełni zjawiska relaksacji naprężeń w nich zachodzących. W celu lepszego odzwierciedlenia relaksacji naprężeń we włóknach przyjęto model całkowity pierwszego rodzaju zwany modelem Kuhna (rysunek 3.2.2.12).



Rys. 3.2.2.12 Uogólniony model reologiczny Maxwella; model Kuhna
Źródło: [24]

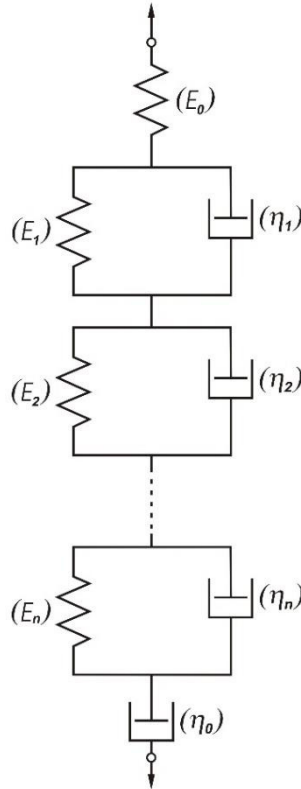
Stanowi on równoległe połączenie nieskończonej liczby elementów modelu Maxwella co przekłada się teoretycznie na nieskończoną liczbę czasów relaksacji elementów strukturalnych o rozkładzie ciągłym $d\tau$.

$$\sigma_t = \varepsilon \int_0^{\infty} E(\tau) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} d\tau \quad (3.17)$$

gdzie:

- σ_t – naprężenie wewnętrzne w czasie relaksacji t ,
- E – moduł Younga sprężyny,
- ε – odkształcenie początkowe wywołane tylko rozciągnięciem sprężyn, jednakowe dla poszczególnych elementów składowych,
- $E(\tau)$ – funkcja widma czasów relaksacji,
- $E(\tau)d\tau$ – wielkość cząstkowego modułu odkształcalności lepko-sprężystej,
- t – czas odkształcenia modelu,
- τ – czas relaksacji.

Płynięcie mechaniczne zwane również pełzaniem charakteryzuje się wzrostem wielkości odkształcenia lepko-sprężystego powstającego pod wpływem przyłożenia stałego naprężenia rozciągającego przy stałej temperaturze włókna T . Podobnie jak w przypadku procesu relaksacji naprężeń wewnętrznych zjawisko płynięcia mechanicznego we włóknach stanowi wypadkową efektów składowych pełzania w poszczególnych obszarach fazy amorficznej włókna. Model Kelvina – Voigta będący podstawą do wyprowadzenia równania opisującego zjawisko pełzania we włóknach opisuje je jedynie w sposób przybliżony. Odkształcenie powstające podczas rozciągania modelu w warunkach pełzania jest „opóźnione” w porównaniu z odkształceniami sprężystymi, które ujawniłyby się w przypadku działania takiego samego naprężenia rozciągającego. Wprowadzono zatem pojęcie czasu retardacji, po którym model doznaje odkształcenia o wartości $\varepsilon = \left(1 - \frac{1}{e}\right)$ odkształcenia ostatecznego. Proces płynięcia we włóknach charakteryzowany jest przez zbiór wartości czasów retardacji nazywany widmem czasów retardacji. Dla jak najdokładniejszego opisu zjawiska pełzania przyjęto model całkowity drugiego rodzaju zwany modelem Alfreya, który stanowi połączenie szeregowe nieskończonej liczby modeli Kelvina – Voigta (rysunek 3.2.2.13).



Rys. 3.2.2.13 Uogólniony model reologiczny Kelvina – Voigta; model Alfreya
Źródło: [24]

Przechodząc od przyjętego modelu do włókna odkształconego lepko-sprężysto, gdzie teoretycznie proces pełzania zachodzi w nieskończonej liczbie elementów strukturalnych, co skutkuje nieskończoną ilością czasów retardacji można napisać:

$$\varepsilon_t = \sigma \int_0^\infty J(\tau) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) d\tau \quad (3.18)$$

gdzie:

- ε_t – odkształcenie po czasie t ,
- σ – naprężenie rozciągające,
- $J(\tau)$ – funkcja widma czasów retardacji,
- $J(\tau) \cdot d\tau$ – wielkość składowej podatności do płynięcia,
- t – czas odkształcenia modelu,
- τ – czas retardacji.

Przedstawione powyżej modele całkowite budowane są w oparciu o znane, proste modele mechaniczne, przy wykorzystaniu zasady superpozycji. Całkowanie jest operacją liniową. Budując zatem model całkowity w oparciu o prosty liniowy model mechaniczny otrzymujemy również model liniowy. W ciałach rzeczywistych zjawiska relaksacji i pełzania występują równocześnie, zatem uzasadnione jest budowanie bardziej złożonych modeli, które opisywałyby je jednocześnie [28].

Model trójparametrowy powstaje w wyniku równoległego połączenia modelu Maxwella i Hooke'a (rys. 3.2.2.14) lub szeregowego połączenia ciała Kelvina – Voigta i Hooke'a (rys. 3.2.2.15). Można wykazać, że oba modele są równoważne z punktu widzenia

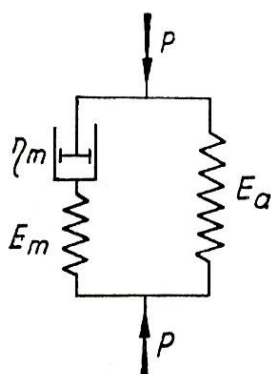
ich właściwości (przy odpowiednio dobranych parametrach), a ich reologiczne równanie stanu przyjmuje postać:

$$a\sigma + a_1\dot{\sigma} = b\varepsilon + b_1\dot{\varepsilon} \quad (3.19)$$

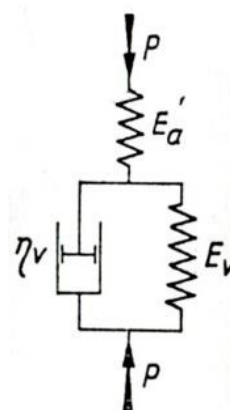
gdzie:

- σ – napężenie,
- ε – odkształcenie.

Ciało, którego własności fizyczne można opisać powyższym równaniem nazywamy ciałem standardowym liniowym, a model mechaniczny modelem standardowym lub modelem trójparametrowym pierwszego rodzaju.

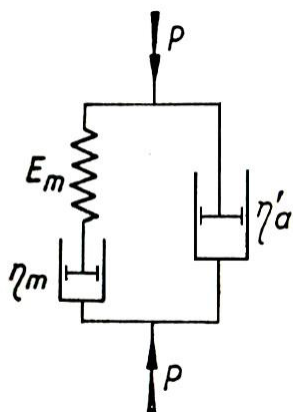


Rys. 3.2.2.14 Model powstały z równoległego połączenia modelu Maxwella i Hooke'a
Źródło: [28]

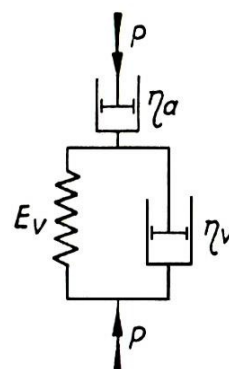


Rys. 3.2.2.15 Model powstały z szeregowego połączenia modelu Kelvina – Voigta i Hooke'a
Źródło: [28]

Modelem trójparametrowym jest również tzw. model standardowy drugiego rodzaju, który stanowi połączenie równoległe modelu Maxwella i Newtona (rys. 3.2.2.16) lub szeregowego ciała Kelvina – Voigta i Newtona (rys. 3.2.2.17).



Rys. 3.2.2.16 Model powstały z równoległego połączenia modelu Maxwella i Newtona
Źródło: [28]



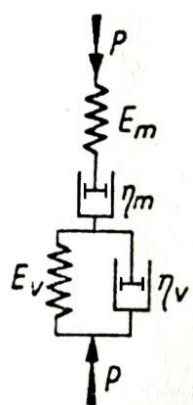
Rys. 3.2.2.17 Model powstały z szeregowego połączenia modelu Kelvina-Voigta i Newtona
Źródło: [28]

W porównaniu z modelami trójparametrowymi pierwszego rodzaju, w modelach tych zastosowano model Newtona zamiast modelu Hooke'a.

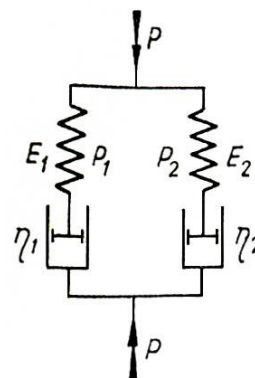
Równaniami identycznego typu jak dla modelu pierwszego rodzaju są reologiczne równania stanu obydwu wariantów modeli drugiego rodzaju. Przy odpowiednio dobranych parametrach,

modele pierwszego i drugiego rodzaju opisują te same właściwości. Podane połączenia modeli wyczerpują wszystkie możliwe układy trójparametrowe.

Modelem czteroparametrowym pierwszego rodzaju nazywamy model powstały z szeregowego połączenia ciała Maxwella i Kelvina – Voigta (rys. 3.2.2.18), natomiast modelem czteroparametrowym drugiego rodzaju jest równoległe połączenie dwóch modeli Maxwella (rys. 3.2.2.19).



Rys. 3.2.2.18 Model powstały z szeregowego połączenia modelu Maxwella i Kelvina – Voigta
Źródło: [28]



Rys. 3.2.2.19 Model powstały z równoległego połączenia dwóch modeli Maxwella
Źródło: [28]

Wykazuje się, iż obydwa modele czteroparametrowe są równoważne, a ich reologiczne równanie stanu przyjmuje następującą postać:

$$a\sigma + a_1\dot{\sigma} + a_2\ddot{\sigma} = b_1\dot{\varepsilon} + b_2\ddot{\varepsilon} \quad (3.20)$$

gdzie:

- σ – naprężenie,
- ε – odkształcenie.

Ciało, którego własności można opisać powyższym równaniem stanu nazywamy ciałem Bürgersa (rys. 3.2.2.18).

Modele reologiczne w zależności od przyjętych założeń określających mechaniczne zachowanie elementów składowych, takich jak sprężyna i tłumik, mogą być opisane zależnościami liniowymi lub nieliniowymi [29]. Autor klasyfikuje modele nieliniowe opisujące zachowanie ciał lepko-sprężystych zależnie od liczby parametrów, natomiast zastosowanie odpowiednich związków konstytutywnych tłumaczy między innymi doświadczeniem naukowców dopasowujących poszczególne parametry do danych otrzymanych w wyniku przeprowadzonych badań.

W oparciu o wieloletnie doświadczenie podparte licznymi publikacjami z tematyki nieliniowego zachowania ciał lepko-sprężystych autor dochodzi do wniosku iż, trudno jest wybrać model, który po pierwsze jest stosunkowo prosty do opisu naprężeń i odkształceń ciał stałych o dowolnej geometrii, po drugie pozwala na wyznaczenie parametrów podczas standardowych badań eksperymentalnych oraz po trzecie prawidłowo oddaje rzeczywiste zachowanie materiału pod wpływem zmiennego w czasie obciążenia [30].

3.3 Reologia we włókiennictwie

Przędze można zaliczyć do ciał stałych o dużej złożoności właściwości mechanicznych. Pod wpływem przyłożonych sił zewnętrznych zachowanie się przędz jest znacznie bardziej skomplikowane od zachowania się wielu ciał stałych. Z uwagi na posiadaną przez przędzę charakterystyczną zależność właściwości od czasu, udogodnieniem opisywanych zjawisk będzie użycie zasad mechaniki ciała lepko-sprężystego [24].

Ciało obciążone układem sił deformuje się doznając zarówno wydłużeń względnych jak i odkształceń postaciowych [23]. W przypadku ciał o długości znacznie większej od wymiarów poprzecznych, jakimi są włókna lub przędza, obciążonych w kierunku podłużnym brany jest pod uwagę związek między naprężeniem σ , wydłużeniem ε i czasem t . Reologiczne równanie stanu (RRS) dla ciał jednowymiarowych opisuje zależność (3.9).

W celu opisu zachowania nitek oraz tekstyliów poddawanych obciążeniom rozciągającym opracowano szereg modeli analitycznych i reologicznych. Szczególnie w odniesieniu do procesów włókienniczych zastosowanie znajdują różnorodne modele reologiczne. Własności reologiczne materiałów włókienniczych (włókien, przędz, dzianin, tkanin, włókna) modelowane są najczęściej znanymi w mechanice układami dwu, trzy- parametrowymi i całkowitymi stanowiącymi połączenia ciała Hooke'a i tłumiku Newtona. Wprowadza się również bardziej złożone modele uwzględniające ciała nieliniowo-sprężyste oraz elementy cierne ze stałym i nieliniowym tarciem suchym.

W modelu urządzenia przewałowego osnowarki autor K. Kopias uznaje nitki osnowy jako ciało lepko-sprężyste opisując je modelem Kelvina – Voigta (rys. 3.2.2.7) [31]. Traktując nitkę jako ciało sprężyste o liniowej charakterystyce rozciągania oraz zakładając siłę tłumienia działającą w nitce jako proporcjonalną do prędkości jej wydłużenia autor określił wartość siły w nitkach przed i za przewalem równaniem:

$$P_i = k \cdot \varepsilon_i + b_i \cdot \lambda_i \quad (3.21)$$

gdzie:

- k – współczynnik sztywności osnowy, określony jako współczynnik proporcjonalności między siłą rozciągającą a wydłużeniem względnym osnowy,
- ε_i – względne wydłużenie odcinków osnowy,
- b_i – współczynniki tłumienia, określone jako współczynniki proporcjonalności między siłą tłumienia przenoszoną przez osnowę a prędkością jej bezwzględnego wydłużenia,
- λ_i – prędkość wydłużenia odcinków osnowy, określona jako pochodna wydłużenia względem czasu.

Podobnie modelem dwuczłonowym Kelvina – Voigta charakteryzuje nitki osnowy w procesie dziania struktur anizotropowych dzianin kolumniowych żakardowych Z. Mikołajczyk [32, 33].

Według Szoslanda i Czołczyńskiego [34] większość surowców włókienniczych można zaliczyć do ciał, w których następuje relaksacja naprężeń i odkształceń pod wpływem nagle przyłożonego obciążenia. Własności te, zdaniem autorów, można przedstawić za pomocą tzw. standardowego modelu liniowego Zenera (rys. 3.2.2.9). W celu bliższego poznania zjawiska relaksacji w nitkach autorzy zaprojektowali układ pomiarowy, w którym rejestrowano w sposób bezdotykowy przemieszczenia wybranego elementu nitki.

W pracy Sajdla [35] modelowano, z wykorzystaniem modelu trójczłonowego Zenera, wartości sił w nitkach przy wprowadzeniu wątku na krosnach. Autor wyznaczył lepkość dynamiczną na podstawie krzywych pełzania. Otrzymane w ten sposób wartości lepkości

wprowadził następnie do modelu, a obliczenia dynamicznych wartości sił przeprowadził na maszynie analogowej. Uzyskał dużą zgodność między wartościami empirycznymi, a obliczeniowymi.

K. Kowalski po wcześniej przeprowadzonych badaniach przyjął, do analizy dynamicznych sił w nitkach na szydełkarce, model reologiczny opisywany modelem standardowym Zenera [36]. Autor posłużył się równaniem różniczkowym, które opisywało związek między odkształceniem ε , siłą rozciągającą F i czasem działania siły oraz parametrami reologicznymi c , c_1 , η modelu Zenera:

$$F + \frac{\eta}{c_1} \frac{dF}{dt} = c \cdot \varepsilon + (c + c_1) \frac{\eta}{c_1} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.22)$$

Parametry reologiczne nitek identyfikował na podstawie relaksacji sił w nitkach. Przyjmując warunki zachodzenia relaksacji tj. $\varepsilon = \text{const.}$, $d\varepsilon/dt = 0$ otrzymał równanie opisujące proces relaksacji siły:

$$F = c \cdot \varepsilon + c_1 \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{tc_1}{\eta}} \quad (3.23)$$

pod wpływem skokowej zmiany wydłużenia siły w nitce zmieniają się od wartości F_0 do wartości $F_{\max}$.

Z interpolacji wyrażenia $\exp\left(-\frac{tc_1}{\eta}\right)$, które opisuje przebieg procesu relaksacji sił wynika,

że siły te zależą odwrotnie wykładniczo od czasu ich występowania. Przyjmując za podstawę wartości sił po czasie, w którym zachodziły w próbce minimalne ich zmiany określił względną sztywność rozciągania c . Dla badanych nitek przyjął czas 60 s. Średnia wartość siły minimalnej wynosiła $F_{\min} = 46,9$ cN dla liczby pomiarów $n = 20$.

$$c = \frac{F_{\min}}{\varepsilon} \quad (3.24)$$

gdzie:

$F_{\min}$ – wartość minimalna siły odczytana z krzywej relaksacji dla czasu 240 s,

ε – wydłużenie względne,

c – wartość względnej sztywności sprężyny.

Ponieważ odkształcenie nitek nastąpiło skokowo autor uznał, że początkowe wartości $F_{\max}$ są skutkiem rozciągania sprężyn.

$$c_1 + c = \frac{F_{\max}}{\varepsilon} \quad (3.25)$$

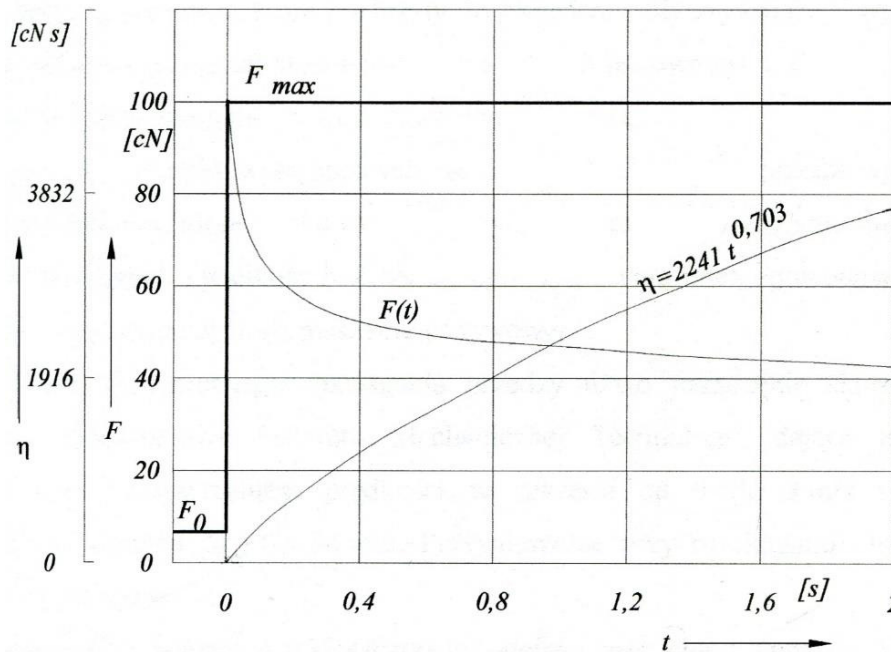
gdzie:

$F_{\max}$ – wartość maksymalna siły,

c , c_1 – wartości względnej sztywności sprężyny,

ε – wydłużenie względne.

Rysunek 3.3.1 przedstawia przykładową krzywą relaksacji dla przędzy bawełnianej.



Rys. 3.3.1 Wartości sił podczas relaksacji naprężeń $F(t)$ w przędzy bawełnianej 2×18 tex oraz wartości współczynnika względnej lepkości dynamicznej η obliczonej na podstawie modelu reologicznego Zenera ($\varepsilon = 1,2\%$, przy stałych wartościach parametrów reologicznych $c = 3900$ cN, $c_1 = 4500$ cN).

Źródło: [36]

Doboru wartości względnej lepkości dynamicznej tworzywa nitki η dokonano na podstawie równania (3.22) i znajomości wielkości sił $F(i)$ w nitkach w chwilach dygitalizacji $t(i)$ krzywej relaksacji.

$$\eta = \frac{-t(i)c_1}{\ln \frac{F(i) - c\varepsilon}{c_1\varepsilon}} \quad (3.26)$$

gdzie:

- η – współczynnik lepkości,
- ε – wydłużenie względne,
- c, c_1 – wartości względnej sztywności sprężyny,
- $F(i)$ – siła,
- $t(i)$ – czas.

Otrzymano funkcję regresji $\eta = at^b$ charakteryzującą się wysokim współczynnikiem korelacji ($\eta = 2241,2t^{0,703}$, $V = 0,996$). K. Kowalski uznał, że ten fizyczno-matematyczny opis procesu relaksacji sił jest bardziej dogodny, niż odwzorowanie procesu relaksacji za pomocą modelu składającego się z równolegle połączonych elementów Maxwella, które wymagają doboru dla poszczególnych elementów wartości η, c_1 .

W artykule [37] Z. Mikołajczyk określił właściwości mechaniczne nitek osnowy poddawanych obciążeniom dynamicznym zmiennym w czasie, wymuszonym pracą elementów oczkotwórczych osnowarek. Określono zależności między wybranymi charakterystykami nitki, a długością osnowy w strefie zasilania.

Do badań statycznych, które posłużyły do określenia siły zrywającej i wydłużenia, przyjęto przędze najczęściej stosowane na maszynach osnowowych. Były to jedwabie poliamidowe, poliestrowe i jedwabie wiskozowe. Po przeanalizowaniu występujących na osnowarkach napięć przędz wyznaczono niezbędne wielkości, które trzeba określić przy dynamicznym rozciąganiu nitki. Jest to prędkość rozciągania i wielkość bezwzględnego wydłużenia nitek spowodowana pracą elementów oczkotwórczych na maszynie osnowowej.

Do pomiaru dynamicznego rozciągania przędzy użyto urządzenie skonstruowane w Zespole Dzielnictwa Instytutu Mechanicznej Technologii, dające możliwość badania nitki z prędkościami w zakresie od 0 do 3 m/s i długości rozciąganego odcinka $\Delta l = 0 \div 30$ mm. Wydłużenie zakleszczonego odcinka było stałe i wynosiło $\Delta l = 8$ mm. Do pomiaru zależności między maksymalną siłą F występującą podczas dynamicznego rozciągania nitki, a długością swobodną nitki wybrano dziewięć wartości długości osnowy z zakresu od 380 do 3000 mm. Rozciąganie następowało przy prędkościach ramienia rozciągającego $V = 0,27; 1,4; 2,5$ m/s dla jedwabiu poliamidowego 110 dtex i $V = 2,5$ m/s dla jedwabiu wiskozowego 167 dtex, przy napięciu wstępnym 3 i 10 cN.

Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji liniowych modeli regresji autor stwierdził, że równanie funkcji wykładniczej postaci $Y = Ae^{Bx}$ najdokładniej opisuje funkcję $F = f(L)$ dla jedwabiu wiskozowego i poliamidowego. Średnia wartość współczynnika korelacji wynosiła 0,9616. W omawianej pracy analizę dynamicznych sił nitki wykonano w oparciu o model reologiczny Zenera. Autor przyjął, że współczynnik lepkości jest wartością zmienną w funkcji czasu. Analizę przeprowadzono dla jedwabiu poliamidowego.

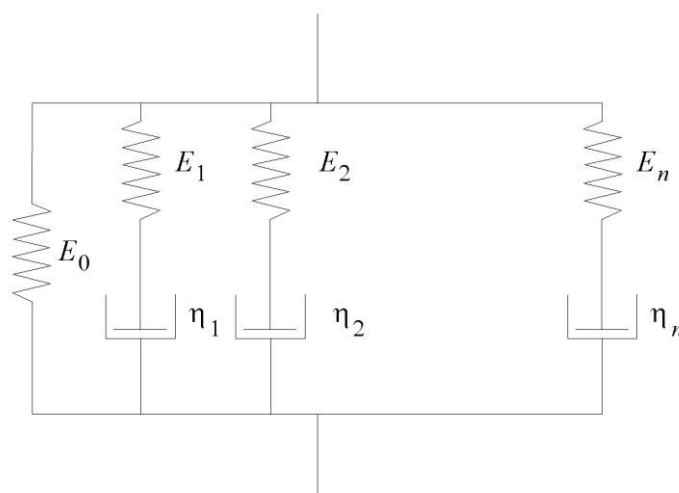
Następnym etapem pracy był dobór funkcji aproksymującej współczynnik lepkości w czasie. Najlepiej zmiany te opisała funkcja wykładnicza $\eta = at^b$. Bardzo wysokie współczynniki korelacji zawierające się w przedziale od 0,919 do 0,994 świadczą o prawidłowym doborze funkcji.

Zweryfikowano postać zmiany F wartości siły występującej w nitce w funkcji czasu przy wyznaczonym współczynniku lepkości:

$$F = C \cdot \varepsilon + C_1 \cdot \varepsilon \cdot \exp\left(-\frac{C_1}{\eta} \cdot t\right) \quad (3.27)$$

Kolejny etap analizy to porównanie uzyskanych pomiarów z modelem reologicznym Zenera. W pierwszej fazie weryfikacji przyjęto wartości maksymalne η z wykresów funkcji aproksymujących. Otrzymane wykresy wykazywały dużą rozbieżność wartości siły. W drugiej fazie przyjęto $\eta = 60$ cNs. Z uzyskanych krzywych procesu relaksacji sił wynika, że istnieje zbieżność wartości sił dla przyjętych założeń modelu Zenera w określonych, zmiennych przedziałach czasu.

L. Vangheluwe [38] przy pomocy poszerzonego nieliniowego modelu Maxwella (rys.3.3.2) opisał proces tkania uwzględniając zachowanie się przędzy osnowowej i tkaniny oraz przemieszczenie krawędzi tkaniny. Do wyznaczenia parametrów przyjętego modelu zastosowano wyniki badań obciążenia dynamicznego i relaksacji. Między wynikami eksperymentalnymi i wartościami wyliczonymi, zarówno w przypadku przędzy, jak i tkaniny uzyskano zadowalające zgodności. Model ten jednak nie dawał dobrych wyników opisu przemieszczenia krawędzi tkaniny, co może być wynikiem innego lepko-sprężystego zachowania się przędzy i tkaniny w strefie przejściowej.

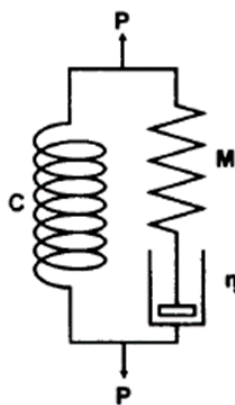


Rys. 3.3.2 Poszerzony nieliniowy model Maxwella

Źródło: [38]

Manich A. M., Ussman M. H., Barella A. przeanalizowali zastosowanie modeli reologicznych, które najdokładniej scharakteryzowałyby elastyczne właściwości przędzy polipropylenowej [39]. Do określenia wpływu barwienia włókien w masie na ich właściwości lepko-sprężyste wykorzystano model Vangheluwe'a i model Żurka oraz ich modyfikacje.

Model Vangheluwe'a składa się z elementu Maxwella o lepkości η i sprężyny Hooke'a o współczynniku sprężystości M połączonych równolegle z nieliniową sprężyną o współczynniku sprężystości C (rys. 3.3.3).



Rys. 3.3.3 Model Vangheluwe'a dla opisu krzywej rozciągania

Źródło: [39]

Oznaczając przez r stopień odkształcenia i przez P_0 naprężenie wstępne, zależność pomiędzy naprężeniem P i wydłużeniem ε można opisać równaniem:

$$P(\varepsilon) = P_0 + A \cdot (1 - \text{EXP}(-B \cdot \varepsilon)) + C \cdot \varepsilon^2 \quad (3.28)$$

Można zauważyć, iż $A = \eta \cdot r$ i $B = M/A$. W równaniu 3.28 występują trzy wielkości, które należy obliczyć A , B i C .

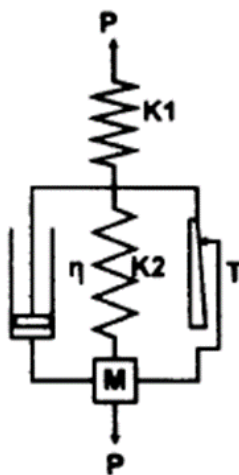
Ponieważ model Vangheluwe'a został opracowany głównie dla przędz, dlatego do opisanie właściwości włókien model zmodyfikowano poprzez wprowadzenie wykładnika potęgi w funkcji wykładniczej i sprężyny połączonej równolegle z elementem Maxwella

dla odwzorowania nieliniowego zachowania identyfikowanego (w równaniu) przez kwadrat wydłużenia. Zmodyfikowany model można opisać następującym równaniem:

$$P(\varepsilon) = P_0 + A \cdot (1 - \text{EXP}(-B \cdot \varepsilon^D)) + C \cdot \varepsilon^E \quad (3.29)$$

Zatem w tym równaniu występuje pięć wartości do obliczenia: A – która podobnie jak w modelu Vangheluwe’a równa się $r \cdot \eta$ elementu Maxwella, B – która jest odwrotnością czasu relaksacji T elementu Maxwella, podobnie jak w równaniu 3.28, podzieloną przez stopień odkształcenia r, z tym, że współczynnik sprężystości sprężyny brany jest jako funkcja ε^D , C – moduł sprężystości nieliniowej sprężyny połączonej równolegle z elementem Maxwella, będącej funkcją ε^E , D i E – wykładniki wcześniej zdefiniowane.

Model Żurka zawiera system inercyjno-tarciowy połączony w układzie równoległym składającym się ze sprężyny Hooke’a i tłumika Newtona. Całość połączona jest szeregowo z jeszcze jedną sprężyną Hooke’a (rys. 3.3.4).



Rys. 3.3.4 Model Żurka dla opisu krzywej rozciągania
Źródło: [39]

Równanie końcowe modelu przyjmuje postać:

$$P(\varepsilon) = A \cdot \varepsilon + B + ((C \cdot \varepsilon - B) \cdot \text{EXP}(-a \cdot \varepsilon)) \quad (3.30)$$

Pierwsza część równania $P(X) = A \cdot X + B$ reprezentuje liniową zależność wytrzymałości na rozciąganie w funkcji wydłużenia w obszarze płynięcia krzywej. Wartości A, B, C i a są związane z reologicznymi wartościami modelu.

Model Żurka został zmodyfikowany biorąc pod uwagę nieliniowe zachowanie sprężyny połączonej szeregowo z tłumikiem. Suwak Képès’a i sprężyna liniowa są proporcjonalne do ε^D , dlatego też równanie końcowe będzie postaci:

$$P(\varepsilon) = A \cdot \varepsilon + B + ((C \cdot \varepsilon - B) \cdot \text{EXP}(-a \cdot \varepsilon^D)) \quad (3.31)$$

i obejmuje pięć parametrów do wyznaczenia A, B, C, a i D. $P(\varepsilon)$ oznacza wytrzymałość na rozciąganie włókna przy różnych poziomach naprężenia.

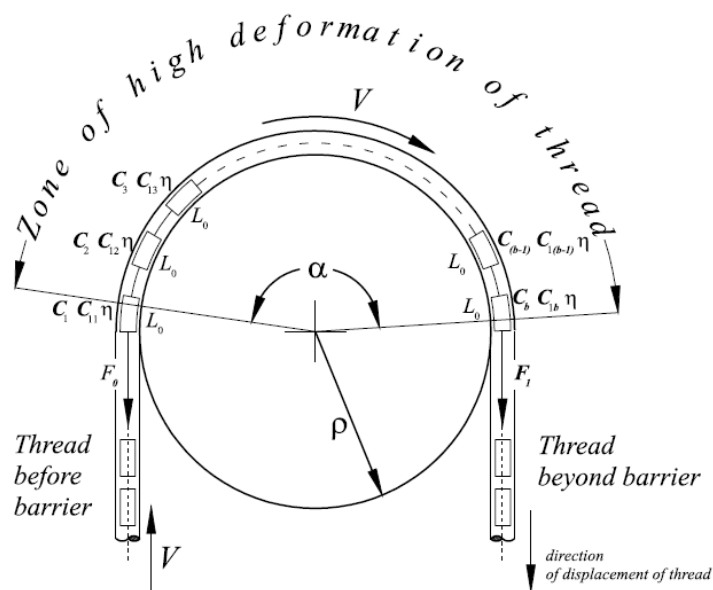
Najlepszym modelem do opisu kształtu krzywej rozciągania w przypadku włókien barwionych na czarno jest zmodyfikowany model Vangheluwe’a, natomiast model Żurka

najlepiej odzwierciedla charakterystyki rozciągania uzyskane dla włókien surowych i barwionych na niebiesko.

W artykule [40] przedstawiono wyniki badań dotyczące podatności modeli reologicznych nitek w odpowiedzi na zachodzące wymuszenia dynamicznego rozciągania w aspekcie technologii włókienniczych. Zadane parametry wejściowe wybranych czterech analizowanych modeli tj. modelu Kelvina – Voigta, modelu Maxwella, modelu Standardowego 2 i modelu Zenera odpowiadały rzeczywistym wielkościom współczynników lepkości, współczynników sprężystości kinematycznego i dynamicznego wymuszenia oraz prędkości rozciągania. Wytypowanym materiałem badań były trzy rodzaje nitek jedwabnych poliestrowych o masach liniowych 84, 110, 334 dtex. W programie badań nitki o długościach od 400 do 1300 mm rozciągano z prędkościami w zakresie $V = 0,65 \div 1,47$ m/s, co odpowiadało prędkościom dziania $n = 700 \div 1600$ rzędów/min. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały, iż dla przyjętych prędkości odkształceń $\dot{\epsilon}(t) = 0,53 \div 4$ 1/s wiarygodnie proces rozciągania opisują modele trójparametrowe Standardowy 2 oraz Zenera.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż poszczególne modele nitek odmiennie zachowują się w procesie rozciągania, i tak model Kelvina – Voigta jest wrażliwy zarówno na przyrosty modułu sprężystości kinematycznej jak i współczynnika lepkości, model Standardowy 2 wykazuje podatności jedynie dla sztywności dynamicznej, model Zenera jest istotnie podatny na sprężystość kinematyczną. Wszystkie odpowiedzi modeli rosną z prędkościami rozciągania. Otrzymane rezultaty wskazują na „tolerancję dokładności” zadawania parametrów wejściowych w identyfikacji dynamiki procesu dziania na osnowarkach. Dla opisu zjawisk fizycznych z wykorzystaniem modeli reologicznych pozytywną cechą jest mała wrażliwość tychże modeli. Niebezpieczeństwo tkwi w przypadku dużej wrażliwości, gdyż niewielkie zmiany parametrów wejściowych mogą wpłynąć na znaczne zmiany ocenianej cechy parametru wyjściowego.

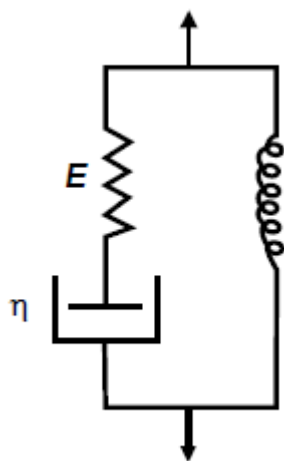
B. Włodarczyk i K. Kowalski [41] opisali wpływ niejednorodności przędzy na siły występujące podczas przeciągania nitek przez barierę cierną stosując 3-elementowy model Zenera. Obliczenia wykonano dla barier o promieniu krzywizny w zakresie 1,0 – 25,0 mm i prędkości przeciągania nici w zakresie 0,1 – 25,0 m/s. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż wartość współczynnika zmienności sił w nitkach wzrasta wraz ze wzrostem prędkości przeciągania nici przez barierę cierną i zmniejszaniem średnicy bariery, a optymalna wartość średnicy bariery ciernej, która zapewnia minimalną wartość sił działających na nić, wzrasta wraz ze wzrostem prędkości przeciągania nici.



Rys. 3.3.5 Model nici umieszczonej na barierze ciernej

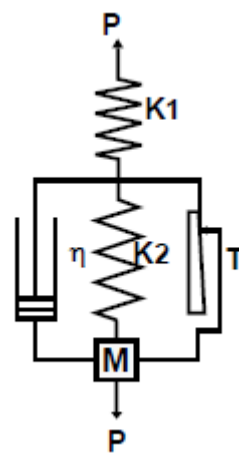
Źródło: [41]

F. Bouhjar, M. Sahnoun i M. Cheikhrouhou [42] przeprowadzili w środowisku programu Matlab analizę modeli reologicznych Vangheluwe'a, Żurka i Manicha pod kątem oceny ich przydatności do opisu zachowania przędz bawełnianych z dodatkiem elastanu poddanych testom rozciągania za pomocą dynamometru Lloyd LR5K. Parametrami wyjściowymi dla każdego modelu predykcyjnego były wytrzymałość i wydłużenie przy zerwaniu.



Rys. 3.3.6 Model Vangheluwe'a

Źródło: [42]



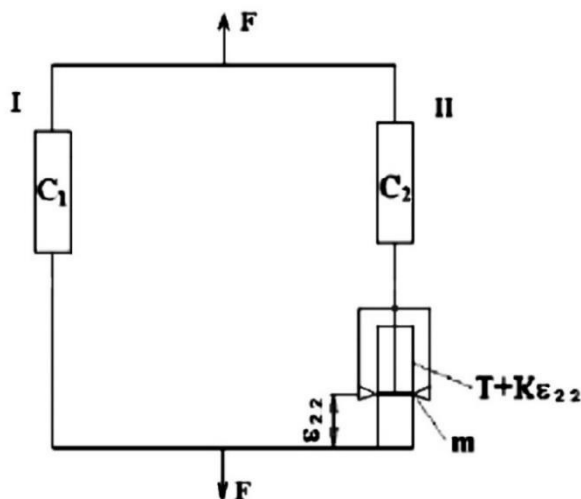
Rys. 3.3.7 Model Żurka

Źródło: [42]

Dzięki próbom rozciągania przeprowadzonym na niektórych przędzach rdzeniowych z dodatkiem elastanu, znaleziono dokładne współczynniki nieliniowych równań modeli reologicznych. Wszystkie trzy wybrane do analizy modele odwzorowują dokładnie zachowanie badanych przędz poddanych procesowi rozciągania. W wyniku przeprowadzonych prac autorzy opracowali narzędzie pozwalające na optymalizację składu i charakterystyk produkowanych przędz.

W. Żurek, M. Chrzanowski, W. Sybilska i I. Jałmużna [43] zastosowali zmodyfikowany model Żurka (rys. 3.3.8) w celu opisanego relaksacji monofilamentu polipropylenowego.

Weryfikacja proponowanego modelu została wykonana przy użyciu trzech rodzajów monofilamentów polipropylenowych o różnej średnicy 0,15; 0,30 i 0,45 mm. Fazy obciążania i relaksacji zostały uzyskane przy użyciu zrywarki Instron 4204. Każdy rodzaj monofilamentów poddano próbie rozciągania z prędkością 5, 50 i 500 mm/min do wydłużenia 15%. Następnie próbki poddano relaksacji przez 180 sekund.

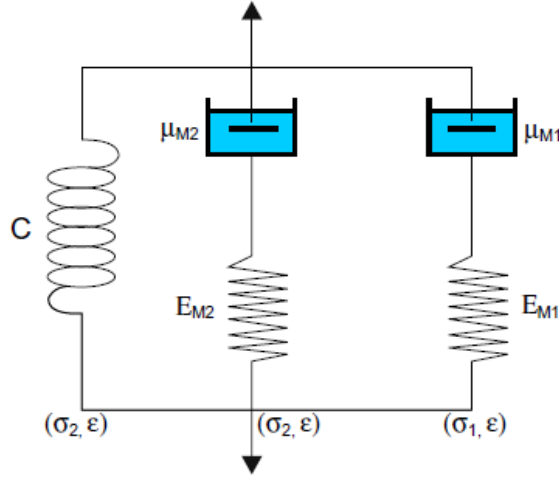


Rys. 3.3.8 Zmodyfikowany model Żurka
Źródło: [43]

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że proponowany model opisuje związki między naprężeniem i odkształceniem monofilamentów polipropylenowych poddanych próbie rozciągania oraz zjawisko relaksacji badanych surowców.

K. Kowalski, B. Włodarczyk i T. M. Kowalski [44] przedstawili wyjaśnienie stochastycznego charakteru dynamicznych obciążeń nitki w strefie dziania szydełkarki cylindrycznej w oparciu o model probabilistyczny procesu dziania, w którym nitkę opisano jako ciało o własnościach lepko-sprężystych. Zachowanie nici podczas dynamicznego rozciągania, relaksacji sił i pełzania opisali za pomocą trzelementowego modelu reologicznego Zenera. Wyniki symulacji numerycznych wykazały, że wzrost wartości współczynników zmienności parametrów reologicznych, takich jak względna sztywność rozciągająca C i C_1 , zgodnie ze standardowym modelem Zenera, tylko nieznacznie wpływa na średnie wartości sił w nitkach w strefie dziania. Zwiększeniu głębokości spychania igieł towarzyszy wzrost wartości współczynników zmienności sił maksymalnych w nitce.

H. Helali, A. Babay i S. Msahli [45] zbadali nieliniowe zachowanie rdzeniowych przędzy elastycznych w oparciu o rozwinięcie modelu Vangheluwe'a (rys. 3.3.9), który stanowi połączenie równoległe dwóch elementów Maxwella i źródła nieliniowego współczynnika C .



Rys. 3.3.9 Model Vangheluwe'a połączony z modelem Maxwella
Źródło: [45]

Zachowanie modelu opisuje rozwiązanie następujących równań:

$$\sigma_3 = C \varepsilon^2 \quad (3.32)$$

$$\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = \frac{1}{E_{M1}} \frac{d^2 \sigma_1}{dt^2} + \frac{1}{\mu_{M1}} \frac{d\sigma_1}{dt} \quad (3.33)$$

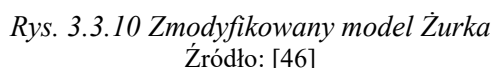
$$\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = \frac{1}{E_{M2}} \frac{d^2 \sigma_2}{dt^2} + \frac{1}{\mu_{M2}} \frac{d\sigma_2}{dt} \quad (3.34)$$

gdzie:

- σ – naprężenie w Pa,
- ε – wydłużenie w %,
- t – czas w s,
- E_{M1}, E_{M2} – moduły sprężystości,
- μ_{M1}, μ_{M2} – współczynniki tłumienia.

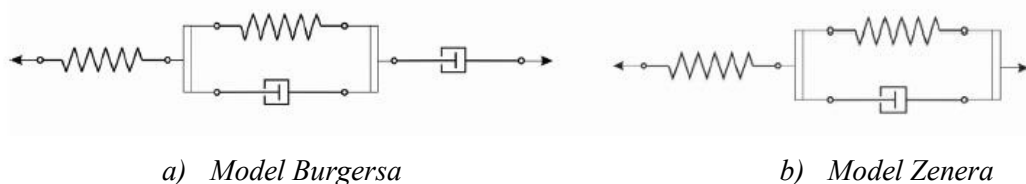
Stwierdzono, że wybrany model stanowi najlepszą odpowiedź na nieliniowe zachowanie lepko-sprężyste przebadanych przędz i zapewnia lepsze dopasowanie do danych uzyskanych podczas badań eksperymentalnych.

M. Chrzanowski w pracy doktorskiej opisał przebieg rozciągania niejednorodnych monofilamentów poliestrowych w oparciu o zmodyfikowany model Żurka uwzględniający nierównomierność ich masy liniowej [46].


$$\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t) = C_1 \cdot u \cdot t + T_2 + u \cdot \eta_2 \left(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_2}} \right) \quad (3.35)$$

σ – naprężenie rozciągające,
 C_1 – stała sprężyny,
 U – prędkość rozciągania,
 t – czas,
 T_2 – tarcie suwaka mechanicznego,
 η_2 – lepkość,
 τ – czas relaksacji.

W. Hufenbach, A. Langkamp, M. Gude, C. Ebert, A. Hornig, S. Nitschke, H. Böhm [47] wykonali dynamiczne próby wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i ścinanie próbek tkanych i dzianych polipropylenowych kompozytów termoplastycznych wzmocnionych włóknami szklanymi. Pomiary przeprowadzono w zakresie prędkości 10^{-5} do 10^3 1/s. Do odwzorowania charakterystyki odkształcenia badanych próbek zastosowano model reologiczny Burgersa (rys. 3.3.11a), natomiast modelem Zenera (rys. 3.3.11b) opisano kruchość włókien szklanych pod wpływem działających na nie naprężeń.

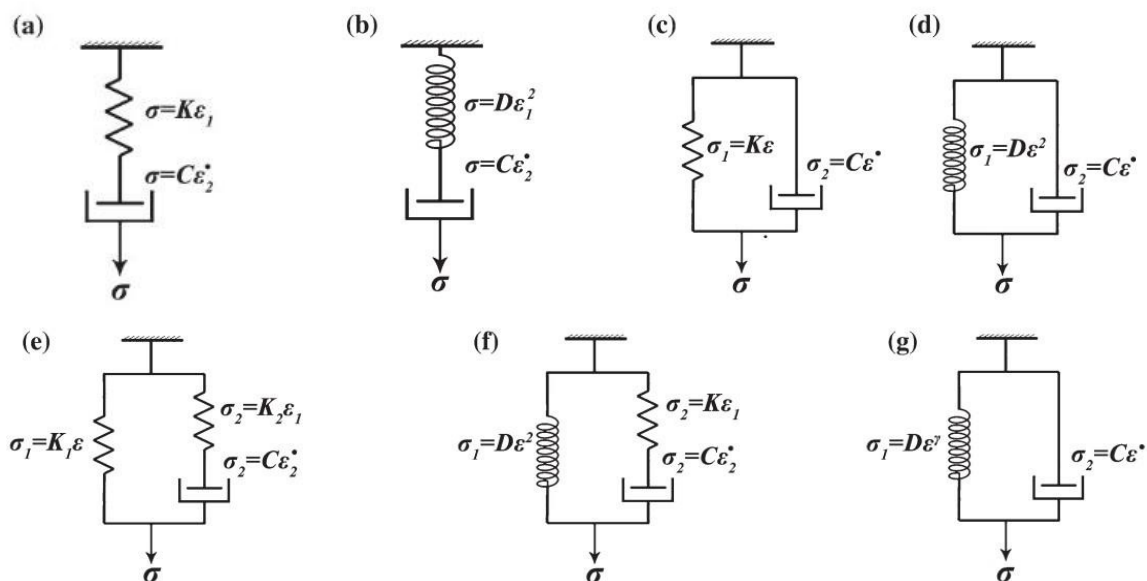


Rys. 3.3.11 Zastosowane modele reologiczne

Źródło: [47]

Dzięki przeprowadzonym badaniom opracowano skuteczną metodę identyfikacji parametrów niezbędnych do wykonania analizy numerycznej właściwości mechanicznych kompozytów. Pozwoliło to na ograniczenie czasochłonnych i kosztownych badań wybranych materiałów kompozytowych.

J. Yekrang i D. Semnani zbadali właściwości mechaniczne w kierunku wzdłużnym i poprzecznym dzianin rządowych o strukturze cylindrycznej znajdujących zastosowanie w inżynierii medycznej i tkankowej [48]. Pomiary prowadzono na maszynie wytrzymałościowej z prędkością 10 mm/min dla dwudziestu wariantów struktur w stanie mokrym celem odwzorowania warunków użytkowania. Do opisu właściwości mechanicznych dzianin rurowych podczas jednokierunkowego rozciągania wybrano siedem różnych modeli reologicznych (rys. 3.3.12).

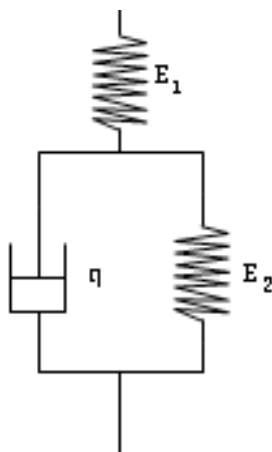


Rys. 3.3.12 Wybrane modele reologiczne: (a) model Maxwella, (b) model Maxwella z nieliniową sprężyną, (c) model Kelvina, (d) model Kelvina z nieliniową sprężyną, (e) model Zenera, (f) model Vangheluw'a, (g) model Kelvina z nieliniową sprężyną (zgodnie z regułą potęgi)

Źródło: [48]

Każdy z modeli opisano równaniem, na podstawie którego obliczono współczynniki reologiczne poszczególnych elementów. Wartości te posłużyły do przewidywania właściwości mechanicznych struktury dzianin. Na podstawie porównania wyników eksperymentalnych z teoretycznymi stwierdzono, że najlepsze dopasowanie wykazał model Kelvina z nieliniową sprężyną (rys. 3.3.12 g). Model ten można wykorzystać do opisu właściwości innych dzianin rządowych wytworzonych z określonych surowców.

W artykule [49] zbadano właściwości relaksacji naprężeń rozciągających przędzy mieszkankowych w układzie surowców poliester/wiskoza (50/50) i regenerowane włókna bambusowe/bawełna (30/70). Testy rozciągania-relaksacji przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron Tester 5582. Przędze o długości 500 mm rozciągano do określonego odkształcenia przy różnych prędkościach 5, 10, 20, 30 i 40 %/min oraz do różnych odkształceń 0,5, 1, 2, 3 i 4% przy tej samej wartości prędkości. W oparciu o zasadę superpozycji Boltzmanna proces relaksacji naprężeń rozciągających przędzy analizowano przy wykorzystaniu standardowego liniowego modelu trójparametrowego (rys. 3.3.13).



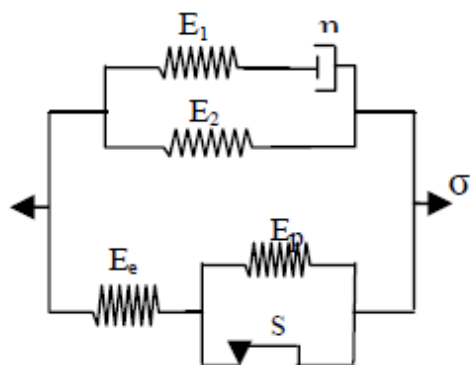
Rys. 3.3.13 Standardowy liniowy model trójparametrowy
Źródło: [49]

Wyniki modelowania wykazały bardzo dobrą zgodność z badaniami eksperymentalnymi, co potwierdza, że standardowy liniowy model trójparametrowy może być zastosowany do opisu właściwości relaksacji naprężeń przędzy poddanych małym odkształceniom. Z uzyskanych rezultatów badań stwierdzono również, że im większa prędkość rozciągania i większe odkształcenie maksymalne przędzy, tym krótszy czas relaksacji.

W artykułach [50, 51] przedstawiono nowy model zachowania przędzy naturalnej (bawełna), sztucznej z polimerów naturalnych (Tencel) i syntetycznej (poliester) podczas rozciągania na podstawie matematycznego opisu krzywej naprężenie-odkształcenie. Z uwagi na zmienny przebieg charakterystyki rozciągania podzielono na trzy części i każdą z nich opisano odpowiednim modelem reologicznym wybranym spośród stosowanych dotychczas we włókiennictwie tj. model Vangheluwe'a, model Żurka, modele Vangheluwe'a i Żurka zmodyfikowane przez Manicha oraz model Legranda. W pierwszym etapie w środowisku programu MATLAB wyznaczono parametry poszczególnych modeli i przeanalizowano ich wpływ na kształt krzywej rozciągania.

Porównanie uzyskanych krzywych modelowych z doświadczalnymi wykazało, iż zaproponowane podejście do problemu pozwoliło na prawidłowe, lecz nie idealne odwzorowanie procesu rozciągania w przypadku większości zastosowanych przędzy.

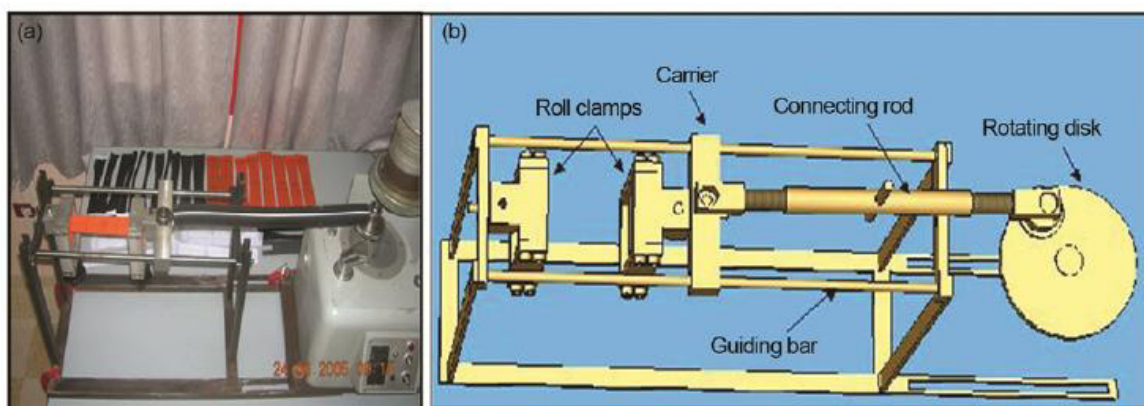
W artykule [52] autorzy przedstawili badania rozciągania i relaksacji przędzy bawełnianej przed i po procesie klejenia. Proces rozciągania przeprowadzono dla prędkości od 150 do 600 mm/min, natomiast dla relaksacji przyjęto zakres wydłużenia od 14 do 28 mm. Do opisu zjawisk zachodzących podczas procesu tkania zaproponowano dla przędzy nieklejonej model reologiczny Zenera (Poytinga), a dla przędzy poddanej klejeniu model lepko-sprężysto-plastyczny przedstawiony na rysunku 3.3.14.



Rys. 3.3.14 Model lepko-sprężysto-plastyczny
Źródło: [52]

Porównanie wyników teoretycznych z eksperymentalnymi potwierdziło możliwość wykorzystania przyjętego modelu do określania właściwości mechanicznych przędzy bawełnianej.

W publikacji [53] przedstawiono badania zmęczeniowe dzianiny lewoprawej bawełnianej symulujące warunki występujące podczas procesu produkcji i użytkowania odzieży dzianej. Badania odkształceń struktury pod wpływem cyklicznego obciążenia przeprowadzono z wykorzystaniem skonstruowanego urządzenia (rys. 3.3.15), pozwalającego na przesuw zacisku ruchomego w zakresie od 40 do 80 mm w kierunku wzdłużnym, dla różnej liczby cykli. Po przeprowadzeniu pomiaru próbki poddawano procesowi relaksacji mierząc okresowo ich długość w czasie 500 godzin.

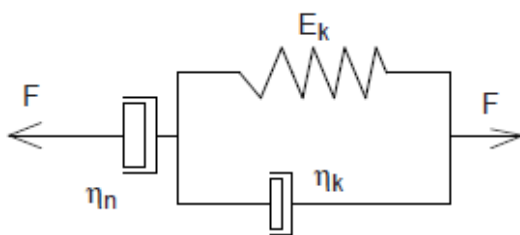


Rys. 3.3.15 Urządzenie do przeprowadzania testów zmęczeniowych: (a) fotografia, (b) schemat
Źródło: [53]

W niniejszej pracy skupiono się na określeniu zdolności powrotu do wymiarów początkowych dzianiny o splocie lewoprawym poddanej rozciąganiu. Autorzy uznali, iż modelem najlepiej odwzorowującym właściwości lepko-sprężyste badanych próbek jest model Burgersa. Na podstawie parametrów modelu wyznaczonych w oparciu o przeprowadzone badania eksperymentalne można obliczyć wartości odkształcenia opóźnionego, sprężystego i trwałego struktur tekstylnych powstałych na skutek procesu rozciągania.

W przemyśle papierniczym tkaniny SSB (Sheet Support Binder) odgrywają bardzo ważną rolę w kształtowaniu arkusza papieru [54]. Projektowanie i wytwarzanie tego rodzaju tkanin wymaga uwzględnienia ich funkcji technologicznych (zdolności do zatrzymywania włókien, zorientowany transport, osadzanie włókien na powierzchni tkaniny i przepuszczalność wody)

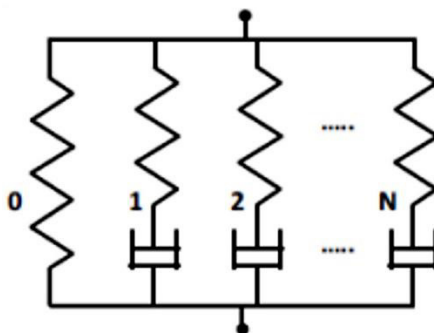
oraz właściwości mechanicznych takich jak odporność na ścieranie, płamoodporność, czy stabilność tkaniny. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania dopuszczalnego obciążenia tkaniny w miejscach łączenia. Badania wytrzymałościowe na rozciąganie wzdłuż wątku próbek o szerokości 40 mm przeprowadzono na zrywarce firmy Zwick. Odległość między zaciskami wynosiła 200 mm, a prędkość pomiaru 80 mm/min. Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych przeprowadzono symulację zachowania się tkanin SSB w obszarze łączenia podczas eksploatacji. Do opisu zjawisk zachodzących na skutek działania siły rozciągającej przyjęto model reologiczny ciała Leseriča (rys. 3.3.16), który stanowi szeregowe połączenie modelu Newtona i modelu Kelvina. Analiza wyników pozwoliła autorom stwierdzić, że wybrany model poprawnie opisuje zachowanie materiału aż do granicy pełzania tkaniny.



Rys. 3.3.16 Model reologiczny ciała Leseriča
Źródło: [54]

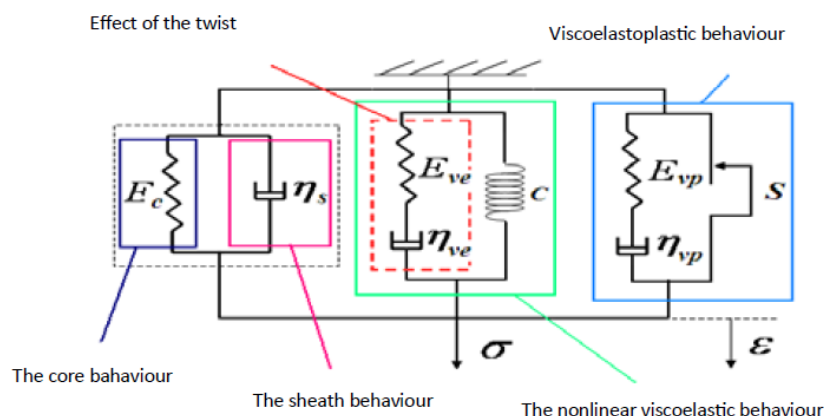
W artykule [55] przedstawiono badania oceny właściwości materiałowych polimerów termoplastycznych (PLLA) stosowanych do wykonywania stentów.

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na zrywarce firmy Zwick z prędkością rozciągania 2 i 5 mm/min. Do odwzorowania zachowania lepko-sprężystego zastosowanego materiału wybrano model reologiczny PRF (rys. 3.3.17), który zaimplementowano do program ABAQUS. Symulacja z wykorzystaniem metody elementów skończonych pozwoliła na zidentyfikowanie i zoptymalizowanie parametrów polimerów termoplastycznych poddawanych dużym odkształceniom.



Rysunek 3.3.17 Nieliniowy model reologiczny PRF
Źródło: [55]

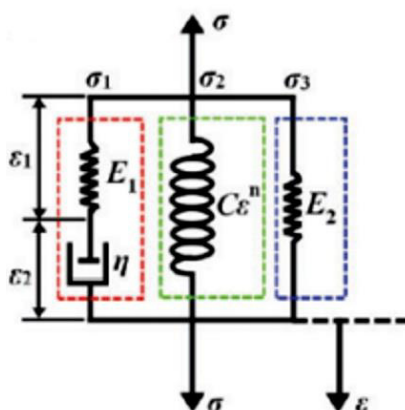
W artykule [56] modelowano zachowanie przędzy rdzeniowych Dorlastan[®] o różnej masie liniowej. Badania eksperymentalne polegały na przeprowadzeniu prób rozciągania i odprężania nitek z prędkością 150, 300 i 500 mm/min do wartości odkształceń 10%, 30%, 50%, 60% i 90% wydłużenia zrywającego. W oparciu o uzyskane wyniki wyznaczono parametry zaproponowanego modelu (rys. 3.3.18) uwzględniającego lepko-sprężysty charakter elastycznych przędzy rdzeniowych. Porównanie danych eksperymentalnych i teoretycznych wykazało dobre dopasowanie modelu przy uzyskanym współczynniku determinacji $R^2 = 0,99$.



Rys. 3.3.18 Model reologiczny zaproponowany do opisu mechanicznego zachowania elastycznej przędzy rdzeniowej

Źródło: [56]

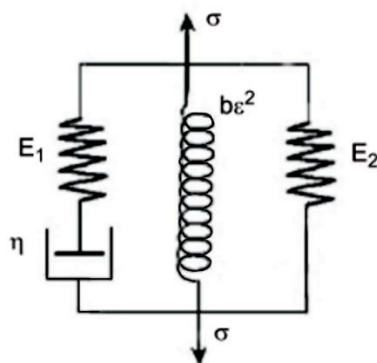
W publikacji [57] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i analitycznych przędzy kompozytowej t-ECCY. Próbki o długości 500 mm poddano procesowi rozciągania z prędkością 100 mm/min przy różnych wartościach odkształcenia (0,1, 1 i 2/mim). Do odwzorowania właściwości elastycznych przędzy kompozytowej autorzy wybrali model Vangheluwe'a połączony szeregowo z modelem Hooke'a (rys. 3.3.19). Obliczony współczynnik korelacji porównujący dane eksperymentalne z teoretycznymi wyniósł $R = 0,999$, co świadczy o dobrym dopasowaniu zaproponowanego modelu.



Rys. 3.3.19 Model reologiczny zaproponowany do opisu zachowania się przędzy kompozytowej poddanej rozciąganiu

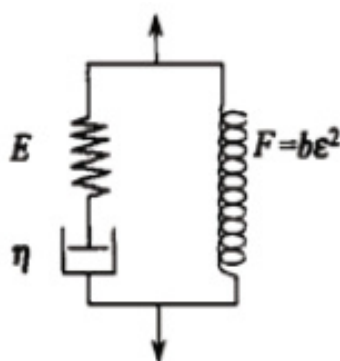
Źródło: [57]

W artykule [58] przedstawiono badania właściwości rdzeniowych przędz poliuretanowych. Próbki o długości 500 mm poddano rozciąganiu z prędkością 500 mm/min na maszynie wytrzymałościowej USTER TENSORPID III. Do przeanalizowania właściwości przebadanych przędz zaproponowano nieliniowy model składający się z modelu Maxwella połączonego szeregowo z nieliniową i liniową sprężyną (rys. 3.3.20). Na podstawie obliczeń teoretycznych i wyników eksperymentalnych stwierdzono, iż możliwe jest wykorzystanie wybranego modelu do scharakteryzowania zachowania się rdzeniowych przędz poliuretanowych podczas procesu rozciągania. Zależność między naprężeniem a odkształceniem krzywych modelowych można przedstawić za pomocą funkcji wielomianowej. Im większy stopień wielomianu tym lepsze dopasowanie charakterystyki rzeczywistej z teoretyczną.



Rys. 3.3.20 Nieliniowy model lepko-sprężysty
Źródło: [58]

W publikacji [59] opisano badania rozciągania regenerowanej przędzy bambusowej o masie liniowej 14,58 tex na maszynie wytrzymałościowej HD021N. Przędze o długości 500 mm rozciągano z prędkościami 100, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 i 5000 mm/min. Analiza uzyskanych wyników wykazała, iż wytrzymałość przędzy na zrywanie wzrasta, gdy prędkość rozciągania zmienia się od 100 mm/min do 3000 mm/min, następnie wytrzymałość maleje wraz ze wzrostem prędkości rozciągania. Do symulacji właściwości rozciągających przędzy wykorzystano nieliniowy, trzelementowy model lepko-sprężysty (rys. 3.3.21). Błąd względny wartości wytrzymałości uzyskanych z badań teoretycznych i rzeczywistych wynosi mniej niż 3%, co potwierdza możliwość zastosowania wybranego modelu do odwzorowania właściwości wytrzymałościowych przędzy bambusowej.

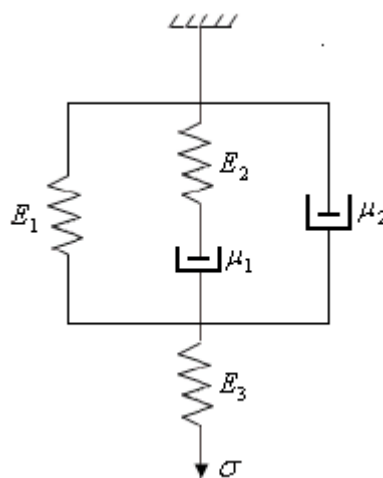


Rys. 3.3.21 Trzelementowy nieliniowy model lepko-sprężysty
Źródło: [59]

W artykule [60] przedstawiono teoretyczny opis właściwości dynamicznych tekstyliów oraz ich badania eksperymentalne wykonane na zbudowanym urządzeniu VibTex, które w przeciwieństwie do urządzeń standardowych umożliwia badanie tekstyliów w szerokim zakresie długości rozciągania. Opracowane oprogramowanie VibTexSoft pozwala na rejestrację m.in. maksymalnego wydłużenia, minimalnej i maksymalnej siły, dynamicznego modułu sztywności oraz modułu sprężystości. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych autorzy wykorzystują do weryfikacji modeli reologicznych dla określonych materiałów tekstylnych. Dążą oni do opracowania metodologii tworzenia charakterystyk właściwości odkształcalnych tekstyliów, projektowania odpowiednich modeli reologicznych i wyznaczania ich parametrów wejściowych w oparciu o badania eksperymentalne.

W publikacji [61] przedstawiono badania relaksacji naprężeń przędzy VORTEX o masach liniowych 8,2 tex i 32,4 tex wytworzonych na przędzarce Murata z włókien bambusowych

i bawełnianych w proporcji 70/30%. Omówiono czynniki wpływające na właściwości relaksacji naprężeń przędzy VORTEX, takie jak odkształcenie przy rozciąganiu, prędkość rozciągania i grubość przędzy. W celu określenia wpływu grubości przędzy na właściwości relaksacyjne nitki poddano procesowi rozciągania do 4% wydłużenia z prędkością 200 mm/min. Dla oceny wpływu naprężenia rozciągającego i prędkości rozciągania przeprowadzono testy relaksacji naprężeń trwające 300 s przy wydłużeniu rozciągającym w pierwszym przypadku od 3 do 5%, a w drugim do 4%. Ponadto do zbadania wpływu prędkości rozciągania na właściwości relaksacyjne pomiary wykonano dla trzech prędkości rozciągania przędzy 50, 200 i 350 mm/min. W celu przewidywania i analizowania właściwości relaksacji naprężeń przędzy VORTEX autor zastosował zmodyfikowany uogólniony model Maxwella (rys. 3.3.22). Otrzymane wyniki badań pokazały, że zastosowany model reologiczny może być wykorzystany do opisu mechanizmu relaksacji naprężeń przebadanych przędz.



Rys.3.3.22 Zmodyfikowany uogólniony model Maxwella; E_1 , E_2 i E_3 – współczynniki sprężystości, μ_1 i μ_2 – współczynniki lepkości

Źródło: [61]

Podsumowanie:

1. Opis reologiczny służy identyfikacji właściwości materiału w procesach statycznego i dynamicznego rozciągania oraz analizie, projektowaniu i modelowaniu procesów technologicznych włókienniczych: przędzenia, tkania i dziania.
2. Przeprowadzone studium literaturowe pokazuje dużą różnorodność badanych materiałów tekstylnych (włókna, przędze, nitki, tekstylia płaskie) oraz modeli reologicznych opisujących zachowanie się tekstyliów w procesie wymuszeń rozciągających. Stosowane są modele kilku parametrowe 2 – 3 członowe (Kelvina – Voigta, Zenera, Standardowy) oraz modele złożone wieloparametrowe (całkowe).
3. Autorzy nie uzasadniają wyboru konfiguracji fizycznej złożonych modeli reologicznych.
4. Wszyscy autorzy materiały tekstylne traktują jako ciało lepko – sprężyste z uwzględnieniem w niektórych przypadkach procesu opóźnionego tarcia wraz z opisem nieliniowych parametrów sztywności E i lepkości η .
5. W większości modele odnoszone są do statycznych procesów rozciągania tekstyliów.

3.4 Modelowanie numeryczne

Symulacja komputerowa jest jedną z metod badawczych powszechnie stosowaną do opisu zjawisk występujących w różnych dziedzinach nauki oraz analizy procesów inżynierskich [62]. Metody numeryczne szczególnie przydatne są wtedy, gdy badany problem jest bardzo złożony i pracochłonny lub nie posiada rozwiązania analitycznego.

Symulacja komputerowa pozwala na odwzorowanie rzeczywistego procesu np. produkcyjnego za pomocą modelu oraz prowadzeniu na nim badań i eksperymentów celem uzyskania danych ilościowych i jakościowych pozwalających przewidzieć zachowanie obiektu rzeczywistego [63]. Zaletą symulacji komputerowych jest między innymi ograniczenie błędów pomiarowych wynikających z czynników zewnętrznych, uzyskanie powtarzalności prowadzonych badań, możliwość wykonania nieograniczonej liczby eksperymentów czy też zmniejszenie liczby pomiarów z wykorzystaniem aparatury badawczej, co wpływa na zredukowanie kosztów badań. Budowa modelu opisującego w sposób prawidłowy przebieg procesu rzeczywistego wymaga dobrej znajomości zarówno wykorzystywanego programu jak i samego procesu modelowania.

W obecnych czasach nauka i przemysł mają możliwość korzystania z szerokiego rodzaju narzędzi służących do modelowania numerycznego. Do najbardziej znanych programów należą między innymi takie jak ANSYS, Autodesk Inventor, ABAQUS, ADINA, LS-Dyna, ProEngineer, CATIA czy Patran/Nastran.

W publikacji [64] przedstawiono możliwości modelowania zachowania się ciał stałych z wykorzystaniem środowiska programu ANSYS. Ciała stałe w zależności od czasu działania naprężenia mogą wykazywać cechy sprężyste, lepkie lub lepkosprężyste. Odształcenia lepkosprężyste charakteryzują się występowaniem zjawiska relaksacji naprężeń wewnętrznych oraz pełzania lub płynięcia mechanicznego, które możemy modelować w systemie ANSYS za pomocą modeli fenomenologicznych. W przypadku małych prędkości deformacji wykorzystuje się modele materiałów o nazwie „creep”, natomiast przy dużych prędkościach deformacji stosowane są modele „visoplastic”. Do obliczeń obu typów materiałów wykorzystuje się niejawne schematy całkowania.

Model Nortona to najprostszy model typu „creep”:

$$\frac{d\varepsilon_{cr}}{dt} = c_1 \sigma^{c_2} e^{\frac{-c_3}{T}} \quad (3.36)$$

gdzie:

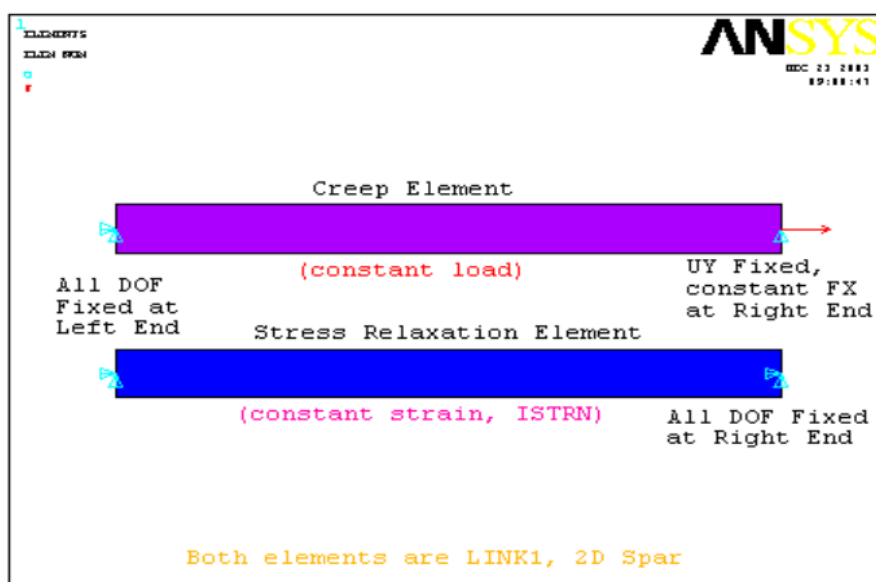
- ε_{cr} – zredukowane odształcenia pełzania,
- c_1, c_2, c_3 – stałe materiałowe,
- σ – naprężenia zredukowane,
- T – temperatura,
- v_2 – prędkość przy rozciąganiu dynamicznym.

Model ten opisuje okres pełzania podczas, gdy prędkość odształceń pełzania nie ulega zmianie oraz okres przyspieszonego pełzania, w wyniku którego dochodzi zazwyczaj do zniszczenia konstrukcji.

Do modelowania zjawisk sprężystych i lepkich, które występują jednocześnie w ciałach stałych wykorzystuje się w programie ANSYS materiały definiowane pojęciem „viscoelastic”. Modele te stanowią kombinację sprężyn o module Younga E , MPa oraz tłumików wiskotycznych o współczynniku lepkości η . Przykładem tego typu modelu jest model

standardowy stanowiący równoległe połączenie ciała Hooke'a i Maxwella (szeregowe połączenie sprężyny i tłumika). W systemie ANSYS opisywany jest on za pomocą „szeregu Prony”, gdzie w miejsce wartości bezwzględnych modułów sprężystości i lepkości wprowadza się parametry zastępcze: E_0 , MPa – natychmiastowy moduł Younga, α_1 – bezwymiarowy parametr określający sprężystość członu lepko-sprężystego oraz t_1 i h – stałą czasową.

W publikacji [65] autorzy opisali procedurę modelowania zjawiska pełzania najczęściej stosowanych w przemyśle żywic polipropylenowych z wykorzystaniem środowiska programu ANSYS. W pierwszym etapie autorzy przeprowadzili badania eksperymentalne dla różnych wartości naprężeń rozciągających w zakresie od 1,38 do 13,8 MPa. Uzyskane wyniki posłużyły do obliczenia parametrów stosowanych w wybranym modelu MES programu (rys. 3.4.1), którego dolny element reprezentuje model relaksacji naprężeń (ma stałe ograniczenia przemieszczenia na obu końcach i odkształcenie początkowe), natomiast górny stanowi model pełzania (posiada stałe, przykładane obciążenie osiowe i może swobodnie rozciągać się w kierunku poziomym). W kolejnym etapie dokonano weryfikacji założonego matematycznego modelu pełzania oraz określonych właściwości materiału. Porównanie wyników otrzymanych w programie ANSYS z danymi eksperymentalnymi wykazały dobrą korelację, a największa wartość błędu wynosiła 11,1 %.

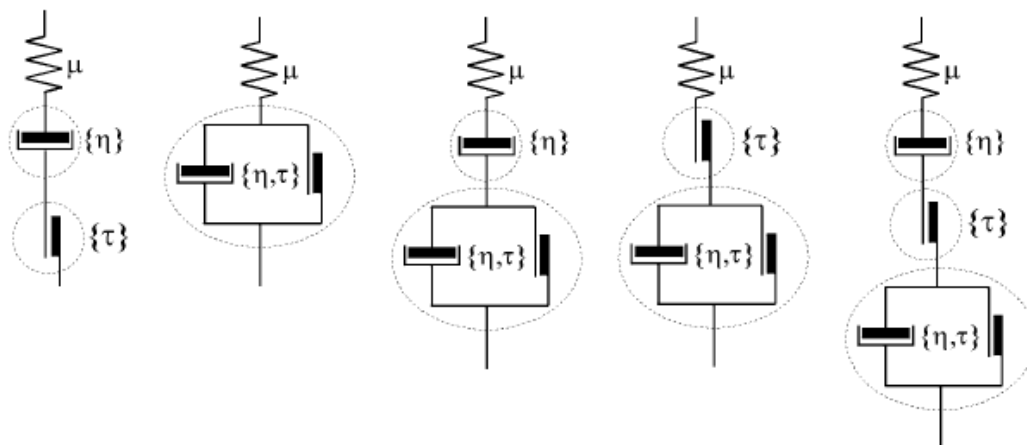


Rys. 3.4.1 Modele programu ANSYS do symulacji zjawiska relaksacji naprężeń i pełzania
Źródło: [65]

W artykule [66] przedstawiono możliwość modelowania liniowego zachowania lepko-sprężystego polimeru szklanego przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics®. Do opisu relaksacji naprężeń i zjawiska pełzania polimeru wykorzystano modele reologiczne Maxwella i Kelvina – Voigta. Otrzymane wyniki porównano z danymi uzyskanymi z podobnych analiz przeprowadzonych przy użyciu pakietu oprogramowania ABAQUS®. Osiągnięto bardzo dobrą zgodność pomiędzy wynikami obu analiz, co potwierdza możliwość zastosowania modelowania PDE w programie COMSOL Multiphysics® dla materiałów lepko-sprężystych.

W publikacji [67] omówiono zalety i trudności zastosowania modelowania metodą elementów skończonych z wykorzystaniem różnych modeli reologicznych do opisu odkształceń lepko-plastycznych w metalach, betonie i tworzywach sztucznych. Analizę wykonano w oparciu o trzy podstawowe modele reologiczne tj. sprężynę Hooke'a, tłumik

Newtona oraz suwak Saint-Venanta, połączone równolegle i szeregowo (rys. 3.4.2). Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano system operacyjny PANTOCRATOR. Autorzy wykazali możliwość aplikacji uniwersalnego oprogramowania do numerycznej analizy strukturalnej, które zastosowano do opisu szerokiego zakresu procesu odkształcenia w oparciu o modele reologiczne. Wyniki analizy strukturalnej można poprawić poprzez modyfikację modelu materiałowego na podstawie otrzymanego rozwiązania numerycznego i porównań z danymi eksperymentalnymi. Model materiałowy można zmieniać zarówno poprzez korekty współczynników modelu w celu uzyskania dokładniejszej predykcji, jak i globalną zmianę struktury modelu reologicznego mającą na celu opis efektów addytywnych.



Rys. 3.4.2 Modele reologiczne sprężysto-lepko-plastyczne

Zródło: [67]

H. Barhoumi, S. Marzougui i S. B. Abdessalem [68] do opisu zmian odkształcenia dzianin elastycznych wykonanych splotem lewoprawym podstawowym i lewoprawym nabraniowym wykorzystali model Maxwella, Zenera i Kelvina-Voigta. Próbkę dzianiny o wymiarach $50 \times 200 \text{ mm}^2$ poddano działaniu siły rozciągającej ze stałą prędkością wynoszącą 100 mm/min . Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono parametry modeli reologicznych tj. sztywność i współczynnik lepkości. Symulację numeryczną wykonano w środowisku programu Origin Pro8. „Stopień dopasowania” wybranych do analizy modeli zweryfikowano poprzez obliczenie pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE) pomiędzy danymi teoretycznymi i eksperymentalnymi. Uzyskane rezultaty badań pokazały, iż model Zenera najlepiej odwzorowuje charakter zmian odkształcenia dzianin elastycznych poddanych jednoosiowemu rozciąganiu.

W artykule [69] autorzy opracowali model matematyczny oraz jego rozwiązanie numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych (FE) do opisu lepko-sprężystych zachowań ciał stałych poddanych obciążeniom statycznym i dynamicznym. Poprawność działania modelu sprawdzono zarówno na podstawie danych eksperymentalnych, jak i symulacji numerycznych dla różnych materiałów, w tym asfaltu, polimeru, jedwabiu pajęczego, agaru i kości. Aby zweryfikować dokładność opracowanego algorytmu FE, porównano otrzymane wyniki symulacji z wynikami uzyskanymi w programie ANSYS. Stwierdzono, iż zaproponowany model poprawia dokładność dopasowania i prognozowania danych eksperymentalnych przy użyciu modeli z mniejszą liczbą parametrów wejściowych, a wyniki obliczeń numerycznych uzyskiwane są w krótszym czasie. Model jest w stanie symulować zjawisko pełzania, deformacji oraz rozpraszania energii, dlatego też może służyć

jako alternatywne narzędzie do przeprowadzania symulacji lepko-sprężystych zachowań ciał stałych w skali eksperymentalnej i numerycznej.

Systemy komputerowe wykorzystywane do przeprowadzania symulacji w środowisku MES stosowane są powszechnie do obliczeń inżynierskich związanych między innymi z rozwiązywaniem problemów dotyczących mechaniki ciała odkształcalnego, dynamiki czy też wytrzymałości materiałów. Programy te wykorzystują również badacze do analizy zachowania się materiałów tekstylnych poddawanych obciążeniom występującym w procesach technologicznych jak i podczas ich eksploatacji. Dostępne na rynku pakiety służące do analizy numerycznej działają na zasadzie „czarnej skrzynki”, które to określenie według sztucznej inteligencji nie podaje sposobu rozwiązania postawionego przed nią problemu, a jedynie w oparciu o zadeklarowane dane wejściowe generuje wynik końcowy. Ciągły rozwój techniki komputerowej powodujący wzrost „mocy obliczeniowej” umożliwia rozwiązywanie coraz bardziej złożonych problemów w tym o charakterze nieliniowym.

4. MATERIAŁ I PROGRAM BADAŃ

4.1 Materiał badań

Materiał badań stanowią przędze poliestrowe i poliamidowe, które są najbardziej rozpowszechnionym surowcem stosowanym w technologiach włókienniczych w tym również w technologiach dziewiarskich.

Przędze poliestrowe i poliamidowe należące do grupy przędz syntetycznych wykorzystywane są do wytwarzania zarówno dzianych wyrobów odzieżowych i dekoracyjnych jak i dzianin technicznych stosowanych w medycynie, budownictwie (geodziańskie), do preform kompozytowych, w rolnictwie czy też w przemyśle obuwniczym i samochodowym.

Przędze z włókna poliestrowego charakteryzują się wysoką wytrzymałością, są odporne na rozciąganie oraz kurczenie się. Wykazują cechy termoplastyczności i hydrofobowości.

Przędze poliamidowe nie wywołują alergii stąd ich powszechne zastosowanie do produkcji biomateriałów. Cechuje je odporność na ścieranie i tarcie oraz wytrzymałość na zerwanie. Przędze te w porównaniu z przędzami poliestrowymi pochłaniają wilgoć.

Do badań wybrano przędze wielofilamentowe o średnich masach liniowych: przędze poliamidowe PA6 o masie liniowej 56 i 156 dtex oraz przędze poliestrowe PES o masie liniowej 55, 111 i 167 dtex. Przerabiane są one na maszynach osnowowych, szydełkarkach cylindrycznych i szydełkarkach płaskich o średnich i wysokich numerach uiglenia. Okres leżakowania zastosowanych surowców nie przekroczył 8 miesięcy od daty produkcji.

W celu scharakteryzowania przyjętych do badań przędz wyznaczono:

1. Rzeczywistą masę liniową przędzy wg PN-EN ISO 2060 [70].

TABELA 4.1.1 Parametry badanych przędz.

Rodzaj przędzy	Nominalna masa liniowa, dtex	Liczba filamentów, f	Rzeczywista masa liniowa, dtex
Poliamid	56,00	17	56,48
Poliamid	156,00	34	153,02
Poliester	55,56	24	55,61
Poliester	111,11	36	111,74
Poliester	166,67	48	167,02

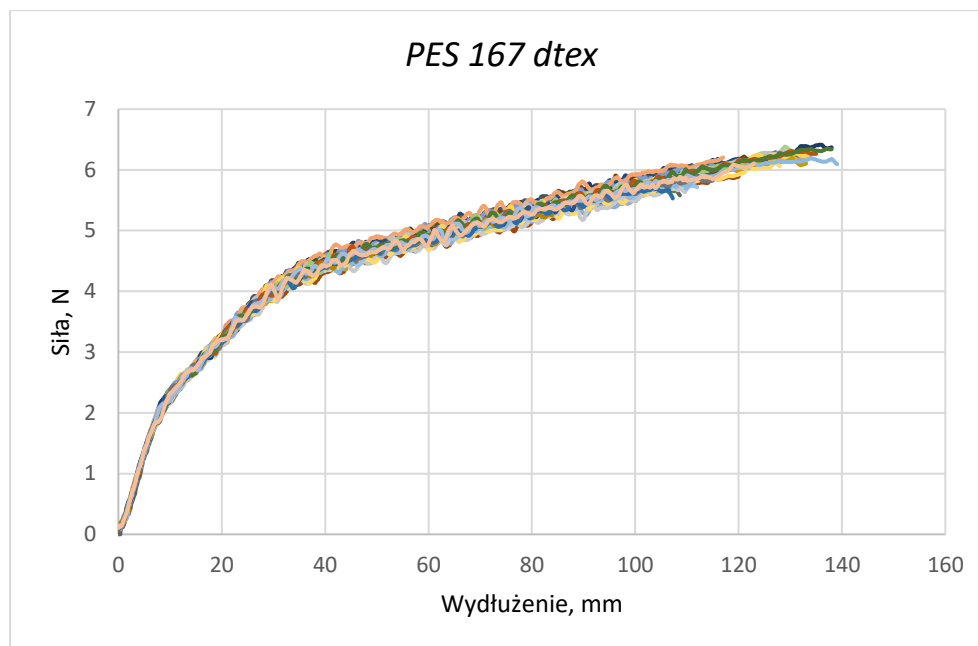
2. Siłę zrywającą i wydłużenie przy zerwaniu oraz wytrzymałość właściwą przędzy wg PN-EN SO 2062 [71].

Przędze poddano procesowi rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Hounsfield model H50K-S. Dla każdej z przędz wykonano po 50 pomiarów.

Parametry procesu rozciągania:

- prędkość rozciągania 500 mm/min,
- długość początkowa próbki $L_0 = 500$ mm,
- głowica 50 N.

W wyniku procesu rozciągania otrzymano charakterystyki siły w funkcji wydłużenia. Przykładowy wykres dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 167 dtex przedstawiono na rysunku 4.1.1. Pozostałe wykresy zamieszczono w Załączniku 1.



Rys. 4.1.1 Charakterystyki wytrzymałościowe przędzy PES 167 dtex. Wykres zbiorczy wykonany dla 50 przeprowadzonych pomiarów rozciągania

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i otrzymanych charakterystyk rozciągania wyznaczono średnie wartości siły zrywającej i wydłużenia przy zerwaniu, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności oraz wytrzymałość właściwą. Wartości obliczonych parametrów dla poszczególnych przędz zestawiono w tabelach 4.1.2, 4.1.3 i 4.1.4.

TABELA 4.1.2 Średnie wartości siły przy zerwaniu rozciąganych przędz.

Rodzaj przędzy	Rzeczywista masa liniowa, tex	Średnia siła zrywająca P, cN	Odchylenie standardowe średniej siły zrywającej S, cN	Współczynnik zmienności średniej siły zrywającej V, %
Poliamid	5,65	242,75	10,78	4,4
Poliamid	15,30	678,44	30,34	4,5
Poliester	5,56	209,51	7,60	3,6
Poliester	11,17	424,13	19,99	4,7
Poliester	16,70	596,10	25,15	4,2

TABELA 4.1.3 Średnie wartości wydłużenia przy zerwaniu rozciąganych przędz.

Rodzaj przędzy	Rzeczywista masa liniowa, tex	Średnie wydłużenie przy zerwaniu ϵ , %	Odchylenie standardowe średniego wydłużenia przy zerwaniu S, cN	Współczynnik zmienności średniego wydłużenia przy zerwaniu V, %
Poliamid	5,65	45,16	2,77	6,0
Poliamid	15,30	39,85	2,64	7,0
Poliester	5,56	22,95	2,38	10,0
Poliester	11,17	23,34	3,08	13,0
Poliester	16,70	22,66	2,97	13,0

TABELA 4.1.4 Średnie wartości wytrzymałości właściwej przy zerwaniu rozciąganych przędz.

Rodzaj przędzy	Rzeczywista masa liniowa, tex	Wytrzymałość właściwa W, cN/tex
Poliamid	5,65	43,00
Poliamid	15,30	44,30
Poliester	5,56	37,68
Poliester	11,17	37,96
Poliester	16,70	35,69

4.2 Program badań

Podział dzianin na rządkowe i kolumnkowe wymaga zastosowania różnego typu maszyn. Te pierwsze wytwarzane są na automatach pończosznich, szydełkarkach płaskich i szydełkarkach cylindrycznych, drugie na osnowarkach. Nowoczesne maszyny dziewiarskie umożliwiają uzyskanie prędkości wytwarzania dzianin w zakresie od 1,2 m/s w przypadku szydełkarek płaskich, natomiast do 4 m/s na maszynach osnowowych. Taśmy dziane w zależności od rodzaju zastosowanej przędzy oraz splotu produkowane są z prędkością od 1,5 do 7,5 m/s.

W procesach przygotowawczych przędze nawijane są na nawoje lub snute na wałki osnowowe z prędkościami od 3,5 do 20 m/s. W procesach konfekcjonowania dzianin prędkość nitki podczas tworzenia ściegu dochodzi do 4 m/s.

Dynamiczne obciążenia nitek występują nie tylko podczas przewijania, snucia, dziania czy szycia, ale również w procesach eksploatacyjnych wyrobów tekstylnych głównie o przeznaczeniu technicznym. Siatki barierowe, które znajdują zastosowanie przy zabezpieczeniu dróg i autostrad przed osuwaniem się odłamków skalnych lub podczas zetknięcia z rozpędzonym pojazdem narażone są na kontakt z przedmiotami poruszającymi się z prędkością od 28 do 140 m/s. Do niniejszej grupy zaliczyć można również siatki sportowe do siatkówki, tenisa, bramek piłki nożnej oraz zapewniające ochronę kibicom na trybunach. Prędkość piłki podczas serwisu w siatkówce dochodzi do 38 m/s [72], natomiast w tenisie ziemnym i w trakcie strzału na bramkę w piłce nożnej osiąga wartość 58 m/s [73, 74].

Powstanie i rozwój nowoczesnych włókienniczych materiałów technicznych wiąże się nierozdzielnie z rozwojem technologii wytwarzania włókien i przędz stosowanych do ich wytworzenia. Przykładem wyrobów wykonanych z zastosowaniem tego typu surowców mogą być kamizelki kuloodporne, które chronią przed pociskami poruszającymi się z prędkością około 950 m/s.

Do badań przyjęto prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s dla przędz poliamidowych oraz przędzy poliestrowej o masie liniowej 55 dtex i 167 dtex. Dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 111 dtex przeprowadzono pomiary z prędkością rozciągania od 10 do 100 m/s zwiększając prędkość początkową o 10 m/s.

Różnorodność stosowanych technik dziania powoduje różnice w długościach nitek w strefie podawania oraz między elementami roboczymi maszyny. Z przeprowadzonej analizy pomiarowej wynika, że w przypadku wszystkich wymienionych maszyn długości poszczególnych odcinków nitek w strefie podawania wynoszą od 0,9 do 185 cm. Największą długość podawanej nitki zmierzono na automacie pończosznym, w przewodniku w formie rurki stanowiącym pierwszy element strefy podawania przędzy, od nawoju do strefy dziania. Na szydełkarkach płaskich naprężacze umieszczone są na poziomej belce wzdłuż całej

szerokości maszyny. Tylko w tym przypadku różnica pomiędzy długościami podawanych odcinków nitek od naprężacza do przewodnika, w zależności od obłożenia maszyny, to różnica od około 45 nawet do 140 cm. Na szydełkarkach cylindrycznych najdłuższe odcinki nitek pomierzono w strefach od nawoju do pierwszego przewodnika i dalej do kolejnego przewodnika oraz pomiędzy podawaczem bębnowym i wodzikiem. Pomierzone długości nie przekroczyły 70 cm. Uwagę zwraca fakt, iż zmiana umiejscowienia ramy natykowej z nawojami może wpłynąć na skrócenie bądź wydłużenie podawanych odcinków przędz.

Badania przeprowadzono dla następujących długości rozciąganych odcinków przędzy: $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm.

Badania przeprowadzono przy naprężeniu wstępnym $0,5$ cN/tex. W Tabeli 4.2.1 przedstawiono wykonane warianty badań wraz z przyjętymi długościami rozciąganych odcinków nitek i prędkościami rozciągania. Sumaryczna liczba wariantów pomiarów wynosiła 150, a szczegółowy opis zamieszczono w Załączniku 2.

5. BUDOWA STANOWISKA BADAWCZEGO DO POMIARU NAPIĘĆ W NITKACH PODCZAS DYNAMICZNEGO ROZCIĄGANIA

Wiele materiałów tekstylnych podczas procesów wytwarzania i użytkowania poddawanych jest rozciąganiu dynamicznemu, które odbywa się w bardzo krótkim czasie. Należą do nich między innymi wyroby techniczne: sznury, liny, tkaniny spadochronowe, przenośniki taśmowe, sieci rybackie, nitki kordu opony itp. Wprowadzanie nowych technologii związane ściśle ze wzrostem wydajności spowodowało, iż obecnie w procesach wytwarzania tkanin i dzianin surowce włókiennicze w postaci nitek i przędz ulegają wielokrotnym odkształceniom z prędkością od 1 do 50 m/s.

Na trwałość użytkowania wyrobów włókienniczych wpływają przede wszystkim właściwości mechaniczne surowców zastosowanych do ich wytworzenia. Parametrami służącymi do ich oceny są siła i wydłużenie zrywające wyznaczone podczas procesu rozciągania.

Badania statycznego i dynamicznego rozciągania nitek, według doniesień literaturowych [2] prowadzone były już wcześniej na przyrządach, które w zależności od prędkości rozciągania podzielono na następujące grupy:

- urządzenia o średnich prędkościach rozciągania od $1 \div 5$ m/s,
- urządzenia o wysokich prędkościach rozciągania od $5 \div 100$ m/s,
- urządzenia rozciągające z prędkościami powyżej 100 m/s.

W wymienionych grupach zastosowanie znalazły przyrządy wykorzystujące różne metody wymuszeń rozciągających.

Pierwsze próby badania materiałów tekstylnych poddanych rozciąganiu z prędkością do $3,5$ m/s odnotowano w 1910 roku. Angielski badacz Lester [2] opisał metodę pomiaru zrywania bawełnianych nici szwalniczych z wykorzystaniem energii opadającego wahadła. Podobne urządzenie z wahadłem opracowano w Japonii [75], gdzie próbki poddawano rozciąganiu wzdłużnemu z prędkością $3,3$ m/s. Zaletą opisanych wyżej urządzeń jest ich prosta konstrukcja i obsługa, natomiast wadą zmienna prędkość podczas rozciągania.

W praktyce do badań dynamicznego rozciągania stosowane są przyrządy wykorzystujące energię kinetyczną koła zamachowego. Konstrukcja tych urządzeń pozwala na osiągnięcie znacznie większych prędkości niż w przypadku urządzeń z opadającym ciężarem lub wahadłem. Parker i Kemik [76] prowadzili badania przy prędkościach rozciągania od $0,03$ do 24 m/s rejestrując odkształcenie próbki kamerą z szybkością 14000 klatek/s.

K. I. Koritsky [2] opracował urządzenie do dynamicznego rozciągania nici w kierunku poprzecznym z prędkością około 10 m/s symulując ich zachowanie w procesie szycia. R. Meredith [9, 10] zaprojektował urządzenie zbudowane z dynamometru talerzykowego pozwalającego na uzyskanie prędkości do 19 m/s. Jego istotną wadą z uwagi na wielkość zastosowanego koła zamachowego jest możliwość rozciągania próbek nie dłuższych niż 130 mm. Niniejszym zagadnieniem zajmowano się również w Japonii i Rosji, gdzie opracowano urządzenia pozwalające na regulację prędkości w sposób ciągły w zakresie od 0,5 do 30 m/s [77]. W Stanach Zjednoczonych naukowcy zbudowali przyrząd przeznaczony do wzdłużnego rozciągania nici z prędkością do 80 m/s [78]. Rozciągano próbki o długości 600 mm, a pomiar rejestrowano za pomocą kamery (2600 klatek/sekundę). Podobne prędkości uzyskano na skonstruowanym w Niemczech urządzeniu, na którym materiały tekstylne rozciągano z prędkością od 3 do 80 m/s, natomiast metale od 0,1 do 300 m/s [2].

Zaletą metody badań z wykorzystaniem koła zamachowego jest praktycznie brak utraty prędkości podczas odkształcenia i zrywu próbki. Do wad zaliczyć można trudności wynikające z doboru urządzeń do rejestracji pomiaru.

Nad metodą rozciągania próbek za pomocą ruchomego wózka poruszającego się poziomo wzdłuż dwóch prowadnic opracowano w instytutach badawczych w Rosji [79]. Efektem tych działań było opracowanie urządzenia umożliwiającego rozciąganie materiałów tekstylnych z prędkością do około 17 m/s.

Badania dynamicznego rozciągania prowadzone były przez naukowców za pomocą urządzeń z napędem pneumatycznym, gdzie prędkości pomiaru dochodziły do 50 m/s [53]. Znane są również przyrządy z napędem elektromechanicznym rozciągające materiały tekstylne z prędkościami od 90 do 300 m/s czy wybuchowo-balistyczne stosowane w technikach badania metali pozwalające na uzyskanie prędkości rozciągania od 300 do 800 m/s [51, 80]. Urządzenia pomiarowe wykorzystujące energię spadającej masy (prędkości wymuszeń od 10 ÷ 150 m/s) opisał A. Selwood podczas badania rozciągania nitek tekstylnych [81]. W praktyce urządzenia te pozwoliły na uzyskanie prędkości rozciągania 10 m/s. W Stanach Zjednoczonych skonstruowano przyrządy umożliwiające rozciąganie różnych materiałów z prędkościami 30 m/s, w Rosji powyżej 100 m/s, a w Japonii nawet do 140 m/s [2, 56, 57]. Wykorzystywane były metody mechaniczno-balistyczne wymuszające rozciąganie próbek materiałów tekstylnych z prędkościami do 100 m/s czy przyrządy pneumo-balistyczne, gdzie prędkości rozciągania dochodziły do 250 m/s.

Przyrządy do rozciągania materiałów tekstylnych z dużymi prędkościami powinny charakteryzować się wysoką stabilnością i powtarzalnością zadanych parametrów, szerokim zakresem i płynną regulacją prędkości oraz prostą i zwartą konstrukcją uwzględniającą jak najmniejsze gabaryty i wagę. Biorąc pod uwagę powyższe wymagania do prowadzenia badań z prędkościami od 10 do 100 m/s zaleca się stosowanie urządzeń z kołem zamachowym.

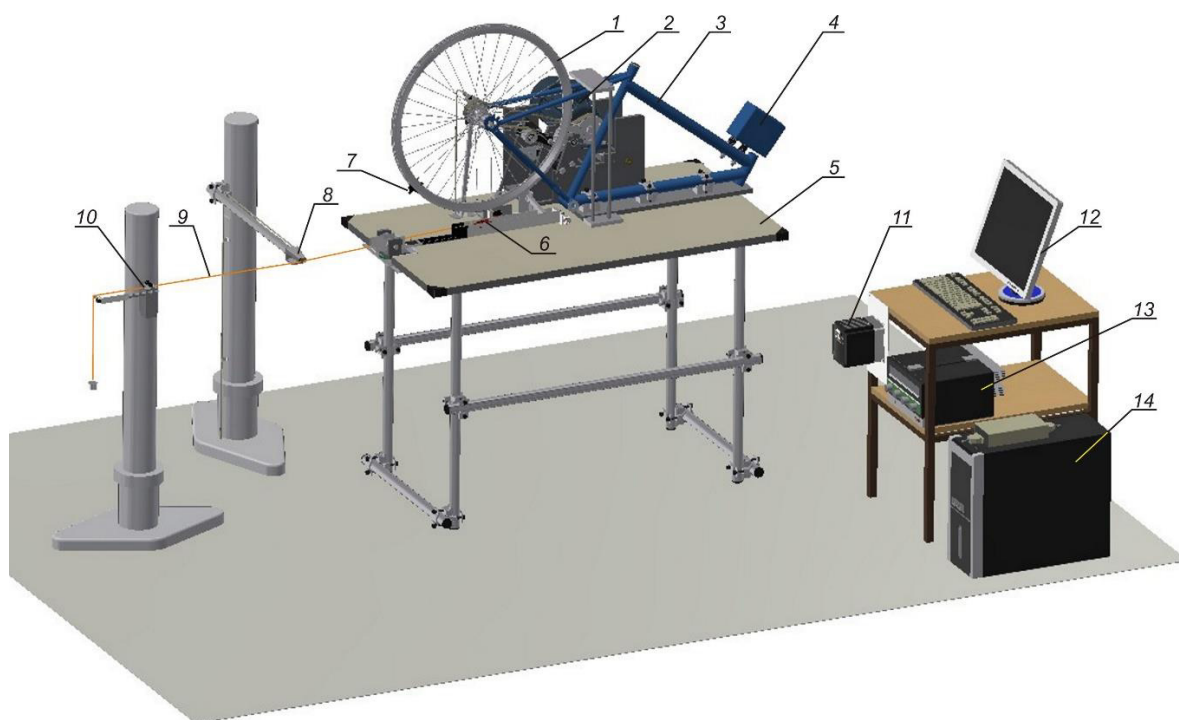
Obecnie we włókiennictwie seryjnie produkowanymi przyrządami pomiarowymi, służącymi do badania rozciągania jedno i wielokierunkowego płaskich i liniowych wyrobów, są maszyny wytrzymałościowe jedno lub dwu kolumnowe umożliwiające wykonanie pomiaru z maksymalną prędkością 0,0186 m/s. Brak jest natomiast komercyjnych urządzeń badawczych (zrywarek), dla których prędkości rozciągania odnoszą się do procesów dynamicznych, na których wymuszenia przyrostu wydłużeń sięgały by przedziału między 10 a 100 m/s, lub więcej. W związku z tym przeprowadzenie badań dynamicznego rozciągania nitek w ramach niniejszej pracy wymagało budowy odpowiedniego stanowiska pomiarowego.

Wspomniane w studium literatury prototypy urządzeń do badań z dużymi prędkościami rozciągania są to aparaty badawcze jednostkowe budowane i wykorzystywane w ośrodkach

naukowych, służące do analizy właściwości mechanicznych tekstyliów (najczęściej nitek i przędz) w warunkach dynamicznych. W publikacjach pojawiają się wzmianki na temat badań dynamicznych tekstyliów powyżej 800 m/s. W pierwotnych planach badawczych niniejszego doktoratu zaprojektowano urządzenie rozciągające z prędkościami do 1500 m/s, co okazało się nierealnym przedsięwzięciem konstrukcyjnym jedynie z powodów proceduralnych.

5.1 Budowa i opis stanowiska pomiarowego

W celu przeprowadzenia badań dynamicznego rozciągania przędzy zaprojektowano i wykonano urządzenie pomiarowe umożliwiające uzyskanie prędkości rozciągania w zakresie od 0,5 do 100 m/s. Schemat zespołu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.1.1.



Rys. 5.1.1 Schemat zespołu pomiarowego: 1 – koło obrotowe, 2 – silnik, 3 – rama, 4 – „przeciwwaga”, 5 – podstawa stanowiska pomiarowego, 6 – ramię z zaciskiem ruchomym, 7 – trzpień, 8 – czujnik tensometryczny, 9 – badana przędza, 10 – zacisk stały, 11 – falownik, 12 – monitor, 13 – wzmacniacz tensometryczny, 14 – komputer z kartą pomiarową transmisji analogowo – cyfrowej

Źródło: opracowanie własne

Przyrząd zbudowano na bazie koła obrotowego wyważonego dynamicznie (1) zamocowanego na ramie (3) przytwierdzonej do podstawy stanowiska w postaci prostokątnego blatu (5). Z uwagi na duże prędkości rozciągania związane z dużą prędkością obrotową koła na przeciwległym końcu ramy zastosowano „przeciwwagę” (4) redukującą drgania mechanizmu pomiarowego.

Przędzę (9) mocowano pomiędzy dwoma zaciskami, jednym stałym (10) a drugim ruchomym (6) w postaci specjalnie uformowanej na jednym z końców badanej przędzy pętelki. Do wykonania pętelki wykorzystano poliestrową nić szwalną o masie liniowej 97,3 tex. W celu wyeliminowania zrywu przędzy w miejscu połączenia obu nici zabezpieczono je warstwą kleju. Na kole umieszczono trzpień (7), którego zadaniem było uchwycenie pętelki (1 – Rys. 5.1.2) znajdującej się na zaczepie (2 – Rys. 5.1.2) na skutek czego następowało rozciągnięcie przędzy. Zaczep umieszczono na ruchomym ramieniu (6). Pomiar siły w nitce dokonywany był

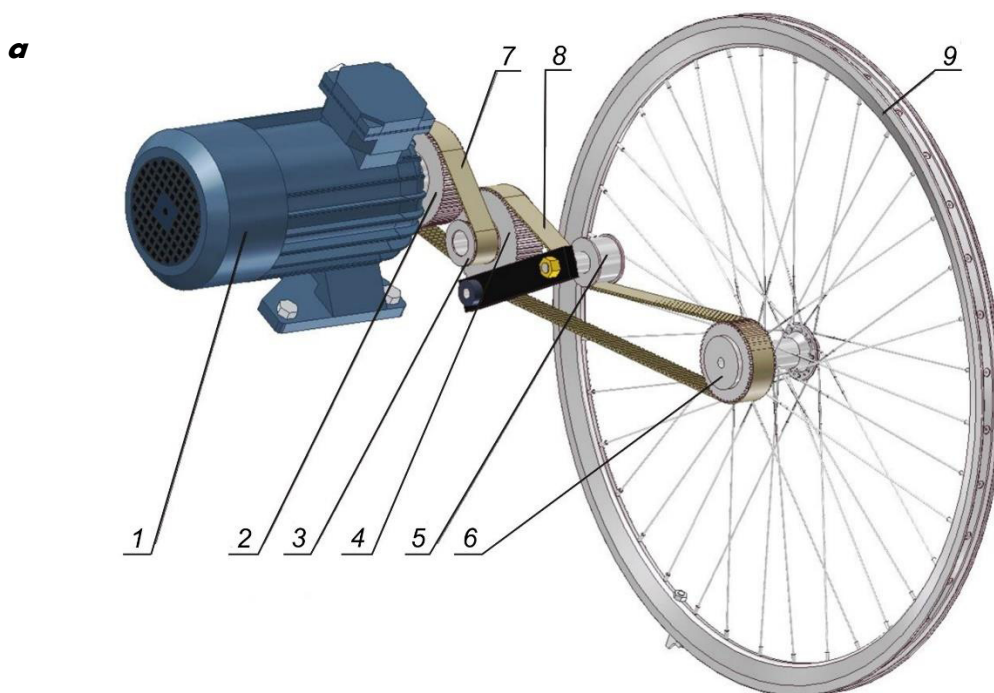
za pomocą czujnika tensometrycznego (8) umieszczanego w połowie długości badanego odcinka przędzy.

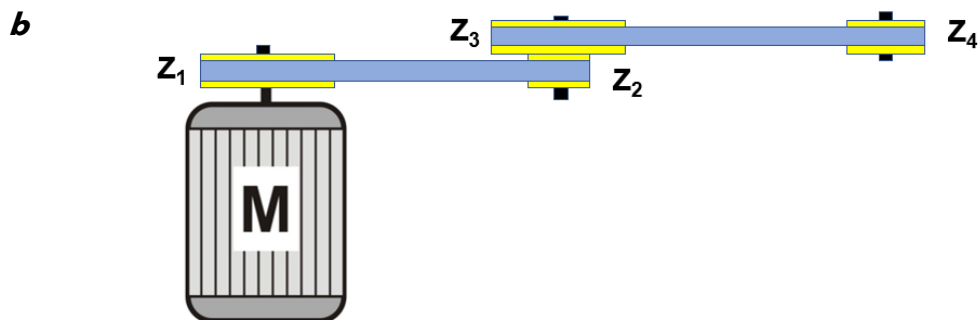


Rys. 5.1.2 Widok rzeczywisty przedstawiający zaczepek z umieszczonym zaciskiem ruchomym w postaci pętli wykonanej z nici szwalniczej: 1 – pętla umocowana na jednym z końców badanej przędzy, 2 – zaczepek

Źródło: opracowanie własne

Układ napędzany silnikiem indukcyjnym trójfazowym o mocy 1,5 kW (2), którego prędkość obrotową regulowano za pomocą przemiennika częstotliwości (falownika) HITACHI NE – S1 (11). W celu uniknięcia oddziaływania zakłóceń na czułe elementy pomiarowe silnik połączono z falownikiem za pomocą ekranowanego przewodu trójfazowego. Silnik połączono z kołem za pomocą układu dwóch przekładni mechanicznych zębatych ciągnowych multiplikujących przedstawionego na rysunku 5.1.3. Dzięki zastosowanej przekładni zwiększono prędkość koła obrotowego 3,6 razy.

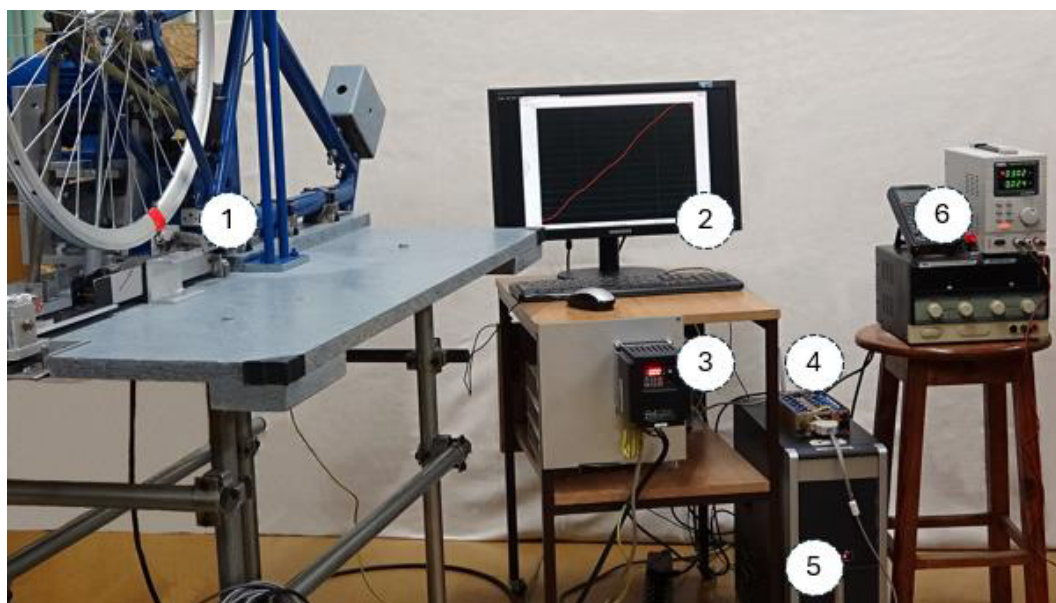




Rys. 5.1.3 Widok zastosowanego zespołu przekładni mechanicznych: a – wizualizacja, b – schemat
 1 – silnik, 2 – koło zębate $Z_1 = 60$, 3 – koło zębate $Z_2 = 26$, 4 – koło zębate $Z_3 = 60$,
 5 – rolka napinająca, 6 – koło zębate $Z_4 = 48$, 7,8 – pasek zębaty, 9 – obrotowe koło
 Źródło: opracowanie własne

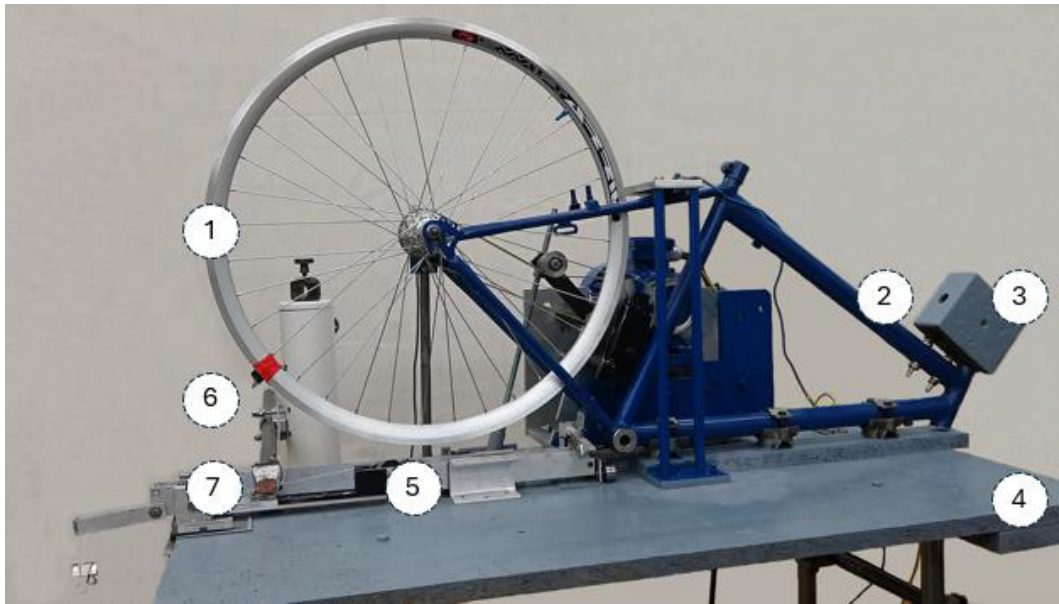
Wyniki badań rejestrowane były na komputerze (14) wyposażonym w kartę pomiarową transmisji analogowo – cyfrowej.

W czasie prób pomiarowych odnotowano duże zakłócenia sygnału pomiarowego dlatego też wystąpiła konieczność zastosowania specjalnego ekranowanego kabla zasilającego silnik.



Rys. 5.1.4 Widok rzeczywisty zespołu pomiarowego do pomiaru napięć w nitkach podczas dynamicznego rozciągania: 1 – przyrząd do pomiaru napięć w nitkach, 2 – monitor, 3 – falownik, 4 – wzmacniacz sygnału z czujnika tensometrycznego, 5 – komputer z kartą pomiarową transmisji analogowo – cyfrowej, 6 – zasilacz laboratoryjny do czujnika pomiarowego

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.1.5 Fotografia przedstawiająca zbudowane stanowisko badawcze do pomiaru napięć w nitkach podczas dynamicznego rozciągania: 1 – koło obrotowe, 2 – rama, 3 – „przeciwwaga”, 4 – podstawa stanowiska pomiarowego, 5 – ramię z zaciskiem ruchomym, 6 – trzpień, 7 – czujnik tensometryczny

Źródło: opracowanie własne

5.2 Charakterystyka elementów elektronicznych układu pomiarowego

Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych znajdują szerokie zastosowanie we wszystkich dziedzinach nauki i techniki. Jako wielkości nieelektryczne mierzy się między innymi czas i częstotliwość, siły i momenty sił (statyczne i dynamiczne), prędkości i przyspieszenia (liniowe i obrotowe), ciepło (ilość ciepła, przepływ ciepła, temperatura). Zasada takiego pomiaru polega na uzyskaniu sygnału elektrycznego proporcjonalnego do mierzonej wielkości nieelektrycznej. Uzyskuje się to dzięki zastosowaniu w układzie pomiarowym elementu zwanego czujnikiem. Istnieje wiele różnych czujników dostosowanych do pomiaru danej wielkości, różniących się konstrukcją. Biorąc pod uwagę budowę czujników dzielimy je na mechaniczne, optyczno-mechaniczne, interferencyjne, elektryczne, izotopowe i pneumatyczne [82].

Zastosowanie czujników w przemyśle włókienniczym umożliwia pomiar szeregu wielkości nieelektrycznych w trakcie procesu wytwarzania. Dzięki temu zakłócenia procesu produkcyjnego są dużo łatwiejsze do wykrycia, co przyczynia się do podniesienia jakości produkcji oraz zwiększenia jej kontroli. W grupie czujników tensometrycznych zwanych tensometrami stosuje się obecnie najczęściej tensometry oporowe głównie w pomiarach laboratoryjnych i użytkowych. Czujniki tensometryczne działają na zasadzie pomiaru zmian oporu cienkiego drucika lub cienkiej warstwy metalicznej pod wpływem przyłożonego naprężenia. Zastosowanie tensometrów oporowych w porównaniu z innymi metodami pomiarowymi zapewnia dużą czułość i dokładność pomiaru. Niewielka masa oraz małe wymiary tensometrów minimalizują wpływ tychże wielkości na dokładność przeprowadzanego pomiaru, co jest szczególnie istotne w przypadku badania obiektów poddanych obciążeniom dynamicznym.

Do pomiaru odkształceń statycznych jak i dynamicznych stosuje się układy zbudowane w oparciu o mostek Wheatstone’a. Mostek może być zasilany ze źródła prądu zmiennego,

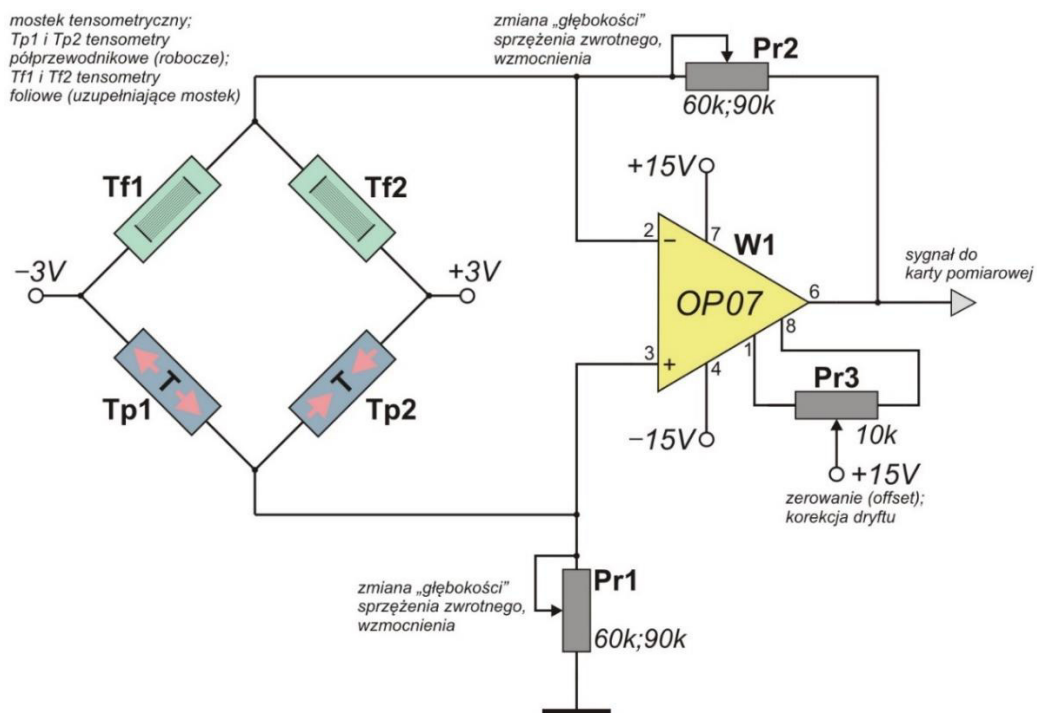
jak i stałego. Uzyskane na wyjściu sygnały pomiarowe są na tyle słabe, że wymagają znacznego wzmocnienia [83, 84].

Jednym z elementów elektronicznego układu pomiarowego jest karta akwizycji danych umożliwiająca współpracę z tensometrami lub mostkami tensometrycznymi. W przypadku pomiarów dynamicznych ważny jest dobór karty o dużej częstotliwości próbkowania.

5.3 Charakterystyka elementów układu pomiarowego

5.3.1 Charakterystyka części analogowej układu pomiarowego

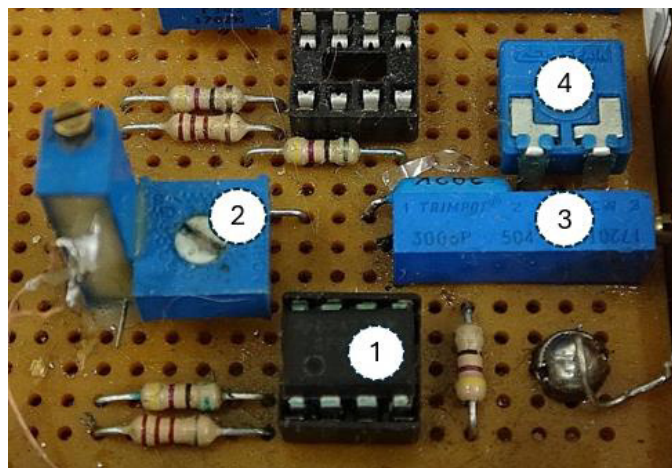
Dobór odpowiedniego zespołu urządzeń pomiarowych jest bardzo istotny w przypadku przeprowadzania pomiarów oraz rejestracji wielkości zmieniających się w sposób dynamiczny w czasie. Zbudowane stanowisko badawcze do pomiaru napięć w nitkach wyposażono w układ pomiarowy którego schemat przedstawiono na rysunku 5.3.1.1.



Rys. 5.3.1.1 Schemat ideowy układu pomiarowego

Źródło: opracowanie własne

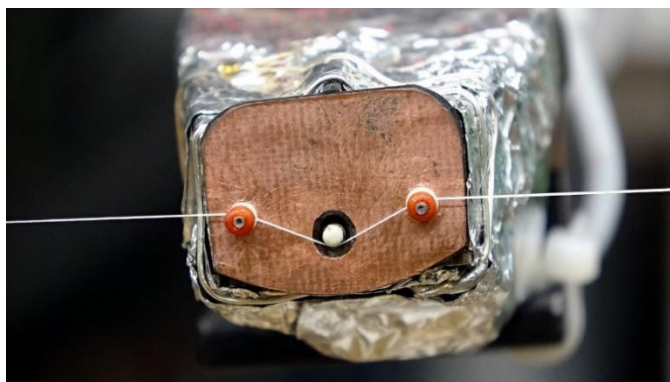
Układ pomiarowy składa się z mostka tensometrycznego oraz wzmacniacza tensometrycznego zbudowanego w ramach niniejszej pracy w oparciu o wzmacniacz operacyjny (Rys. 5.3.1.2). Sygnał analogowy z mostka tensometrycznego przekazywany jest za pośrednictwem wzmacniacza tensometrycznego na wejście karty pomiarowej PC, która umożliwia zapis charakterystyki pomiaru w postaci wykresu i danych pomiarowych w kodzie ASCII.



Rys.5.3.1.2 Wzmacniacz tensometryczny zastosowany w układzie pomiarowym: 1 – wzmacniacz operacyjny, 2 – potencjometry montażowe do zerowania układu pomiarowego (jednoobrotowy i wieloobrotowy), 3, 4 – potencjometry montażowe do regulacji sprzężenia zwrotnego (wzmocnienia układu)

Źródło: opracowanie własne

W ramach pracy wykonano czujnik tensometryczny (Rys. 5.3.1.3) w postaci rurki z trzpieniem pomiarowym.



Rys. 5.3.1.3 Fotografia zbudowanego czujnika tensometrycznego

Źródło: opracowanie własne

Na rurce czujnika umieszczono dwa tensometry półprzewodnikowe Tp1 i Tp2, które stanowią połowę mostka Wheatstone'a. Druga połowa mostka została zrealizowana za pomocą tensometrów foliowych Tf1 i Tf2 umieszczonych przy czujniku. Mostek zasilano prądem stałym o napięciu 3V. Zastosowanie w budowie czujnika tensometrów półprzewodnikowych umożliwia uzyskanie większej wartości sygnału przy odkształceniu elementu pomiarowego. Zmierzona częstotliwość drgań własnych czujnika wynosi 11 kHz. Sygnał z mostka Wheatstone'a po wzmocnieniu przez wzmacniacz operacyjny W1 przekazywany jest na wejście karty pomiarowej (karty akwizycji danych). W pomiarach wykorzystano dwa zakresy wzmocnienia odpowiadające nastawom potencjometrów Pr1 i Pr2 na 60 k Ω lub 90 k Ω w układzie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego. Wielokrotnie w trakcie wykonywania pomiarów dokonywano korekty napięcia wyjściowego ze wzmacniacza przy nieobciążonym czujniku za pomocą potencjometru Pr3. Wzmacniacz operacyjny zasilany był typowym napięciem symetrycznym ± 15 V.

W celu wyeliminowania zakłóceń zastosowano ekranowanie czujnika folią aluminiową oraz ekranowane przewody sygnałowe.

5.3.2 Charakterystyka karty akwizycji danych

Do rejestracji danych pomiarowych wykorzystano kartę PCI-1714UL firmy Advantech (Rysunek 5.3.2.1):

- liczba kanałów pomiarowych: 4,
- rozdzielczość przetworników A/C: 12 bitów,
- szybkość przetwarzania A/C: max 10 MS/s.

Karta pomiarowa pełni funkcję precyzyjnego miernika napięcia elektrycznego z możliwością wizualizacji mierzonego przebiegu elektrycznego i zapisu wartości napięcia w postaci cyfrowej.

Sygnał analogowy ze wzmacniacza tensometrycznego podawany był na jedno z wejść przy częstotliwości próbkowania 1 MHz w zakresie pomiarowym $-5,0 \div +5,0$ V.

Wybór niniejszej karty podyktowany był koniecznością zapisu odpowiedniej liczby punktów pomiarowych umożliwiających prawidłowe odwzorowanie charakterystyki przebiegu procesu rozciągania nitki z dużymi prędkościami.



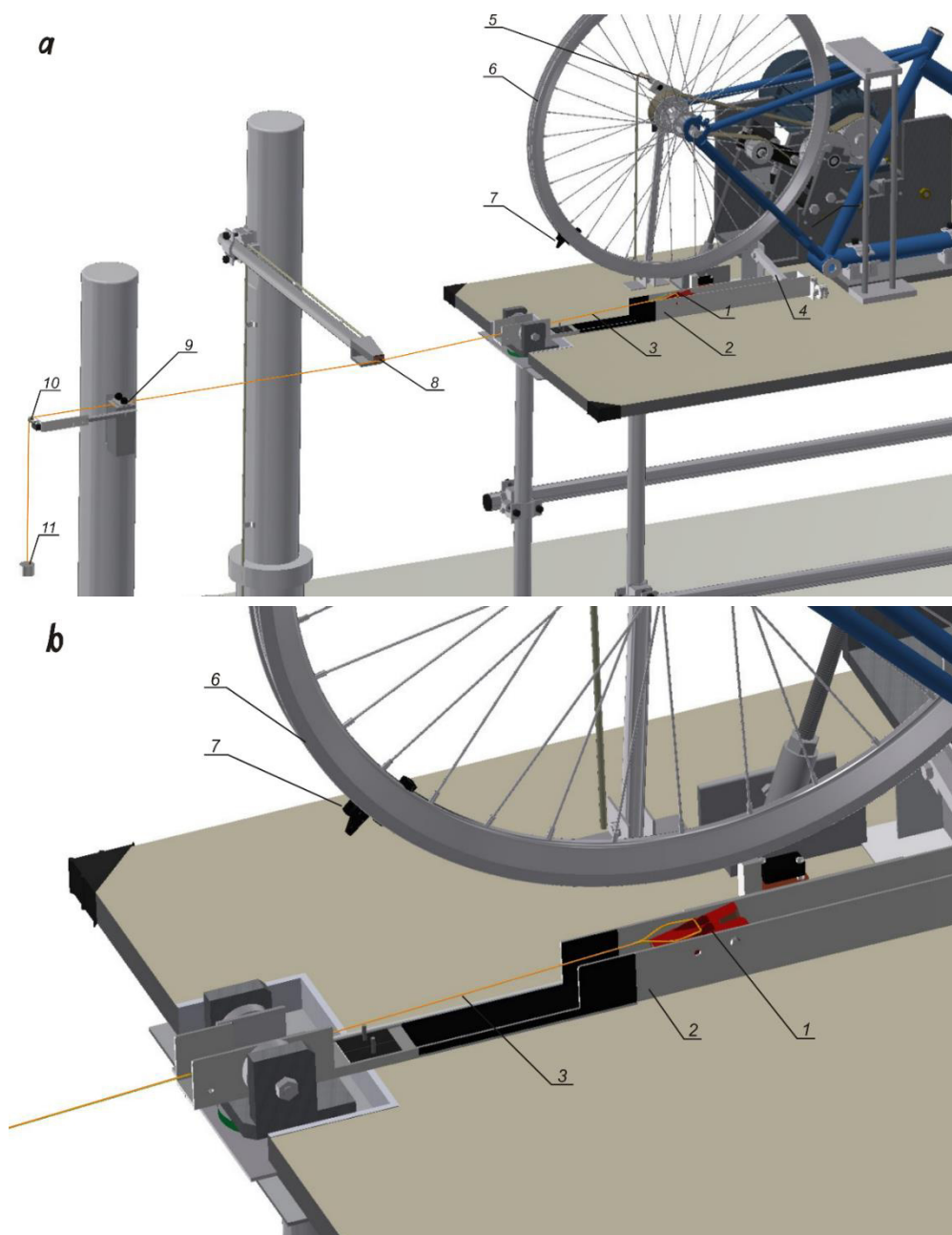
Rys. 5.3.2.1 Karta pomiarowa transmisji analogowo - cyfrowej PCI-1714UL firmy Advantech
Źródło: opracowanie własne

6. METODY BADAWCZE/POMIAROWE

6.1 Badania (pomiar charakterystyk) dynamicznego rozciągania przędzy

Pomiary dynamicznego rozciągania przędzy wykonano na przyrządzie, którego budowę opisano w rozdziale 5. Sposób zamocowania badanej przędzy przedstawiono na rysunku 6.1.1.

Pomiar rozpoczynano od zamocowania na zaczepie (1) umieszczonej na jednym końcu przędzy pętelki (Rysunek 6.1.1). Po przeprowadzeniu nitki przez przewodnik (10) poddawano ją obciążeniu wstępnemu P_0 (dla każdej z przędz przyjęto wartość obciążenia wstępnego 0,5 cN/tex). Następnie po umieszczeniu przędzy w czujniku tensometrycznym (8) drugi jej koniec zakleszczano w zacisku stałym (9). Długość rozciąganych odcinków przędzy regulowano poprzez zmianę położenia zacisku stałego.



Rys. 6.1.1 Sposób zamocowania badanej przędzy: 1 – zaczep, 2 – ruchome ramię, 3 – nitka, 4 – blokada, 5 – czujnik pomiaru prędkości obrotowej koła, 6 – koło obrotowe, 7 – trzpień, 8 – czujnik tensometryczny, 9 – zacisk stały, 10 – prowadnik, 11 – obciążenie wstępne
Źródło: opracowanie własne

Po zamocowaniu przędzy uruchamiano koło (6) regulując prędkość obrotową poprzez ustawienie odpowiedniej wartości częstotliwości pracy falownika.

Na podstawie przyjętych prędkości rozciągania obliczono prędkość obrotową elementu rozciągającego przędzę trzpienia (7) umieszczonego na kole obrotowym (6) ze wzoru:

$$n = \frac{V}{\pi d}, \text{ obr/min} \quad (6.1)$$

gdzie:

V – prędkość rozciągania, m/min,

d – średnica koła obrotowego z uwzględnieniem długości elementu rozciągającego (trzpienia), m ($d = 0,67 \text{ m}$).

Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 6.1.1.

TABELA 6.1.1 Zestawienie wartości prędkości rozciągania

Prędkość rozciągania V , m/s	Prędkość obrotowa elementu rozciągającego n , obr/min.
10	128,0
20	256,1
30	384,1
40	512,1
50	640,1
60	768,2
70	896,2
80	1024,2
90	1152,2
100	1280,3

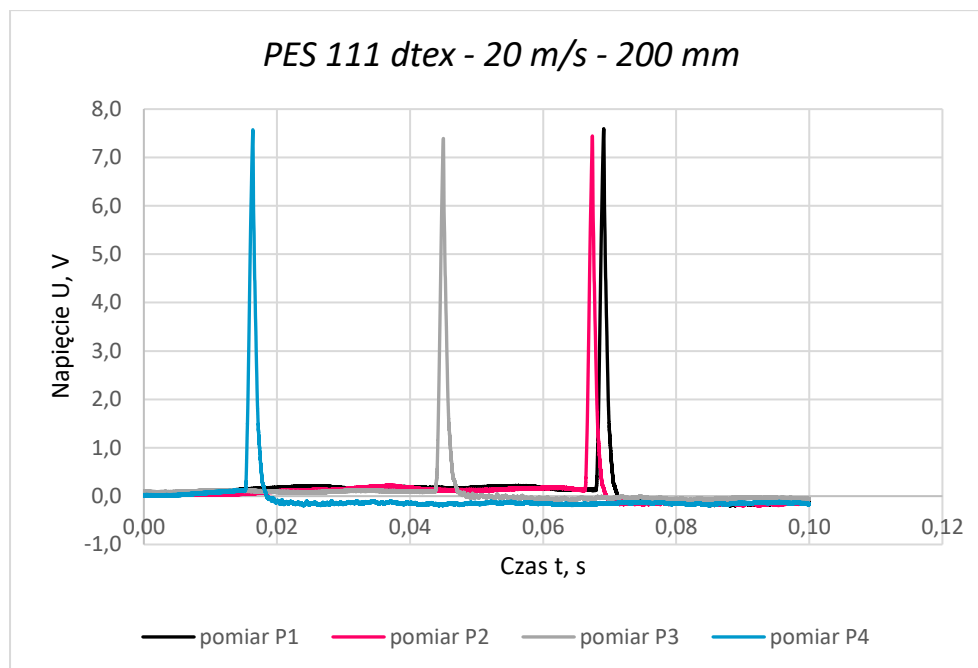
Uzyskanie odpowiedniej prędkości obrotowej zapewniało otrzymanie liniowych prędkości rozciągania zgodnych z wartościami przedstawionymi w powyższej tabeli.

Z uwagi na duże prędkości uzyskiwane podczas prowadzenia pomiarów bezpieczeństwo operatora – badacza zapewniono poprzez osłonięcie go masywną płytą pleksi oraz wyposażenie w specjalne okulary (przyłbicę) chroniące oczy.

W momencie, gdy trzpień znajdował się w górnym położeniu ramię (2) było unoszone tak, aby trzpień mógł przechwycić pętlę zamocowaną na zaczepie (1). Maksymalne odchylenie ramienia uniemożliwiające uderzenie trzpienia w zaczep uzyskano poprzez umieszczenie blokady (4).

Sygnał z czujnika po wzmocnieniu we wzmacniaczu tensometrycznym (13 – Rys. 5.1.1) przetwarzany był z analogowego przez interfejs akwizycji danych do postaci cyfrowej. Zmierzone zmiany naprężenia przędzy odwzorowywane były na komputerze (14 – Rys. 5.1.1) w postaci graficznej wykresów $U = f(t)$, gdzie U – napięcie sygnału w V, t – czas w s. Do rejestracji wyników wykorzystano program Data Logger Application1 – Advantech DAQ Data Logger Express [85, 86].

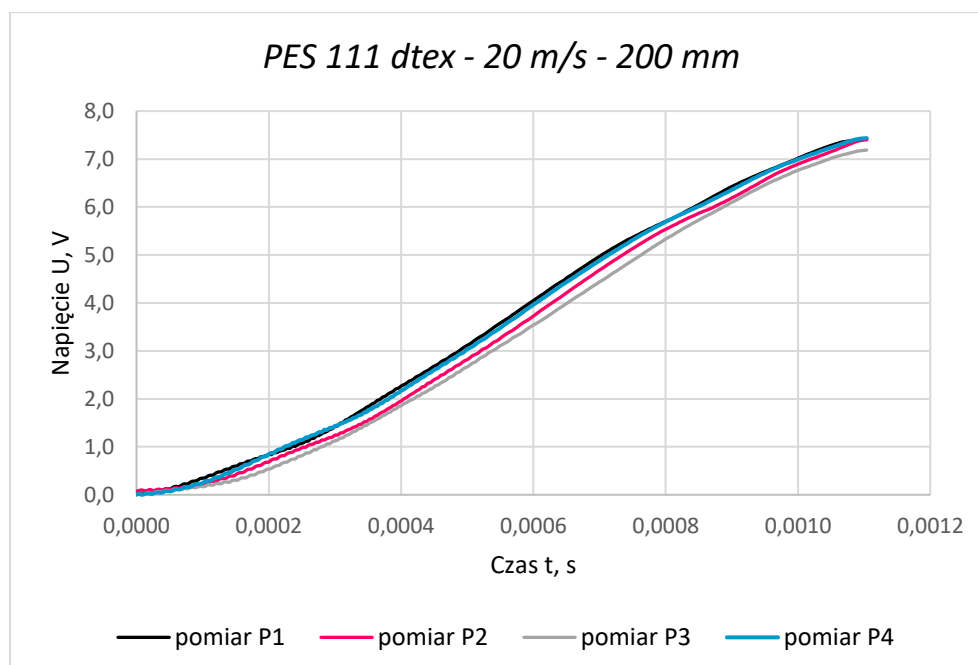
Dla każdego wariantu wykonano po cztery pomiary rozciągania przędzy do momentu jej zerwania. Opracowanie wyników pomiarów przeprowadzono z wykorzystaniem programu komputerowego Microsoft Excel. Poszczególne kroki opisano na podstawie wariantu nitki poliestrowej PES 111 dtex – 20m/s – 200 mm, dla którego wykonano pomiary oznaczone odpowiednio przez P1 do P4. Wszystkie wykresy umieszczono w jednym arkuszu (Rysunek 6.1.2).



Rys. 6.1.2 Siły w nitce w procesie dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex (prędkość rozciągania $V = 20$ m/s, długość rozciąganej odcinka $l = 200$ mm)

Źródło: opracowanie własne

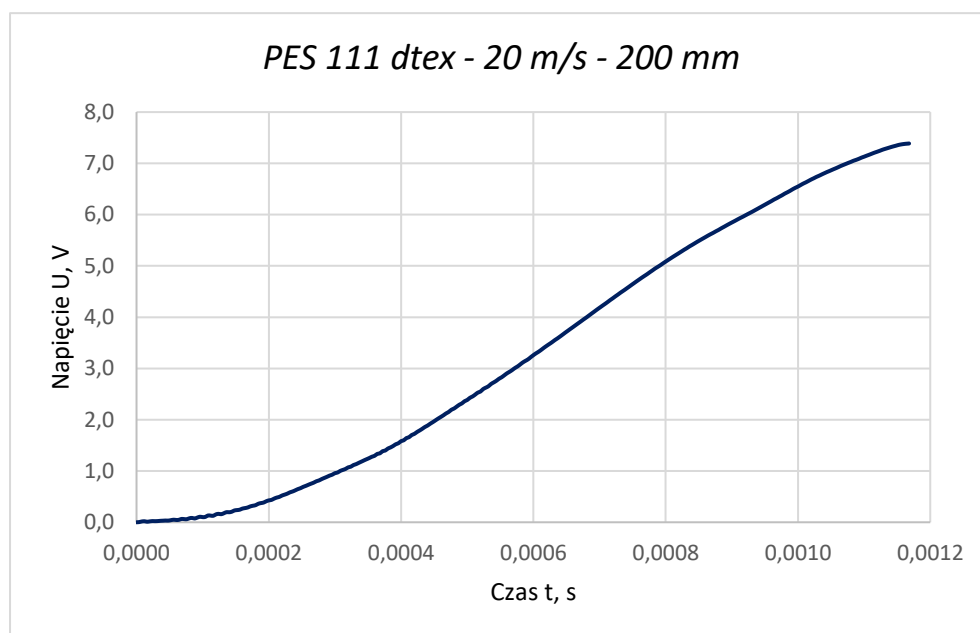
Usunięto odpowiednią liczbę wartości początkowych, tak aby zsynchronizować moment zerwania przędzy oraz wartości końcowych, począwszy od maksymalnej wielkości napięcia, aby poszczególne charakterystyki $U = f(t)$ przedstawiały tylko fragment obrazujący proces rozciągania nitki (Rysunek 6.1.3).



Rys. 6.1.3 Zmiany napięcia U mierzone w układzie pomiarowym w funkcji czasu (PES 111 dtex, $V = 20$ m/s, $l = 200$ mm)

Źródło: opracowanie własne

Otrzymane w ten sposób wartości siły w nitce dla czterech wykonanych dla tego wariantu pomiarów uśredniono.

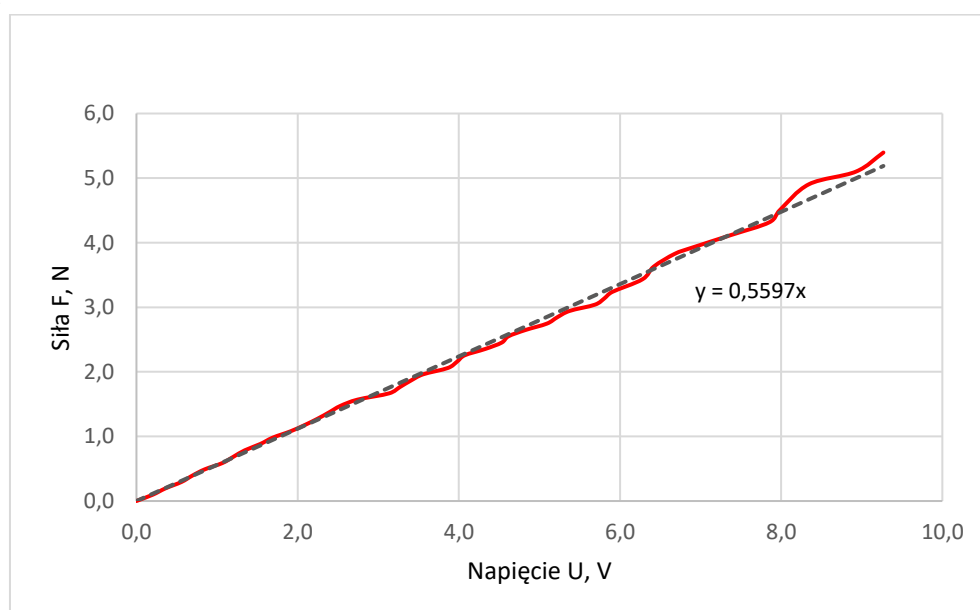


Rys. 6.1.4 Zmiany napięcia U mierzone w układzie pomiarowym w funkcji czasu. Wykres uśredniony dla przędzy PES 111 dtex, prędkości rozciągania $V = 20$ m/s i długości rozciąganego odcinka $l = 200$ mm

Źródło: opracowanie własne

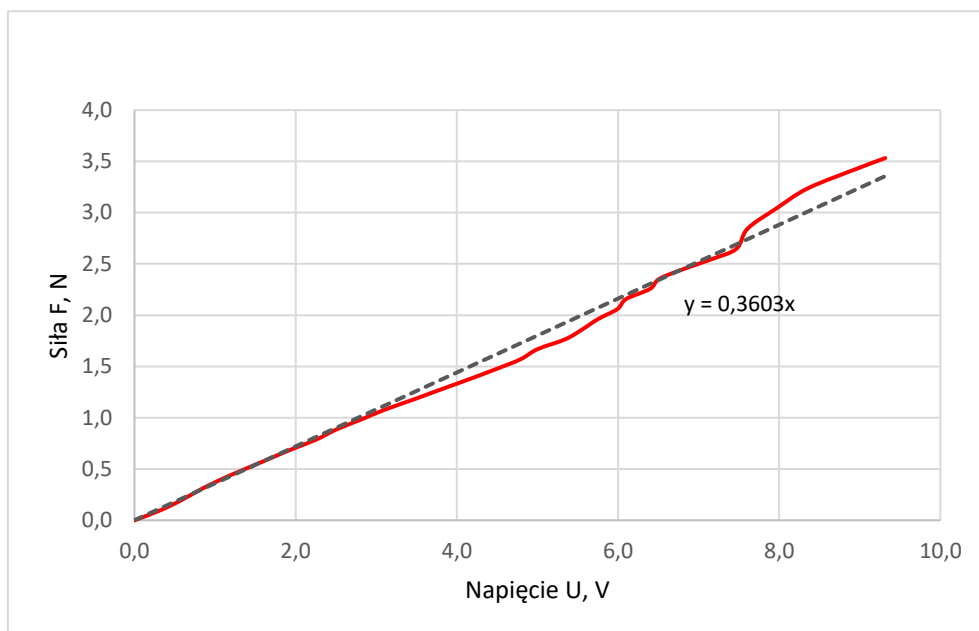
Ponieważ układ pomiarowy rejestrował wartości napięcia elektrycznego w woltach konieczne było wykonanie kalibracji czujnika pomiarowego umożliwiającej przeliczenie ich na wartości siły w niutonach (Rysunek 6.1.5 i 6.1.6).

Przyjęto stałą wartość napięcia zasilania mostka tensometrycznego równą 3,0 V. Aby wykorzystać pełen zakres pomiaru amplitudy napięcia na karcie (10 V) zmieniano wielkość wzmocnienia wzmacniacza tensometrycznego stosując różne wartości rezystancji R_f w obwodzie sprzężenia zwrotnego. Wartości te wynosiły: 60 k Ω dla przędzy poliamidowej o masie liniowej 56 dtex, a także przędzy poliestrowej o masie liniowej 55 i 111 dtex oraz 90 k Ω dla dwóch pozostałych przędz. Otrzymane krzywe kalibracji przybliżono funkcją liniową.



Rys. 6.1.5 Wykres skalowania układu pomiarowego siły działającej na nić dla $R_f = 60$ k Ω

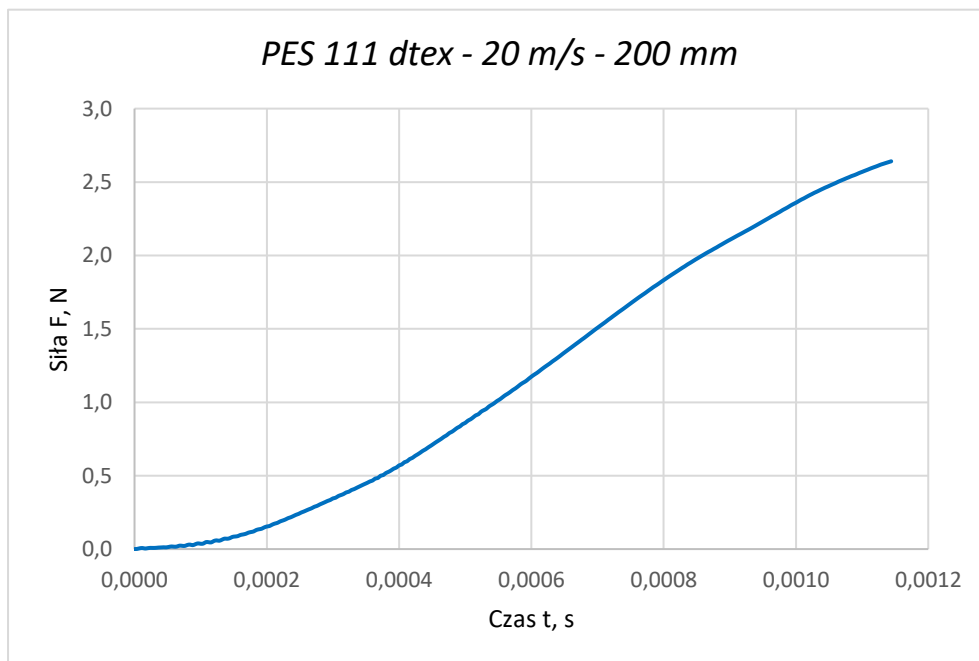
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.1.6 Wykres skalowania układu pomiarowego siły działającej na nić dla $R_f = 90 \text{ k}\Omega$

Źródło: opracowanie własne

Po przeliczeniu wartości napięcia na wartości siły zgodnie z otrzymaną funkcją kalibracji czujnika otrzymano charakterystykę rozciągania przędzy $F = f(t)$ przedstawioną na rysunku 6.1.7.



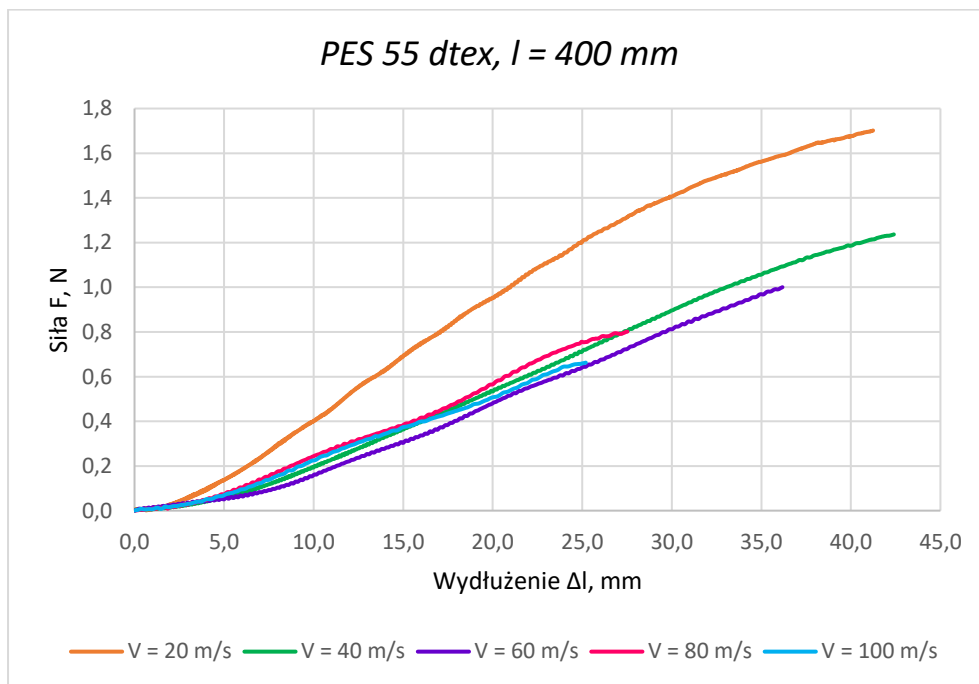
Rys. 6.1.7 Charakterystyka dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex ($V = 20 \text{ m/s}$, $l = 200 \text{ mm}$)

Źródło: opracowanie własne

6.2 Analiza wyników badań uzyskanych podczas dynamicznego rozciągania przędzy

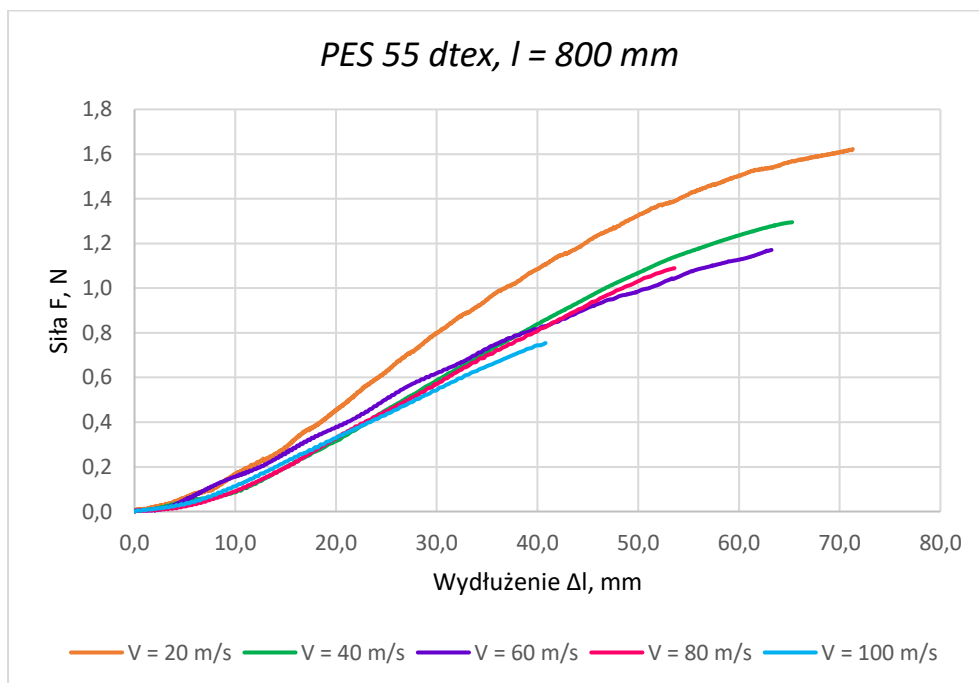
Otrzymane podczas dynamicznego rozciągania przędz wyniki przedstawiono w postaci charakterystyk siły w funkcji wydłużenia $F = f(\Delta l)$. Przykładowe charakterystyki w formie

wykresów zbiorczych dla poszczególnych wariantów prędkości przedstawiono na rysunkach 6.2.1 do 6.2.22. Pozostałe wykresy zamieszczono w Załączniku 3.



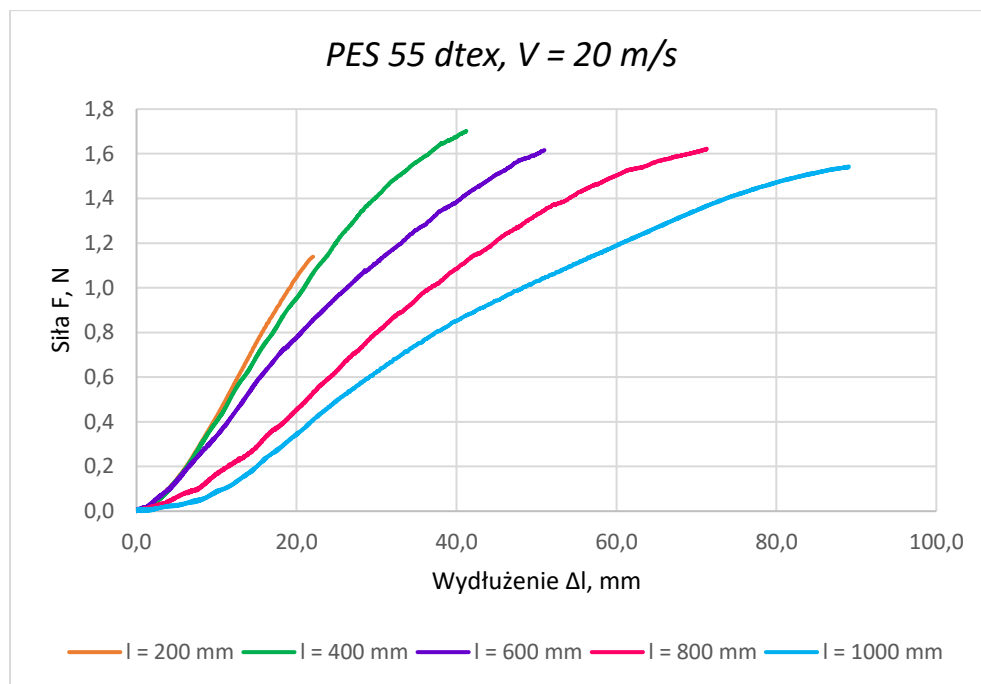
Rys. 6.2.1 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganej odcinka $l = 400$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s

Źródło: opracowanie własne



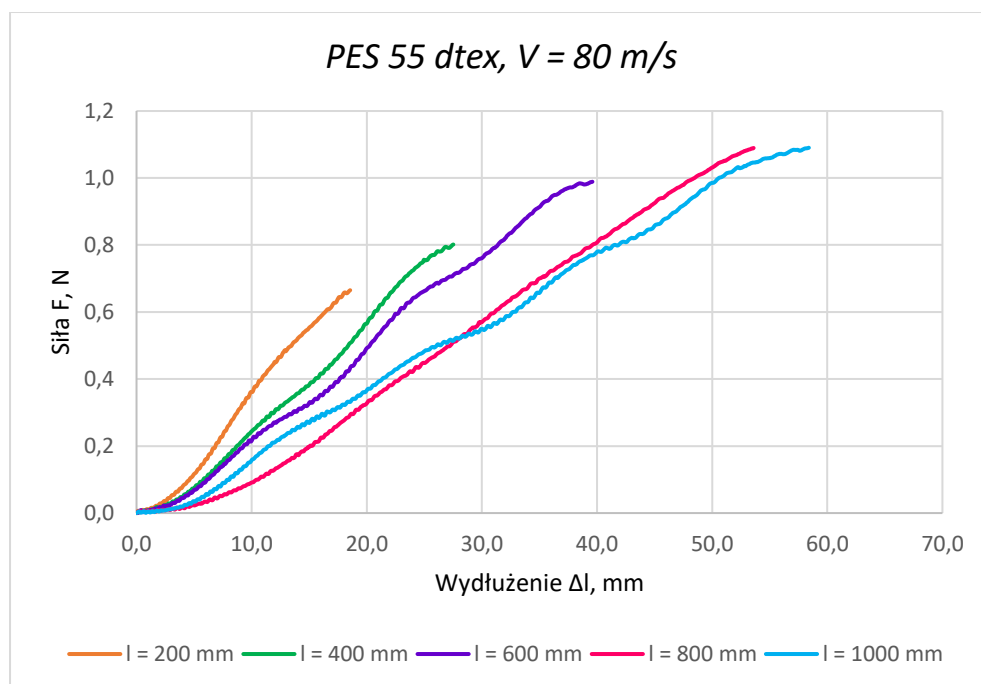
Rys. 6.2.2 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganej odcinka $l = 800$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s

Źródło: opracowanie własne



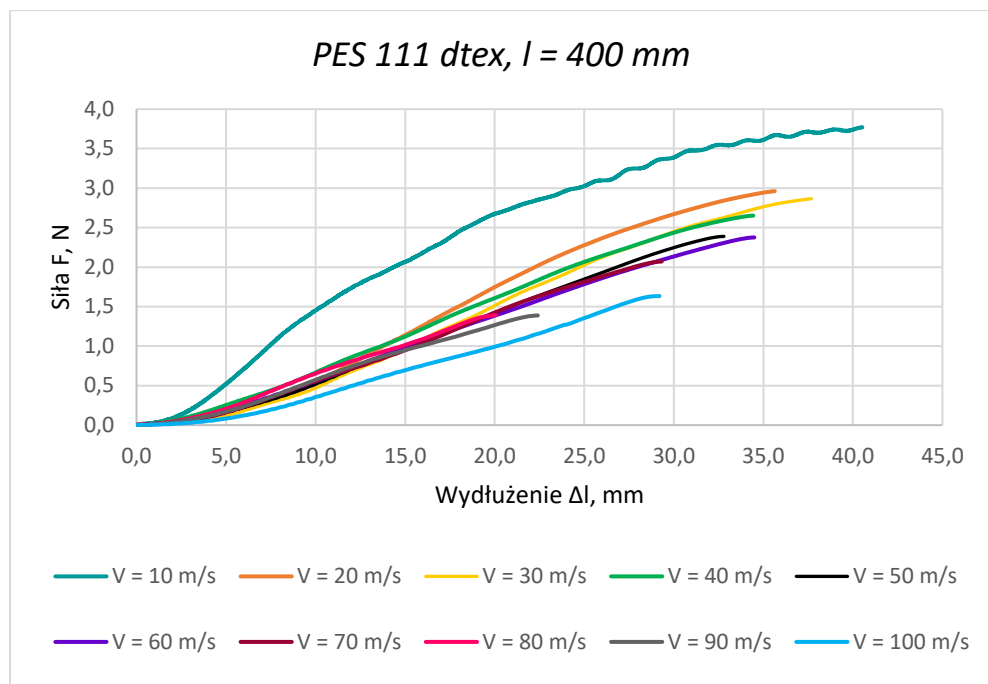
Rys. 6.2.3 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 20 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne

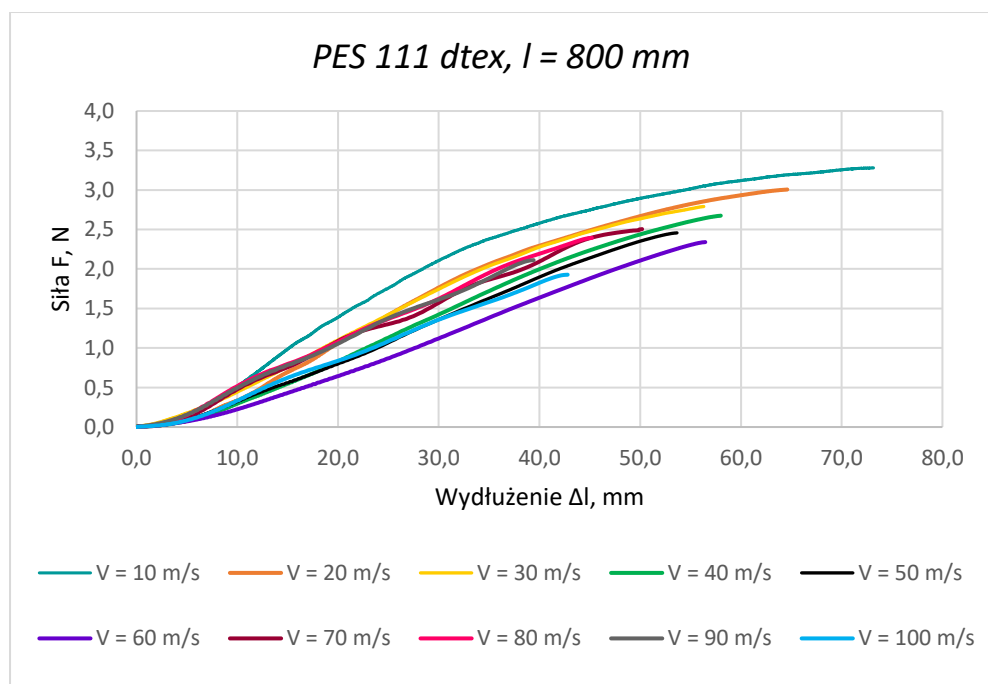


Rys. 6.2.4 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 80 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

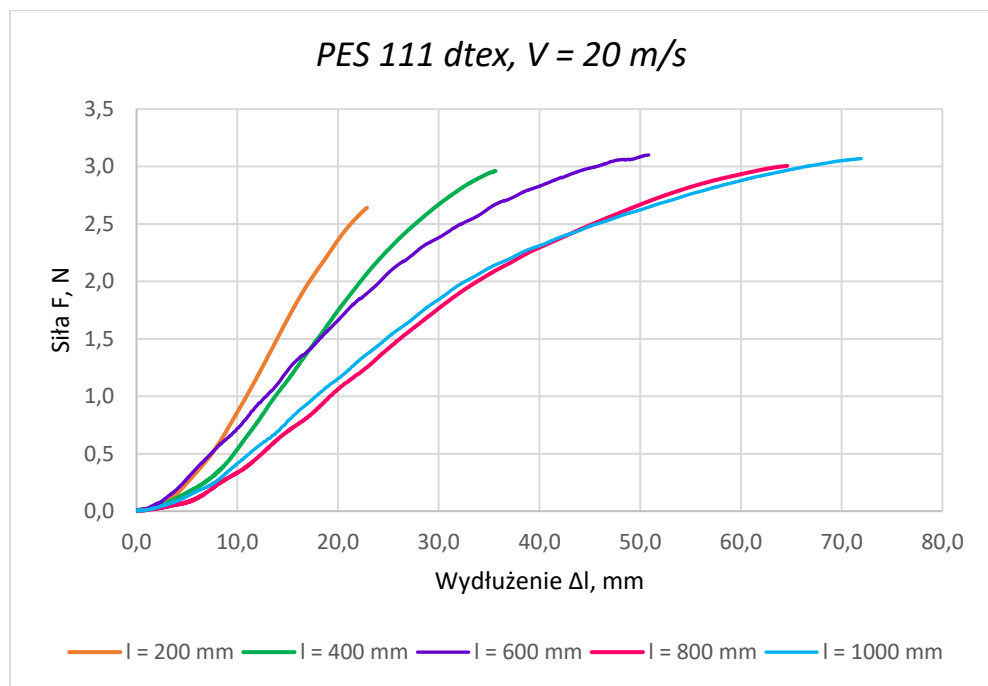
Źródło: opracowanie własne



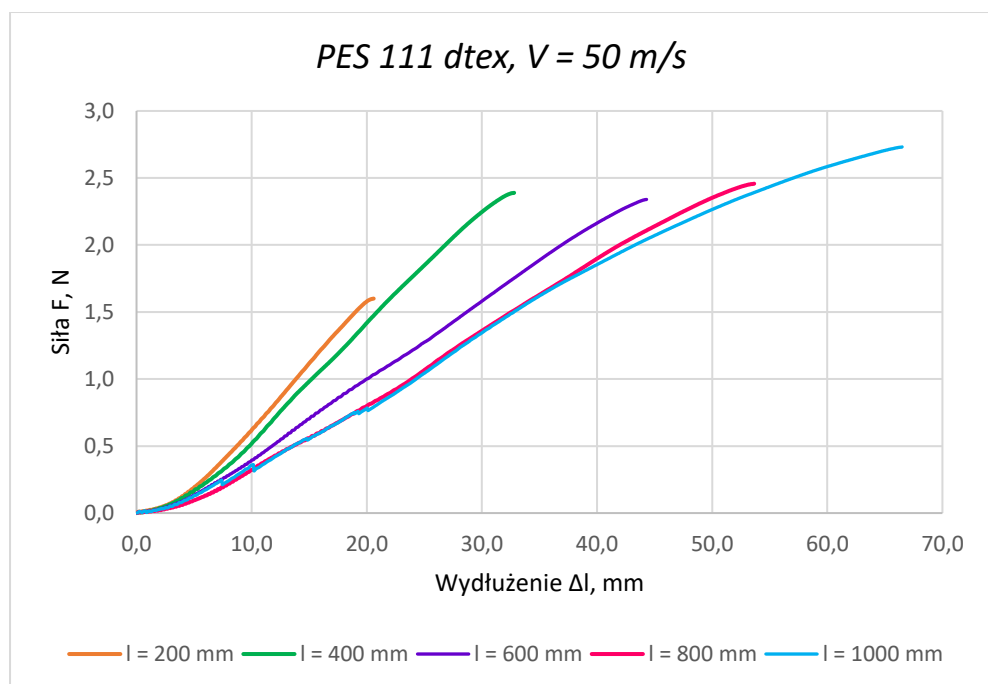
Rys. 6.2.5 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 400$ mm i prędkości rozciągania $V = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ i 100 m/s



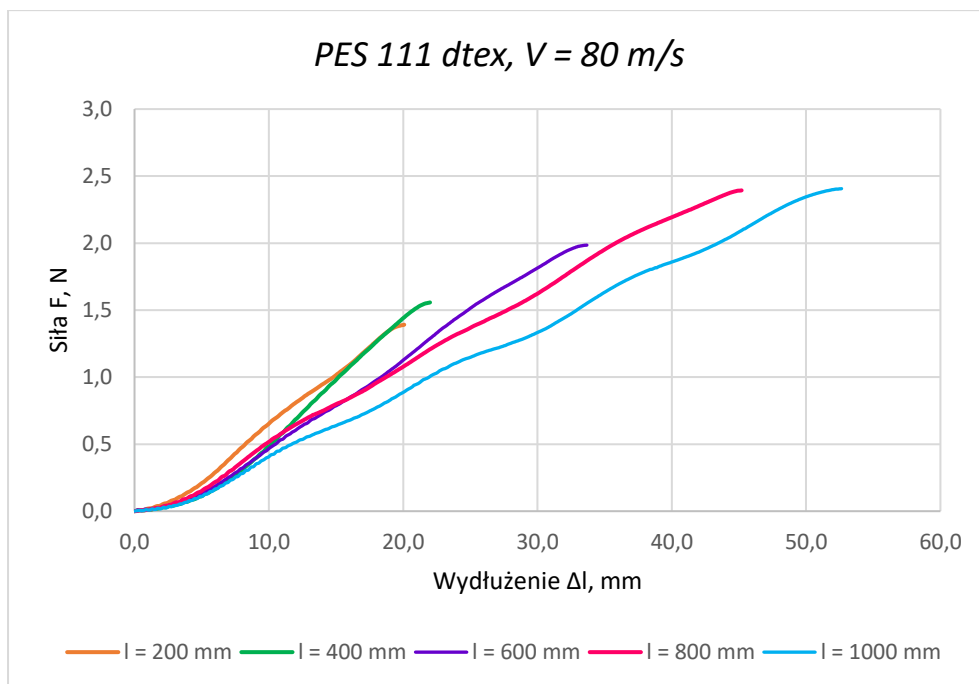
Rys. 6.2.6 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 800$ mm i prędkości rozciągania $V = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ i 100 m/s



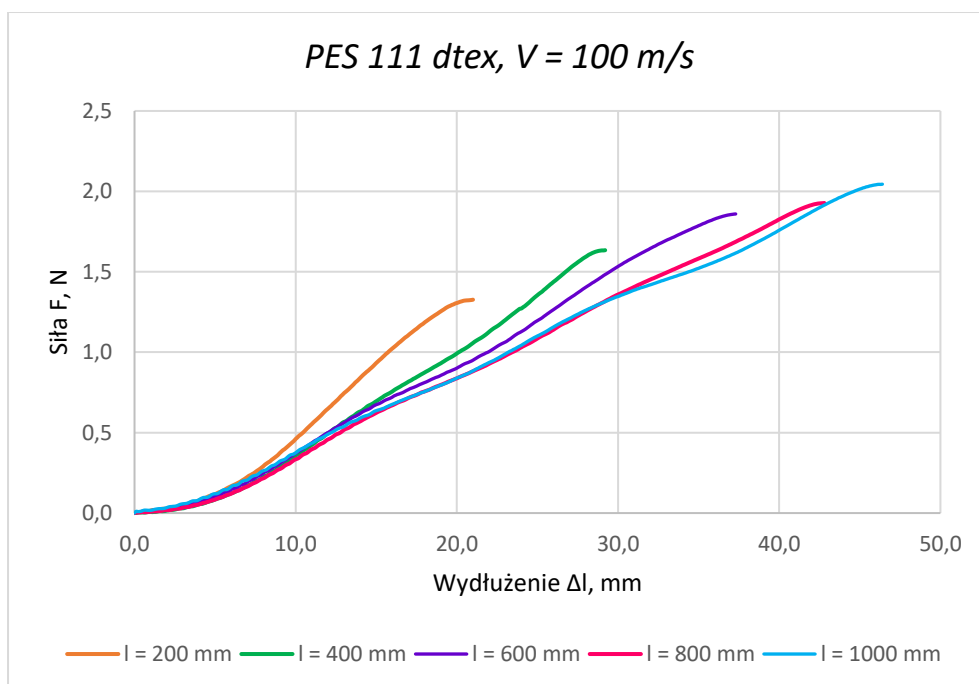
Rys. 6.2.7 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 20 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



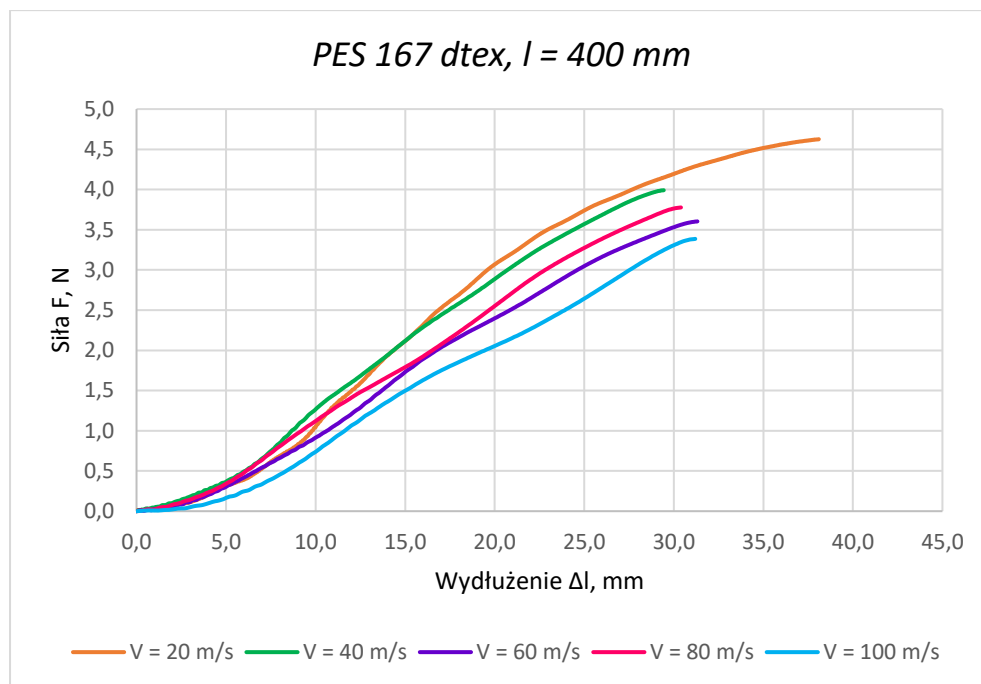
Rys. 6.2.8 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 80 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



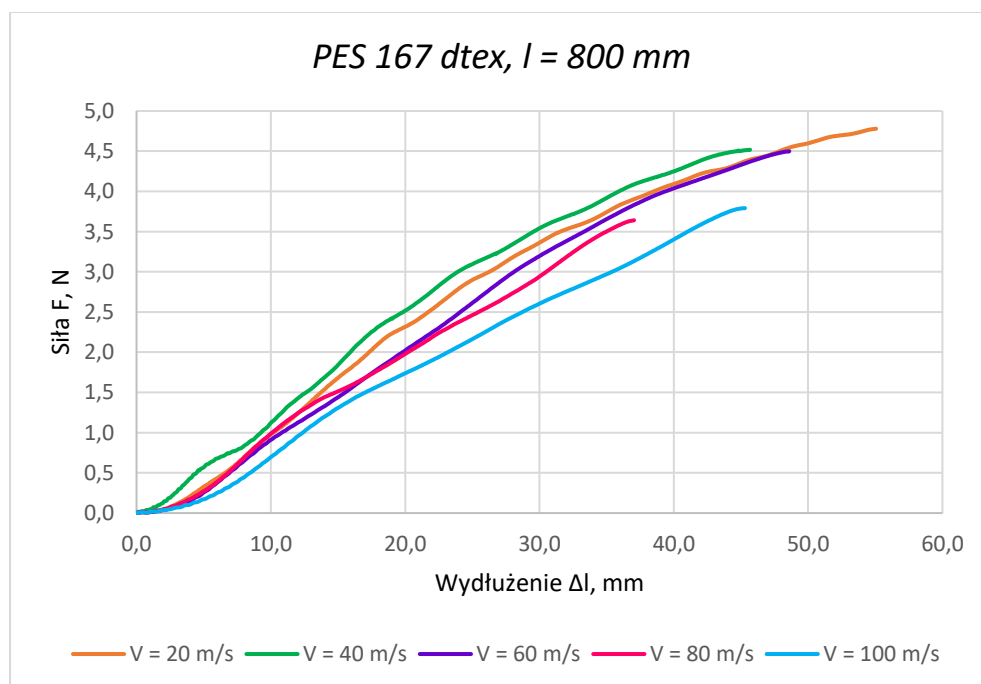
Rys. 6.2.9 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 80 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



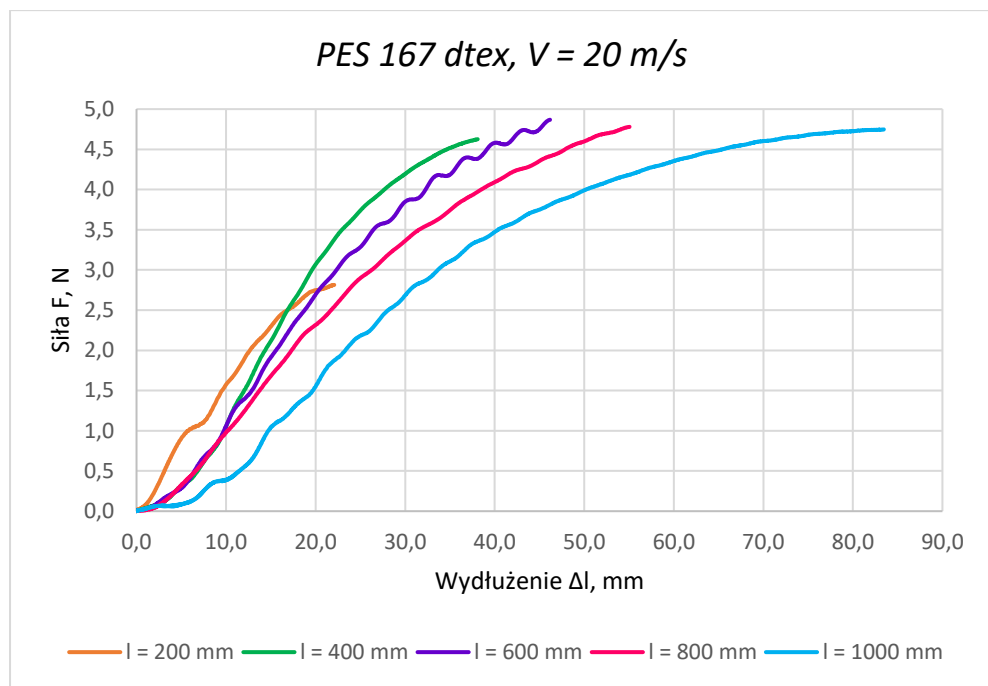
Rys. 6.2.10 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 100 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.2.11 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 400$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne

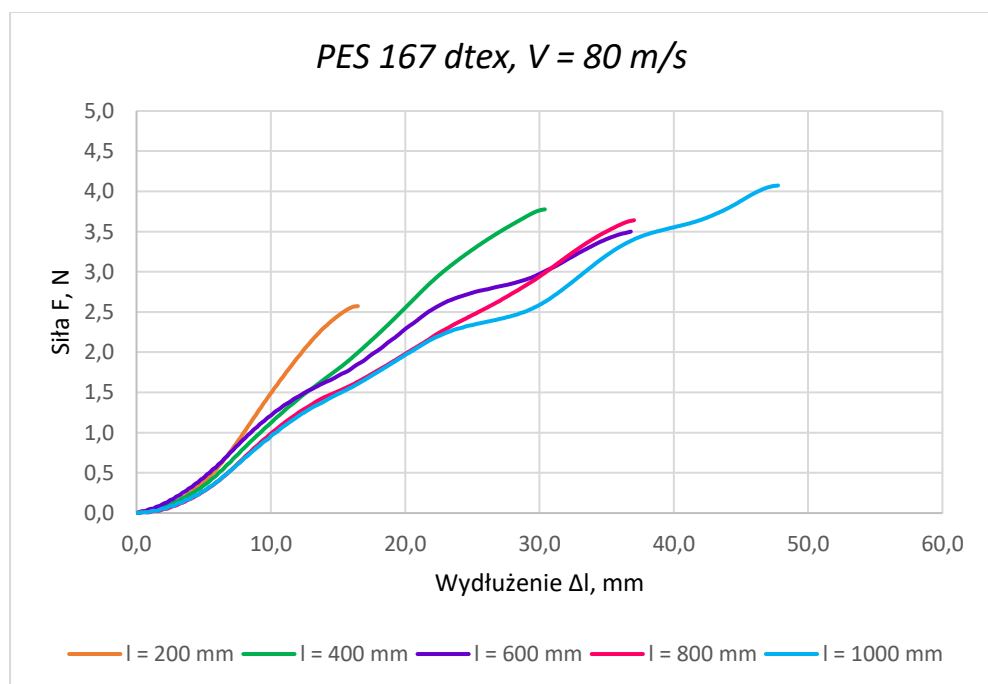


Rys. 6.2.12 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 800$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



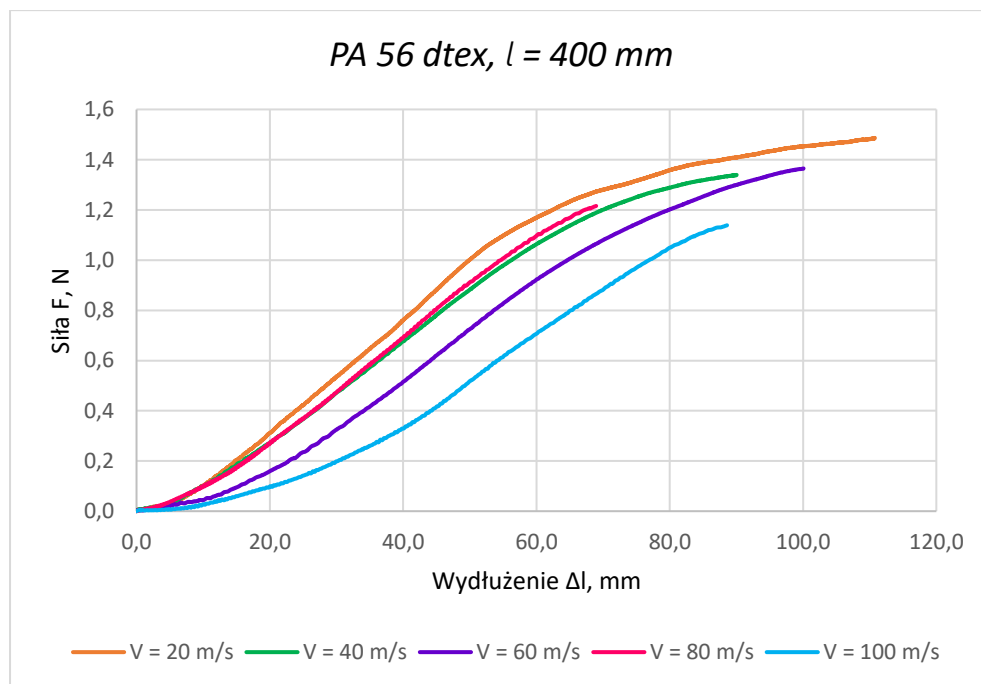
Rys. 6.2.13 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 20 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne

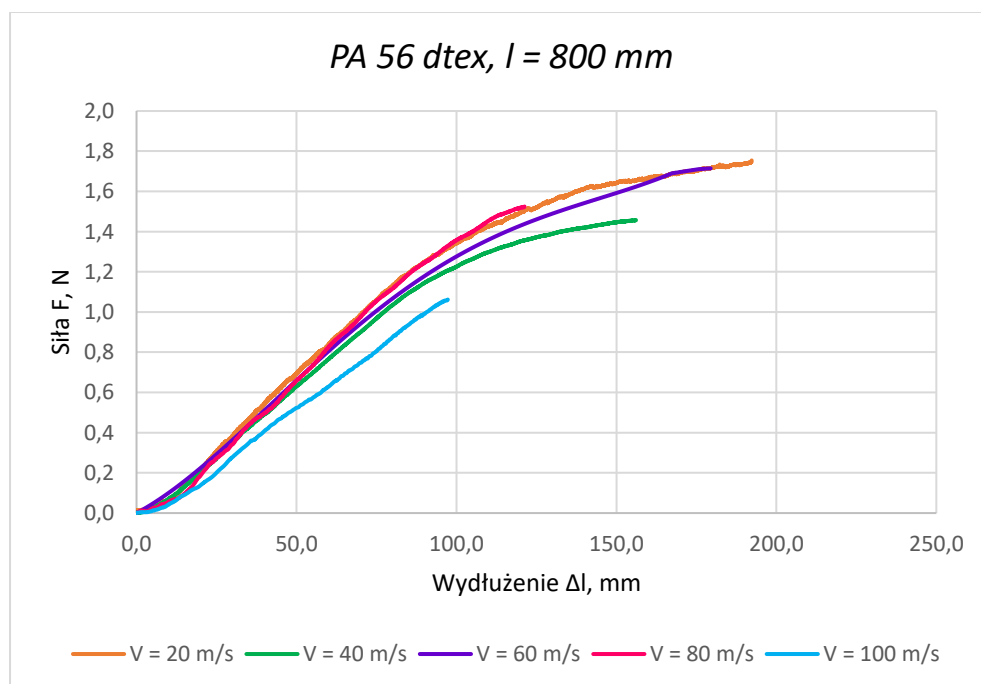


Rys. 6.2.14 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 80 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

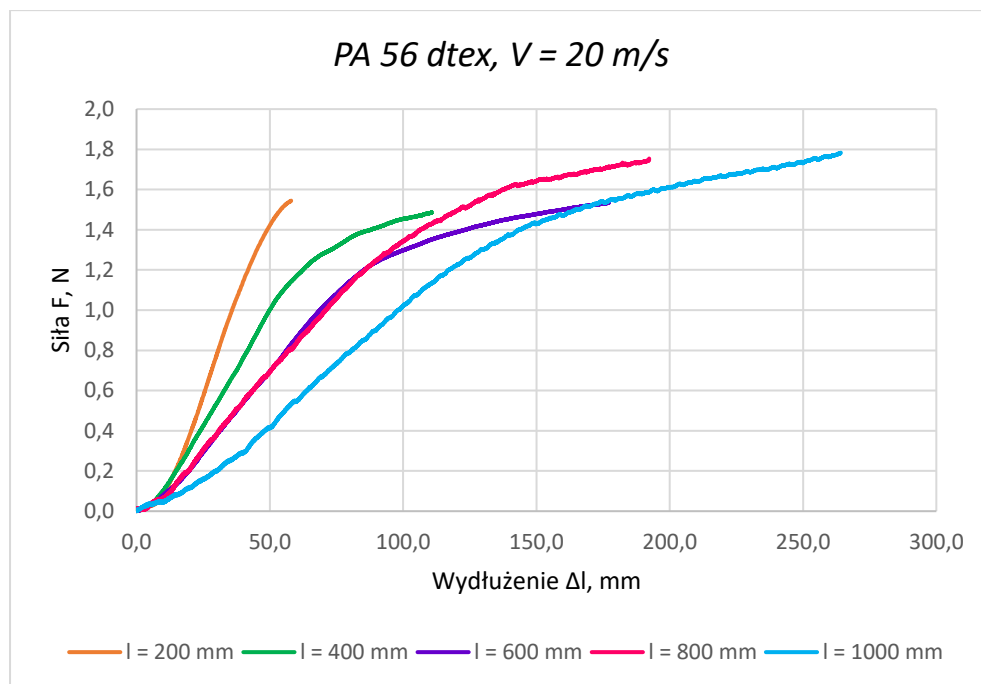
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.2.15 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 400$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne

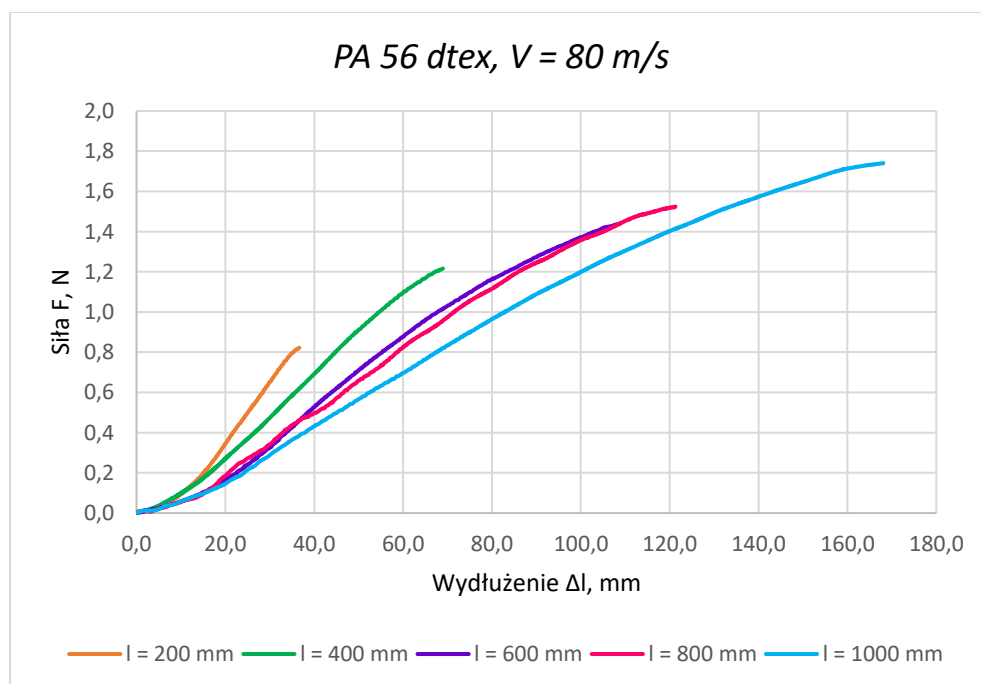


Rys. 6.2.16 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 800$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



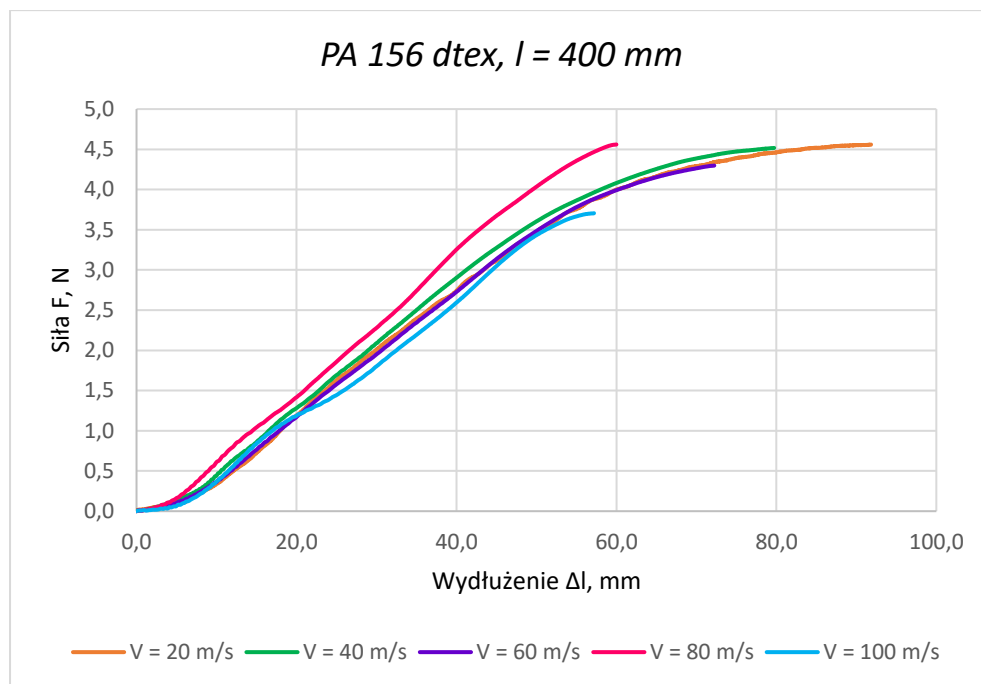
Rys. 6.2.17 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 20 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



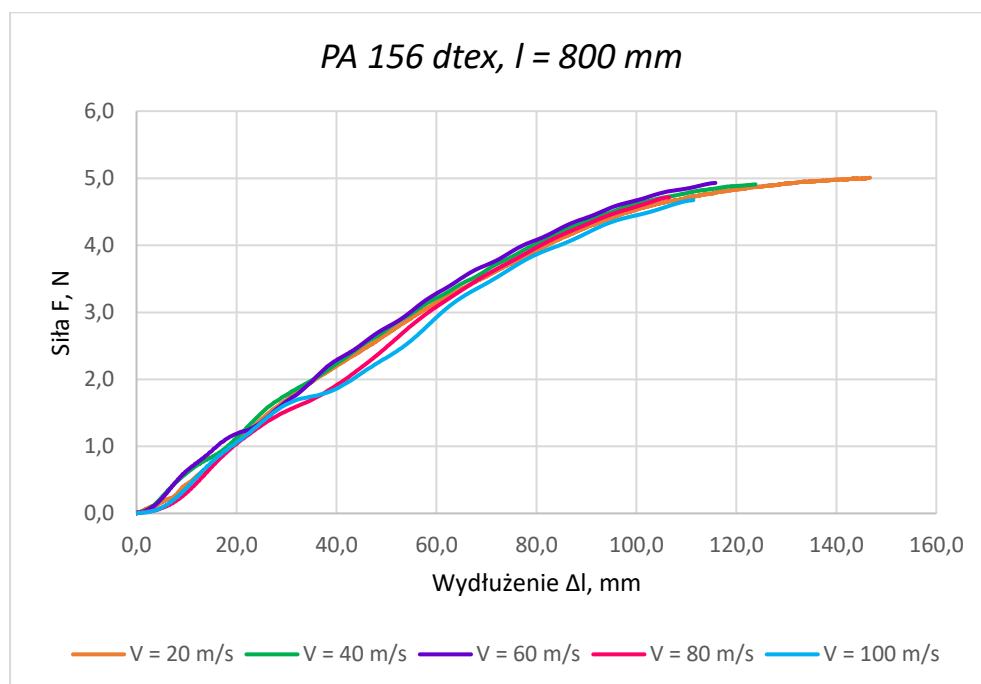
Rys. 6.2.18 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 80 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



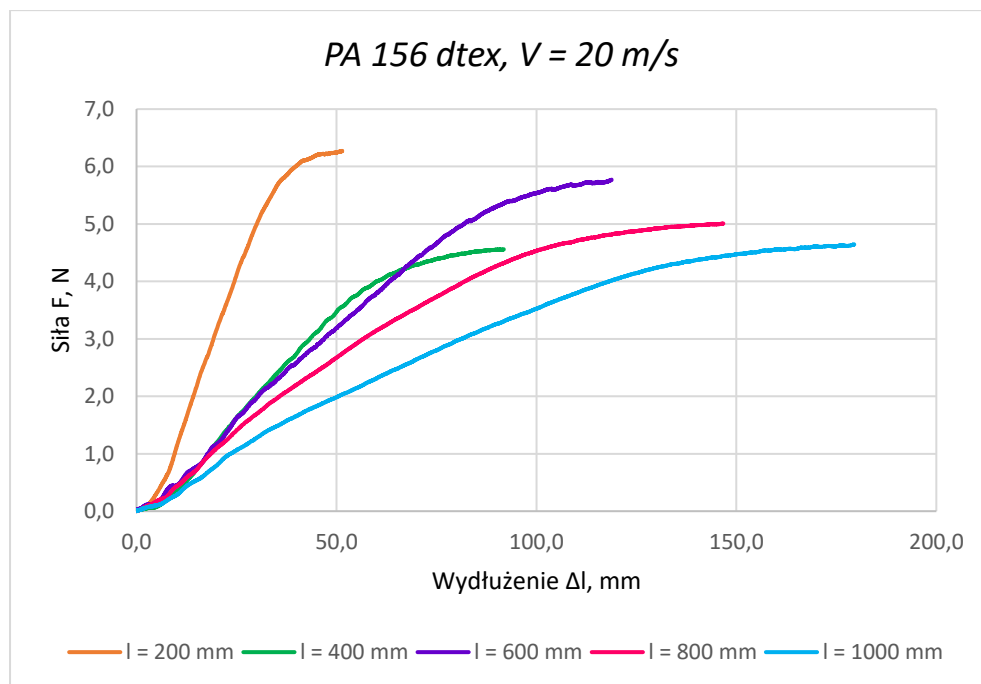
Rys. 6.2.19 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 400$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s

Źródło: opracowanie własne



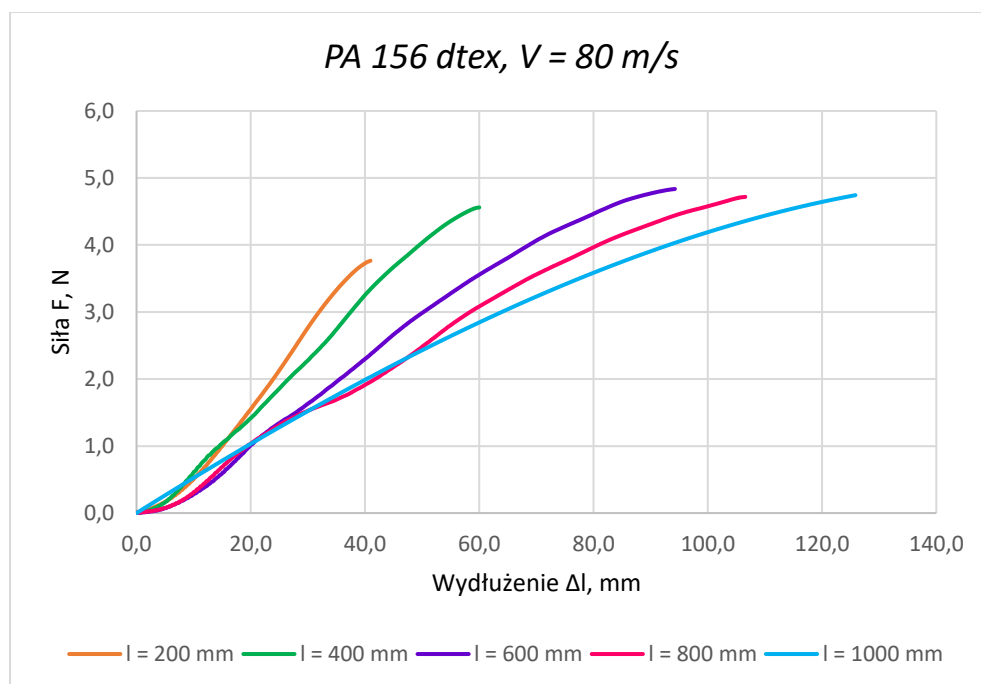
Rys. 6.2.20 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 800$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.2.21 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 20 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.2.22 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 80 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy charakterystyk siły w funkcji wydłużenia otrzymanych w wyniku dynamicznego rozciągania wytypowanych przędz stwierdzono, iż dla przyjętych prędkości i długości rozciąganych odcinków:

a) dla przędzy poliamidowej o masie liniowej 56 dtex

- uzyskano wartości siły w zakresie od 0,82 do 1,81 N oraz wydłużenia w zakresie od 35,90 do 264,16 mm,
- zaobserwowano, iż dla poszczególnych prędkości rozciągania wraz ze wzrostem długości rozciąganego odcinka wartości siły i wydłużenia wykazują tendencje wzrostowe,
- dla przyjętych długości rozciąganych odcinków nitek wraz ze zwiększaniem prędkości rozciągania wartości siły i wydłużenia wykazują tendencje spadkowe,
- krzywe rozciągania wykazują charakter przebiegu skupionego w zakresie wydłużenia od 0 do 80 mm dla $l = 600$ mm i od 0 do 100 mm dla $l = 800$ mm,

b) dla przędzy poliamidowej o masie liniowej 156 dtex

- uzyskano wartości siły w zakresie od 3,18 do 6,17 N oraz wydłużenia w zakresie od 39,60 do 179,48 mm,
- zaobserwowano, iż wraz ze wzrostem prędkości rozciągania największy spadek wartości siły o 3,09 N wystąpił dla $l = 200$ mm, niewielki spadek wartości siły o około 0,90 N zauważyć można dla $l = 400$ i 600 mm, natomiast dla $l = 800$ i 1000 mm wartości siły utrzymują się na zbliżonym poziomie,
- stwierdzono, iż dla poszczególnych długości rozciąganych odcinków nitek wzrost prędkości rozciągania w zakresie od 20 do 80 m/s powoduje zmniejszenie wartości wydłużenia,
- rozpatrując krzywe dla różnych prędkości rozciągania i tej samej długości rozciąganego odcinka nitki można zauważyć, iż wykazują one charakter przebiegu skupionego za wyjątkiem $l = 200$ mm,

c) dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 55 dtex

- uzyskano wartości siły w zakresie od 0,73 do 1,70 N oraz wydłużenia w zakresie od 16,80 do 89,06 mm,
- zaobserwowano, iż dla poszczególnych prędkości rozciągania wraz ze wzrostem długości rozciąganego odcinka wartości siły i wydłużenia wykazują tendencje wzrostowe,
- dla przyjętych długości rozciąganych odcinków nitek wraz ze zwiększaniem prędkości rozciągania wartości siły i wydłużenia wykazują tendencje spadkowe,
- krzywe rozciągania wykazują charakter przebiegu skupionego dla $l = 1000$ mm,

d) dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 111 dtex

- uzyskano wartości siły w zakresie od 1,29 do 3,77 N oraz wydłużenia w zakresie od 18,00 do 87,45 mm,
- biorąc pod uwagę przyjęte długości rozciąganych odcinków przędzy zaobserwowano, iż ze zwiększeniem wartości prędkości rozciągania wartości siły i wydłużenia wykazują tendencje spadkowe,
- rozpatrując poszczególne prędkości rozciągania stwierdzono, iż wraz ze wzrostem długości rozciąganego odcinka nitki wydłużenie rośnie natomiast wartości siły wykazują tendencje wzrostowe za wyjątkiem $V = 10, 20$ i 30 m/s,
- krzywe rozciągania wykazują charakter przebiegu skupionego dla $l = 1000$ mm,

e) dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 167 dtex

- uzyskano wartości siły w zakresie od 2,49 do 4,87 N oraz wydłużenia w zakresie od 16,48 do 83,46 mm,
- zaobserwowano, iż dla poszczególnych prędkości rozciągania wraz ze wzrostem długości rozciąganego odcinka wartości siły i wydłużenia wykazują tendencje wzrostowe,
- dla przyjętych długości rozciąganych odcinków nitek wraz ze zwiększaniem prędkości rozciągania wartości siły i wydłużenia wykazują tendencje spadkowe,
- krzywe rozciągania wykazują charakter przebiegu skupionego.

Reasumując: Przeprowadzona analiza wykazała, iż dla wszystkich przebadanych przędz wraz ze wzrostem długości rozciąganego odcinka przędzy wydłużenie rośnie, natomiast maleje na skutek zwiększania prędkości rozciągania.

Dla większości przypadków wyższe wartości siły rozciągania można zaobserwować dla większych długości rozciąganych odcinków przędzy. Ogólnie na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, iż wzrost prędkości rozciągania powoduje spadek wartości siły rozciągania nitki.

7. ZWIĄZKI KONSTYTUTYWNE WYBRANYCH MODELI LEPKOSPŘŻYSTYCH

O właściwościach użytkowych materiałów włókienniczych (przędz, dzianin, tkanin, włóknin) decydują własności włókien z których te wyroby są wykonane. Na trwałość tekstyliów podczas ich użytkowania decydujący wpływ mają właściwości mechaniczne włókien.

Z uwagi na złożoność budowy makroskopowej, molekularnej i nadcząsteczkowej zachowanie włókien pod wpływem przyłożonych sił zewnętrznych jest bardziej skomplikowane od zachowania się wielu ciał stałych. Ponieważ większość właściwości mechanicznych włókien zależna jest od czasu do ich opisu stosuje się zasady mechaniki ciała lepko-sprężystego. Włókna oraz przędze charakteryzuje znaczna długość w stosunku do wymiarów poprzecznych stąd też w większości badań rozpatrywana jest odkształcalność wywołana działaniem poosiowych sił rozciągających [24].

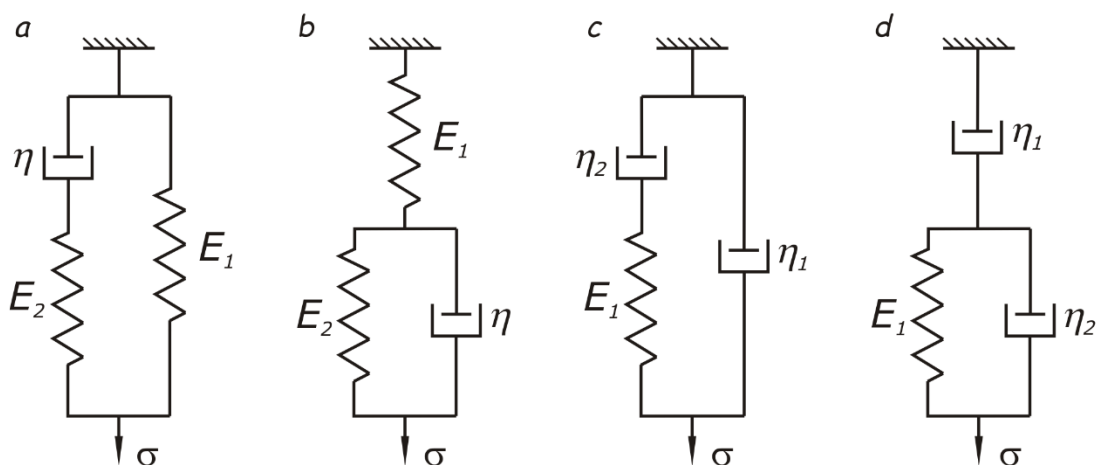
W celu opisu zachowania nitek oraz tekstyliów poddawanych obciążeniom rozciągającym opracowano szereg modeli reologicznych. Do opisu przebiegu odkształceń ciał lepko-sprężystych pod wpływem przyłożonej siły rozciągającej stosuje się mechaniczne modele reologiczne stanowiące połączenie modelu ciała doskonale sprężystego (model Hooke'a) i modelu cieczy lepkiej (model Newtona). Proste modele dwuparametrowe Maxwella i Kelvina – Voigta charakteryzują się zdolnością tylko do relaksacji lub tylko do pełzania przez co nie opisują rzeczywistego zachowania ciał lepko-sprężystych. Dla ujęcia zjawisk zachodzących pod wpływem przyłożonych naprężeń rozciągających stosuje się modele bardziej złożone trzy-, cztero- i więcej parametrowe posiadające obydwie właściwości pozwalające na dokładniejsze odwzorowanie zachowania się materiału lepko-sprężystego. W miarę rozbudowy modeli mechanicznych wzrasta rząd równań stanu. Pociąga to za sobą coraz bardziej wydłużone rozwiązanie. Budowanie bardziej złożonych modeli mechanicznych nie nastręcza większych trudności, kłopoty rozpoczynają się dopiero przy rozwiązywaniu odpowiadających im równań stanu oraz wyznaczeniu wartości poszczególnych parametrów.

Modele reologiczne, które często stosowane są do opisu zjawisk zachodzących w materiałach włókienniczych poddanych odkształceniom są modele trójparametrowe

tw. standardowe pierwszego rodzaju, których schematy przedstawiono na rysunku 7.1a i 7.1b. Stanowią one połączenie równoległe modelu Maxwella i Hooke'a oraz połączenie szeregowe modelu Hooke'a i Kelvina – Voigta. Można wykazać, że ciała te są równoważne z punktu widzenia ich właściwości (przy odpowiednio dobranych parametrach), a ich równanie stanu wyraża się wzorem postaci:

$$a\sigma + a_1\dot{\sigma} = b\varepsilon + b_1\dot{\varepsilon} \quad (7.1)$$

W grupie modeli trójparametrowych standardowych znajdują się również modele drugiego rodzaju, mające charakter podobny do cieczy lepkiej z opóźnioną sprężystością [23, 87]. Tworzone są poprzez podstawienie w miejsce sprężyny o charakterystyce E w wariancie przedstawionym na rys. 7.1a tłumika (Rys. 7.1c) lub połączenie równoległe modelu Maxwella i Newtona (Rys. 7.1d).

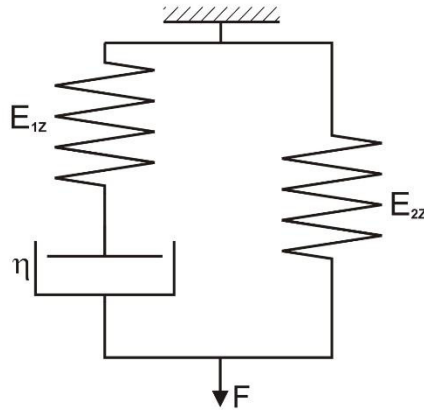


Rys. 7.1 Modele reologiczne trójparametrowe powstałe w wyniku połączenia: a) równoległego modelu Maxwella i Hooke'a – model Zenera, b) szeregowego modelu Hooke'a i Kelvina – Voigta - model Standardowy 2, c) równoległego modelu Maxwella i Newtona, d) szeregowego modelu Newtona i Kelvina – Voigta

Źródło [87]

Dobór modelu dla którego matematycznie zapisane związki naprężenia i odkształcenia będą w sposób najbardziej dokładny opisywały rzeczywiste zachowanie się badanego ciała w czasie jest trudny. Układy te zawierają szereg parametrów, które należy wyznaczyć, aby możliwie wiernie opisywały i odtwarzały uzyskane z doświadczeń krzywe. Do analizy zjawiska dynamicznego rozciągania nitek wybrano modele standardowe pierwszego rodzaju, które opisują zarówno proces pełzania jak i relaksacji, są określone przez minimalną liczbę parametrów materiałowych – lepkość materiału i charakterystyczny czas relaksacji (retardacji) [88].

7.1 Charakterystyka modelu standardowego trójpparametrowego 1, Zenera



Rys. 7.1.1 Model standardowy trójpparametrowy pierwszego rodzaju - model Zenera
Źródło: opracowanie własne

Równanie stanu

$$\frac{d\varepsilon}{dt} \cdot (E_{1Z} + E_{2Z}) \cdot \eta + \varepsilon \cdot E_{1Z} \cdot E_{2Z} = \eta \cdot \frac{dF}{dt} + E_{1Z} \cdot F \quad (7.2)$$

Rozwiązanie równania stanu dla warunku początkowego $t=0$, $F(0)=F_0$

$$F(t) = F_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{1Z} \cdot t}{\eta}\right) + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{1Z} \cdot t}{\eta}\right)\right) + E_{2Z} \cdot \varepsilon \quad (7.3)$$

dla $\frac{d\varepsilon}{dt} = \omega = \text{const.}$

$$F(t) = F_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{1Z} \cdot t}{\eta}\right) + \eta \cdot \omega \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{1Z} \cdot t}{\eta}\right)\right) + E_{2Z} \cdot \omega \cdot t \quad (7.4)$$

Współczynniki sprężystości wiąże równanie:

$$E_{1Z} = E_{dZ} - E_{2Z} \quad (7.5)$$

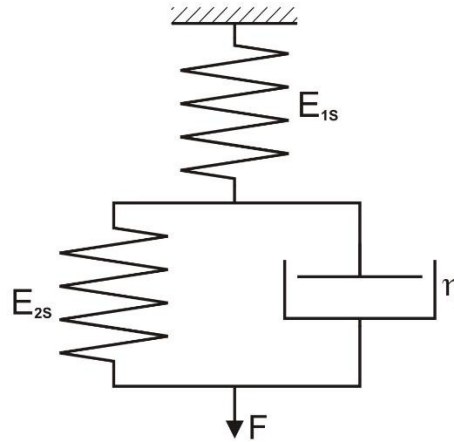
$$E_{2Z} = E_K \quad (7.6)$$

$$E_{1Z} = E_{dZ} - E_K \quad (7.7)$$

gdzie:

- E_{1Z}, E_{2Z} – współczynnik sprężystości dla modelu standardowego 1, Zenera,
- $\omega = d\varepsilon/dt$ – prędkość przyrostu wydłużenia względnego,
- η – współczynnik lepkości,
- ε – wydłużenie względne,
- F – siła,
- F_0 – napięcie wstępne,
- T – czas rozciągania,
- E_{dZ} – współczynnik sprężystości wyznaczony dla modelu Zenera przy dynamicznych obciążeniach nitki,
- E_K – współczynnik sprężystości statycznej.

7.2 Charakterystyka modelu Standardowego trójpparametrowego 2



Rys. 7.2.1 Model standardowy trójpparametrowy pierwszego rodzaju - model Standardowy 2
Źródło: opracowanie własne

Równanie stanu

$$(E_{1S} + E_{2S}) \cdot F + \eta \cdot \frac{dF}{dt} = E_{1S} \cdot E_{2S} \cdot \varepsilon + \eta \cdot E_{1S} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (7.8)$$

Ogólna postać równania stanu:

$$a_1 \cdot F + a_2 \cdot \frac{dF}{dt} = b_1 \cdot \varepsilon + b_2 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (7.9)$$

gdzie: $a_1 = E_{1S} + E_{2S}$, $a_2 = \eta$, $b_1 = E_{1S} \cdot E_{2S}$, $b_2 = \eta \cdot E_{1S}$

Rozwiązanie równania dla $t=0$, $F(0) = F_0$:

$$F(t) = F_0 \cdot \exp\left(-\frac{a_1}{a_2} \cdot t\right) + \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot \frac{(-b_1 \cdot a_2 + b_1 \cdot a_1 \cdot t + b_2 \cdot a_1)}{a_1^2} - \exp\left(-\frac{a_1}{a_2} \cdot t\right) \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot \frac{-b_1 \cdot a_2 + b_2 \cdot a_1}{a_1^2} \quad (7.10)$$

dla $\frac{d\varepsilon}{dt} = \omega = \text{const.}$

$$F(t) = F_0 \cdot \exp\left(-\frac{a_1}{a_2} \cdot t\right) + \omega \cdot \frac{-b_1 \cdot a_2 + b_1 \cdot a_1 \cdot t + a_1 \cdot b_2 + \exp\left(-\frac{a_1}{a_2} \cdot t\right) \cdot b_1 \cdot a_2 - \exp\left(-\frac{a_1}{a_2} \cdot t\right) \cdot b_2 \cdot a_1}{a_1^2} \quad (7.11)$$

Współczynniki sprężystości E_{1S} , E_{2S} , E_K wiąże równanie:

$$\frac{1}{E_K} = \frac{1}{E_{1S}} + \frac{1}{E_{2S}} \quad (7.12)$$

$$E_{1S} = E_{dS} \quad (7.13)$$

stąd:

$$E_{2S} = \frac{E_K \cdot E_{1S}}{E_{1S} - E_K} \text{ lub } E_{2S} = \frac{E_K \cdot E_{dS}}{E_{dS} - E_K} \quad (7.14)$$

gdzie:

E_{1S}, E_{2S}	– współczynnik sprężystości dla modelu Standardowego 2,
$\omega = d\varepsilon/dt$	– prędkość przyrostu wydłużenia względnego,
η	– współczynnik lepkości,
ε	– wydłużenie względne,
F	– siła,
F_0	– napięcie wstępne,
T	– czas rozciągania,
a_1, a_2, b_1, b_2	– współczynniki w równaniu modelu Standardowego 2,
E_{dS}	– współczynnik sprężystości wyznaczony dla modelu Standardowego 2 przy dynamicznych obciążeniach nitki,
E_K	– współczynnik sprężystości statycznej.

8. WYZNACZENIE STAŁYCH WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW SPRĘŻYSTOŚCI I WSPÓŁCZYNNIKA LEPKOŚCI

W celu przeprowadzenia analizy wrażliwości modeli reologicznych procesu rozciągania nitek na parametry wejściowe wyznaczono stałe wartości współczynników sprężystości statycznej E_K , sprężystości przy dynamicznych obciążeniach nitki E_{dZ} i E_{dS} oraz współczynnika lepkości η .

Ponadto dla każdego z wariantów obliczono prędkość przyrostu wydłużenia względnego ω oraz określono rzeczywisty czas trwania procesu dynamicznego rozciągania przędzy t . Zdecydowano, iż górną wartość przyjętego przedziału czasu rozciągania nitki stanowić będzie jego maksymalna wartość.

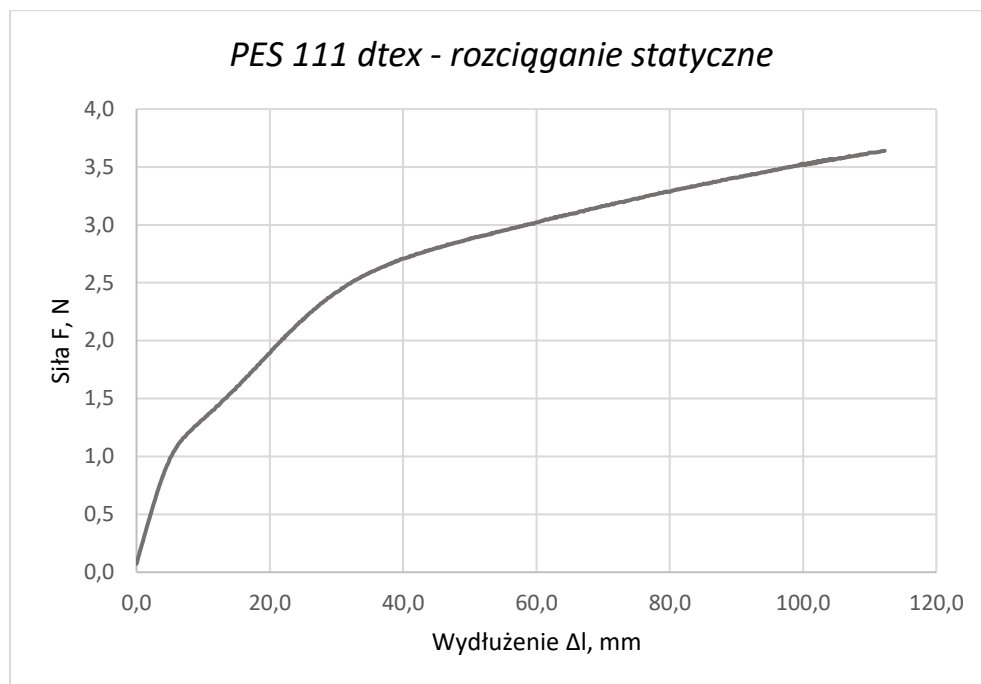
8.1 Wyznaczenie współczynnika sprężystości statycznej E_K

Do wyznaczenia współczynnika sprężystości statycznej E_K przy prędkości rozciągania nitki $d\varepsilon/dt \rightarrow 0$ wykorzystane w badaniach przędzy poddano procesowi rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Hounsfield model H50K-S.

Parametry procesu rozciągania:

- prędkość rozciągania 2 mm/min,
- długość rozciąganego odcinka przędzy 500 mm,
- napięcie wstępne - dla każdej z przędzy przeliczono wartość napięcia wstępnego przyjmując obciążenie wstępne 0,5 cN/tex.

Dla każdej z przędzy wykonano pięć pomiarów. Otrzymane wyniki uśredniono. Przykładowy wykres zależności siły w funkcji wydłużenia dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex przedstawiono na rysunku 8.1.1. Pozostałe wykresy zamieszczono w Załączniku 4.



Rys. 8.1.1 Charakterystyka rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$, $l = 500 \text{ mm}$

Źródło: opracowanie własne

Uzyskane w procesie rozciągania krzywe przedstawiono w postaci charakterystyk siły w funkcji odkształcenia $F = f(\epsilon)$. W celu wyznaczenia wartości współczynnika sprężystości przeprowadzono styczne do wykresu. Przebieg krzywych rozciągania pozwolił na poprowadzenie trzech stycznych, a tym samym na otrzymanie trzech wartości współczynnika sprężystości E_{K1} , E_{K2} i E_{K3} obliczonego ze wzoru:

$$E_K = \frac{\Delta F_i}{\Delta \epsilon_i} \quad (8.1)$$

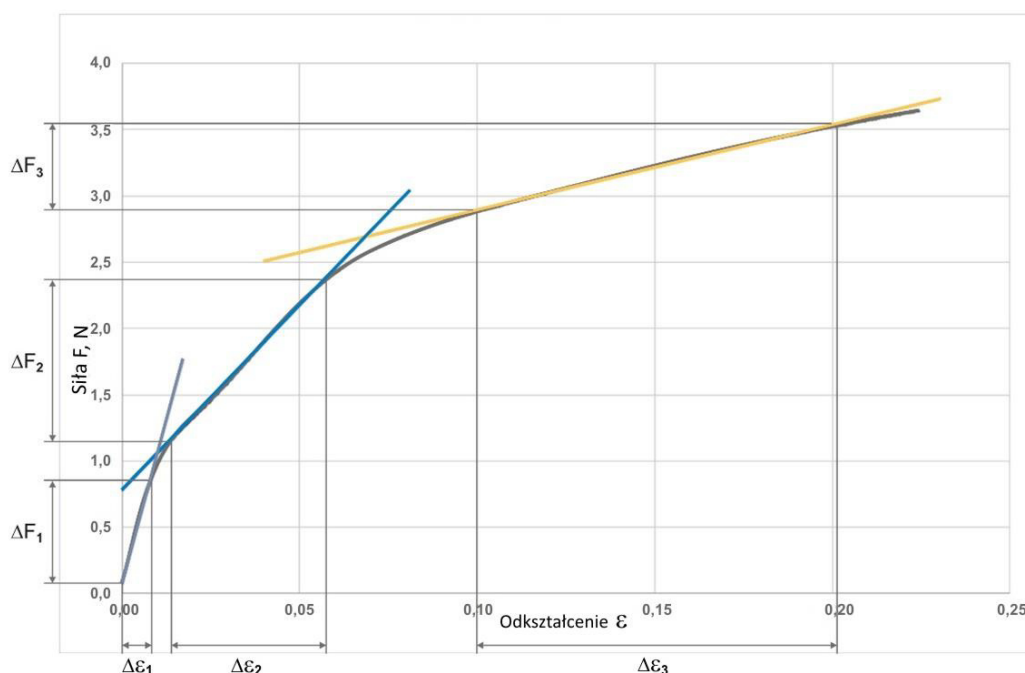
gdzie:

ΔF_i – zmiana siły dla i -tej stycznej, N,

$\Delta \epsilon_i$ – zmiana odkształcenia dla i -tej stycznej.

Przykładowy wykres dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex z naniesionymi stycznymi pozwalającymi na wyznaczenie E_{K1} , E_{K2} i E_{K3} przedstawiono na rysunku 8.1.6. Pozostałe wykresy zamieszczono w Załączniku 5.

PES 111 dtex – rozciąganie statyczne



Rys. 8.1.6 Wykres rozciągania dla przędzy PES 111 dtex z naniesionymi stycznymi
Źródło: opracowanie własne

Dla pięciu przędz stanowiących materiał badań wartość współczynnika sprężystości statycznej zmienia się w przedziale $E_K = 3 \div 140$ N.

8.2 Wyznaczenie współczynnika sprężystości E_d przy dynamicznych obciążeniach nitki

Współczynnik sprężystości przy dynamicznych obciążeniach nitki wyznaczono z następujących zależności:

- model Zenera

$$E_{dZ} = \frac{F_{max}}{\varepsilon} - E_K, \text{ N} \quad (8.2)$$

- model Standardowy 2

$$E_{dS} = \frac{F_{max}}{\varepsilon}, \text{ N} \quad (8.3)$$

gdzie:

F_{max} – siła maksymalna, N,

ε – odkształcenie, $\varepsilon = \Delta l / l$ (Δl – wydłużenie określone dla każdego z wariantów podczas dynamicznego rozciągania nitek w mm, l – długość rozciąganego odcinka przędzy w mm),

E_K – współczynnik sprężystości statycznej, N.

Wartości siły maksymalnej oraz odkształcenia odczytano z wykresów otrzymanych podczas dynamicznego rozciągania przędzy przedstawionych w postaci charakterystyk siły w funkcji odkształcenia. W równaniu (8.2) w miejsce E_K podstawiono wartości współczynnika sprężystości dla poszczególnych przędz mieszczące się w określonym wcześniej przedziale.

Wartości współczynników sprężystości wyznaczone podczas dynamicznego obciążenia nitki wyliczone ze wzoru odpowiedniego dla danego modelu reologicznego zawierają się w następujących przedziałach:

- $E_{dZ} = 3 \div 80$ N – model Zenera,
- $E_{dS} = 3 \div 90$ N – model Standardowy 2.

8.3 Wyznaczanie współczynnika lepkości

Współczynnik lepkości η dla modelu Zenera i Standardowego 2 obliczono ze wzoru:

$$\eta = \frac{F_{\max}}{\omega} - \frac{E_K \cdot \epsilon}{\omega}, Ns \quad (8.4)$$

gdzie:

$F_{\max}$ – siła maksymalna, N,

E – odkształcenie,

E_K – współczynnik sprężystości statycznej, N,

ω – prędkość przyrostu wydłużenia względnego, 1/s;

$\omega = \epsilon/t$ (gdzie t – czas rozciągania, s).

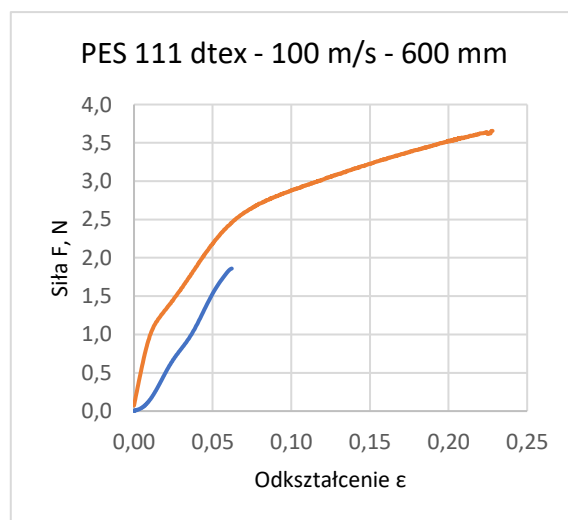
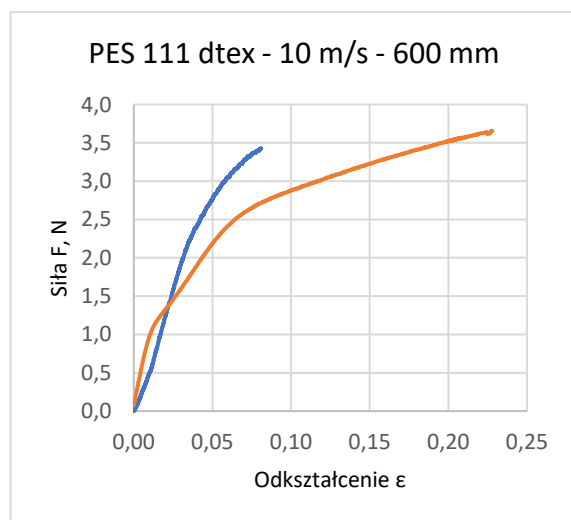
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń współczynnik lepkości przyjmuje wartości z przedziału $\eta = 0,05 \div 0,30$ Ns.

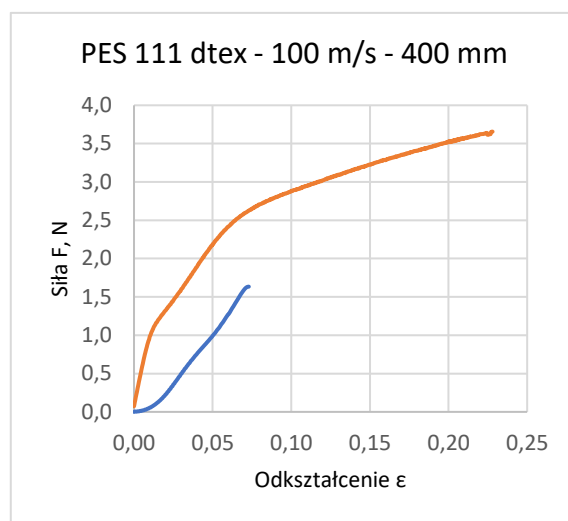
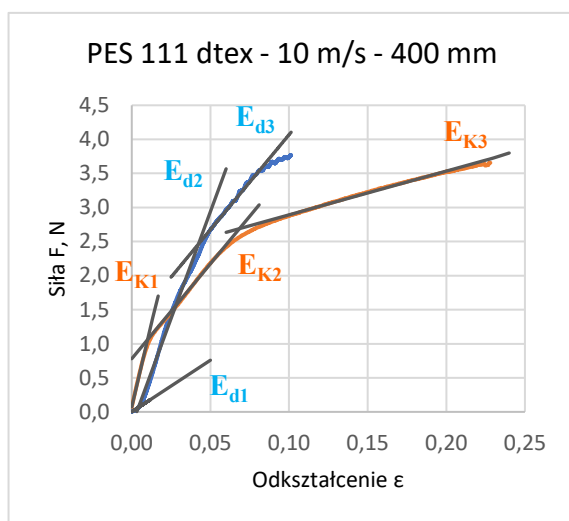
Z wyliczonego zbioru wartości prędkości przyrostu wydłużenia względnego wyznaczono jej najmniejszą $\omega = 10$ 1/s i największą wartość $\omega = 500$ 1/s.

W celu przeprowadzenia w dalszej części pracy oceny wrażliwości modeli reologicznych procesu rozciągania nitek Zenera i Standardowego 2 na parametry wejściowe ustalono zakres czasu $t = 0 \div 0,02$ s odpowiadający czasom uzyskanym podczas procesu dynamicznego rozciągania przędzy.

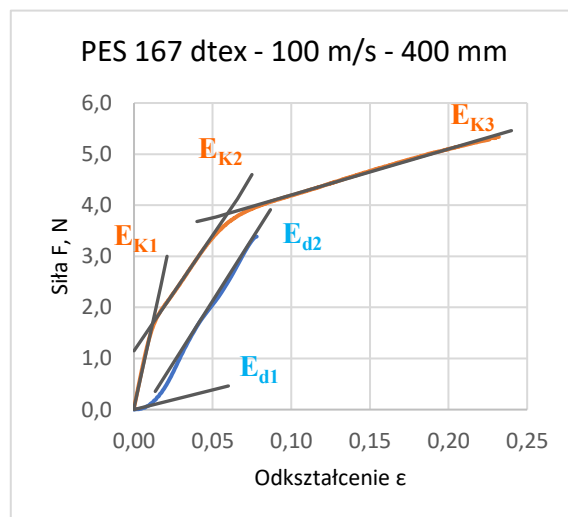
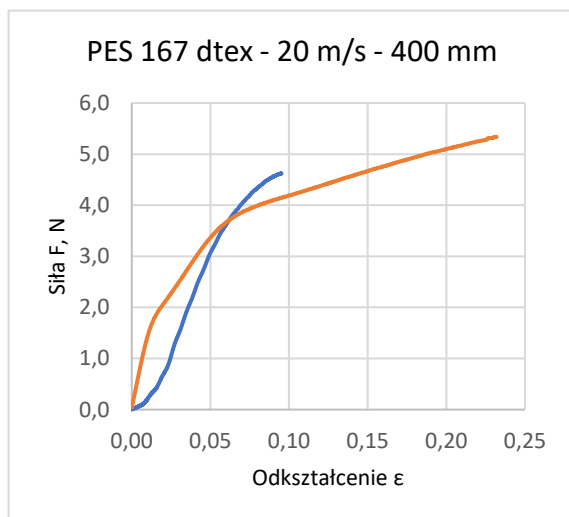
8.4 Analiza porównawcza charakterystyk statycznego i dynamicznego rozciągania nitek

Na podstawie przeprowadzonych badań statycznego i dynamicznego rozciągania nitek dokonano porównania otrzymanych charakterystyk siły w funkcji odkształcenia dla wybranych wariantów pomiarów.





$E_{K1} = 98,17 \text{ N}$, $E_{K2} = 27,89 \text{ N}$, $E_{K3} = 6,42 \text{ N}$
 $E_{d1} = 15,17 \text{ N}$, $E_{d2} = 62,79 \text{ N}$, $E_{d3} = 27,89 \text{ N}$

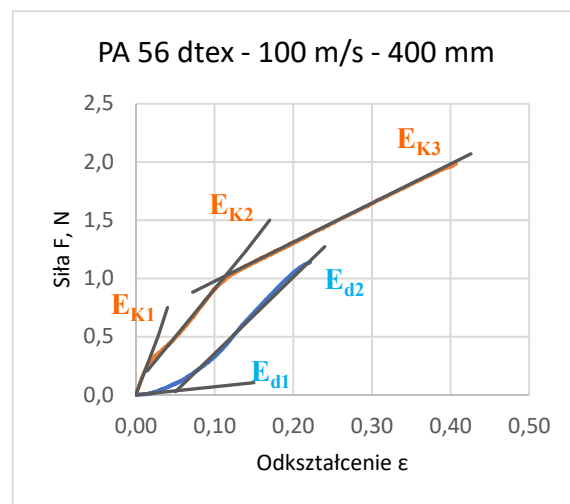
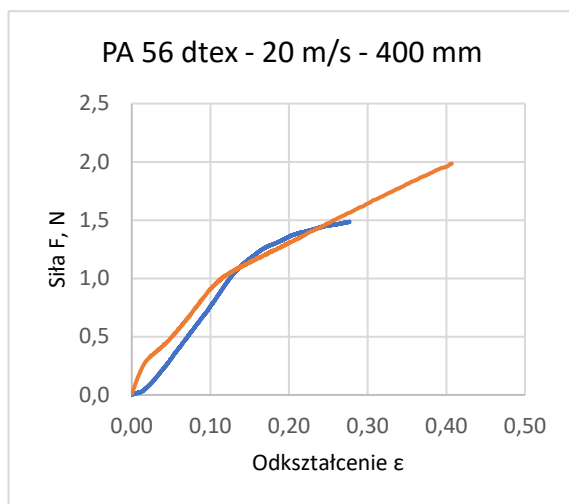


$E_{K1} = 143,02 \text{ N}$, $E_{K2} = 45,21 \text{ N}$, $E_{K3} = 9,00 \text{ N}$
 $E_{d1} = 7,70 \text{ N}$, $E_{d2} = 48,55 \text{ N}$

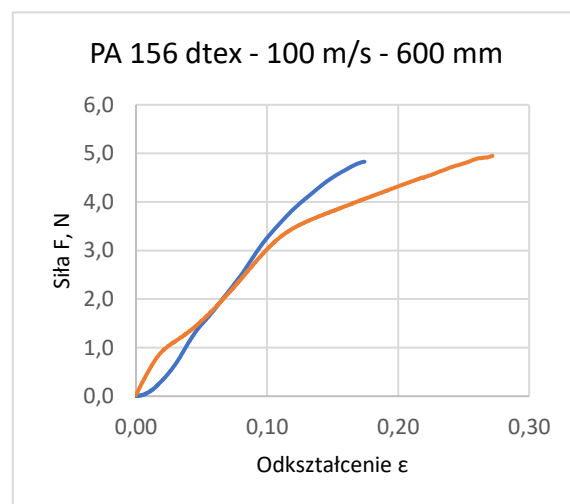
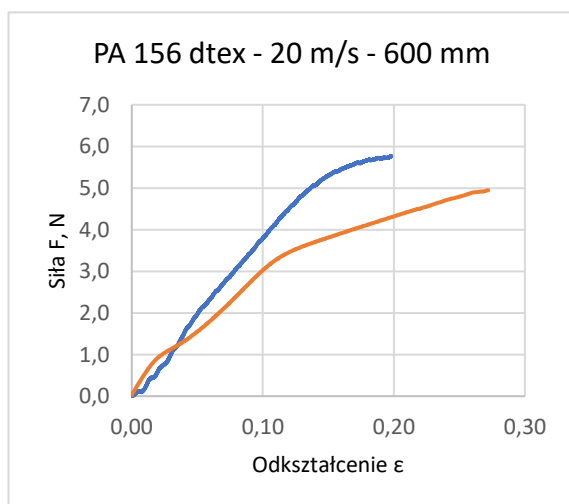
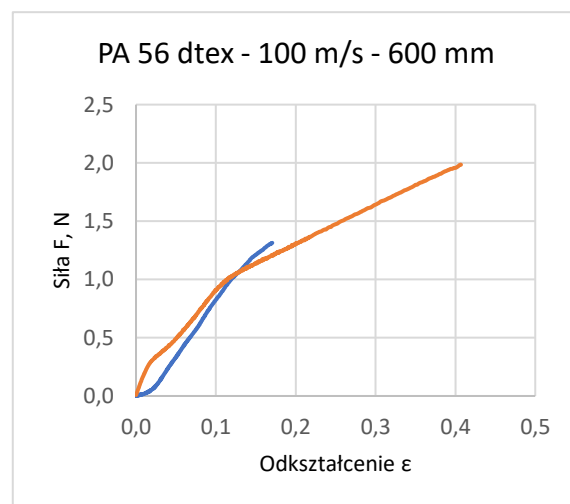
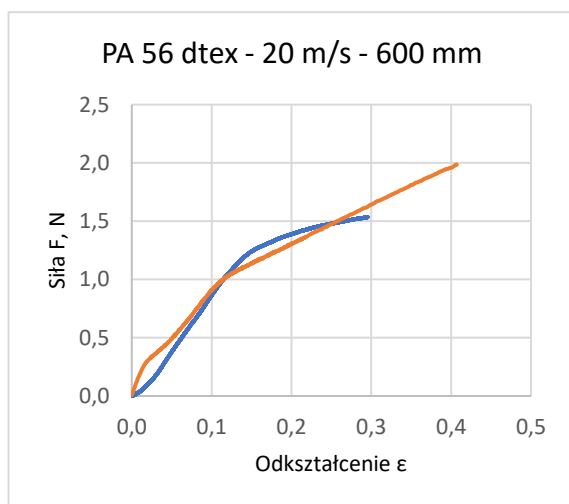
— dynamiczne — statyczne

Rys. 8.4.1 Porównanie charakterystyk siły w funkcji odkształcenia dla wybranych wariantów pomiarów przędzy poliestrowych otrzymanych podczas statycznego i dynamicznego rozciągania

Źródło: opracowanie własne



$E_{K1} = 17,60 \text{ N}$, $E_{K2} = 8,20 \text{ N}$, $E_{K3} = 3,35 \text{ N}$
 $E_{d1} = 0,70 \text{ N}$, $E_{d2} = 6,55 \text{ N}$



— dynamiczne — statyczne

Rys. 8.4.2 Porównanie charakterystyk siły w funkcji odkształcenia dla wybranych wariantów pomiarów przędzy poliamidowych otrzymanych podczas statycznego i dynamicznego rozciągania

Źródło: opracowanie własne

W wyniku analizy porównawczej charakterystyk naprężeń dynamicznych i statycznych wykazano znaczące różnice (jakościowe) w przebiegu krzywych siły w funkcji odkształcenia oraz wartościach sił i wydłużeń zrywających. Wydłużenie względne przy dynamicznym rozciąganiu przędzy poliestrowych jest średnio o około 2,8 razy mniejsze przy zerwaniu w stosunku do wydłużenia uzyskanego przy rozciąganiu statycznym, natomiast dla przędzy poliamidowych jest mniejsze średnio o 1,7 raza. Niższe wartości sił średnio o około 1,5 raza odnotowano podczas rozciągania dynamicznego zarówno w przypadku przędzy poliestrowych jak i poliamidowych. Dla dwóch spośród przeanalizowanych przypadków odnotowano wzrost siły podczas dynamicznego rozciągania.

W drugim etapie analizie (ilościowej) poddano wartości modułów sprężystości budując graficznie styczne do krzywych w odpowiednich przedziałach odkształceń. Charakter przebiegu krzywych otrzymanych w wyniku poddania przędzy procesowi rozciągania na maszynie wytrzymałościowej pozwala na poprowadzenie trzech stycznych, a tym samym na otrzymanie trzech wartości współczynnika sprężystości E_{K1} , E_{K2} i E_{K3} . W przypadku charakterystyk przedstawiających dynamiczny proces rozciągania możemy wyznaczyć dwie lub trzy styczne w zależności od rozpatrywanego wariantu, co pozwala na obliczenie dwóch lub trzech wartości współczynnika sprężystości dynamicznej E_d . Na podstawie porównania przedstawionych powyżej wykresów można stwierdzić, że różnice w przyrostach siły w czasie mają istotny wpływ na wartości modułu sprężystości nitki. Największe różnice odnotowano w wartościach modułu początkowego, który jest znacząco większy, nawet o 25 razy, w przypadku statycznego rozciągania nitki, w stosunku do wartości początkowego modułu sprężystości obliczonego dla maksymalnej prędkości rozciągania wynoszącej 100 m/s.

Rozpatrując otrzymane wartości modułu sztywności statycznej wyznaczonego dla ustalonych przedziałów odkształceń zauważyć można spadek jego wartości wraz ze wzrostem czasu rozciągania nitek.

Wzrost wartości współczynnika sprężystości dynamicznej odnotowano dla przeanalizowanych wariantów pomiarów wykonanych dla prędkości 100 m/s począwszy od początkowej wartości modułu sztywności. Dla niniejszych przypadków zaobserwowano niewielkie różnice w wartościach współczynników E_{K2} i E_{d2} . Inaczej sytuacja przedstawia się dla mniejszej prędkości rozciągania 10 m/s, gdzie nastąpił dwukrotny wzrost E_{d2} w stosunku do E_{K2} .

Wyniki przeprowadzonej analizy dowodzą odmienności jakościowej i ilościowej charakterystyk procesu rozciągania nitek w warunkach statycznych i dynamicznych. Przyjęcie nieliniowych parametrów opisujących proces rozciągania tekstyliów jest jedyną słuszną drogą ich identyfikacji w ujęciu mechanicznym.

9. WRAŻLIWOŚĆ MODELI REOLOGICZNYCH PROCESU ROZCIĄGANIA NA PARAMETRY WEJŚCIOWE

Analizę wykonano dla następujących przedziałów wartości poszczególnych parametrów wejściowych:

- współczynnik lepkości $\eta = 0,05 \div 0,30$ Ns,
- współczynnik sprężystości statycznej $E_K = 3 \div 70$ N,
- współczynnik sprężystości wyznaczony podczas dynamicznego obciążenia nitki wyliczony ze wzoru odpowiedniego dla danego modelu reologicznego:
 $E_{dZ} = 4 \div 80$ N - model Zenera,
 $E_{dS} = 3 \div 90$ N - model Standardowy 2.

Zależności $F = f(t)$ wykonano dla dwóch wartości prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10 \text{ 1/s}$ i $\omega = 500 \text{ 1/s}$ oraz dla czasu $t = 0 \div 0,02 \text{ s}$.

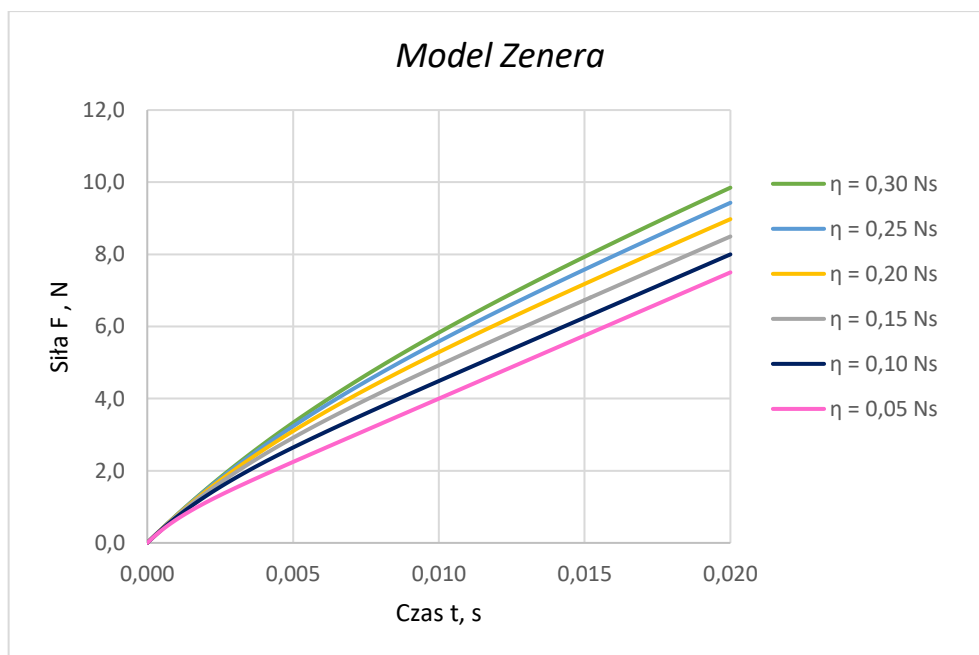
9.1 Model Zenera

Rozwiązanie równania stanu dla modelu Zenera przyjmuje postać:

$$F(t) = F \cdot e^{-E_1 \frac{t}{\eta}} + \eta \cdot \omega \cdot \left(1 - e^{-E_1 \frac{t}{\eta}}\right) + E_2 \cdot \omega \cdot t \quad (9.1)$$

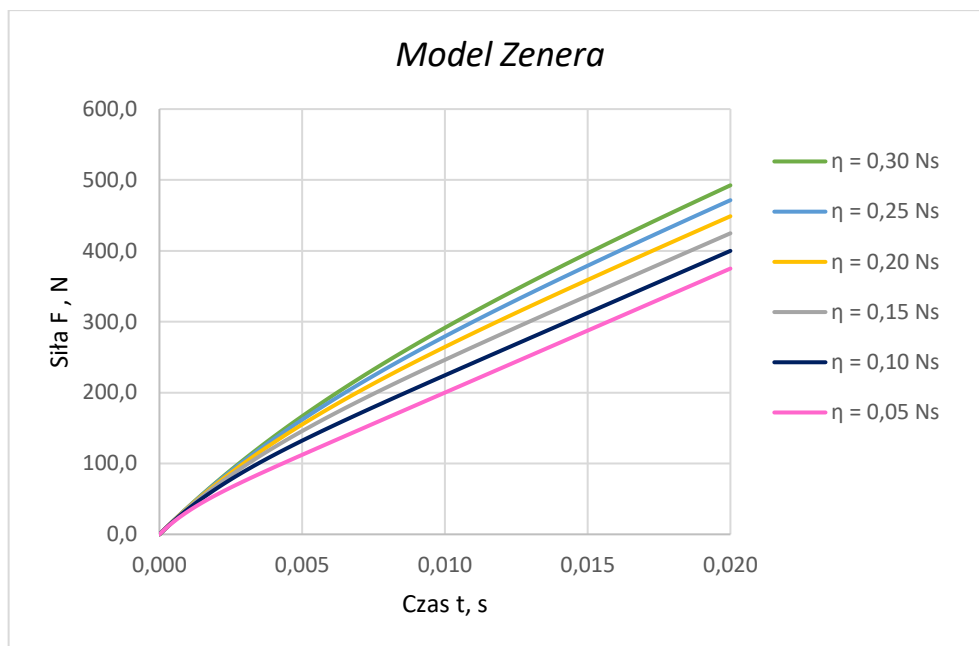
Dla pierwszego kroku analizy przyjęto następujące dane wejściowe: $F = 0$, $E_1 = 45 \text{ N}$, $E_2 = 35 \text{ N}$, $\eta = 0,05 \text{ Ns}$. W kolejnych pięciu krokach zwiększano krotność podstawowej wartości lepkości do $\eta = 0,30 \text{ Ns}$. Na podstawie otrzymanych zależności wykonano charakterystyki $F = f(t)$ modelu Zenera przedstawione na rysunkach 9.1.1 i 9.1.2.

Pierwszy z wykresów wykonano dla prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10 \text{ 1/s}$, drugi dla $\omega = 500 \text{ 1/s}$. Charakter i zmienność krzywych jest taka sama w obu przypadkach, różnice występują w wartości siły maksymalnej, która jest znacznie większa dla $\omega = 500 \text{ 1/s}$ i dochodzi do 492 N. Różnice między wartościami siły dla kolejnych krzywych są niewielkie.



Rys. 9.1.1 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Zenera dla współczynnika lepkości $\eta = 0,05 \div 0,30 \text{ Ns}$ i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10 \text{ 1/s}$

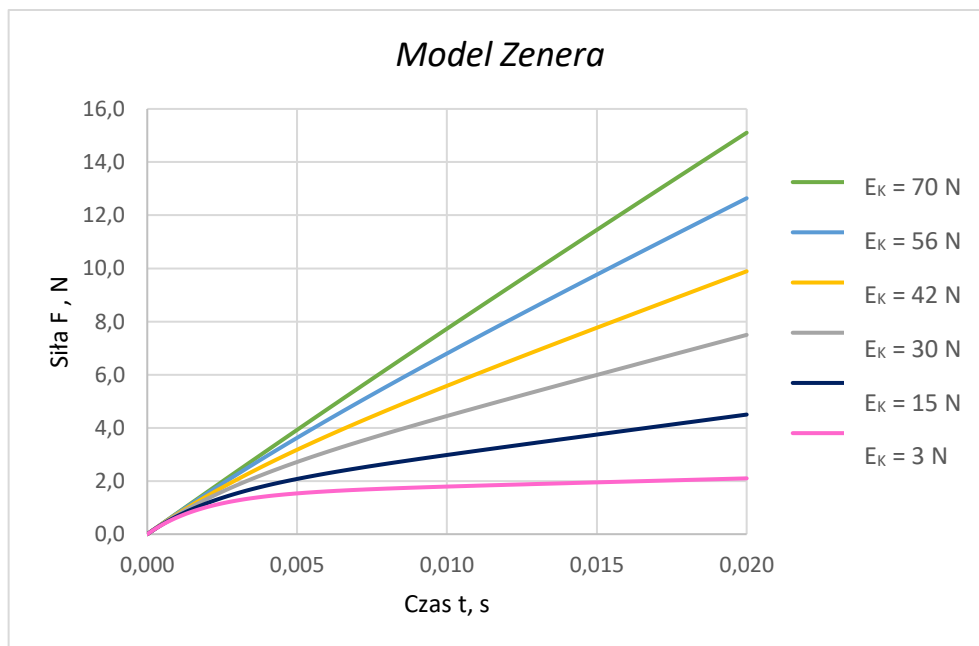
Źródło: opracowanie własne



Rys. 9.1.2 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Zenera dla współczynnika lepkości $\eta = 0,05 \div 0,30 \text{ Ns}$ i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 500 \text{ 1/s}$

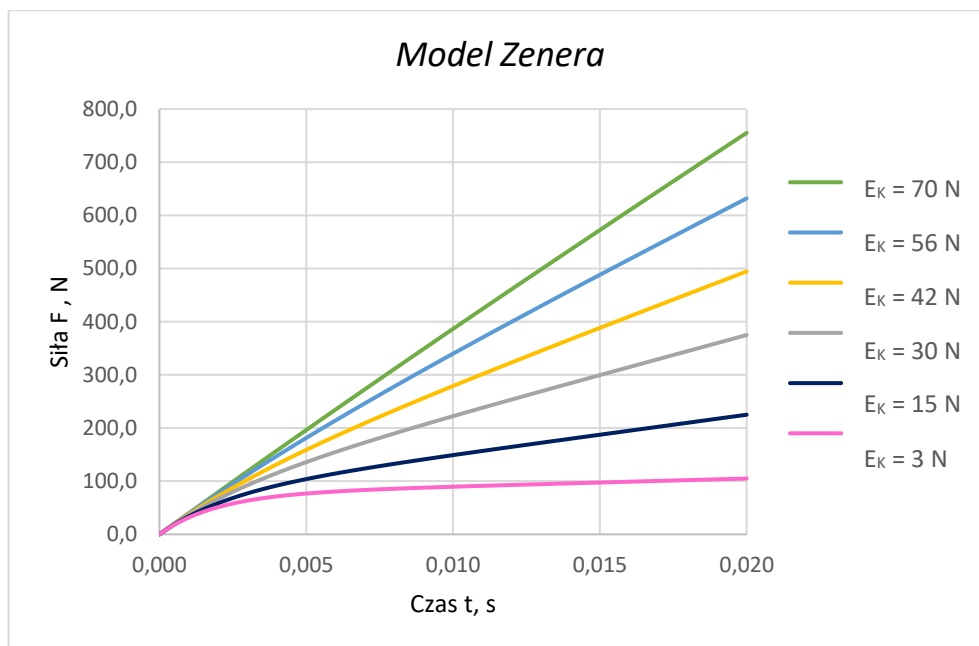
Źródło: opracowanie własne

Kolejne wykresy (Rys. 9.1.3 i 9.1.4) przedstawiają zależność $F = f(t)$ dla współczynnika sprężystości statycznej E_K . Podobnie jak dla dwóch pierwszych charakterystyk po przyjęciu dla pierwszego kroku danych: $F = 0$, $E_1 = 77 \text{ N}$, $E_{2Z} = 3 \text{ N}$, $\eta = 0,15 \text{ N}$ w kolejnych pięciu zwiększano krotność E_K do 70 N . W obu przypadkach układ jest podatny na zmiany współczynnika w zakresie $E_K = 3 \div 70 \text{ N}$. Zachowanie się modelu zarówno dla $\omega = 10 \text{ 1/s}$ i $\omega = 500 \text{ 1/s}$ jest podobne. Wykresy różnią się maksymalną wartością siły, która dla $\omega = 500 \text{ 1/s}$ i $E_K = 70 \text{ N}$ dochodzi do 755 N .



Rys. 9.1.3 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Zenera dla współczynnika sprężystości podczas kinematycznego wymuszenia $E_K = 3 \div 70 \text{ N}$ i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10 \text{ 1/s}$

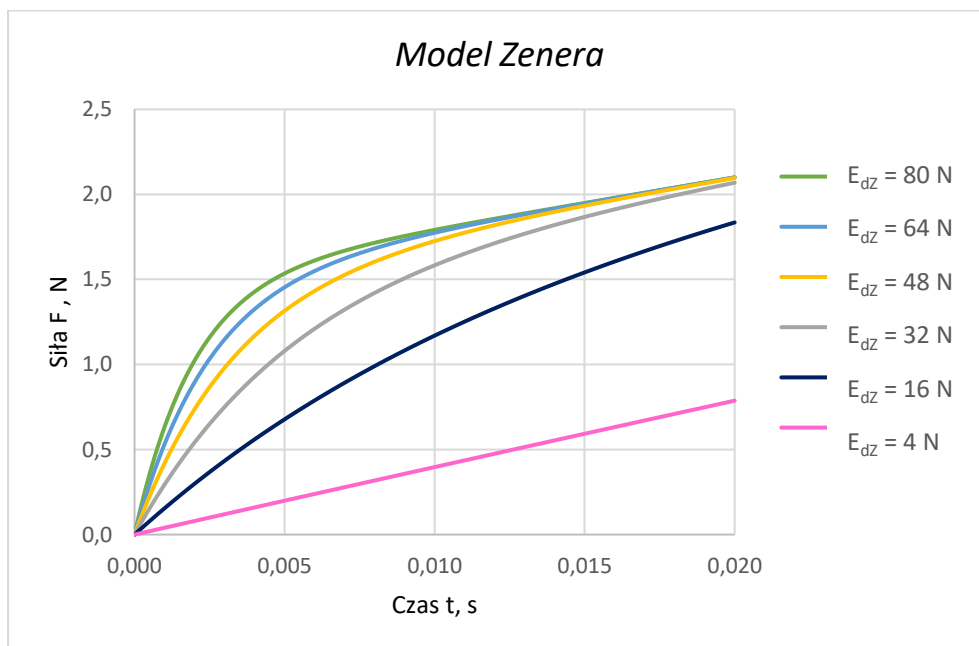
Źródło: opracowanie własne



Rys. 9.1.4 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Zenera dla współczynnika sprężystości podczas kinematycznego wymuszenia $E_k = 3 \div 70$ N i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 500$ 1/s

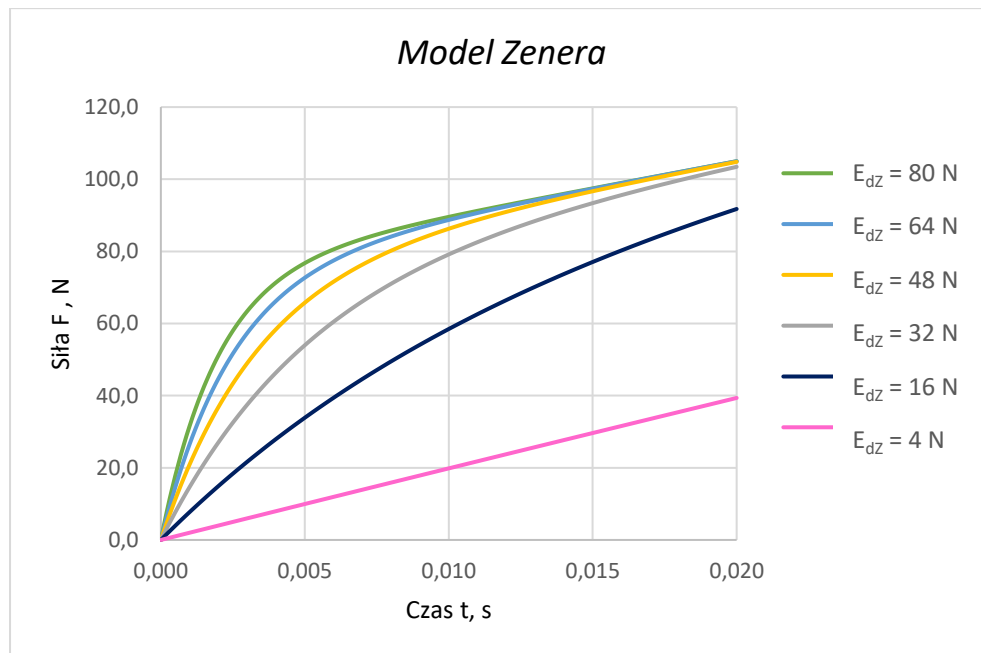
Źródło: opracowanie własne

Ostatnie dwa wykresy (Rys. 9.1.5 i 9.1.6) obrazują podatność modelu Zenera przy zmienności współczynnika sprężystości wyznaczonego przy dynamicznych obciążeniach nitki $E_{dZ} = 4 \div 80$ N. Zachowanie się modelu dla $\omega = 10$ 1/s i $\omega = 500$ 1/s jest podobne. Istotne zmiany widoczne są w zakresie $E_{dZ} = 4 \div 32$ N. Wraz ze zwiększaniem jego wartości różnice między wartościami siły dla kolejnych krzywych zmniejszają się. Analogicznie do poprzednich wykresów zaobserwować można różnice w wartości siły maksymalnej, która jest większa dla $\omega = 500$ 1/s i dochodzi do 105 N.



Rys. 9.1.5 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Zenera dla współczynnika sprężystości wyznaczonego podczas dynamicznych obciążeń nitki $E_{dZ} = 4 \div 80$ N i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10$ 1/s

Źródło: opracowanie własne



Rys. 9.1.6 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Zenera dla współczynnika sprężystości wyznaczonego podczas dynamicznych obciążeń nitki $E_{dz} = 4 \div 80 \text{ N}$ i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 500 \text{ 1/s}$

Źródło: opracowanie własne

Podsumowując współczynnik lepkości η w niewielkim stopniu wpływa na charakterystyki modelu Zenera. Układ reaguje na zmiany wartości współczynnika sprężystości statycznej oraz współczynnika sprężystości wyznaczonego przy dynamicznych obciążeniach nitki w zakresie $E_{dz} = 4 \div 32 \text{ N}$.

9.2 Model Standardowy 2

Rozwiązanie równania stanu dla rozpatrywanego modelu przyjmuje postać:

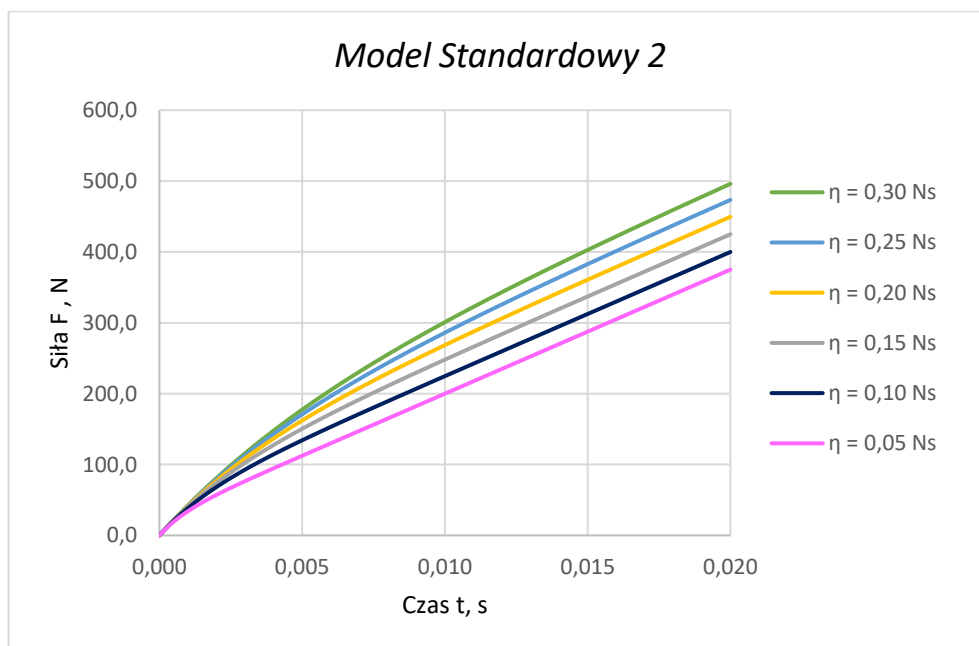
$$F(t) = F \cdot e^{\left(-a_1 \frac{t}{a_2}\right)} + \omega \cdot \frac{\left(-b_1 \cdot a_2 + b_1 \cdot a_1 \cdot t + a_1 \cdot b_2 + e^{\left(-a_1 \frac{t}{a_2}\right)} \cdot b_1 \cdot a_2 - e^{\left(-a_1 \frac{t}{a_2}\right)} \cdot b_2 \cdot a_1\right)}{a_1^2} \quad (9.2)$$

$$\begin{aligned} \text{gdzie:} \quad a_1 &= E_{1S} + E_{2S} & a_2 &= \eta \cdot \frac{a_1}{E_{1Z}} \\ b_1 &= E_{1S} \cdot E_{2S} & b_2 &= a_2 \cdot E_{1S} \end{aligned}$$

Dla pierwszego kroku analizy przyjęto następujące dane wejściowe: $F = 0$, $E_{1S} = 90 \text{ N}$, $E_{2S} = 57 \text{ N}$, $E_{1Z} = 55 \text{ N}$, $E_{2Z} = 35 \text{ N}$, $\eta = 0,05 \text{ Ns}$. W kolejnych pięciu krokach zwiększano krotność podstawowej wartości współczynnika lepkości do $\eta = 0,30 \text{ Ns}$. Charakterystyki przedstawione na rysunkach 9.2.1 i 9.2.2 wykonano dla dwóch wartości prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10 \text{ 1/s}$ i $\omega = 500 \text{ 1/s}$. Zachowanie się modelu w obu przypadkach jest identyczne, wykresy różnią się maksymalną wartością siły, która przyjmuje wyższe wartości dochodzące do 496 N dla $\omega = 500 \text{ 1/s}$.



Rys. 9.2.1 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Standardowego 2 dla współczynnika lepkości $\eta = 0,05 \div 0,30 \text{ Ns}$ i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10 \text{ 1/s}$
Źródło: opracowanie własne



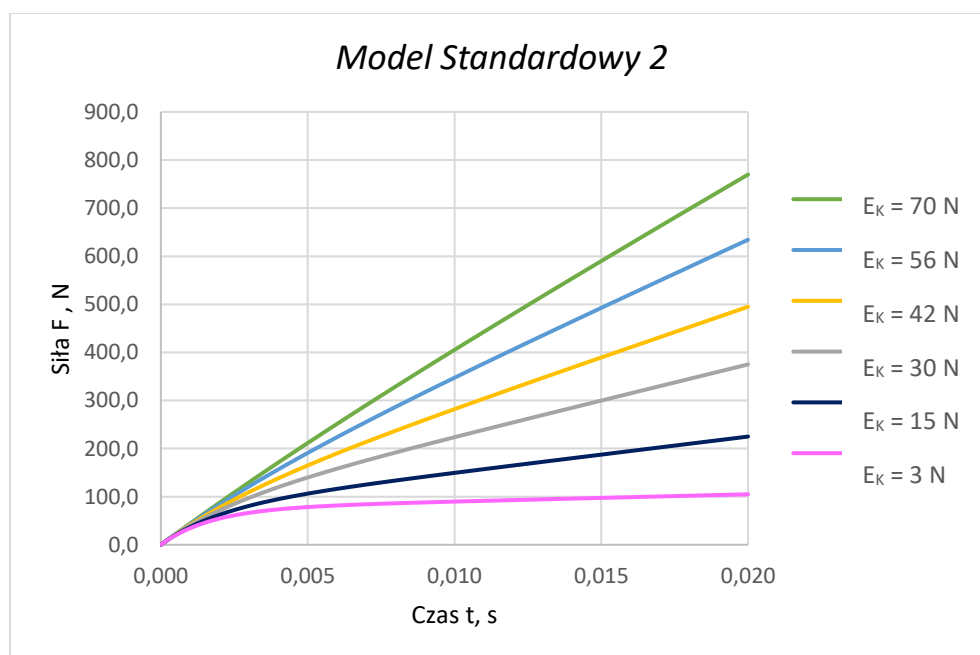
Rys. 9.2.2 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Standardowego 2 dla współczynnika lepkości $\eta = 0,05 \div 0,30 \text{ Ns}$ i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 500 \text{ 1/s}$
Źródło: opracowanie własne

Na wykresach 9.2.3 i 9.2.4 przedstawiono zależność siły w funkcji współczynnika sprężystości statycznej $E_k = 3 \div 70 \text{ N}$. Po przyjęciu dla pierwszego kroku następujących danych: $F = 0$, $E_{1S} = 90 \text{ N}$, $E_{2S} = 3 \text{ N}$, $E_{1Z} = 87 \text{ N}$, $E_{2Z} = 3 \text{ N}$, $\eta = 0,15 \text{ Ns}$, w kolejnych pięciu zwiększano krotność podstawowej wartości E_k do 70 N . Charakterystyki wykonano dla dwóch wartości prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10 \text{ 1/s}$ i $\omega = 500 \text{ 1/s}$. Analogicznie do poprzednich wykresów zaobserwować można różnice w wartości siły maksymalnej, która jest większa dla $\omega = 500 \text{ 1/s}$ i dochodzi do 770 N . Model jest podatny na zmianę współczynnika E_k .



Rys. 9.2.3 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Standardowego 2 dla współczynnika sprężystości podczas kinematycznego wymuszenia $E_K = 3 \div 70$ N i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10$ 1/s

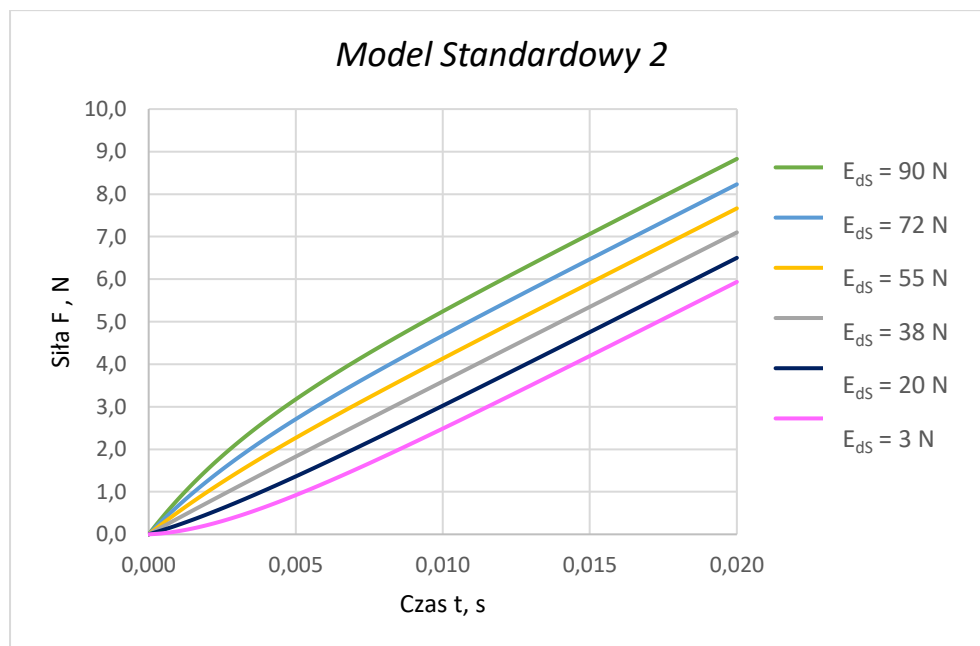
Źródło: opracowanie własne



Rys. 9.2.4 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Standardowego 2 dla współczynnika sprężystości podczas kinematycznego wymuszenia $E_K = 3 \div 70$ N i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 500$ 1/s

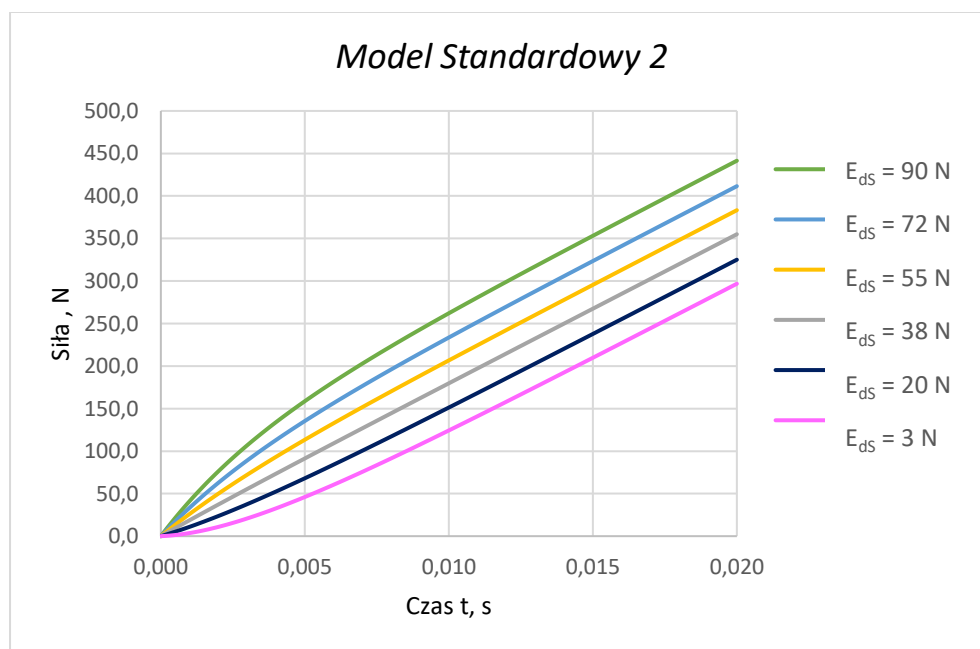
Źródło: opracowanie własne

Ostatnie dwa wykresy (Rys. 9.2.5 i 9.2.6) obrazują zależności siły w funkcji E_{dS} . Oba wykresy różnią się jedynie maksymalną wartością siły, która dla $\omega = 10$ 1/s wynosi 8,8 N, a dla $\omega = 500$ 1/s osiąga wartość 441 N. Model wykazuje niewielką podatność na zmiany współczynnika E_{dS} .



Rys. 9.2.5 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Standardowego 2 dla współczynnika sprężystości wyznaczonego podczas dynamicznych obciążeń nitki $E_{ds} = 3 \div 90 \text{ N}$ i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 10 \text{ 1/s}$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 9.2.6 Charakterystyki $F = f(t)$ modelu Standardowego 2 dla współczynnika sprężystości wyznaczonego podczas dynamicznych obciążeń nitki $E_{ds} = 3 \div 90 \text{ N}$ i prędkości przyrostu wydłużenia względnego $\omega = 500 \text{ 1/s}$

Źródło: opracowanie własne

Podsumowując model Standardowy 2 wykazuje największą podatność na zmiany współczynnika E_K . Nieznaczne różnice krzywych zauważalne są przy zmianie współczynnika E_{ds} i współczynnika lepkości η .

Reasumując:

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że zarówno model Zenera jak i model Standardowy 2 są najbardziej wrażliwe na zmianę współczynnika sprężystości statycznej E_K ,

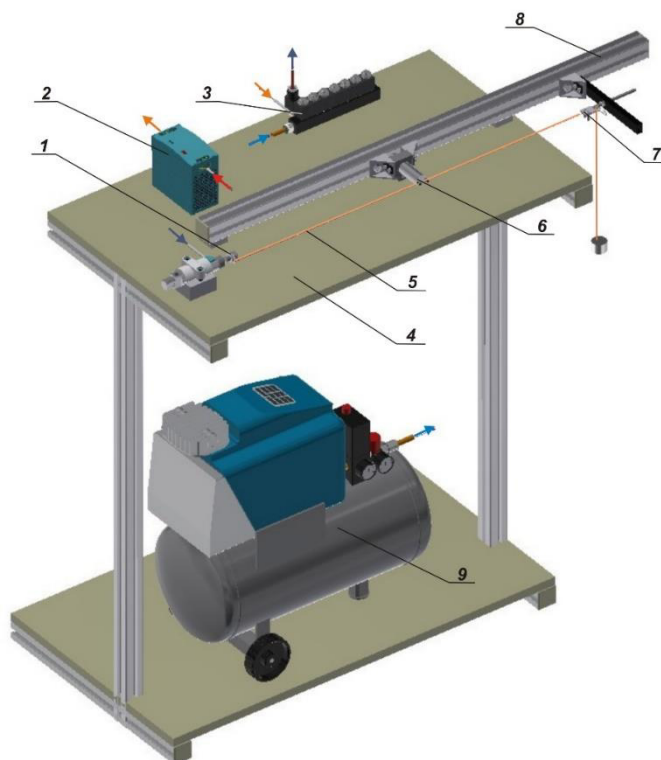
natomiast wykazują niewielką podatność na zmianę współczynnika lepkości η . Ponadto model Zenera reaguje na zmiany współczynnika sprężystości dynamicznej w zakresie wartości $E_{dZ} = 4 \div 32 \text{ N}$.

10. BUDOWA PRZYRZĄDU DO WYZNACZENIA WSPÓŁCZYNNIKA LEPKOŚCI POPRZECZ POMIAR SIŁ PODCZAS RELAKSACJI NAPRĘŻEŃ W NITKACH

10.1 Budowa i opis stanowiska do pomiaru sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach

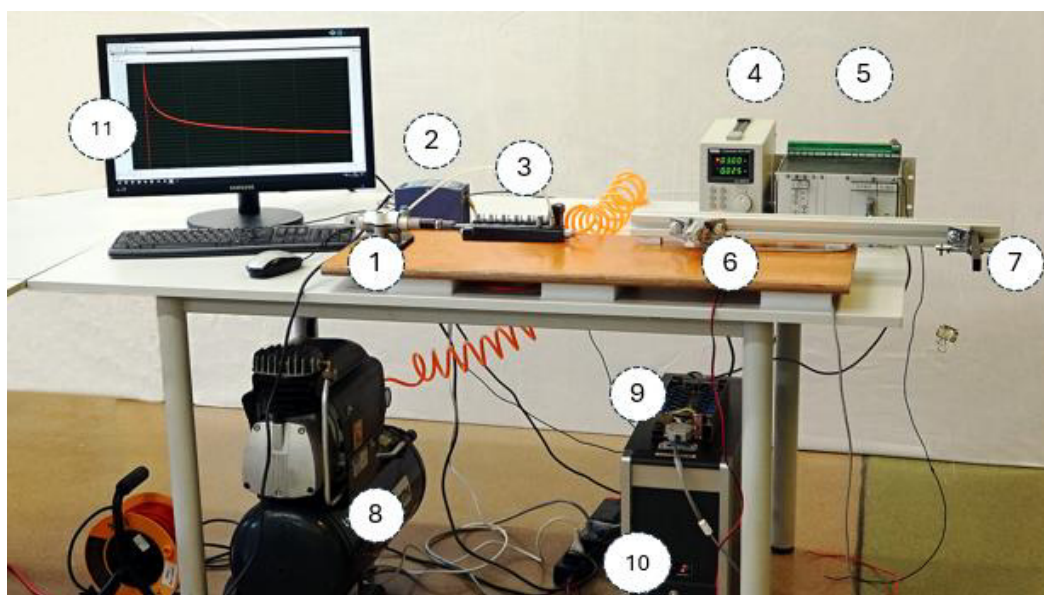
Zaprojektowano i zbudowano przyrząd do wyznaczenia współczynnika lepkości η poprzez pomiar sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach, którego schemat przedstawiono na rysunku 10.1.1.

Badaną przędzę zakleszczano pomiędzy zaciskiem ruchomym (1), a zaciskiem nieruchomym (7) zamocowanym na szynie (8) przytwierdzonej do podstawy (4). Odległość między zaczepami była stała i wynosiła 100 cm. Wartości sił mierzono za pomocą czujnika tensometrycznego (6) umieszczonego w połowie długości rozciąganego odcinka przędzy. Zacisk ruchomy stanowił siłownik pneumatyczny o skoku maksymalnym 1 cal. Powietrze ze sprężarki (9) było podawane na zawór elektromagnetyczny (3) pod ciśnieniem 5 Bar. W momencie pomiaru napięcie 24 V DC było załączane na cewkę zaworu elektromagnetycznego w celu otwarcia przepływu powietrza ze sprężarki do siłownika powodując przesuw tłoka o stałą wartość Δl .



Rys. 10.1.1 Schemat przyrządu pomiarowego sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach:
1 – zacisk ruchomy (siłownik pneumatyczny - tłokowy), 2 – zasilacz DC24V, 3 – zawór elektromagnetyczny, 4 – podstawa, 5 – nitka, 6 – czujnik tensometryczny, 7 – zacisk nieruchomy, 8 – szyna, 9 – sprężarka

Źródło: opracowanie własne

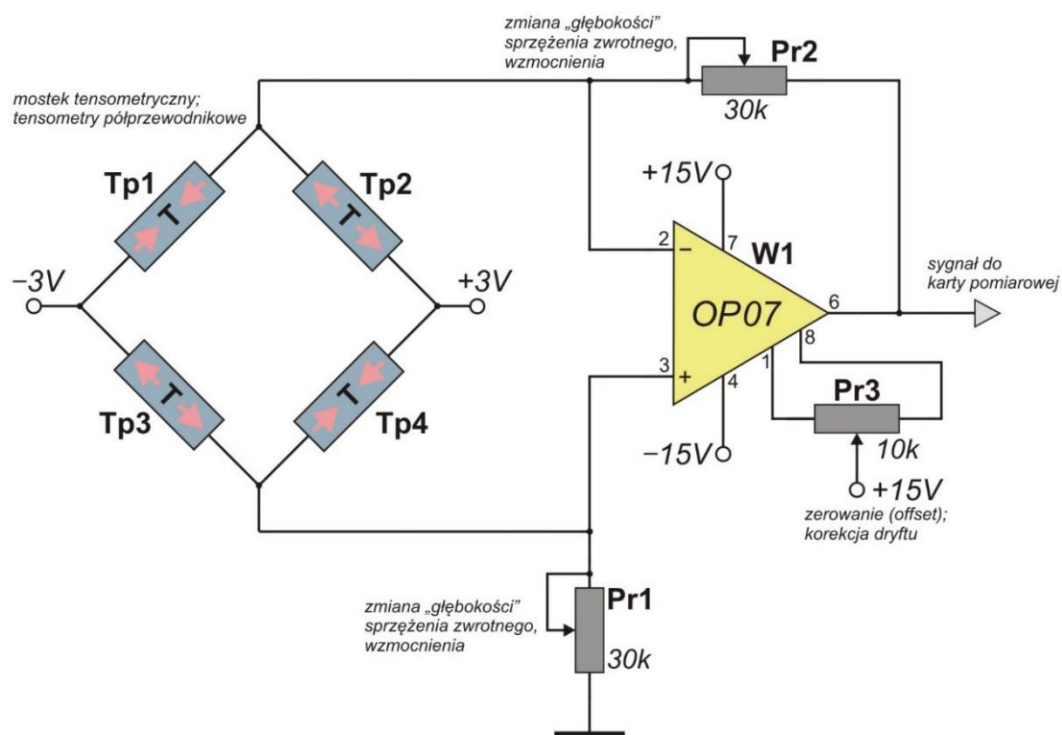


Rys. 10.1.2 Fotografia układu pomiarowego sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach: 1 – zacisk ruchomy (siłownik pneumatyczny - tłokowy), 2 – zasilacz DC24V, 3 – zawór elektromagnetyczny, 4 – zasilacz mostka tensometrycznego, 5 – zasilacz do wzmacniacza sygnału z czujnika tensometrycznego, 6 – czujnik tensometryczny, 7 – zacisk nieruchomy, 8 – sprężarka, 9 – wzmacniacz sygnału z czujnika, 10 – komputer z kartą akwizycji danych, 11 – monitor

Źródło: opracowanie własne

10. 2 Charakterystyka elementów układu pomiarowego

Zbudowane stanowisko badawcze do pomiaru sił w nitkach podczas relaksacji naprężeń wyposażono w układ pomiarowy którego schemat przedstawiono na rysunku 10.2.1.



Rys. 10.2.1 Schemat ideowy układu pomiarowego

Źródło: opracowanie własne

W zastosowanym układzie elektronicznym sygnał analogowy z mostka tensometrycznego ze wzmacniaczem przekazywany jest na wejście karty pomiarowej PC, która umożliwia zapis charakterystyki pomiaru w postaci wykresu i danych pomiarowych w kodzie ASCII.

Do przeprowadzenia pomiarów zastosowano czujnik zbudowany z czterech tensometrów półprzewodnikowych Tp1, Tp2, Tp3 i Tp4 naklejonych na stożkowy element stanowiący mechaniczną część czujnika. Czujnik pracował w układzie pełnego mostka Wheatstone'a zasilanego prądem stałym o napięciu 3V. Czujniki stożkowe umożliwiają uzyskanie częstotliwości drgań własnych nawet do 20 kHz. Sygnał z mostka Wheatstone'a po wzmocnieniu przez wzmacniacz operacyjny W1 przekazywany był na kartę pomiarową (kartę akwizycji danych). Wzmocnienie regulowane za pomocą potencjometrów Pr1 i Pr2 odpowiadało rezystancji 30 k Ω w układzie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego. Wielokrotnie w trakcie wykonywania pomiarów dokonywano korekty napięcia wyjściowego ze wzmacniacza przy nieobciążonym czujniku za pomocą potencjometru Pr3. Wzmacniacz operacyjny zasilany był typowym napięciem symetrycznym ± 15 V.

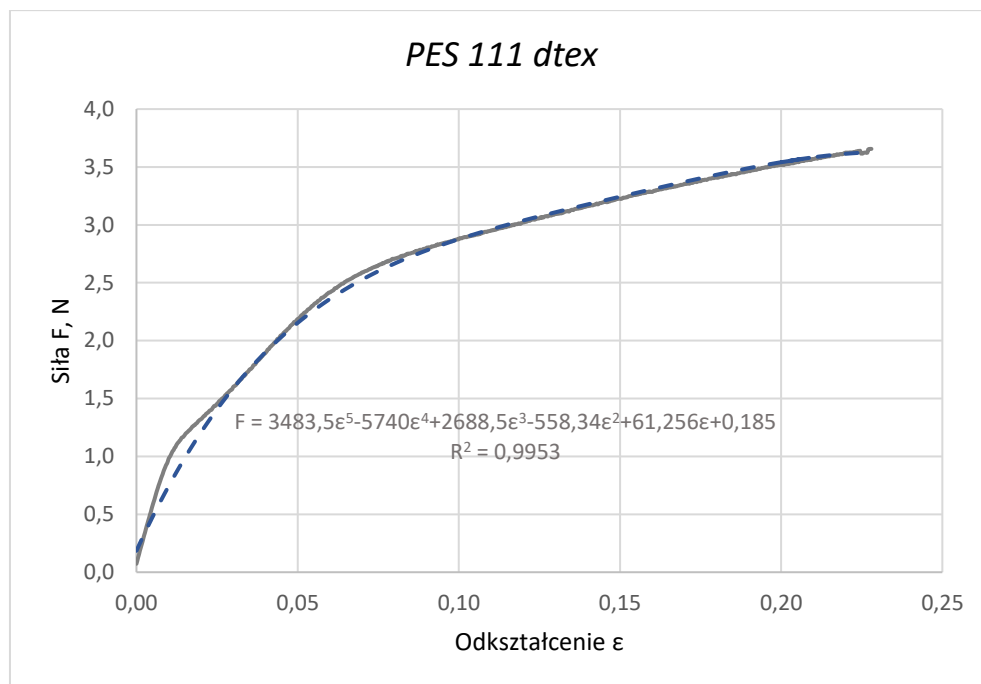
Do rejestracji danych pomiarowych wykorzystano kartę PCI-1714UL firmy Advantech której charakterystykę przedstawiono w podrozdziale 5.3.2.

11. WYZNACZENIE NIELINIOWYCH PARAMETRÓW MODELI REOLOGICZNYCH, WSPÓŁCZYNNIKÓW SPRĘŻYSTOŚCI I WSPÓŁCZYNNIKA LEPKOŚCI

11.1 Wyznaczenie współczynnika sprężystości statycznej E_K

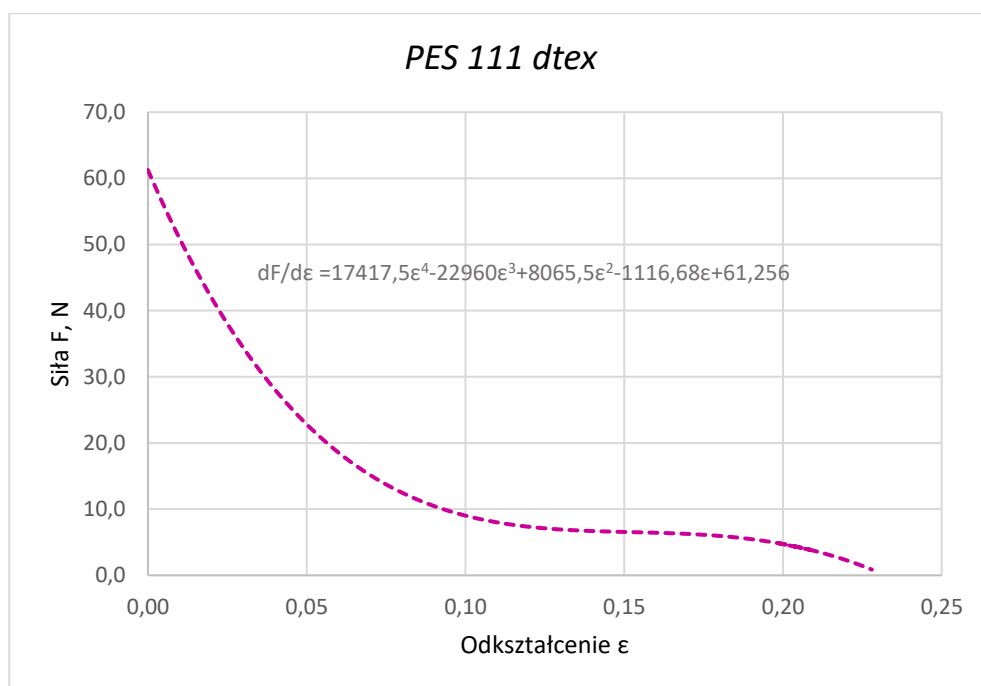
W celu wyznaczenia nieliniowych charakterystyk wartości współczynnika sprężystości E_K uzyskane w procesie rozciągania krzywe (Podrozdział 8.1) przedstawione w postaci charakterystyk siły w funkcji odkształcenia $F = f(\epsilon)$ przybliżono wielomianem piątego stopnia. W wyniku przeprowadzenia aproksymacji oraz obliczenia pierwszej pochodnej względem zmiennej ϵ dla każdej z przebadanych prędz otrzymano równanie pozwalające na określenie nieliniowej zmiany współczynnika sprężystości E_K .

Uzyskane wyniki aproksymacji oraz pierwszej pochodnej zaprezentowano przykładowo dla prędzu poliestrowej PES 111 dtex na rysunku 11.1.1 i 11.1.2.



Rys. 11.1.1 Aproksymacja charakterystyki $F = f(\epsilon)$ wielomianem piątego stopnia dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex

Źródło: opracowanie własne



Rys. 11.1.2 Przebieg pierwszej pochodnej aproksymowanej charakterystyki $F = f(\epsilon)$ dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex (nieliniowy moduł sprężystości)

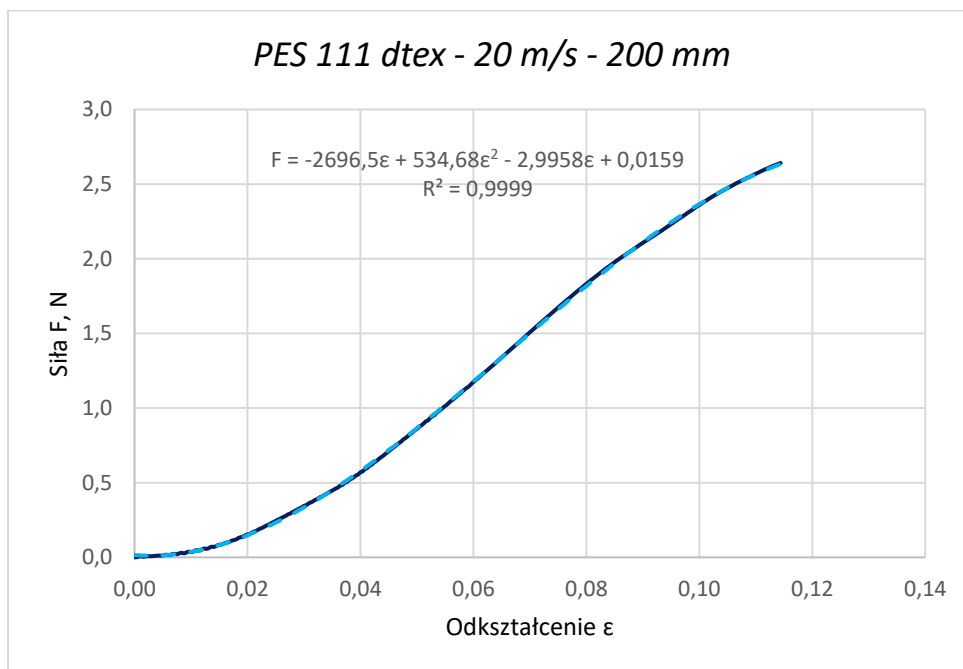
Źródło: opracowanie własne

11.2 Wyznaczenie współczynnika sprężystości E_d przy dynamicznych obciążeniach nitki

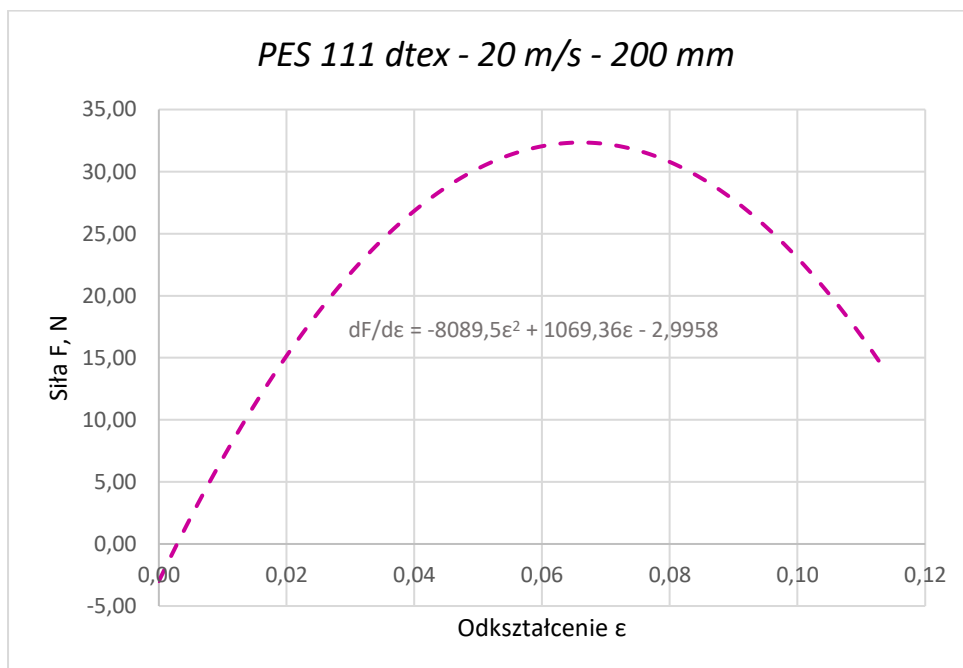
Wartości współczynnika sprężystości E_d wyznaczono poprzez obliczenie pierwszej pochodnej funkcji zależności siły od odkształcenia $F = f(\epsilon)$. Uzyskane w procesie

dynamicznego rozciągania krzywe (Podrozdział 6.2) przedstawione w postaci charakterystyk siły w funkcji odkształcenia przybliżono wielomianem piątego stopnia. W oparciu o wyznaczone krzywe można określić nieliniowe zmiany współczynnika sprężystości dynamicznej poszczególnych przędzy w funkcji odkształcenia.

Uzyskane wyniki aproksymacji oraz pierwszej pochodnej zaprezentowano przykładowo dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex na rysunku 11.2.1 i 11.2.2.



Rys. 11.2.1 Aproksymacja charakterystyki $F = f(\epsilon)$ wielomianem piątego stopnia dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex w procesie dynamicznego rozciągania z prędkością 20 m/s
 Źródło: opracowanie własne

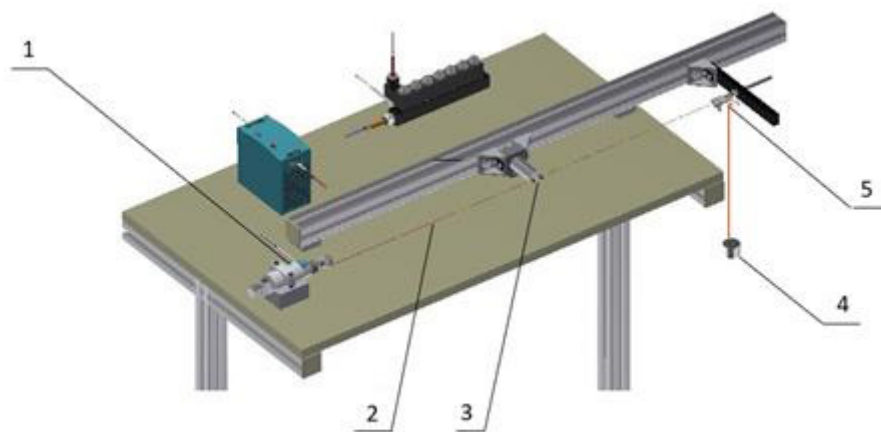


Rys. 11.2.2 Przebieg pierwszej pochodnej aproksymowanej charakterystyki $F = f(\epsilon)$ dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex w procesie dynamicznego rozciągania z prędkością 20 m/s (nieliniowy moduł sprężystości)

Źródło: opracowanie własne

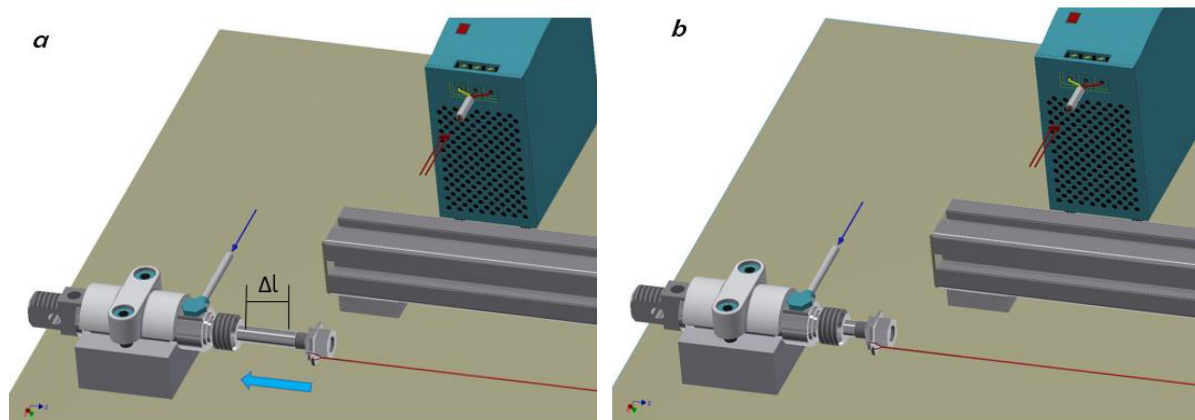
11.3 Metodyka pomiaru wartości sił podczas procesu relaksacji naprężeń w nitkach

Wyznaczenie zmiennych wartości współczynnika lepkości wymagało przeprowadzenia pomiarów wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach. Badania wykonano na zbudowanym do tego celu przyrządzie, którego budowę przedstawiono w rozdziale 10.



Rys. 11.3.1 Przyrząd do pomiaru sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach, 1 – zacisk ruchomy (siłownik pneumatyczny - tłokowy), 2 – badana przędza, 3 – czujnik tensometryczny, 4 – obciążenie wstępne, 5 – zacisk nieruchomy

Źródło: opracowanie własne



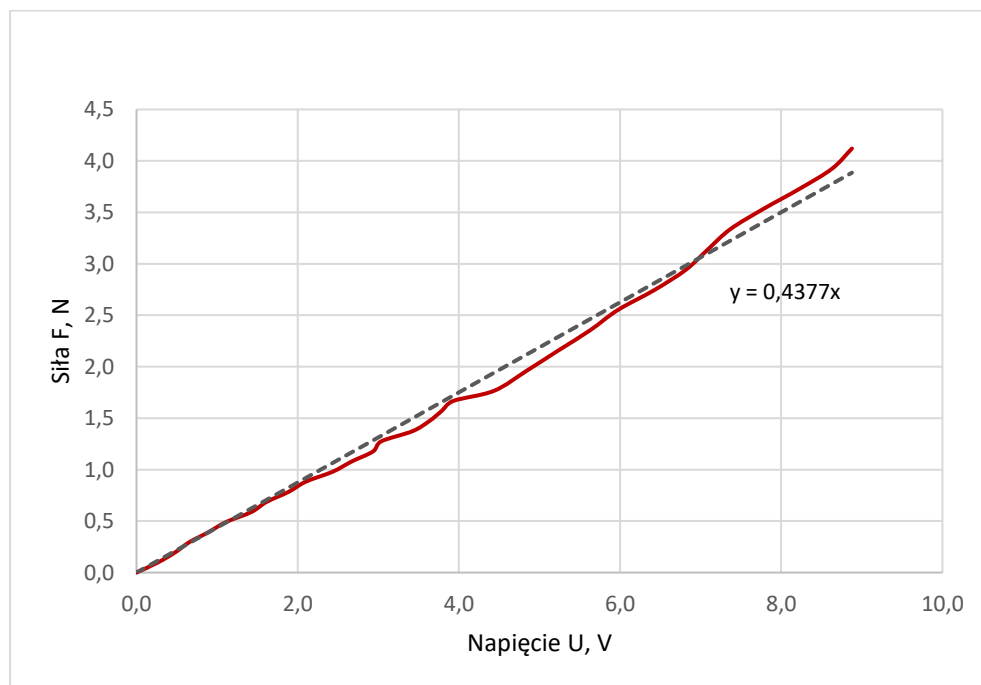
Rys. 11.3.2 Pozycje zacisku ruchomego z przędzą podczas przeprowadzania pomiaru
a – siłownik z tłokiem w pozycji wyjściowej, b – siłownik z tłokiem przesuniętym o wartość wydłużenia Δl

Źródło: opracowanie własne

Pomiar rozpoczynano od zamocowania przędzy (2) w zacisku ruchomym (1), po przeprowadzeniu nitki przez zacisk nieruchomy (5) poddawano ją obciążeniu wstępnemu P_0 (4) (dla każdej z przędz przyjęto wartość obciążenia wstępnego 0,5 cN/tex). Po umieszczeniu przędzy w czujniku tensometrycznym (3) blokowano zacisk nieruchomy. Następnie poprzez przesuw tłoka siłownika pneumatycznego uzyskiwano przesunięcie zacisku ruchomego o stałą wartość $\Delta l = 20$ mm (Rys. 11.3.2 a). Sygnał z czujnika po wzmacnieniu we wzmacniaczu tensometrycznym przetwarzany był przez kartę akwizycji danych. Zmierzone zmiany naprężenia przędzy odwzorowywane były na komputerze w postaci graficznej wykresów

$U = f(t)$, gdzie U – napięcie sygnału w V, t – czas w s. Do rejestracji wyników wykorzystano program Data Logger Application1 – Advantech [85, 86].

Ponieważ układ pomiarowy rejestrował wartości napięcia elektrycznego w voltach konieczne było wykonanie kalibracji czujnika pomiarowego umożliwiającej przeliczenie ich na wartości siły w niutonach (Rysunek 11.3.3). Otrzymaną krzywą kalibracji przybliżono funkcją liniową.



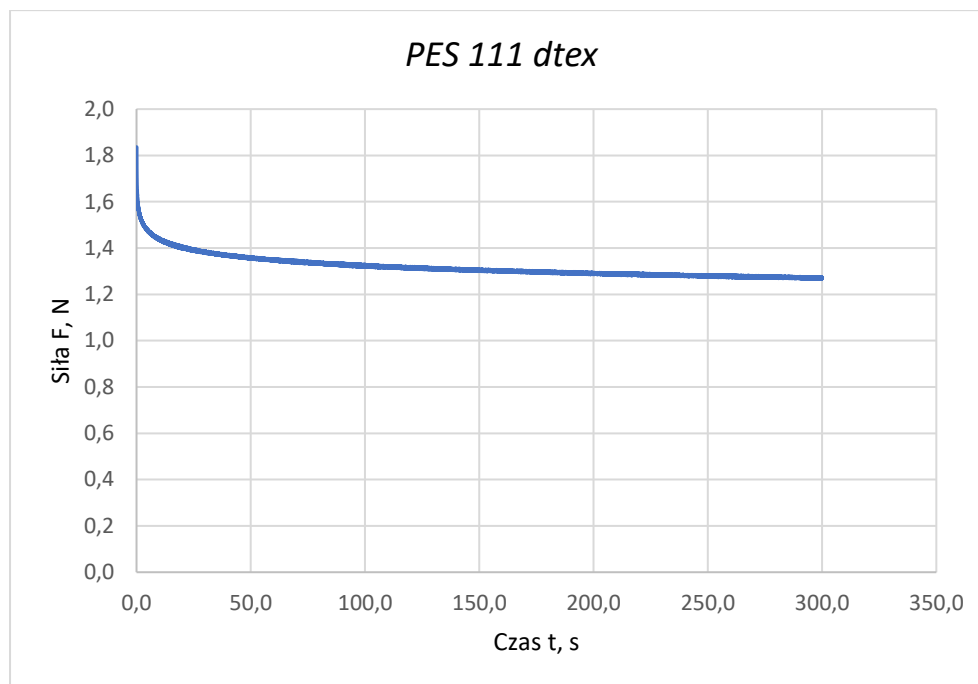
Rys. 11.3.3 Wykres skalowania przyrządu pomiarowego wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach

Źródło: opracowanie własne

Długość rozciąganego odcinka przędzy wynosiła 1000 mm, czas pomiaru wynosił 300 s. Dla każdej z badanych przędz wykonano po pięć pomiarów, których wartości uśredniono. Do opracowania wyników pomiarów wykorzystano program komputerowy Microsoft Excel.

Przykładowy wykres wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 111 dtex przedstawiono na rysunku 11.3.4.

Wykresy wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach dla pozostałych przebadanych przędz zamieszczono w Załączniku 6.



Rys. 11.3.4 Wykres uśrednionej wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach poddanych procesowi rozciągania: przędza poliestrowa PES 111 dtex, długość rozciąganego odcinka $l = 1000\text{mm}$, wydłużenie $\Delta l = 20\text{ mm}$

Źródło: opracowanie własne

11.4 Wyznaczanie współczynnika lepkości

Współczynnik lepkości wyznaczono na podstawie wzoru (11.1) [3] podstawiając do niego wartości poszczególnych wielkości uzyskane podczas procesu relaksacji naprężeń w nitkach poddanych procesowi rozciągania. Podczas analizy wyników zaobserwowano, iż po czasie 4 minut zmiany zachodzące w wartościach siły są minimalne stąd też do obliczenia współczynnika lepkości przyjęto czas relaksacji 240 s.

$$\eta = \frac{-t_{(i)} \cdot c_1}{\ln\left(\frac{F_{(i)} - c \cdot \varepsilon}{c_1 \cdot \varepsilon}\right)} \quad (11.1)$$

gdzie:

- η – współczynnik lepkości,
- ε – wydłużenie względne,
- c, c_1 – wartości względnej sztywności sprężyny,
- $F_{(i)}$ – siła,
- $t_{(i)}$ – czas.

Wartości względnej sztywności sprężyny c i c_1 obliczono z przedstawionych poniżej zależności. Wartość wydłużenia względnego była stała i wynosiła $\varepsilon = 0,02$. Wartości siły maksymalnej i minimalnej odczytano z krzywych relaksacji (Rysunek 11.3.4 oraz Rysunki od 11.3.5 do 11.3.8 w Załączniku 6).

$$c = \frac{F_{min}}{\varepsilon} \quad (11.2)$$

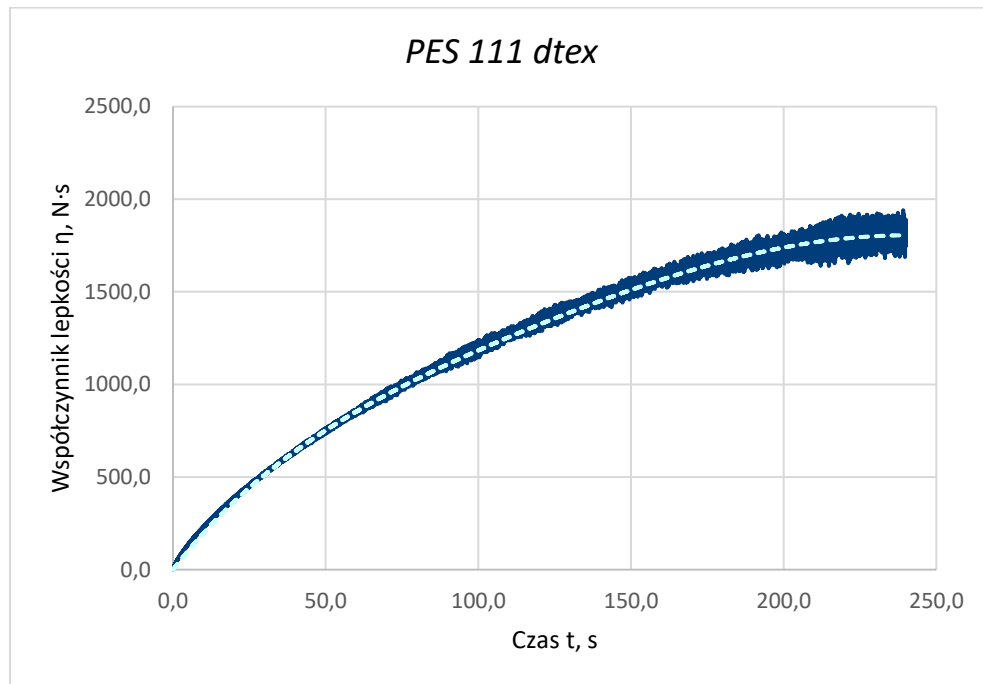
$$c_1 = \frac{F_{max}}{\varepsilon} - c \quad (11.3)$$

gdzie:

F_{min} – wartość minimalna siły odczytana z krzywej relaksacji dla czasu 240 s,

F_{max} – wartość maksymalna siły.

Przykładowy wykres wartości współczynnika lepkości uzyskany dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex przedstawiono na rysunku 11.4.1. Pozostałe wykresy zamieszczono w Załączniku 7.



Rys. 11.4.1 Wykres wartości nieliniowego współczynnika lepkości wyznaczonego dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex

Źródło: opracowanie własne

W wyniku przeprowadzenia aproksymacji krzywych wyznaczonych współczynników lepkości dla poszczególnych przędz otrzymano następujące równania:

- PES 55 dtex $y = 0,00000000437x^5 - 0,000003x^4 + 0,000779x^3 - 0,1064x^2 + 11,333x,$
- PES 111 dtex $y = 0,00000000342x^5 - 0,000003079x^4 + 0,000995x^3 - 0,1657x^2 + 21,194x,$
- PES 167 dtex $y = -0,00000132x^4 + 0,0008x^3 - 0,1988x^2 + 28,878x,$
- PA 56 dtex $y = 0,0000000042x^5 - 0,000003x^4 + 0,0008x^3 - 0,1063x^2 + 9,7716x,$
- PA 156 dtex $y = 0,00000000845x^5 - 0,000006x^4 + 0,0016x^3 - 0,2168x^2 + 23,877x.$

Powyższe równania posłużyły następnie do obliczenia wartości współczynnika lepkości dla każdego wariantu uwzględniając czas dynamicznego rozciągania nitki.

12. MODELOWANIE DYNAMICZNEGO PROCESU ROZCIĄGANIA NITEK

Symulacja to przybliżone odtwarzanie zjawisk fizycznych często implementujące ich model matematyczny. Techniki symulacyjne wykorzystuje się przede wszystkim w sytuacji gdy wyznaczenie rozwiązania metodą analityczną nie jest możliwe lub bardzo pracochłonne. Symulacja komputerowa jest narzędziem pozwalającym przewidzieć zachowanie się ciał oraz obiektów podczas ich użytkowania. Jest ona wykorzystywana obecnie we wszystkich dziedzinach nauki i techniki. Umożliwia ona zmniejszenie ilości wytworzonych prototypów, skrócenie czasu przeprowadzanych na nich testów wpływając tym samym na zwiększenie wydajności i obniżenie kosztów procesów produkcyjnych [89, 90].

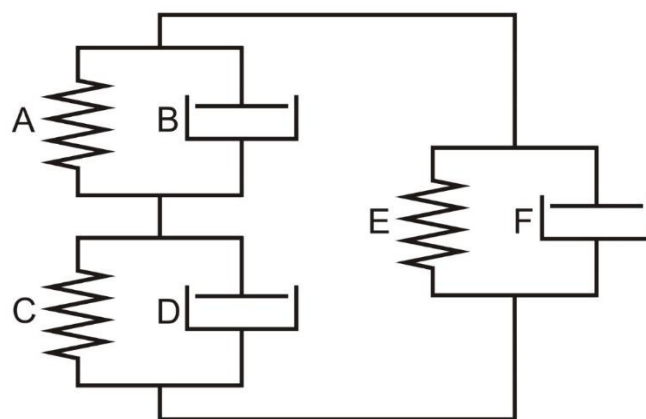
Nowoczesne programy komputerowe umożliwiają przeprowadzenie symulacji szeregu zjawisk zachodzących między innymi w ciałach stałych poddanych działaniu jednoosiowych sił rozciągających. Jednym z nich jest program Autodesk® Inventor® zawierający Moduł Symulacji Dynamicznej (MSD). Tworzone w programie modele charakteryzowane są zbiorem parametrów opisujących właściwości sprężyste i tłumiące. Mogą być one zdefiniowane jako wartości stałe lub zmienne odniesione do czasu, przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia. Dzięki temu umożliwiają analizę układów dynamicznych z uwzględnianiem parametrów nieliniowych [91].

Badanie doświadczalne zjawisk zachodzących podczas dynamicznego rozciągania nitek jest procesem złożonym wymagającym wykonania licznych pomiarów oraz zastosowania specjalistycznych przyrządów. Możliwość wykorzystania metody symulacji numerycznych zamiast badań stanowiskowych jest szybsza i tańsza, oczywiście pod warunkiem uzyskiwania wiarygodnych wyników. Stąd potrzeba weryfikacji wyników uzyskiwanych z wirtualnych modeli dynamicznych w warunkach rzeczywistych.

12.1 Sprawdzenie poprawności działania wybranych modeli reologicznych w środowisku programu Autodesk® Inventor®

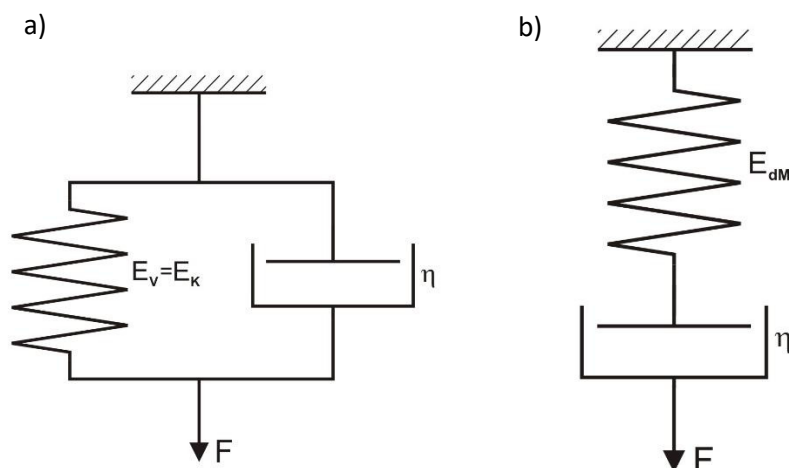
Symulację numeryczną zjawiska dynamicznego rozciągania przędzy przeprowadzono w środowisku programu Autodesk® Inventor® Professional [92]. Moduł Symulacji Dynamicznej (MSD) niniejszego programu poprzez wykorzystanie środowiska ANSYS WORKBENCH umożliwia rozwiązywanie równań różniczkowych zwyczajnych wykorzystując metodę zbieżności Rungego – Kuty lub metodę eliminacji Gaussa [91, 93]. W programie występują dwa rodzaje elementów: części i złącza. „Części definiowane są jako masa uogólniona wraz ze środkiem ciężkości określającym położenie części w przestrzeni. Złącza są bezmasowe i definiują charakter wzajemnego oddziaływania części poprzez określenie sztywności, tłumienia oraz tarcia”.

Zbudowano ogólny wirtualny model dynamiczny (Rys. 12.1.1) z odpowiednio połączonych trzech modeli reologicznych Kelvina – Voigta. Pozwala on w prosty sposób uzyskać każdy z wybranych do analizy procesu dynamicznego rozciągania nitek modeli poprzez podstawienie zerowych wartości współczynników nieużywanych członów.



Rys. 12.1.1 Układ połączonych modeli Kelvina – Voigta zbudowany w środowisku programu Inventor
Źródło: opracowanie własne

W celu sprawdzenia poprawności działania modelu wirtualnego przeprowadzono symulację procesu rozciągania nitek poliestrowych w oparciu o dwa modele reologiczne dwuparametrowe tj. model Maxwella (Rysunek 12.1.2 b) i model Kelvina – Voigta (Rysunek 12.1.2 a). W programie symulacyjnym model Maxwella otrzymano poprzez podstawienie zerowych wartości współczynników w członach B, C, E i F (Rys. 12.1.1) natomiast model Kelvina – Voigta uzyskano poprzez wyzerowanie wartości współczynników w członach C, D, E i F (Rys. 12.1.1). Wykonanie symulacji wymagało zdefiniowania stałych parametrów modeli określających ich właściwości sprężyste i lepkie takich jak: współczynnik sprężystości statycznej E_K , współczynnik sprężystości wyznaczony dla dynamicznych obciążeń nitki E_{dM} i współczynnik lepkości η . Wartości poszczególnych parametrów wyznaczono na podstawie wyników badań laboratoryjnych przedstawionych w artykułach [40, 94].



Rys. 12.1.2 Modele reologiczne: a) Maxwell; b) Kelvin – Voigt;
Źródło: opracowanie własne

W wyniku przeprowadzonej symulacji numerycznej otrzymano charakterystyki siły w funkcji czasu $F = f(t)$. Dla tych samych wartości parametrów dynamicznych przyjętych do weryfikacji modeli rozwiązano analitycznie przy pomocy arkusza kalkulacyjnego programu Excel równania stanu modelu Kelvina – Voigta (12.6) i modelu Maxwella (12.12). Uzyskano odpowiedź dynamiczną układu na zadane, zmienne w czasie wydłużenie w postaci wykresu siły.

Reologiczne równanie stanu modelu Kelvina - Voigta

Siła działająca na model Kelvina – Voigta stanowiącego równoległe połączenie sprężyny i tłumika jest sumą sił w poszczególnych członach [28]:

$$F = F_{spr} + F_{tłum} \quad (12.1)$$

$$F_{spr} = E_V \cdot \varepsilon \quad (12.2)$$

$$F_{tłum} = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (12.3)$$

Równanie stanu dla modelu Kelvina – Voigta przyjmuje postać:

$$F = E_V \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (12.4)$$

Rozwiązaniem równania stanu dla warunku początkowego $t = 0$, $F_0 = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$ jest zależność:

$$F(t) = E_V \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (12.5)$$

dla $\frac{d\varepsilon}{dt} = \omega = const.$, $E_V = E_K$

$$F(t) = E_K \cdot \omega \cdot t + \eta \cdot \omega \quad (12.6)$$

gdzie:

- F – siła,
- F_{spr} – siła działająca na sprężynę,
- $F_{tłum}$ – siła działająca na tłumik,
- $E_V = E_K$ – współczynnik sprężystości statycznej,
- ε – wydłużenie względne,
- η – współczynnik lepkości,
- F_0 – napięcie wstępne,
- t – czas rozciągania,
- $\omega = 1,65 \text{ 1/s}$ – prędkość przyrostu wydłużenia względnego obliczona według wzoru $\omega = \varepsilon/t$, 1/s.

Reologiczne równanie stanu modelu Maxwella

Całkowite odkształcenie powstające w modelu Maxwella (szeregowe połączenie sprężyny i tłumika) pod wpływem przyłożonej siły stanowi sumę odkształceń w poszczególnych członach [28]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{spr} + \varepsilon_{tłum} \quad (12.7)$$

$$\varepsilon_{spr} = \frac{F}{E} = \frac{F}{E_{dM}} \quad (12.8)$$

$$\frac{d\varepsilon_{tłum}}{dt} = \frac{F}{\eta} \quad (12.9)$$

Równanie stanu dla modelu Maxwella przyjmuje postać:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = F \cdot \frac{1}{\eta} + \frac{1}{Ed_M} \cdot \frac{dF}{dt} \quad (12.10)$$

Rozwiązanie równania stanu dla warunku początkowego $t = 0$, $F(0) = F_0$

$$F(t) = \left(F_0 - \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot \eta\right) \cdot \exp\left(-\frac{t \cdot Ed_M}{\eta}\right) + \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot \eta \quad (12.11)$$

dla $\frac{d\varepsilon}{dt} = \omega = \text{const.}$

$$F(t) = (F_0 - \omega \cdot \eta) \cdot \exp\left(-\frac{t \cdot Ed_M}{\eta}\right) + \omega \cdot \eta \quad (12.12)$$

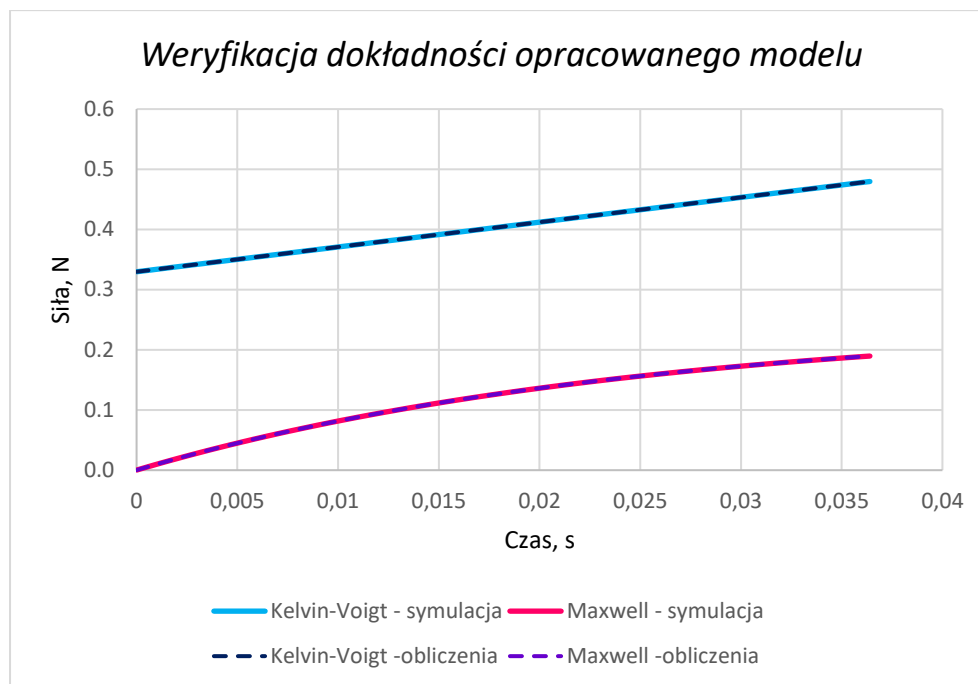
gdzie:

- ε – wydłużenie względne,
- ε_{spr} – odkształcenie powstające w sprężynie,
- $\varepsilon_{\text{tłum}}$ – odkształcenie powstające w tłumiku,
- F – siła,
- F_{spr} – siła działająca na sprężynę,
- $F_{\text{tłum}}$ – siła działająca na tłumik,
- $E = E_{dM}$ – współczynnik sprężystości dla dynamicznego wymuszenia,
- η – współczynnik lepkości,
- F_0 – napięcie wstępne,
- t – czas rozciągania,
- ω – prędkość przyrostu wydłużenia względnego obliczona według wzoru $\omega = \varepsilon/t$, 1/s.

Do obliczeń numerycznych i analitycznych wprowadzono następujące wartości poszczególnych parametrów modeli:

- długość rozciąganego odcinka przędzy $l = 400$ mm,
- prędkość rozciągania $V = 0,66$ m/s,
- wydłużenie zakleszczonego odcinka przędzy $\Delta l = 0,024$ mm,
- czas rozciągania $t = 0,0364$ s,
- współczynnik sprężystości statycznej $E_K = 25$ N,
- współczynnik sprężystości wyznaczony przy dynamicznych obciążeniach nitki $E_{dM} = 60$ N,
- współczynnik lepkości:
 - $\eta = 2,0$ N dla modelu Kelvina – Voigta,
 - $\eta = 1,5$ N dla modelu Maxwella.

Celem weryfikacji poprawności symulacji numerycznej porównano uzyskane charakterystyki obliczeń analitycznych i modelowych (Rys. 12.1.3). Przedstawione na rysunku 12.1.3 krzywe pokrywają się, co świadczy o poprawności budowy modelu symulacyjnego procesu rozciągania nitki.



Rys. 12.1.3 Charakterystyki modelowe procesu rozciągania nitek otrzymane w wyniku przeprowadzenia symulacji numerycznej oraz obliczeń w środowisku programu Excel
Źródło: opracowanie własne

Uzyskane wyniki świadczą o wysokiej dokładności przeprowadzonych symulacji. Charakterystyki modelowe wartości siły w funkcji czasu dla procesu rozciągania nitek zarówno dla modelu Kelvina – Voigta, jak i Maxwella wykazują bardzo dobrą zgodność z przeprowadzonymi obliczeniami. Zgodność wyników symulacji numerycznej z analitycznymi rozwiązaniami równań stanu prostych modeli reologicznych daje podstawy do założenia poprawności wyników symulacji dla bardziej złożonych modeli.

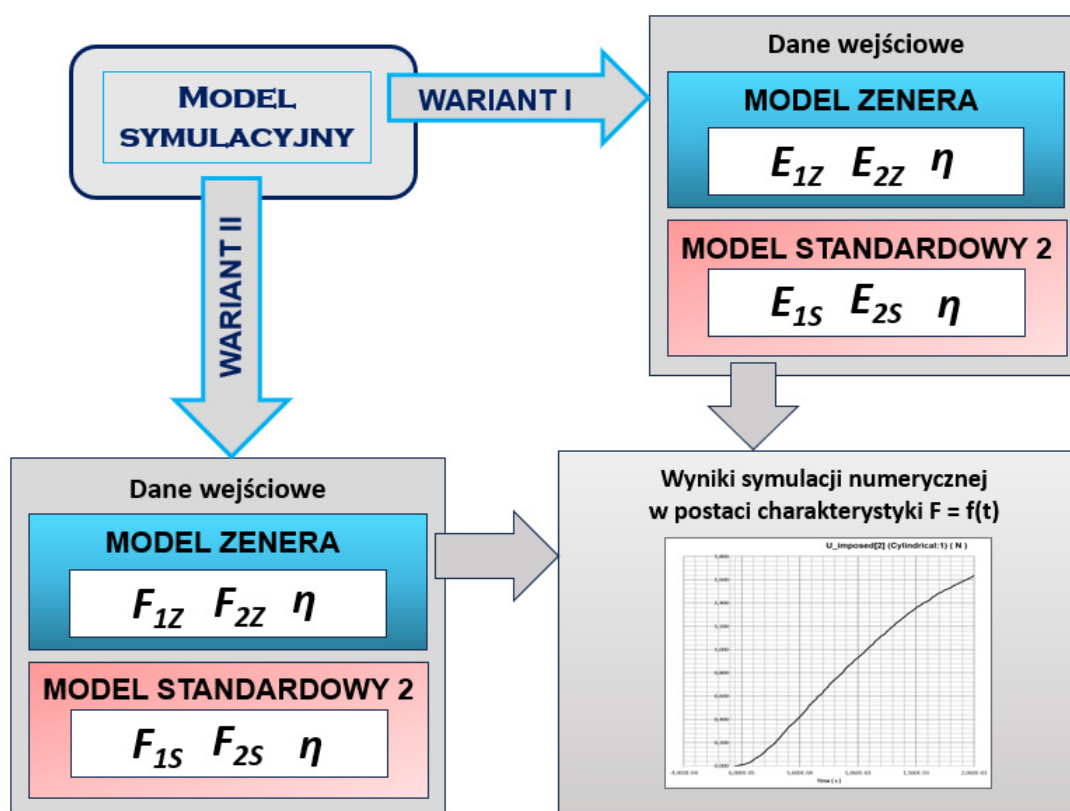
12.2 Symulacja numeryczna dynamicznego procesu rozciągania nitek dla nieliniowych parametrów wejściowych modeli reologicznych

Badania symulacyjne dynamicznego procesu rozciągania nitek oparto na dwóch modelach reologicznych trójparametrowych tj. modelu Zenera i modelu Standardowego 2. Są one często wykorzystywane we włókiennictwie do odwzorowania zachowania ciał lepko-sprężystych. Zaletą niniejszych modeli jest możliwość:

- opisanie ich poprzez proste zależności matematyczne,
- wyznaczenia parametrów na drodze eksperymentalnej,
- zastosowania w metodach numerycznych.

Określenie zmiennych wartości współczynnika sprężystości statycznej E_K oraz współczynnika sprężystości dla relatywnie szybkich wymuszeń dynamicznych obciążeń nitki E_d wymagało wyznaczenia równań uzyskanych w procesie rozciągania krzywych przedstawionych w postaci charakterystyk siły w funkcji odkształcenia $F = f(\epsilon)$ (Podrozdział 11.1 i 11.2). W wyniku przeprowadzenia aproksymacji poszczególne charakterystyki opisano wielomianem piątego stopnia. Przybliżenie funkcji spowodowało wystąpienie błędów aproksymacji, które wpłynęły na zmianę uzyskanych wartości poszczególnych współczynników sprężystości wprowadzanych do modelu symulacyjnego (Rys. 12.2.1 WARIANT I). Dlatego też do przeprowadzenia symulacji numerycznej dynamicznego procesu rozciągania nitek wykorzystano model pozwalający na wprowadzenie

wartości współczynników sprężystości bezpośrednio w postaci charakterystyk siły w funkcji wydłużenia $F = f(\Delta l)$ (Rys. 12.2.1 WARIANT II). W przypadku obu wariantów wartości współczynnika lepkości deklarowano w postaci funkcji $\eta = f(t)$, a odpowiedzią układu były charakterystyki siły w funkcji czasu $F = f(t)$.



E_{1Z}, E_{2Z} – współczynnik sprężystości dla modelu standardowego 1, Zenera (Rys. 7.1.1),
 $E_{1Z} = f(\epsilon), E_{2Z} = f(\epsilon)$

E_{1S}, E_{2S} – współczynnik sprężystości dla modelu Standardowego 2 (Rys. 7.2.1),
 $E_{1S} = f(\epsilon), E_{2S} = f(\epsilon)$,

η – wartości współczynnika lepkości, $\eta = f(t)$,

F_{1Z}, F_{2Z} – wartości współczynników sprężystości dla modelu Zenera w postaci charakterystyk siły w funkcji wydłużenia, $F_{1Z}, F_{2Z} = f(\Delta l)$,

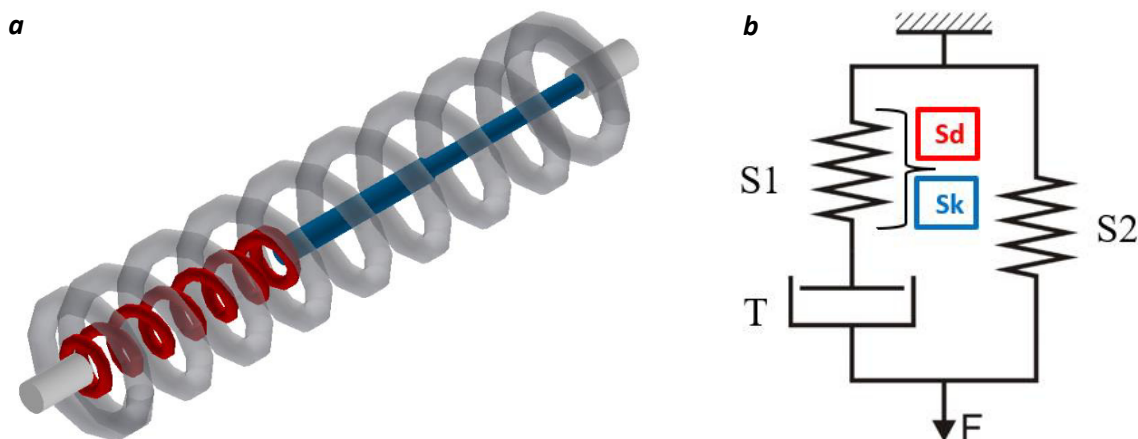
F_{1S}, F_{2S} – wartości współczynników sprężystości dla modelu Zenera w postaci charakterystyk siły w funkcji wydłużenia, $F_{1S}, F_{2S} = f(\Delta l)$,

Rys. 12.2.1 Algorytm symulacji procesu dynamicznego rozciągania nitek z wykorzystaniem modelu reologicznego Zenera i Standardowego 2 w programie Inventor® dla dwóch wariantów wprowadzania danych wejściowych

Źródło: opracowanie własne

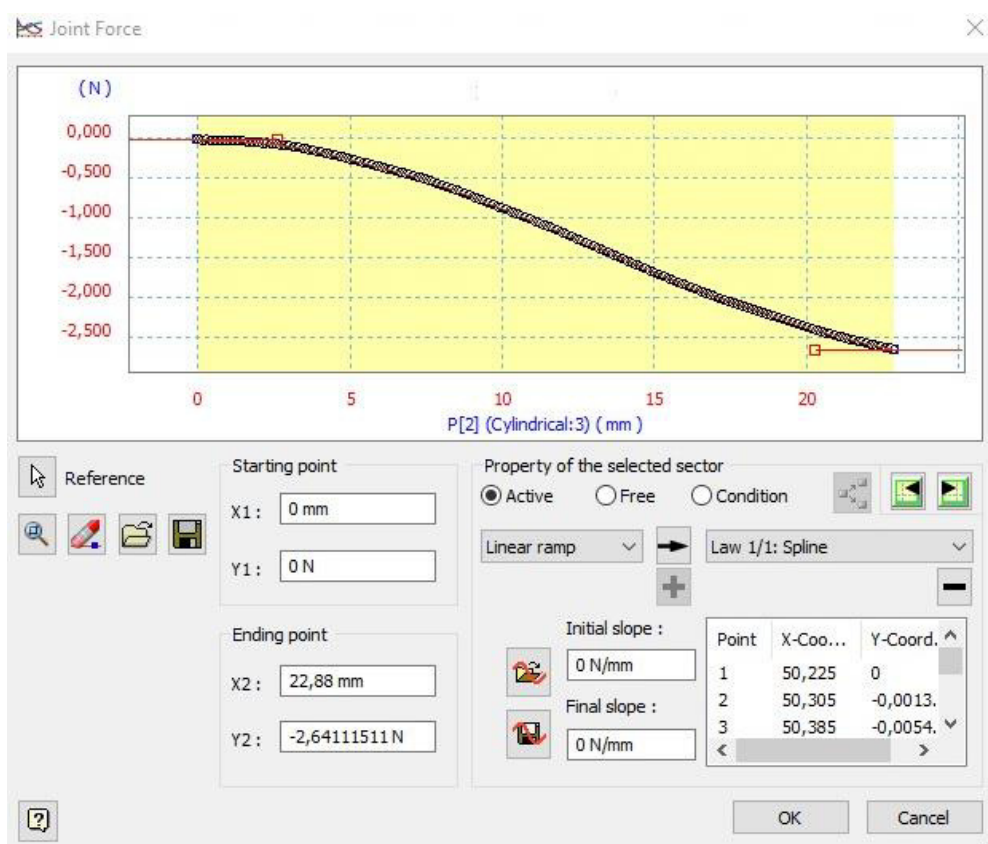
Model Zenera otrzymano poprzez podstawienie zerowych wartości współczynników w członach B, C i F (Rys. 12.1.1).

W celu wykonania symulacji dynamicznego procesu rozciągania nitek wprowadzono wartości poszczególnych parametrów do odpowiednich członów modeli reologicznych. Możliwość definiowania zakresu wartości parametrów w tym przypadku siły i współczynnika lepkości oraz charakterystyk ich przebiegu w funkcji czasu lub odkształcenia daje okno dialogowe. Przykładowy widok takiego okna przedstawiono na rysunku 12.2.3.

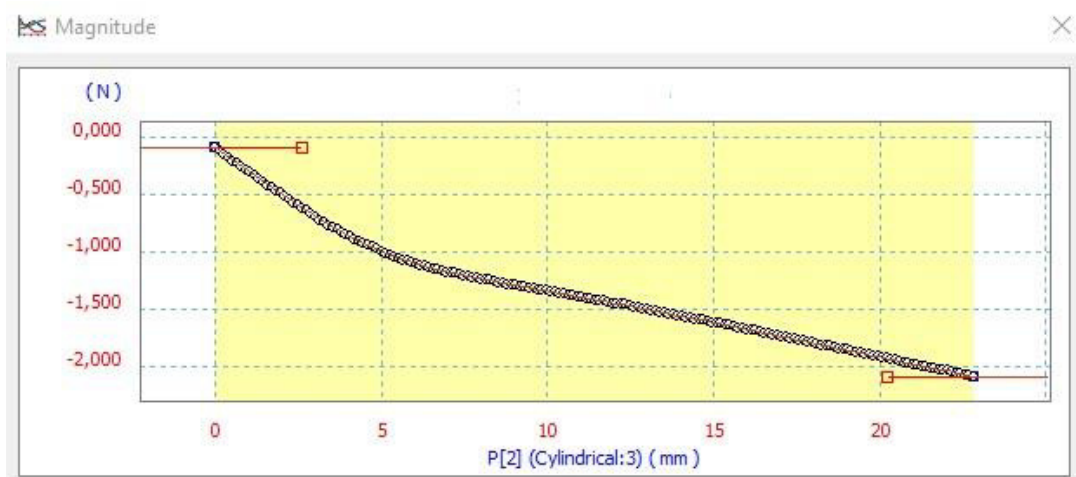


Rys. 12.2.2 Model Zenera utworzony w programie Inventor®: a) wizualizacja; b) schemat
Źródło: opracowanie własne

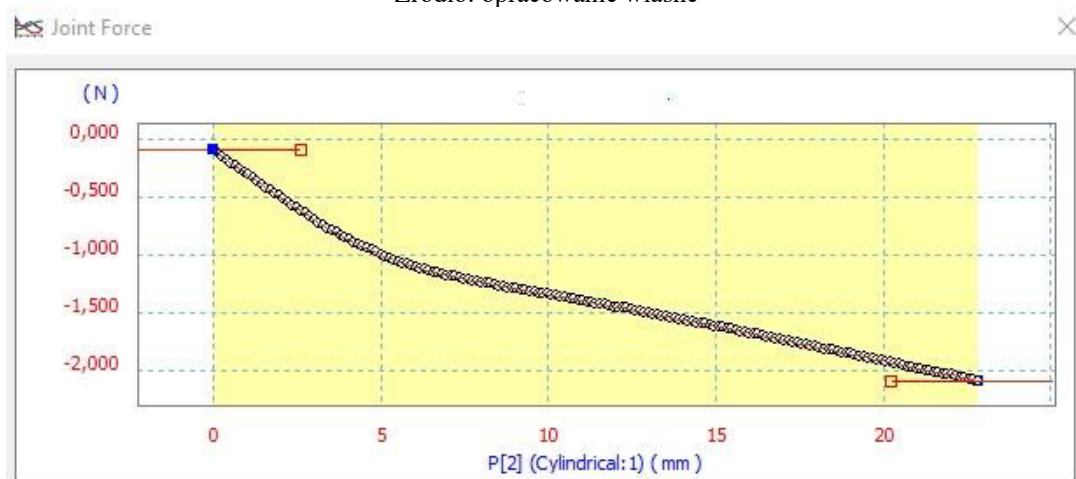
W modelu Zenera (Rys. 12.2.2 b), zgodnie z zależnością (7.7), człon S1 stanowił połączenie dwóch modułów Sd i Sk uwzględniających różnicę wartości siły w funkcji wydłużenia $F = f(\Delta l)$ uzyskane podczas dynamicznego i statycznego rozciągania nitek (Rys. 12.2.3 i 12.2.4). W oknie dialogowym oznaczonym symbolem S2 wczytano wartości siły w funkcji wydłużenia otrzymane w wyniku statycznego wymuszenia (Rys. 12.2.5). Wartości współczynnika lepkości odniesione do długości rozciąganego odcinka przędzy wczytano w oknie dialogowym członu T (Rys. 12.2.6).



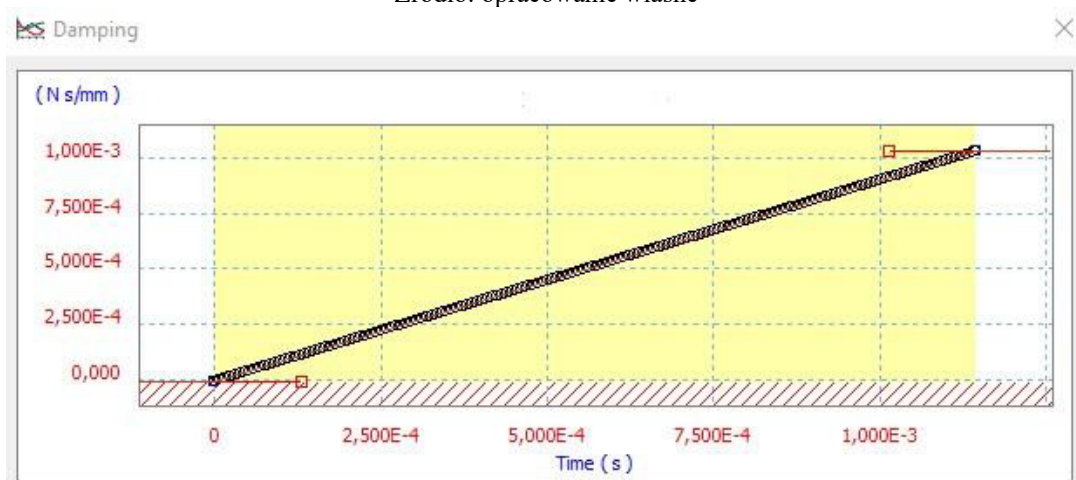
Rys. 12.2.3 Widok okna dialogowego Sd członu S1 wraz z wykresem siły $F = f(\Delta l)$ otrzymanym podczas dynamicznego rozciągania, dane dla wariantu PES111-20ms-200mm
Źródło: opracowanie własne



Rys. 12.2.4 Okno dialogowe Sk członu S1- widok wykresu siły $F = f(\Delta l)$ otrzymanego podczas statycznego rozciągania, dane dla wariantu badań PES111-20ms-200mm
Źródło: opracowanie własne

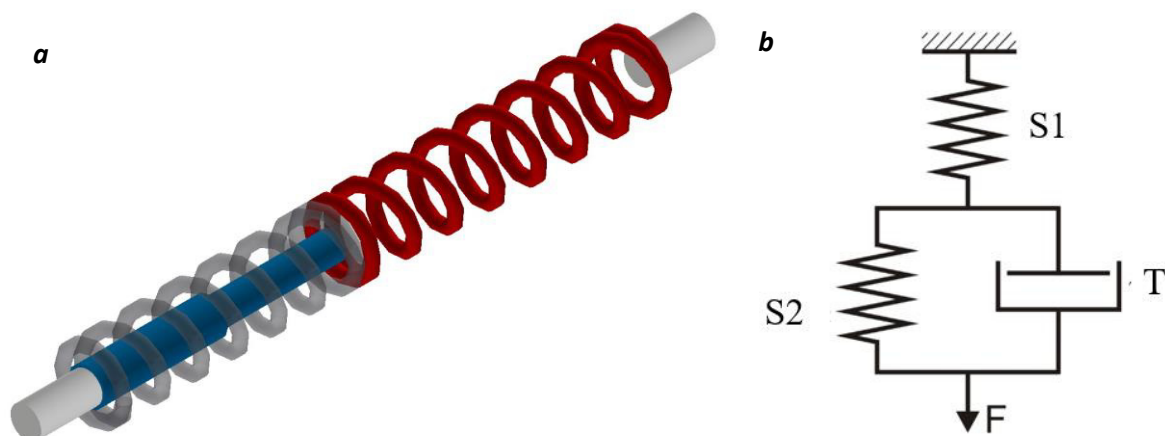


Rys. 12.2.5 Okno dialogowe członu S2 - widok wykresu z wprowadzonymi wartościami siły $F = f(\Delta l)$ otrzymanymi podczas statycznego rozciągania, dane dla wariantu badań PES111-20ms-200mm
Źródło: opracowanie własne



Rys. 12.2.6 Okno dialogowe członu T – widok wykresu z wprowadzonymi wartościami współczynnika lepkości wyznaczonego dla wariantu PES111-20ms-200mm
Źródło: opracowanie własne

Utworzenie modelu Standardowego 2 wymagało wyzerowania współczynników w następujących członach układu: B, E i F (Rys. 12.1.1).



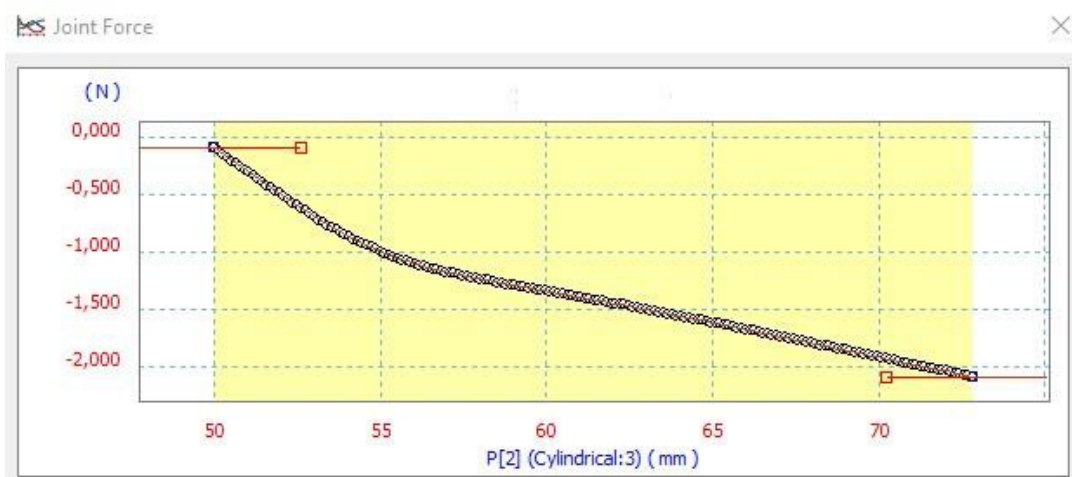
Rys. 12.2.7 Model Standardowy 2 utworzony w programie Inventor®: a) wizualizacja; b) schemat
Źródło: opracowanie własne

W modelu Standardowym 2 (Rys. 12.2.7 b) w zakładce definiującej człon oznaczony przez S1 wprowadzono wartości siły w funkcji wydłużenia $F = f(\Delta l)$ uzyskane podczas dynamicznego rozciągania nitek (Rys. 12.2.8). W oknie dialogowym oznaczonym symbolem S2 wczytano wartości siły w funkcji wydłużenia otrzymane podczas statycznego rozciągania (Rys. 12.2.9). Wykorzystana do modelowania aplikacja programu uwzględnia przedstawione w podrozdziale 7.2 zależności. Wartości współczynnika lepkości odniesione do długości rozciąganego odcinka przędzy wczytano w oknie dialogowym członu T (Rys. 12.2.10).



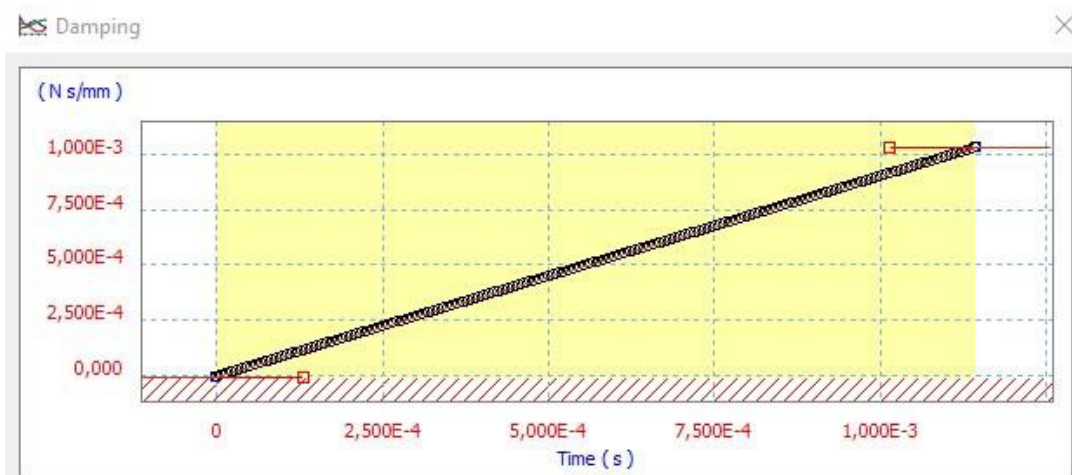
Rys. 12.2.8 Okno dialogowego członu S1 – widok wykresu z wprowadzonymi wartościami siły $F = f(\Delta l)$ otrzymanymi podczas dynamicznego rozciągania, dane dla wariantu PES111-20ms-200mm

Źródło: opracowanie własne



Rys. 12.2.9 Okno dialogowe S2 – widok wykresu z wprowadzonymi wartościami siły $F = f(\Delta l)$ otrzymanymi podczas statycznego rozciągania, dane dla wariantu PES111-20ms-200mm

Źródło: opracowanie własne

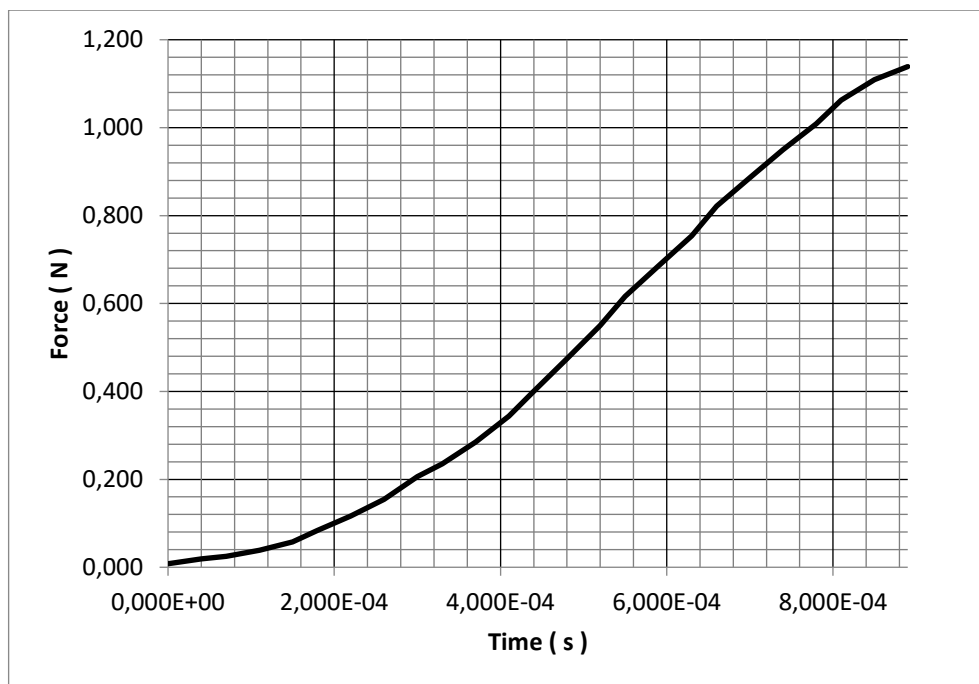


Rys. 12.2.10 Okno dialogowe członu T – widok wykresu z wprowadzonymi wartościami współczynnika lepkości wyznaczonego dla wariantu PES111-20ms-200mm

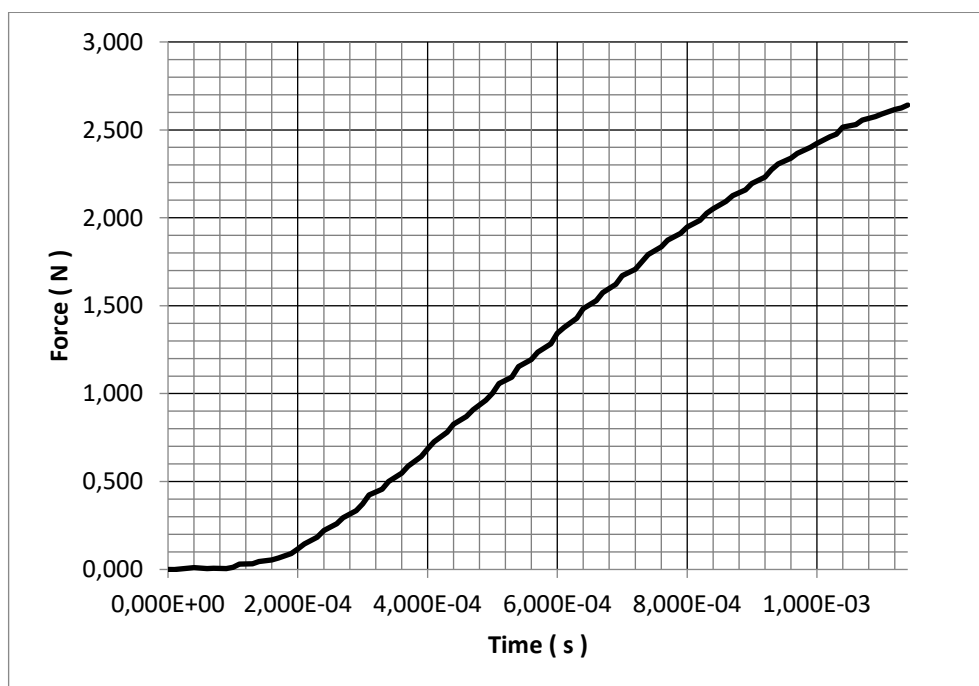
Źródło: opracowanie własne

Dodatkowo w części modelu stanowiącej model Kelvina – Voigta deklarowano wartość prędkości rozciągania. Dla poszczególnych wariantów zadeklarowano także czasy rzeczywistego rozciągania nitki.

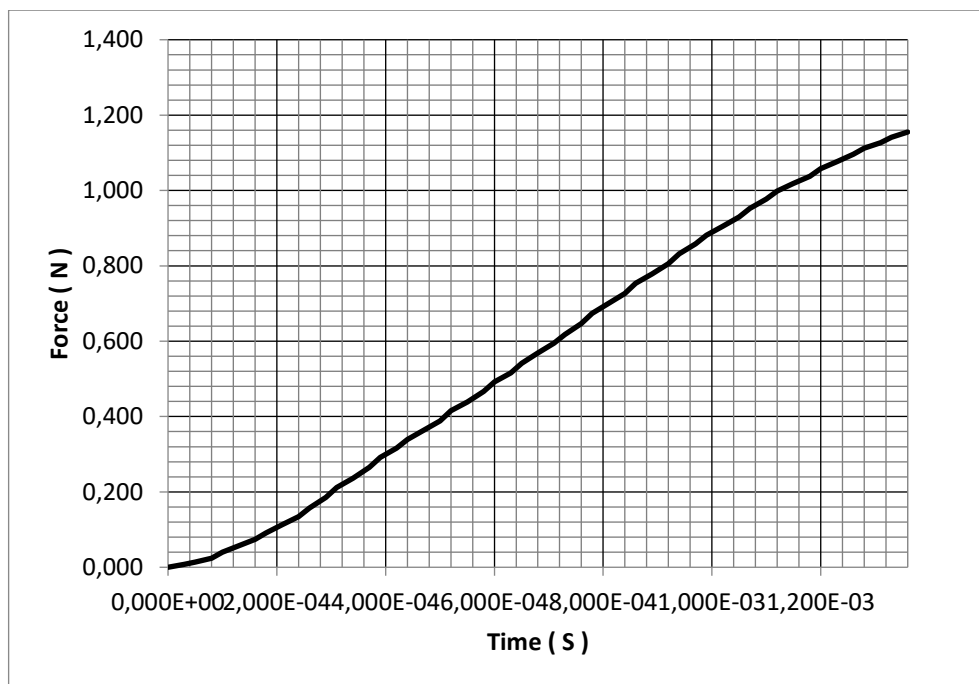
Przykładowe charakterystyki $F = f(t)$ otrzymane w wyniku przeprowadzonej symulacji przedstawiono na rysunkach 12.2.11 do 12.2.14. Pozostałe wyniki posłużyły do przeprowadzenia analizy porównawczej z krzywymi uzyskanymi podczas badań eksperymentalnych.



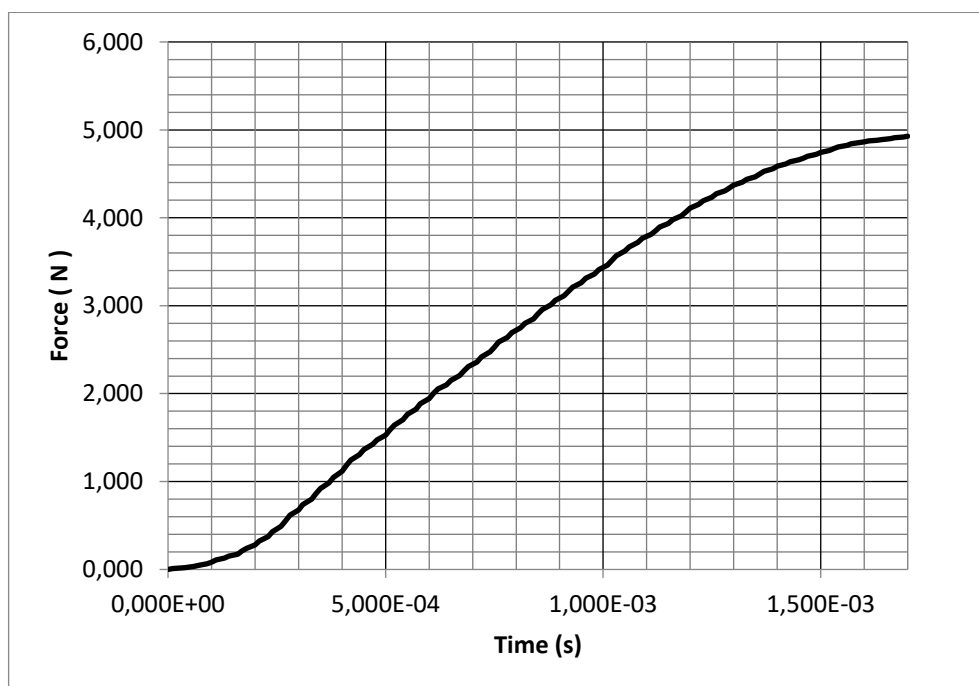
Rys. 12.2.11 Charakterystyka modelu Zenera otrzymana w wyniku przeprowadzonej symulacji dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex; wykres dla długości rozciąganego odcinka $l = 400$ mm i prędkości rozciągania $V = 100$ m/s
Źródło: opracowanie własne



Rys. 12.2.12 Charakterystyka modelu Zenera otrzymana w wyniku przeprowadzonej symulacji dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex; wykres dla długości rozciąganego odcinka $l = 200$ mm i prędkości rozciągania $V = 20$ m/s
Źródło: opracowanie własne



Rys. 12.2.13 Charakterystyka modelu Standardowego 2 otrzymana w wyniku przeprowadzonej symulacji dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex; wykres dla długości rozciąganego odcinka $l = 600$ mm i prędkości rozciągania $V = 40$ m/s
Źródło: opracowanie własne

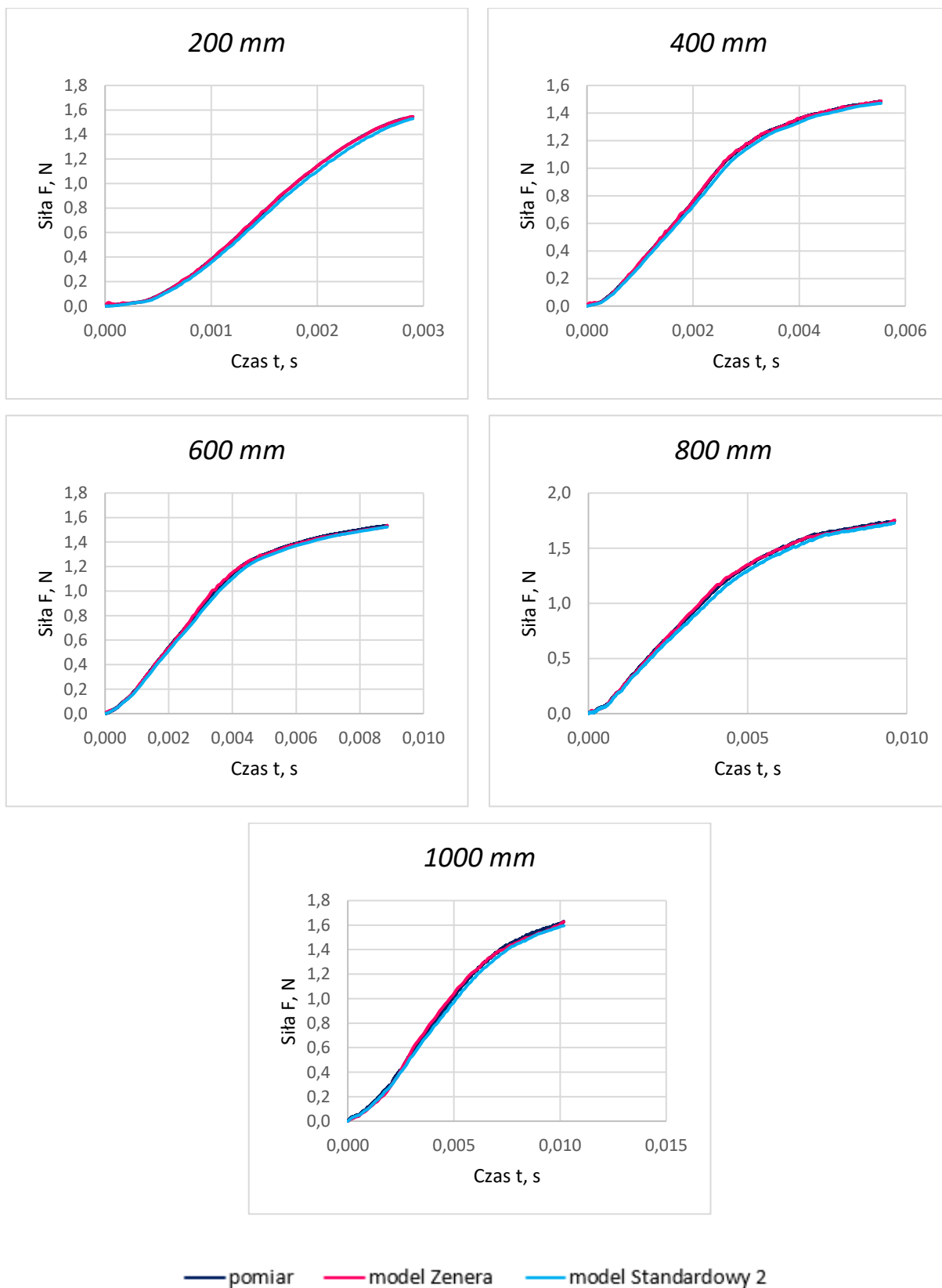


Rys. 12.2.14 Charakterystyka modelu Standardowego 2 otrzymana w wyniku przeprowadzonej symulacji dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex; wykres dla długości rozciąganego odcinka $l = 600$ mm i prędkości rozciągania $V = 60$ m/s
Źródło: opracowanie własne

13. ANALIZA PORÓWNAWCZA CHARAKTERYSTYK RZECZYWISTYCH Z MODELOWYMI PROCESU DYNAMICZNEGO ROZCIĄGANIA NITEK

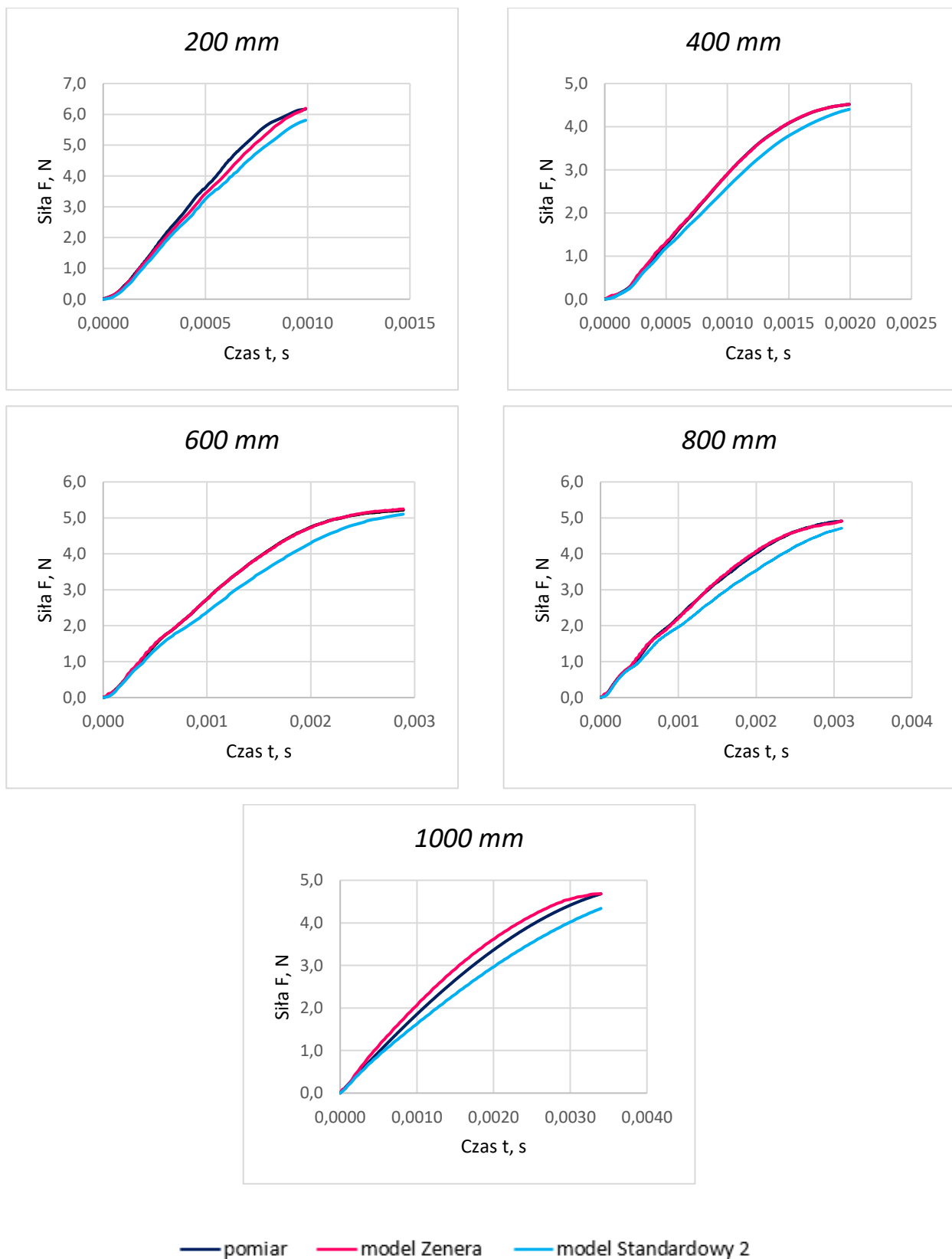
Analizę porównawczą charakterystyk rzeczywistych z modelowymi przeprowadzono w środowisku programu Excel. W celu przeprowadzenia weryfikacji w pierwszym etapie wykonano badania dynamicznego i statycznego rozciągania oraz wyznaczono współczynnik lepkości wybranych przędz poliamidowych i poliestrowych. Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych zidentyfikowano wartości nieliniowych parametrów modelu Zenera i Standardowego 2. Stanowiły one dane wejściowe symulacji numerycznej procesu jednoosiowego rozciągania nitek prowadzonego ze stałą prędkością. Uzyskane w ten sposób krzywe modelowe porównano z charakterystykami eksperymentalnymi.

Przykładowe charakterystyki $F = f(t)$ otrzymane w wyniku przeprowadzonej analizy porównawczej przedstawiono na rysunkach 13.1 do 13.5. Pozostałe wykresy zamieszczono w Załączniku 8.



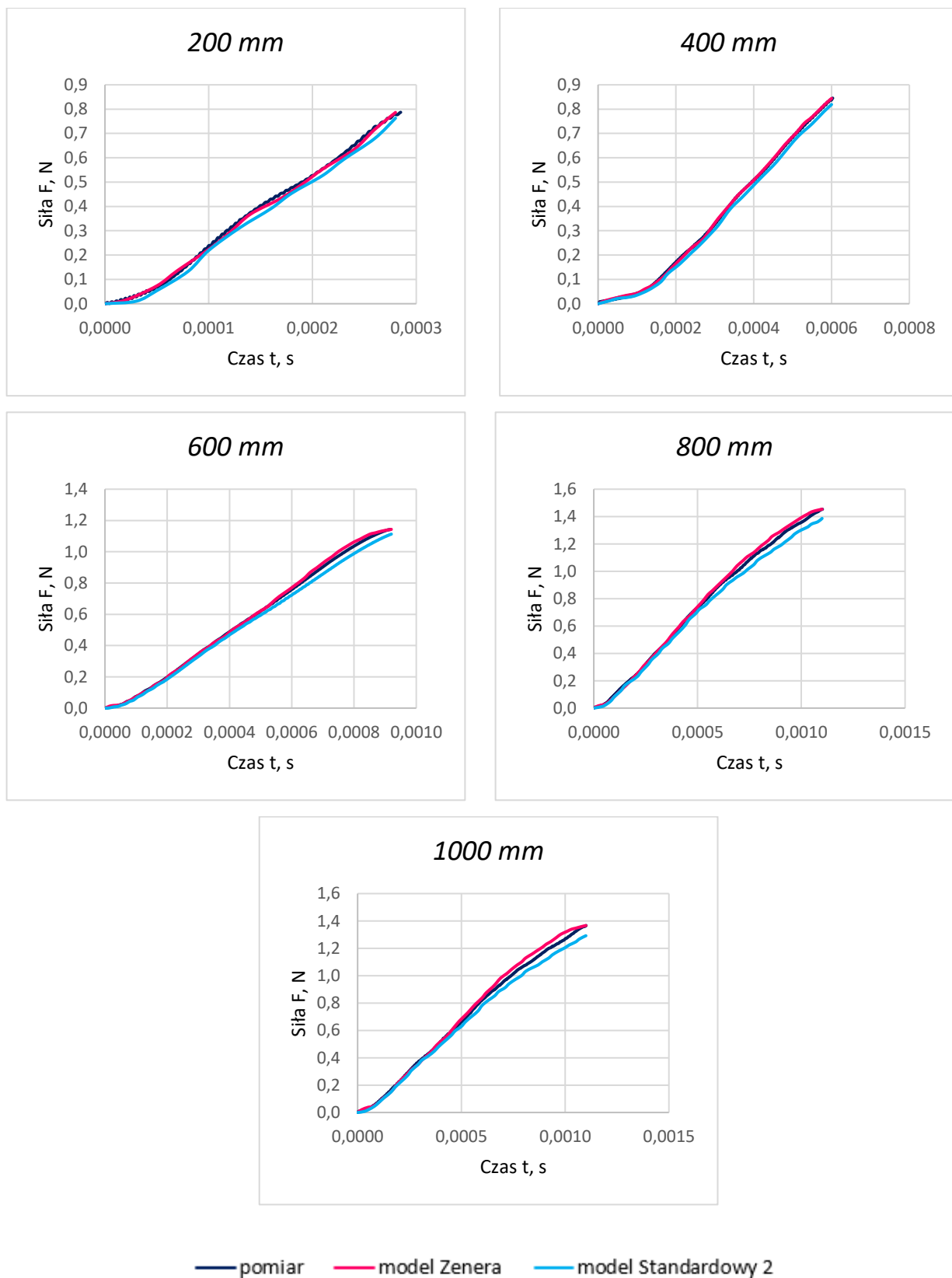
Rys. 13.1 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 56 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 20 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



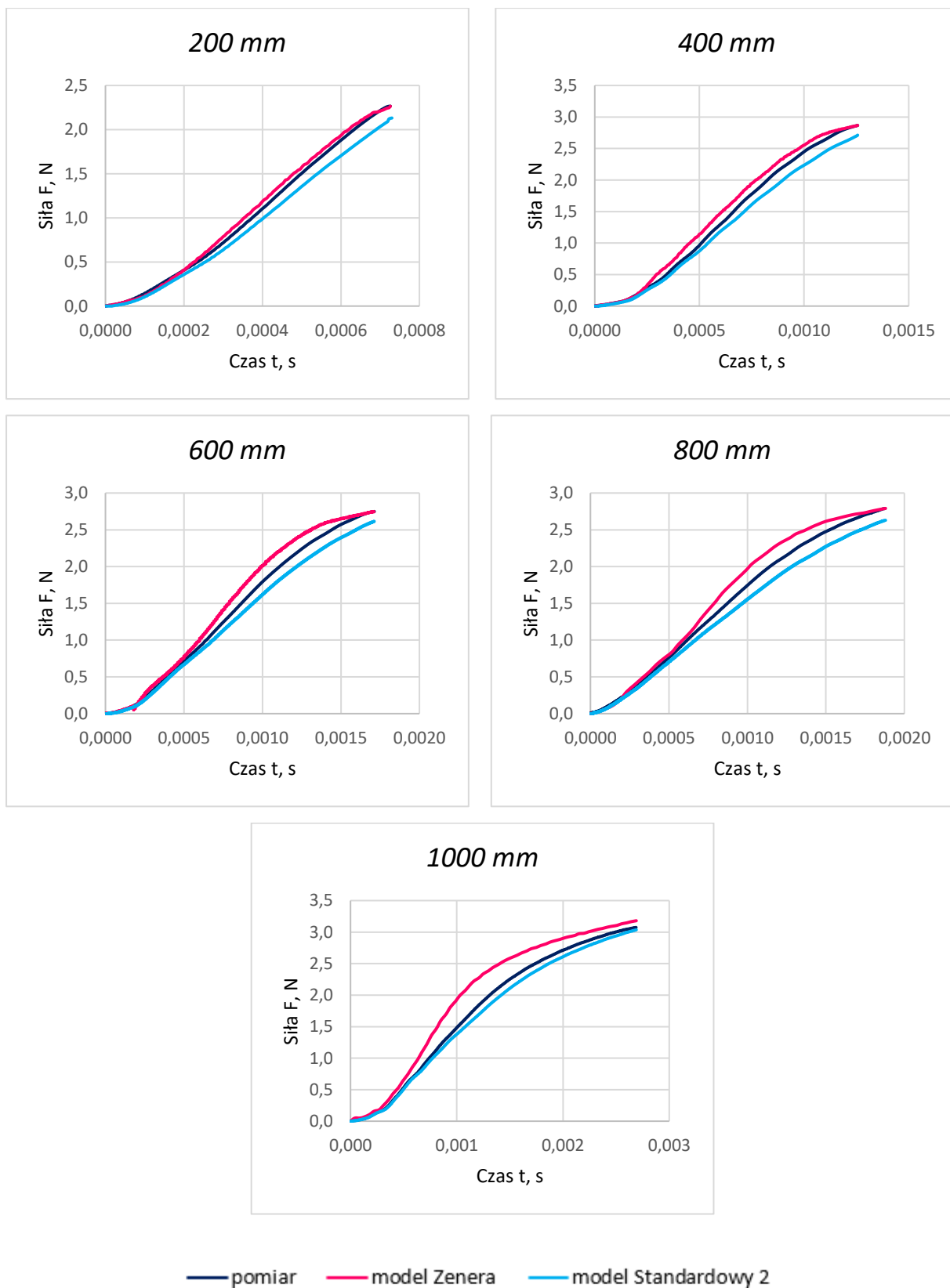
Rys. 13.2 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 156 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 40 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



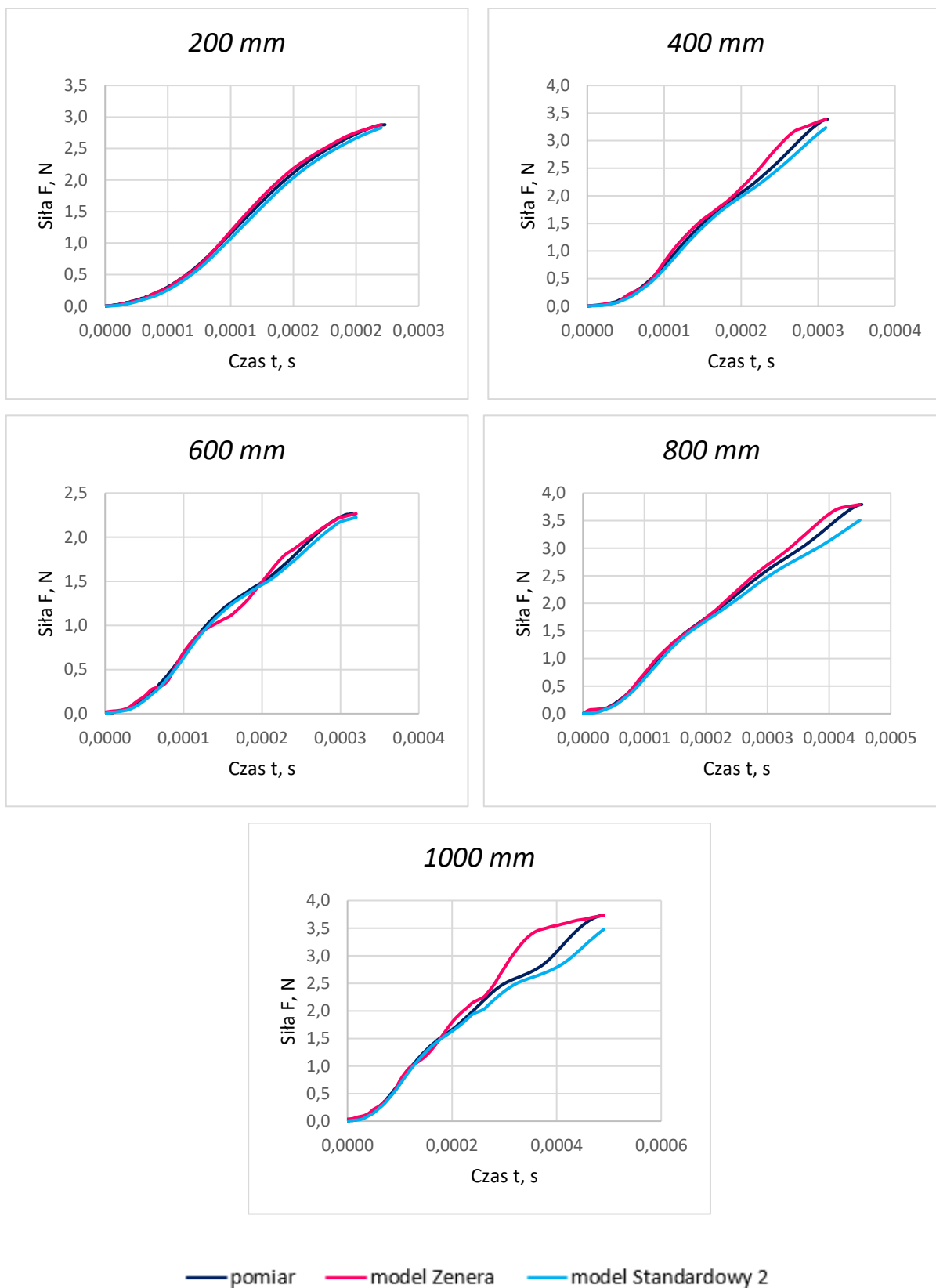
Rys. 13.3 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 55 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 60 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



Rys. 13.4 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 30 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



Rys. 13.5 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 167 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 100 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne

Porównanie charakterystyk uzyskanych w wyniku badań doświadczalnych i symulacji numerycznej modeli nieliniowych rozpatrywano w zależności od prędkości rozciągania dla pięciu długości rozciąganego odcinka nitki $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm. Przeprowadzona analiza wykazała, iż:

a) dla przędzy poliamidowej o masie liniowej 56 dtex:

- krzywe modelu Zenera pokrywają się z charakterystykami rzeczywistymi we wszystkich wariantach za wyjątkiem wariantu PA56dtex-100m/s-800mm, gdzie krzywa Zenera zbliżona jest do krzywej rzeczywistej,
- krzywe modelu Standardowego 2 pokrywają z charakterystykami doświadczalnymi we wszystkich wariantach za wyjątkiem dwóch przypadków: PA56dtex-60m/s-800mm – charakterystyki pokrywają się na odcinku $t = 0 \div 0,001$ s, PA56dtex-80m/s-800mm – krzywe pokrywają się na odcinku $t = 0 \div 0,0008$ s,

b) dla przędzy poliamidowej o masie liniowej 156 dtex:

- krzywe modelu Zenera pokrywają się z charakterystykami rzeczywistymi we wszystkich wariantach za wyjątkiem wariantów PA156dtex-40m/s-200mm i PA156dtex-40m/s-1000mm, dla których krzywa Zenera zbliżona jest do krzywej rzeczywistej,
- w przypadku trzech wariantów PA156dtex-60m/s-600mm, PA156dtex-80m/s-200mm i PA156dtex-100m/s-200mm krzywe modelu Standardowego 2 pokrywają się z charakterystykami doświadczalnymi, dla pozostałych wariantów krzywe modelowe wykazują dużą zbieżność z charakterystykami rzeczywistymi pokrywając się na odcinku odpowiadającemu początkowemu etapowi procesu rozciągania,

c) dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 55 dtex:

- krzywe modelu Zenera pokrywają się z charakterystykami rzeczywistymi we wszystkich wariantach za wyjątkiem: PES55dtex-20m/s-800mm, PES55dtex-20m/s-1000mm, PES55dtex-40m/s-600mm, PES55dtex-40m/s-800mm, PES55dtex-40m/s-1000mm, PES55dtex-60m/s-1000mm, PES55dtex-80m/s-200mm, PES55dtex-80m/s-1000mm, PES55dtex-100m/s-200mm, PES55dtex-100m/s-400mm dla których krzywe modelowe wykazują dużą zbieżność z charakterystykami doświadczalnymi miejscowo pokrywając się (w pewnych zakresach czasu rozciągania),
- w przypadku sześciu wariantów PES55dtex-60m/s-400mm, PES55dtex-80m/s-400mm, PES55dtex-80m/s-600mm, PES55dtex-100m/s-600mm, PES55dtex-100m/s-800mm i PES55dtex-100m/s-1000mm krzywe modelu Standardowego 2 pokrywają się z charakterystykami doświadczalnymi, dla pozostałych wariantów krzywe modelowe wykazują dużą zbieżność z charakterystykami rzeczywistymi za wyjątkiem wariantu PES55dtex-80m/s-1000mm dla którego krzywa modelowa i doświadczalna pokrywają się jedynie dla początkowych wartości czasu rozciągania,

d) dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 111 dtex:

- krzywe modelu Zenera pokrywają się z charakterystykami rzeczywistymi w przypadku 16 wariantów: PES111dtex-30m/s-200mm, PES111dtex-40m/s-200mm, PES111dtex-40m/s-400mm, PES111dtex-50m/s-200mm, PES111dtex-50m/s-400mm, PES111dtex-60m/s-200mm, PES111dtex-60m/s-400mm, PES111dtex-70m/s-200mm, PES111dtex-70m/s-400mm, PES111dtex-80m/s-200mm, PES111dtex-80m/s-400mm, PES111dtex-80m/s-

600mm, PES111dtex-90m/s-200mm, PES111dtex-90m/s-400mm, PES111dtex-90m/s-600mm, PES111dtex-100m/s-200mm, największa rozbieżność w przebiegu obu krzywych widoczna jest dla 4 wariantów: PES111dtex-50m/s-800mm, PES111dtex-50m/s-1000mm, PES111dtex-60m/s-800mm, PES111dtex-90m/s-1000mm, w pozostałych przypadkach krzywe otrzymane w wyniku symulacji numerycznej wykazują dużą zbieżność z przebiegami charakterystyk rzeczywistych pokrywając się z nimi w przedziale początkowych wartości czasu rozciągania, zauważyć można również, iż wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wydłuża się odcinek, na którym obie krzywe pokrywają się,

- dla modelu Standardowego 2 krzywe uzyskane w wyniku symulacji numerycznej wykazują dużą zbieżność z charakterystykami rzeczywistymi, pokrywając się z nimi w przedziale początkowych wartości czasu rozciągania, widoczna jest również zależność, iż wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wydłuża się odcinek, na którym obie krzywe pokrywają się,

e) dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 167 dtex:

- krzywe modelu Zenera pokrywają się z charakterystykami rzeczywistymi jedynie w przypadku dwóch wariantów: PES167dtex-60m/s-200mm, PES167dtex-100m/s-200mm, dla wariantów PES167dtex-20m/s-200mm i PES167dtex-40m/s-200mm krzywe modelowe wykazują dużą zbieżność z charakterystykami doświadczalnymi miejscowo pokrywając się, w pozostałych przypadkach krzywe otrzymane w wyniku symulacji numerycznej odbiegają nieznacznie od przebiegu charakterystyk rzeczywistych pokrywając się z nimi w przedziale początkowych wartości czasu rozciągania, zauważyć można również, iż wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wydłuża się odcinek, na którym obie krzywe pokrywają się,

- krzywe modelu Standardowego 2 pokrywają się z charakterystykami doświadczalnymi jedynie w przypadku dwóch wariantów PES167dtex-100m/s-200mm, PES167dtex-100m/s-600mm, dla wariantów PES167dtex-20m/s-200mm, PES167dtex-40m/s-200mm, PES167dtex-40m/s-800mm, PES167dtex-60m/s-200mm, PES167dtex-60m/s-400mm, PES167dtex-80m/s-200mm, PES167dtex-80m/s-400mm, PES167dtex-80m/s-600mm, PES167dtex-100m/s-400mm, PES167dtex-100m/s-800mm krzywe otrzymane w wyniku symulacji numerycznej wykazują dużą zbieżność z charakterystykami rzeczywistymi, dla pozostałych wariantów można stwierdzić, iż krzywe modelowe nieznacznie odbiegają od krzywych rzeczywistych pokrywając się z nimi w przedziale początkowych wartości czasu rozciągania, zauważyć można również, iż wraz ze wzrostem prędkości rozciągania wydłuża się odcinek, na którym obie krzywe pokrywają się.

Ogólna konkluzja:

Nieliniowe modele reologiczne, opisujące dynamiczny proces rozciągania nitek, analizowane w środowisku eksperymentu numerycznego odpowiadają wielkościom rzeczywistym procesu identyfikowanego z wykorzystaniem autorskich, unikatowych metod pomiarowych.

13.1 Weryfikacja stopnia dopasowania charakterystyk modelowych do rzeczywistych

Weryfikację stopnia dopasowania otrzymanych charakterystyk modelowych i eksperymentalnych przeprowadzono z wykorzystaniem analizy współczynnika korelacji R [95, 96].

$$R_{Y,\hat{Y}} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2}} \quad (13.1)$$

gdzie $\hat{Y}_i$ to przewidywana modelem regresji wartość zmiennej Y , a $\bar{\hat{Y}}$ jest średnią zmiennych $\hat{Y}_i$.

Współczynnik korelacji przyjmuje wartość z przedziału $R \in \langle -1; 1 \rangle$. Im wartość współczynnika korelacji jest bliższa wartości jeden tym silniejszy stopień dopasowania modelu. Siłę korelacji pomiędzy cechami można zdefiniować następująco:

- $0,0 < |R| \leq 0,2$ – bardzo słaba,
- $0,2 < |R| \leq 0,4$ – słaba,
- $0,4 < |R| \leq 0,6$ – umiarkowana,
- $0,6 < |R| \leq 0,8$ – silna,
- $0,8 < |R| \leq 1,0$ – bardzo silna.

Kierunek korelacji można określić przez jej dodatni bądź ujemny znak. Zmiana jednej zmiennej w korelacji dodatniej powoduje zmianę drugiej zmiennej w tym samym kierunku, natomiast w przypadku korelacji ujemnej zmiana ma kierunek przeciwny.

Miarą dopasowania modelu do danych empirycznych jest współczynnik determinacji R^2 zdefiniowany jako kwadrat współczynnika korelacji.

$$R_{Y,\hat{Y}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 - \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (13.2)$$

Współczynnik determinacji przyjmuje wartość z przedziału $R \in \langle 0; 1 \rangle$ i służy do oceny jakości dopasowania modelu. Im większa wartość współczynnika determinacji tym lepsza zgodność porównywanych krzywych.

Weryfikację stopnia dopasowania charakterystyk modelowych i eksperymentalnych przeprowadzono w środowisku programu Excel. Dla każdego z wariantów wyznaczono współczynnik korelacji uwzględniając dwa wybrane modele reologiczne, model Zenera i model Standardowy 2. Otrzymane dla każdej z przędz wyniki uśredniono.

Dla modelu Zenera otrzymano następujące wartości współczynnika korelacji:

- PA 56 dtex – $R = 0,9998$
- PA 156 dtex – $R = 0,9996$
- PES 55 dtex – $R = 0,9993$
- PES 111 dtex – $R = 0,9970$
- PES 167 dtex – $R = 0,9940$

Dla modelu Standardowego 2 otrzymano następujące wartości współczynnika korelacji:

- PA 56 dtex – $R = 0,9998$
- PA 156 dtex – $R = 0,9989$
- PES 55 dtex – $R = 0,9994$
- PES 111 dtex – $R = 0,9996$
- PES 167 dtex – $R = 0,9989$

Biorąc pod uwagę uzyskane wartości współczynnika korelacji zawierające się w przedziale $0,8 < |R| \leq 1,0$ można stwierdzić, iż dla wszystkich wariantów przędz uzyskane krzywe symulacji numerycznej modelu Zenera i Standardowego 2 wykazują bardzo silną korelację z charakterystykami otrzymanymi w wyniku procesu dynamicznego rozciągania nitek.

W wyniku przeprowadzonej analizy porównawczej charakterystyk doświadczalnych z krzywymi symulacji numerycznej można zauważyć, iż:

- model Standardowy 2 dla wszystkich przeanalizowanych przypadków lepiej odzwierciedla charakter przebiegu krzywych doświadczalnych,
- lepsze dopasowanie charakterystyk modelowych do krzywych rzeczywistych uzyskano dla przędz poliamidowych,
- w przypadku przędz poliestrowych stopień dopasowania krzywych modelowych do charakterystyk doświadczalnych zmniejsza się nieznacznie wraz ze wzrostem masy liniowej przędzy,
- spośród 150 przeanalizowanych wariantów krzywe modelowe pokrywają się z charakterystykami doświadczalnymi dla modelu Zenera w 80 przypadkach natomiast dla modelu Standardowego 2 w 34 wariantach,
- dla większości przypadków obie krzywe modelowe pokrywają się z charakterystykami rzeczywistymi w przedziale początkowych wartości czasu rozciągania, który zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości rozciągania,
- widoczne rozbieżności w przebiegu krzywych modelowych i charakterystyk doświadczalnych wynikają z uniwersalnego algorytmu programu symulacyjnego, w którym dokładność analizy dynamicznej ciał ultralekkich jest ograniczona.

14. PODSUMOWANIE

Podsumowanie pracy doktorskiej obejmuje analizę dynamicznych procesów rozciągania zachodzących w materiałach tekstylnych podczas wytwarzania i użytkowania z wykorzystaniem oryginalnych narzędzi pomiarowych oraz analizę teoretyczną w eksperymencie numerycznym z użyciem nieliniowych trójparametrowych modeli reologicznych.

1. ***Przeprowadzono studium literaturowe obejmujące zagadnienia reologii w aspekcie identyfikacji właściwości mechanicznych materiałów tekstylnych w procesach statycznego i dynamicznego rozciągania.*** Wykonana analiza pokazała, iż badaniu poddawane są różne materiały włókiennicze między innymi przędze, nitki, tkaniny i dzianiny. Proces wymuszeń rozciągania opisywany jest z zastosowaniem modeli reologicznych 2 – 3 parametrowych oraz bardziej złożonych modeli uwzględniających ciała nieliniowo-sprężyste oraz elementy cierne ze stałym i nieliniowym tarcieniem suchym. ***W przeważającej większości analiz proces rozciągania prowadzony jest na ogólnie dostępnych maszynach wytrzymałościowych w warunkach statycznego obciążenia. Dynamiczne procesy rozciągania wymagają budowy odpowiednich przyrządów oraz opracowania metodyki pomiarowej.*** Rozwój dziedziny nauki związanej z modelowaniem numerycznym w środowisku MES umożliwia korzystanie z szerokiego rodzaju narzędzi informatycznych, do którego należą między innymi środowiska programowe ANSYS, Autodesk Inventor, ABAQUS, ADINA, LS-Dyna, ProEngineer, CATIA czy Patran/Nastran.

2. ***Zdefiniowano materiał badań w postaci wytypowanych rodzajów surowców oraz określono warunki prowadzonych badań*** takie jak długości rozciąganych odcinków nitek oraz zakres wartości dynamicznych prędkości rozciągania. ***Pomiary przeprowadzono dla przędz poliamidowych o masie liniowej 56 i 156 dtex oraz przędz poliestrowych o masie liniowej 55, 111 i 167 dtex,*** które są najbardziej rozpowszechnionym surowcem stosowanym w technologiach dziewiarskich. ***Długości rozciąganych odcinków wynoszą $l = 200 \div 1000$ mm*** co odpowiada pomierzonym odcinkom nitek w strefie podawania oraz między elementami roboczymi na maszynach dziewiarskich. ***Prędkości rozciągania wynosiły $V = 10 \div 100$ m/s.*** Przyjęte prędkości wymuszeń korelują z rzeczywistymi prędkościami występującymi w technologiach włókienniczych, które w dynamicznym rozciąganiu mieszczą się w granicach od 1,2 do 20 m/s oraz odpowiadają prędkością zmiany sił lub przyrostowi wydłużenia w warunkach eksploatacji tekstyliów gdzie, w przypadku zwłaszcza wyrobów technicznych mieszczą się w granicach od 28 do 950 m/s.

3. ***Dokonano analizy empirycznej właściwości wytrzymałościowych przędz w procesie rozciągania na maszynie wytrzymałościowej.*** Wytypowane do badań nitki o długości 500 mm poddano procesowi rozciągania z prędkością 2 mm/min. W wyniku przeprowadzonych pomiarów otrzymano wykresy zależności siły w funkcji wydłużenia, na podstawie których ***wyznaczono nieliniowy współczynnik sprężystości statycznej nitek.***

4. ***Zaprojektowano i zbudowano według autorskiej koncepcji oryginalne urządzenie do przeprowadzenia badań dynamicznego rozciągania oraz opracowano metodykę pomiaru i rejestracji wyników badań.*** Przyrząd zbudowano na bazie obrotowego koła zamocowanego na ramie przytwierdzonej do podstawy stanowiska. Napęd stanowił silnik indukcyjny trójfazowy połączony z kołem za pomocą układu dwóch przekładni mechanicznych zębatych ciągłych multiplikujących. Prędkość obrotową silnika regulowano z wykorzystaniem falownika uzyskując zakres prędkości koła zamachowego w przedziale od 128 do 1280 obr/min. Przędzę mocowano pomiędzy dwoma zaciskami, jednym stałym, a drugim ruchomym. Na kole umieszczono trzpień, którego zadaniem było uchwycenie uformowanej

na jednym z końców badanej przędzy pętli. Pomiar siły w nitce dokonywany był za pomocą czujnika tensometrycznego o wysokiej częstotliwości drgań własnych wykonanego w ramach niniejszej pracy. Wyniki pomiarów rejestrowano na komputerze wyposażonym w kartę pomiarową o taktowości 10 MHz umożliwiającą zapis odpowiedniej liczby punktów pomiarowych pozwalających na prawidłowe odwzorowanie charakterystyki przebiegu *procesu rozciągania nitki z dużymi prędkościami w zakresie od 0,5 do 100 m/s*.

5. *Wykorzystując zbudowane urządzenie przeprowadzono serię badań empirycznych dynamicznego rozciągania nitek. Sumaryczna liczba wariantów pomiarów wynosiła 150, a otrzymane wyniki przedstawiono w postaci charakterystyk siły w funkcji wydłużenia $F = f(\Delta l)$. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań określono wpływ prędkości i długości rozciąganych odcinków na czasowe przyrosty siły oraz wyznaczono nieliniowe wartości współczynnika sprężystości dynamicznej.*

6. *Zaprojektowano i zbudowano oryginalny przyrząd do wyznaczenia nieliniowego współczynnika lepkości poprzez pomiar sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach. Długość rozciąganego odcinka przędzy wynosiła 1000 mm, a czas pomiaru 300 s. Na podstawie danych odczytanych z charakterystyk siły w funkcji czasu $F = f(t)$ otrzymanych w wyniku przeprowadzonych pomiarów obliczono wartości współczynnika lepkości dla poszczególnych przędz.*

7. *Dokonano analizy i wyboru modeli reologicznych identyfikujących zachowanie przędz poddanych procesowi jednoosiowego rozciągania uwzględniając rzeczywiste warunki ich przerobu w technologiach dziania. Wybrano modele trójparametrowe tj. model Zenera i model Standardowy 2, które opisują proces rozciągania nitki w ujęciu ciała lepko-sprężystego odwzorowując jednocześnie zjawisko relaksacji i pełzania. Dla niniejszych modeli zdefiniowano parametry wejściowe: nieliniowe współczynniki sprężystości statycznej i dynamicznej oraz nieliniowy współczynnik lepkości.*

8. *Przeprowadzono analizę podatności wybranych modeli reologicznych dla ograniczonych stałych wartości parametrów wejściowych: sztywności statycznej i dynamicznej oraz współczynnika lepkości. Na jej podstawie stwierdzono, iż Model Zenera jest najbardziej czuły na zmiany wartości współczynnika sprężystości podczas statycznego wymuszenia E_K oraz współczynnika sprężystości wyznaczonego przy dynamicznych obciążeniach nitki w zakresie $E_{dZ} = 4 \div 32$ N, natomiast model Standardowy 2 wykazuje największą podatność na zmiany współczynnika E_K .*

9. *Wykonano badania symulacyjne dynamicznego procesu rozciągania nitek. W środowisku programu Autodesk® Inventor® zbudowano wirtualny model analogowy na bazie odpowiednio połączonych modułów modeli reologicznych Kelvina – Voigta. Wybrane do analizy numerycznej modele trójparametrowe Zenera i Standardowy 2 uzyskano poprzez podstawienie zerowych wartości współczynników w niewykorzystanych członach modeli cząstkowych. Wykonano serię obliczeń symulacji dynamicznego procesu rozciągania nitek. Przeprowadzone badania są oryginalną i autorską częścią teoretyczną pracy doktorskiej.*

10. *Dokonano analizy porównawczej charakterystyk uzyskanych na podstawie badań eksperymentalnych i modelowych procesu dynamicznego rozciągania nitek. Dla każdego z wariantów, uwzględniając modele trójparametrowe, wyznaczono współczynnik korelacji w celu przeprowadzenia weryfikacji stopnia dopasowania otrzymanych charakterystyk rzeczywistych i modelowych.*

Przedstawione powyżej uzyskane efekty pracy doktorskiej dowodzą realizacji przyjętego planu pracy oraz poprawności postawionej tezy pracy.

15. WNIOSKI

1. **Aktualny stan wiedzy** na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury krajowych i zagranicznych czasopism, książek i monografii naukowych pokazuje, iż:
 - a) **określanie właściwości mechanicznych materiałów włókienniczych prowadzonych na tradycyjnych maszynach wytrzymałościowych w warunkach statycznych nie pozwala przewidzieć ich zachowań w procesie wymuszeń dynamicznych. Do badań dynamicznego procesu rozciągania nitek i materiałów tekstylnych z surowców naturalnych i syntetycznych stosowane są specjalistyczne urządzenia** wykorzystujące energię spadającej masy lub opadającego wahadła, przyrządy z napędem pneumatycznym, elektromechanicznym oraz z wykorzystaniem koła zamachowego, urządzenia oparte na napędach hydraulicznych, balistycznych, wybuchowo-balistycznych i pneumo-balistycznych. W praktyce urządzenia te pozwoliły na przeprowadzenie **badania dynamicznego rozciągania z prędkościami w zakresie od 3 do 300 m/s**. Znacząca grupa badań odnosi się do badań wyrobów technicznych, kordów samochodowych oraz linek i czaszy spadochronowych. Wyniki badań uwzględniają charakterystyki zmienności w funkcji wydłużenia, pracę zerwania, moduły sztywności początkowej, dla różnych surowców rozciąganych materiałów tekstylnych. **Generalnie we wszystkich przypadkach znacząco spada wydłużenie zrywające natomiast dane dotyczące charakteru zmiany ekstremalnych sił i pracy zerwania są rozbieżne.**
Autorzy badań w prowadzonych analizach **procesu dynamicznego rozciągania tekstyliów tłumaczą charakter zmian obciążeń zjawiskami fizycznymi zachodzącymi w strukturze chemicznej polimerów włóknistych poddanych „szokowemu” rozciąganiu**. Istotnym problemem badań empirycznych prowadzonych w latach 60 – 80 ubiegłego wieku była bariera technologiczna „ubogich” technicznie urządzeń elektroniczno-informatycznych. Wszyscy autorzy podkreślają jednomyślnie, iż **dla oceny właściwości mechanicznych tekstyliów w warunkach dynamicznych niezbędne są metody empirycznych pomiarów dynamicznego rozciągania tekstyliów**.
 - b) modele reologiczne często wykorzystywane w opisie zachowania odkształceń lepko-sprężystych to modele dwuparametrowe (podstawowe) Maxwella i Kelvina - Voigta oraz modele trójparametrowe Eyringa i Zenera. Do lepszego odzwierciedlenia relaksacji naprężeń stosowany jest model Khuna lub Alfrey'a do dokładniejszego opisu zjawiska pełzania. Stosowane są również modele trzy i czteroparametrowe pierwszego i drugiego rodzaju. Modele reologiczne w zależności od przyjętych założeń określających mechaniczne zachowanie elementów składowych takich jak sprężyna i tłumik mogą być opisane zależnościami liniowymi lub nieliniowymi.
 - c) **identyfikacja właściwości mechanicznych procesów włókienniczych i materiałów tekstylnych dokonywana jest z wykorzystaniem modeli reologicznych ciał lepko-sprężystych w tym modeli wieloparametrowych, trójczłonowych liniowych i nieliniowych oraz z uwzględnieniem elementów ciernych.**
 - d) w opisie zachowań tekstyliów w procesach wytwarzania i użytkowania w tym także z uwzględnieniem modeli reologicznych stosowane są środowiska programowe pozwalające przewidywać i rozwiązywać niniejsze zagadnienia w formie prowadzonego eksperymentu numerycznego opartego na metodzie elementów skończonych.
2. **Jako materiał badań przyjęto dwa rodzaje nitek wielofilamentowych syntetycznych, nitki poliamidowe PA6 i poliestrowe w zakresie mas liniowych od 55 do 167 dtex. Nitki te w przeważającej ilości stosowane są w technologiach dziewiarskich w produkcji**

asortymentów dzianin dla przemysłu odzieżowego, obuwniczego i samochodowego, ale także do wytwarzania preform kompozytów, wyrobów dekoracyjnych, dzianin technicznych stosowanych w medycynie. Dla przyjętych pięciu rodzajów nitek określono rzeczywiste masy liniowe oraz charakterystyki rozciągania statycznego wyznaczając średnią siłę zrywającą, której wartości mieszczą się w granicach od 209,5 cN do 678,4 cN i wytrzymałość właściwą oraz średnie wydłużenie zrywające przyjmujące wartości w zakresie od 23,0 % do 45,2 %.

3. **Odnosząc się do rzeczywistych uwarunkowań analizy mechanicznych właściwości nitek identyfikację dynamicznych procesów rozciągania przeprowadzono dla przyjętych wartości prędkości rozciągania w zakresie od 10 do 100 m/s oraz długości rozciąganych odcinków nitek od 200 do 1000 mm, które to parametry korelują z wielkościami wymuszeń w procesach technologicznych tekstyliów i podczas rzeczywistych warunków użytkowania wyrobów tekstylnych.**
4. **Zaprojektowano i zbudowano unikatowe stanowisko badawcze w ujęciu mechanicznym, elektronicznym oraz programowo - informatycznym oraz opracowano metodykę pomiaru obciążeń dynamicznych rozciąganych nitek o średnich masach liniowych w szerokim zakresie prędkości do 200 m/s i długości rozciąganych przędz do 1500 mm. Urządzenie pomiarowe wykonane w ramach pracy doktorskiej pozwoliło wykonać badania określające wpływ prędkości i długości rozciąganych odcinków na czasowe przyrosty siły oraz wyznaczenie nieliniowych wartości współczynnika sprężystości dynamicznej. W zaprojektowanym urządzeniu istotą jakości prowadzonego eksperymentu był dobór karty akwizycji danych o dużej taktowości próbkowania 10 MHz umożliwiającej zapis ponad 10000 punktów pomiarowych pozwalających na prawidłowe odwzorowanie charakterystyki przebiegu procesu rozciągania nitek w czasie dla prędkości w zakresie od 0,5 do 100 m/s. Do pomiaru sił w nitce zbudowano czujnik tensometryczny o wysokiej częstotliwości drgań własnych 11 kHz, z wykorzystaniem nowoczesnej konstrukcji tensometrów półprzewodnikowych o dużej czułości odkształceń elementu sprężystego czujnika, zastosowano także specjalistyczne ekranowane wiązki przewodów transmisji danych analogowych, zaprojektowano i zbudowano wielokanałowy wzmacniacz sygnału czujnika tensometrycznego, wykonano kalibrację układu pomiarowego wraz z określeniem funkcji liniowych skalowania charakterystyk dynamicznych sił w nitkach z wartości bezpośrednio mierzonych zmian napięcia prądu w mV na wartości siły w nitkach. Część pomiarowa urządzenia była wyposażona w specjalistyczne osłony zapewniające bezpieczeństwo badacza wykonującego pomiary zwłaszcza przy dużych prędkościach rozciągania. Sumaryczna liczba wariantów badań wyniosła 150 co wiązało się z wykonaniem około 2000 pomiarów.**
5. **Analiza charakterystyk dynamicznego rozciągania wykazała, iż dla tej samej długości rozciąganego odcinka przędzy wraz ze wzrostem prędkości rozciągania następuje spadek wartości siły rozciągania nitek średnio od 20% do 34% dla przędz poliamidowych, oraz w granicach od 25% do 55% dla przędz poliestrowych. Wartości wydłużenia względnego maleją średnio od 28% do 46% dla przędz poliamidowych oraz od 31% do 40% w przypadku nitek poliestrowych. Dla tej samej prędkości rozciągania wzrost długości rozciąganego odcinka przędzy powoduje wzrost wartości siły rozciągania nitki średnio od 17% do 30% dla przędz poliamidowych, oraz o 37% dla przędz poliestrowych, wartość wydłużenia względnego maleje średnio od 19% do 36% dla przędz poliamidowych oraz od 19% do 42% w przypadku nitek poliestrowych.**

6. **Wyznaczono nieliniowe współczynniki sprężystości statycznej** dla badanych przędz na podstawie pomierzonych charakterystyk rozciągania nitek na klasycznej maszynie wytrzymałościowej Haunsfield model H50K-S zadając minimalną prędkość rozciągania 2 mm/min. **Otrzymane zależności siły w funkcji czasu poddano różniczkowaniu poprzez obliczenie pierwszej pochodnej dF/dt .** Funkcje nieliniowych statycznych współczynników sprężystości wyznaczono dla wszystkich badanych przędz według opracowanego algorytmu w środowisku pakietu Microsoft Office Excel oraz w procedurze programowej Autodesk® Inventor®.
7. **Na podstawie przeprowadzonej analizy, dla wybranych wariantów pomiarów, charakterystyk siły w funkcji odkształcenia otrzymanych w wyniku przeprowadzenia badań statycznego i dynamicznego rozciągania nitek stwierdzono znaczące różnice jakościowe i ilościowe w charakterze przebiegu obu krzywych.** Wydłużenie względne przy dynamicznym rozciąganiu przędz poliestrowych jest średnio o około 2,8 razy mniejsze przy zerwaniu w stosunku do wydłużenia uzyskanego przy rozciąganiu statycznym, natomiast dla przędz poliamidowych maleje średnio o 1,7 raza. Niższe wartości sił średnio o około 1,5 raza odnotowano podczas rozciągania dynamicznego. **Odmienność zachowań statycznego i dynamicznego rozciągania jest fundamentalnym i zarówno istotnym argumentem rozdzielnego traktowania analizy właściwości mechanicznych tekstyliów w warunkach statycznych i dynamicznych, oraz potwierdza zasadność prowadzenia badań odnoszących się do rzeczywistego środowiska obcowania tekstyliów w procesach technologicznych i użytkowych. Niniejszy wniosek silnie argumentuje istotę problematyki prowadzonych badań w obszarze „dynamiki tekstyliów” w niniejszym doktoracie.**
8. Na podstawie analizy literaturowej i badań własnych dotyczących teorii modeli reologicznych opisujących zachowanie przędz poddanych procesowi jednoosiowego rozciągania przy uwzględnieniu rzeczywistych warunków procesu technologicznego dziania **dokonano wyboru dwóch modeli trójparametrowych tj. modelu Zenera i modelu Standardowego 2, które opisują proces rozciągania nitki w ujęciu ciała lepko-sprężystego odwzorowując jednocześnie zjawisko relaksacji i pelzania.** Dla niniejszych modeli „otwartych” zdefiniowano parametry wejściowe: nieliniowe współczynniki sprężystości statycznej i dynamicznej oraz nieliniowy współczynnik lepkości. **Niniejsze nieliniowe modele reologiczne są fundamentalnym założeniem poczynionym w pracy doktorskiej służącym istocie analizy zjawisk fizycznych procesu dynamicznego rozciągania nitek.**
9. **Wykonano badania symulacyjne podatności modeli trójparametrowych dla stałych wartości sztywności statycznej i dynamicznej oraz współczynnika lepkości.** Analiza czułości zmian przyrostu siły w rozciąganych nitkach w funkcji parametrów modeli wykazała, iż zarówno model Zenera jak i model Standardowy 2 są **najbardziej wrażliwe na zmianę współczynnika sprężystości statycznej E_K , natomiast wykazują niewielką podatność na zmianę współczynnika lepkości η .** Ponadto model Zenera reaguje na zmiany współczynnika sprężystości dynamicznej w zakresie wartości $E_{dZ} = 4 \div 32$ N. Wiedza ta ma istotne znaczenie w procesie badań teoretycznych w kontekście planowanego zakresu zmian wartości parametrów wejściowych członów sprężystości i lepkości.
10. **Zaprojektowano i zbudowano oryginalne stanowisko badawcze w celu wyznaczenia nieliniowych współczynników lepkości poprzez pomiar sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach.** Przędze mocowano między dwoma zaciskami, nieruchomym i ruchomym, którego przesunięcie uzyskano poprzez przesuw tłoka siłownika pneumatycznego.

Wartości sił mierzone były za pomocą czujnika tensometrycznego o częstotliwości drgań własnych 20 kHz. Z uwagi na to, iż układ pomiarowy rejestrował wartości napięcia elektrycznego w woltach konieczne było wykonanie kalibracji czujnika pomiarowego umożliwiającej przeliczenie ich na wartości siły w niutonach. Długość rozciąganego odcinka przędzy wynosiła 1000 mm, a czas pomiaru 300 s. Uzyskane charakterystyki procesu relaksacji opisano odwrotnością funkcji logarytmicznej zmian sił w czasie.

11. Architektura modeli reologicznych ciała lepko-sprężystego tworzona była przy założeniu nieograniczonych możliwości połączeń w układzie szeregowym i równoległym członów sprężystości i tłumienia w budowaniu wieloparametrowych modeli. W środowisku programu Autodesk® Inventor® zbudowano wirtualny model analogowy z odpowiednio połączonych trzech modeli reologicznych Kelvina – Voigta, którego struktura umożliwiła uzyskanie wybranych do analizy modeli Zenera i Standardowego 2. Przed aplikacją modeli fizycznych zweryfikowano ich poprawność matematyczną poprzez analizę porównawczą charakterystyk uzyskanych w wyniku analitycznego i numerycznego rozwiązywania równań stanu prostych modeli dwuparametrowych Kelvina – Voigta i Maxwella. Wyniki obliczeń wykazały jednoznacznie „pokrycie”, identyczność charakterystyk zmian sił w funkcji czasu przy współczynniku korelacji krzywych $R = 1$. Dało to podstawę do akceptacji poprawności przyjętych założeń w budowie modeli. W wyniku przeprowadzenia serii obliczeń z wykorzystaniem opracowanego w programie algorytmu symulacji procesu dynamicznego rozciągania nitek uzyskano charakterystyki siły w funkcji czasu. Dowiedziono, iż przyjęta filozofia modelowania numerycznego pozwala na opisanie zjawisk fizycznych procesu dynamicznego rozciągania nitek (tekstyliów) przy pominięciu złożonych rozwiązań analitycznych równań stanu modeli wieloparametrowych.
12. **Porównanie przebiegu charakterystyk empirycznych z krzywymi teoretycznymi uzyskanymi w wyniku przeprowadzenia symulacji numerycznej z wykorzystaniem modelu reologicznego Zenera i Standardowego 2 pozwala stwierdzić, iż z dużą dokładnością odwzorowują one rzeczywiste zachowanie wybranych do badań nitek poliestrowych i poliamidowych poddanych procesowi dynamicznego rozciągania.** Najmniejszą wartość współczynnika korelacji $R = 0,9940$ odnotowano przy porównaniu charakterystyk rzeczywistych i modelowych otrzymanych dla modelu Zenera i przędzy poliestrowej PES 167 dtex natomiast największą $R = 0,9998$ w przypadku obu modeli dla przędzy poliamidowej PA 56 dtex.
13. **Wyniki weryfikacji** stopnia dopasowania charakterystyk otrzymanych na podstawie badań eksperymentalnych i modelowych procesu dynamicznego rozciągania nitek **wykazały bardzo silną korelację, co skłania do konkluzji o przydatności wykorzystanych w pracy narzędzi fizycznego opisu procesu rozciągania nitek (tekstyliów) w postaci nieliniowych modeli reologicznych oraz rozwiązań ilościowych analizy procesu z wykorzystaniem unikatowych metod empirycznych.**

Przeprowadzone podsumowanie rezultatów pracy doktorskiej oraz przedstawione wnioski skłaniają do generalnej konkluzji, o udowodnieniu poprawności postawionej tezy pracy.

LITERATURA

1. Chróścielewski J., Rucka M., Witkowski W., Metody doświadczalne wytrzymałości materiałów, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2018, s. 78, ISBN 978-83-7348-741-3.
2. КУДРЯШОВА Н.И., КУДРЯШОВ Б.А., ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, Moskwa 1974, s. 270.
3. Крагельский И. В., Динамическое определение прочности текстильных материалов, М., Гизлегпром, 1933, с. 51.
4. Newman S. B., Wheeler H. G., Impact Strength of Nylon and Sisal Ropes., Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1953, Vol. 23, No. 7, p. 489-494.
5. Кукин Г. Н. и др., Учение о волокнистых материалах. М., Гизлегпром, 1949, с. 118.
6. Lyons W. J., Preityman J. B., Textile Research Journal, 1953, Vol. 23, No. 12, p. 917-925.
7. Schiefer H. F., Appel W. D., Krasny J. F., Richey G. G., Impact Properties of Yarns Made from Different Fibers, Textile Research Journal, 1953, Vol. 23, No. 7, p. 489-494.
8. Роговина А. А., Каргин В. А., Изучение поведения шинного корда при ударе. Сопротивляемость корда ударным нагрузкам, Журнал технической физики, 1956, т. 26, вып. 12, с. 2690-2704.
9. Meredith R., The Effect of Rate of Extension on the Tensile Behaviour of Viscose and Acetate Rayons Silk and Nylon, Journal of the Textile Institute, 1954, No. 1.
10. Meredith R., The Mechanical Properties of Textile Fibers, Edited by College of Technology University of Manchester, North – Holland Publishing Company, Amsterdam, 1956.
11. Талызин М. Д., Изучение механических свойств текстильных нитей с помощью электрических измерений, М., Гизлегпром, 1959, с. 100.
12. Laible R. C., Morgan H. M., The Viscoelastic Behaviour of Isotactic Polypropylene Fibers, Journal of Applied Polymer, 1962, Vol. 6, No. 21.
13. Dogliotti E. C., Yelland W., Effect of strain Rate on the Viscoelastic Properties of High Polymeric Fibrous Materials, Journal of Applied Polymer Science, 1964, Vol. 8, No. 1, p. 211-235.
14. Hall J. H., The Tensile Properties of Textile Yarns of very High Strain Rates, Journal of Applied Polymer Science, 1964, Vol. 8, No. 1, p. 237-256.
15. Neil O., High Speed Testing, Journal of Applied Polymer Symposia, 1967, Vol. 5, No. 1, p. 41-51.
16. German J., Podstawowe informacje nt. LINIOWA MECHANIKA PĘKANIA, Wytrzymałość materiałów II, 2001, Case study No. 165, TWI WORLD CENTRE FOR MATERIALS JOINING TECHNOLOGY, p. 13.
17. Лазуркин Ю. С., Фогельсон Р. Л., Журнал технической физики, 1951, т. 21, с. 267.
18. Регель В. Р., Журнал технической физики, 1951, т. 21, с. 288.
19. Гуль В. Е., Структура и прочность полимеров, М., Химия, 1971, с. 344.
20. Перепелкин К. Е., Механика полимеров, 1966, т. 6, с. 850.
21. Бартенев Г. М., Валишин А. А., Теоретическая прочность полимеров в полностью ориентированном состоянии, Механика полимеров, 1970, с. 458-464.
22. Dziubiński M., Kiljański T., Sęk J., Podstawy teoretyczne i metody pomiarowe reologii, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2014, s. 308, ISBN 978-83-7283-641-0.
23. Gluza J., Kobza W., Mechanika i reologia techniczna, 1991, Skrypt PŁ, Łódź, s. 476.
24. Urbańczyk G., Fizyka włókna, Własności fizyczne włókien, 2002, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, s. 420.

25. Mezger T. G., *The Rheology Handbook*, 2006, Hannover: Vincent Network, p. 299, ISBN 3-87870-174-8.
26. Osswald T. A., *Polymer Rheology, Fundamentals and Applications*, 2014, Hanser Publishers, Munich, p. 225, ISBN 978-1-56990-517-3.
27. Barnes H. A., Hutton J. F., Walters K., *An introduction to rheology*, 1993, Elsevier, p. 199, ISBN 0-444-87140-3.
28. Derski W., Ziemia S., *Analiza modeli reologicznych*, 1968, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, s. 160.
29. Drozdov A.D., *Finite Elasticity and Viscoelasticity. A Course in the Nonlinear Mechanics of Solids*, 1996, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, p. 456.
30. Drozdov A.D., *A constitutive model for nonlinear viscoelastic media*, 1997, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, No. 21, p. 2685-2707.
31. Kopias K., *Technologia dzianin kolumniowych*, 1984, WNT, Warszawa, s. 177.
32. Mikołajczyk Z., *Identyfikacja procesu dziania kolumniowych struktur anizotropowych na osnowarkach*, 2009, *Zeszyty Naukowe Nr 1047, Rozprawy Naukowe, Z. 381*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, s. 234, ISSN 0137-4834.
33. Mikołajczyk Z., *Model of the Feeding Process of Anisotropic Warp Knitted Fabrics*, 2013, *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 11, No. 2(41), p. 58-62.
34. Szosland J., Czołczyński M., *Prędkość rozchodzenia się impulsu napięciowego w nitkach*, 1973, *Przegląd Włókienniczy nr 27*, Warszawa, s. 122-127.
35. Sajdl R., *Modellierung der Beanspruchung beim Schusseintrag an Webmaschinen*, 1985, *Przegląd prac naukowo – badawczych*, Moskwa, Liberec, Łódź, Karl-Marx-Stat.
36. Kowalski K., *Identyfikacja dynamicznych sił w nitkach na szydełkarkach na podstawie komputerowej i cyfrowej techniki pomiarowej*, 1991, *Zeszyty naukowe*, Łódź, s. 17-22.
37. Mikołajczyk Z., *Identification of the Dynamic Properties of Yarn Used in Rib Knitting*, 1995, *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, Vol.3, No 4(11), p. 29-33.
38. Vangeheluwe L., *Model przemieszczenia się krawędzi tkaniny w wyniku relaksacji w czasie zatrzymania krosna*, maj 1995, *Artykuł do wygłoszenia na Międzynarodowej Konferencji IMTEX'95 w Łodzi*.
39. Manich A.M., Ussman M. H., Barella A., *Viscoelastic Behaviour of Polypropylene Fibers*, 1999, *Textile Research Journal*, No. 69(5), p. 325-330.
40. Prążyńska A., Mikołajczyk Z., *Identification of the process of dynamic stretching of threads in warp knitting technology. Part II: Experimental identification of the process of stretching threads, with verification of rheological models*, 2018, *Autex Research Journal*, Vol. 18, No. 1, p. 1-6.
41. Włodarczyk B., Kowalski K., *Analysis of the Process of Pulling a Thread Through a Friction Barrier Considering the Non-uniformity of Visco-Elastic Properties of Yarns and Their Random*, 2008, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, Vol. 16, No. 4(69), p. 78-84, ISSN 1230-3666.
42. Bouhjar F., Sahnoun M., M. Cheikhrouhou M., *Study of the Theoretical and Rheological Models for the Mechanical Behaviour of Cotton Core Spun Yarn with Elastane*, January 2012, *Journal of Textile Science & Engineering*, Vol.2, Issue 2, , ISSN: 2165-8064, DOI: 10.4172/2165-8064.1000110.
43. Żurek W., Chrzanowski M., Sybilska W., Jałmużna I., *The application of Zurek's rheological model for description of mechanical behaviour of textiles subjected to different state of loads*, 2010, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 43, Issue 2.

44. Kowalski K., Włodarczyk B., Kowalski T. M., Probabilistic Model of Dynamic Forces in Thread in the Knitting Zone of Weft Knitting Machines, Allowing for the Heterogeneity of Visco-Elasticity Yarn Properties, 2010, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 18, No. 4(81), p. 61-67.
45. Helali H., Babay A. and Msahli S., Effect of elastane draft on the rheological modelling of elastane core spun yarn, 2011, The Journal of The Textile Institute, p. 1-7, DOI:10.1080/00405000.2011.584383.
46. Chrzanowski M., Analiza przebiegu rozciągania niejednorodnych monofilamentów poliestrowych, Łódź 2018, Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów, Katedra Fizyki Włókna i Metrologii Włókienniczej.
47. Hufenbach W., Langkamp A., Gude M., Ebert C., Hornig A., Nitschke S., Böhm H., Characterisation of strain rate dependent material properties of textile reinforced thermoplastics for crash and impact analysis, 2013, Elsevier, Materials Science Engineering, Symposium B6 - Hybrid Structures, Procedia Materials Science 2, p. 204-211, DOI: 10.1016/j.mspro.2013.02.025.
48. Yekrang J., Semnani D., Rheological modeling of tubular weft knitted textiles, 2018, THE JOURNAL OF THE TEXTILE INSTITUTE, Vol. 109, No. 8, p. 990-999, DOI:10.1080/00405000.2017.1396649, ISSN: 0040-5000.
49. Shi F., Modeling Stretching-Relaxation Properties of Yarns, 2013, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 21, No. 2/98, p. 51-55.
50. Serwatka A., Bruniaux P., Frydrych I., New Approach to Modeling the Stress-Strain Curve of Linear Textile Products. Part 1 – Theoretical Considerations, January/March 2006, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 14, No. 1(55), p. 30-35.
51. Serwatka A., Bruniaux P., Frydrych I., Modelling the Stress-strain Curve of Textile Products. Part 2 – Simulation of Real Stress-strain Curves, July/September 2007, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 15, No. 3(62), p. 60-62.
52. Dridi S., Faouzi S., Dogui A., Rheological model of sized cotton yarn, 30th November to 2nd December 2006, 2nd International conference of Applied Research in Textile (CIRAT-2), At: Monastir, Tunisia.
53. Marzougul S., Zaouali R., Rheological model for studying fatigue of knitted fabric, December 2022, Indian Journal of Fibre & Textile Research, Vol. 47, p. 410-416, DOI: 10.56042/ijftr.v47i4.58334.
54. Stepanovic J., Stojiljkovic D., Vilumsone-Nemes I., Mitkovic P., Modelling the Strength-Elongation Characteristic of Forming Fabrics for the Paper Industry, 2014, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 22, No. 4(106), p. 112-116.
55. Lebahn K., Kleine T., Fiedler N., Arbeiter D., Grabow N., Evaluation of a nonlinear viscoelastic-plastic constitutive model in numerical simulation of thermoplastic polymers for stent application, 2022, Current Directions in Biomedical Engineering, No. 8(2), p. 470-473, DOI.org/10.1515/cdbme-2022-1120.
56. Helali H., Babay Dhouib A., Msahli S., Cheikhrouhou M., Rheological Modeling of the Dorlastan Core Spun Yarns for Various Dorlastan Drafts and Yarn Counts, 2013, Journal of Textile Science & Engineering, Vol. 3, DOI:10.4172/2165-8064.1000127, ISSN: 2165-8064.
57. Wang Y., Yu W., Wang F., Structural evolution and predictive modeling for nonlinear tensile behavior of tri-component elastic-conductive composite yarn during stretch, 2019, Textile Research Journal, Vol. 89(4), p. 487-497, DOI: 10.1177/0040517517748513.

58. Feng-jun Shi, Jin Xuling, Modelling the Tensile Properties of Modal/Polyurethane Core-spun Stretch Yarn, 2012, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 20, No. 3(92), p. 30-32.
59. Li L., Yan H., Tensile Properties of Regenerated Bamboo Yarn, 2012, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 20, No. 1, p. 20-22.
60. Tumajer P., Ursíny P., Bílek M., Moučková E., Research Methods for the Dynamic Properties of Textiles, 2011, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 19, No. 5.
61. Zou, Z. Y., Study of the Stress Relaxation Property of Vortex Spun Yarn in Comparison with Air-jet Spun Yarn and Ring Spun Yarn, 2012, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 20, No. 1(90), p. 28-32.
62. Sosnowski Z. A., Symulacje komputerowe w badaniach i rozwoju, 2020, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, s. 205, ISBN 978-83-66391-27-7, DOI: 10.24427/978-83-66391-28-4.
63. Janisz K., Mikulec A., Górka K., Symulacja procesu technologicznego w aspekcie jego logistyki i wydajności, 2017, Logistyka nr 6, s. 1394-399.
64. Krzesiński G.; Zagrajek T., Marek P., Borkowski P., Metoda elementów skończonych w mechanice materiałów i konstrukcji. Rozwiązywanie wybranych zagadnień za pomocą systemu ANSYS, 2015, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, s. 344.
65. Dropik M. J., Johnson D. H., Roth D. E., Developing an ANSYS Creep Model for Polypropylene from Experimental Data, January 2002, https://www.researchgate.net/publication/237666592_Developing_an_ANSYS_Creep_Model_for_Polypropylene_from_Experimental_Data, dostęp dnia 26.04.2019.
66. Haghighi-Yazdi M., Lee-Sullivan P., Modeling Linear Viscoelasticity in Glassy Polymers Using Standard Rheological Models, Proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Boston, https://www.researchgate.net/publication/268348170_Modeling_Linear_Viscoelasticity_in_Glassy_Polymers_Using_Standard_Rheological_Models, dostęp dnia 26.04.2019.
67. Semenov A., Melnikov B., Interactive rheological modeling in elasto-visco-plastic finite element analysis, 2016, 15th International scientific conference "Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development", Procedia Engineering 165, p. 1748-1756, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.918.
68. Barhoumi H., Marzougui S., Ben Abdesslem S., Rheological modelling of strain variation of elastic knitted garment, 2019, International Journal of Applied Research on Textile, p. 68-74, www.researchgate.net/publication/336563428.
69. Xu Q., Engquist B., A mathematical model for fitting and predicting relaxation modulus and simulating viscoelastic responses, 2018, The Royal Society Publishing, Proc. R. Soc. A 474: 20170540, p. 18, <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2017.0540>.
70. PN-EN ISO 2060:1997. Tekstylnia. Nitki w nawojach. Wyznaczanie masy liniowej (masa na jednostkę długości) metodą pasmową.
71. PN-EN ISO 2062:1997. Tekstylnia. Nitki w nawojach. Wyznaczanie siły zrywającej i wydłużenia przy zerwaniu odcinków nitki.
72. <https://pehasports.com/najszybszy-serwis-w-siatkowce>, dostęp dnia 16.10.2022 r.
73. <https://przegladsportowy.onet.pl/pilka-nozna>, dostęp dnia 16.10.2022 r.
74. <https://przegladsportowy.onet.pl/tenis>, dostęp dnia 16.10.2022 r.
75. Гурвич Л. Л. Современные японские приборы для определения механических свойств текстильных материалов, 1967, М., ЦНИИТЭЙлегпром, с. 30.

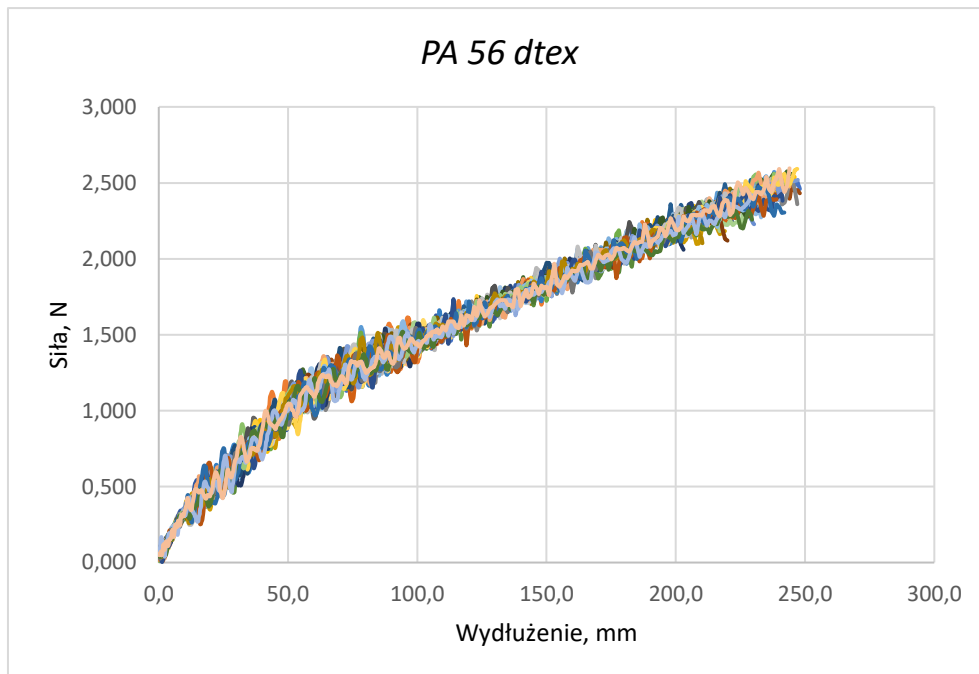
76. Parker J., Kemic C., A Flywheel Impact Test for Measuring Physical Properties of Tire Cords, 1962, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 6, No. 21, p. 255-263.
77. Журков С. Н., Томашевский Э. Е., Санфирова Т. П., Механические свойства материалов при больших скоростях растяжения, Журнал технической физики, 1953, т. 23, вып. 6, с. 933-939.
78. Smith J. C., McCrackin F. L., Schiefer H. F., Stone W. K., Towne K. M., Stress – Strain relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading, 1956, Textile Research Journal, Vol. 26, No. 11, p. 821-828.
79. Белицин М. Н. Синтетические нити. М., Легкая индустрия, 1970, с. 192.
80. Погодин-Алексеев Г. И. Динамическая прочность и хрупкость металлов, М., Машиностроение, 1966, с. 242.
81. Selwood A., A Catapult Method for Extending Textile Filaments at High Rates, 1964, Journal of the Textile Institute, Transaction, Vol. 55, No. 2, p. 146-153.
82. Łapiński M., Włodarski W., Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych. Czujniki pomiarowe, 1970, WNT, Warszawa, Wydanie 2, s. 380.
83. Roliński Z., Tensometria oporowa podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań, 1981, WNT, Warszawa, ISBN 83-204-0270-0, s. 371.
84. Sarzyński A., Czujniki tensometryczne - czyli co o pomiarach siły powinien wiedzieć automatyk, 2010, Technika, Portal Branżowy Automatyka B2B, <https://automatykab2b.pl/technika/40360-czujniki-tensometryczne-czyli-co-o-pomiarach-sily-powinien-wiedziec-automatyk>, dostęp dnia: 12.10.2022.
85. <https://www.advantech.com>, dostęp dnia 25.11.2023.
86. https://www.advantech.com/en/products/1-2mlcny/data-logger/mod_f6b88b52-1d2a-4584-a352-038a984ad0fa, dostęp dnia 25.11.2023.
87. Findley W. N., Lai J. S., Onaran K., Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials, 1976, North-Holland, Amsterdam-New York-Oxford, s. 367.
88. Jakowluk A. Procesy pełzania i zmęczenia w materiałach, 1993, WNT, Warszawa.
89. Cztery kroki do symulacji dynamicznej Autodesk Inventor, Poradnik Autodesk, <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/emea/docs/maszyna-idealna-symulacja-dynamiczna.pdf> dostęp dnia 16.03.2023.
90. Burczyński T., Modelowanie i symulacja komputerowa jako kluczowy element współczesnej metodologii badań naukowych, s. 66, <http://www.imio.polski.pl/DHCTB-wykład>, dostęp dnia 14.03.2023.
91. Wilk A., Judek S., Karwowski K., Michna M., Mizan M., Zastosowanie modułu symulacji dynamicznej programu Autodesk Inventor do badań właściwości dynamicznych obieraków prądu, 2015, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, Nr 47.
92. <https://www.autodesk.com/education/educators> - plan Autodesk Education dla nauczycieli pozwalający na uzyskanie bezpłatnego dostępu do produktów i usług Autodesk w ramach rocznego odnowienia licencji, dostęp dnia: 06.03.2022.
93. Kuchar M., Wibracyjne zagęszczanie wątków w krośnie tkackim, 2013, Zeszyty Naukowe Nr 1149, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, ISSN 0137-4834.
94. Prążyńska A., Mikołajczyk Z., Identification of the Process of Dynamic Stretching of Threads in Warp-Knitting Technology. Part I: Theoretical analysis of the susceptibility of rheological models of the process of stretching textile threads, 2017, AUTEX Research Journal, Vol. 17, No. 4, p. 334-343, ISSN 1470-9589 , DOI: 10.1515/aut-2016-0039.

95. Syska J., Współczesne metody analizy regresji wspomagane komputerowo, 2014, Skrypt dla studentów Ekonofizyki, Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski, s. 357.
96. Ręklewski M. Statystyka opisowa. Teoria i przykłady, 2020, WPUZ we Włocławku, ISBN 978-83-60607-93-0, s. 182.

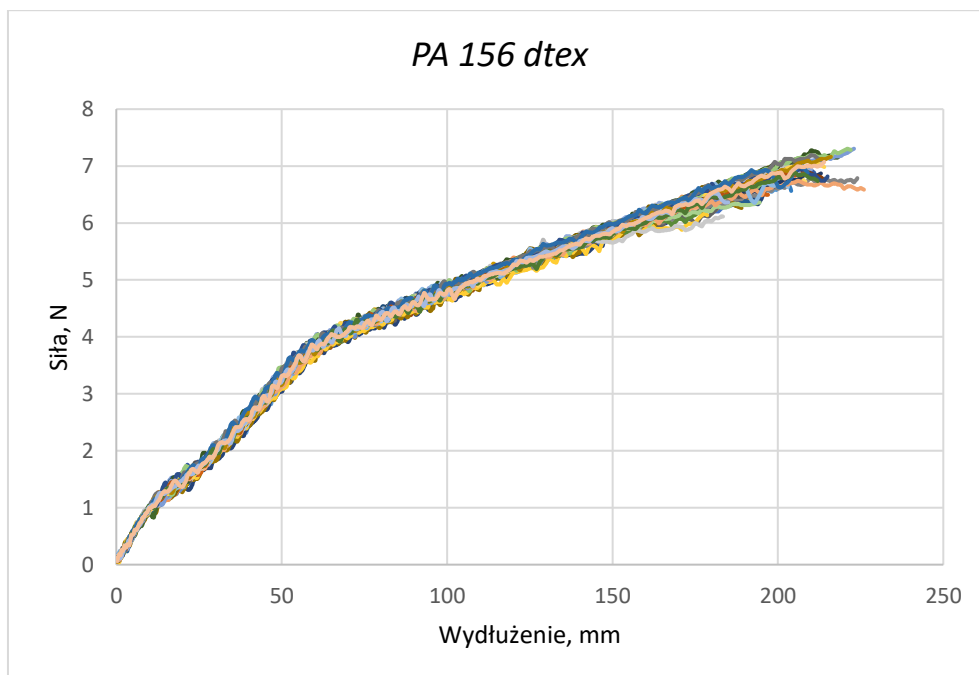
ZAŁĄCZNIKI

ZAŁĄCZNIK 1

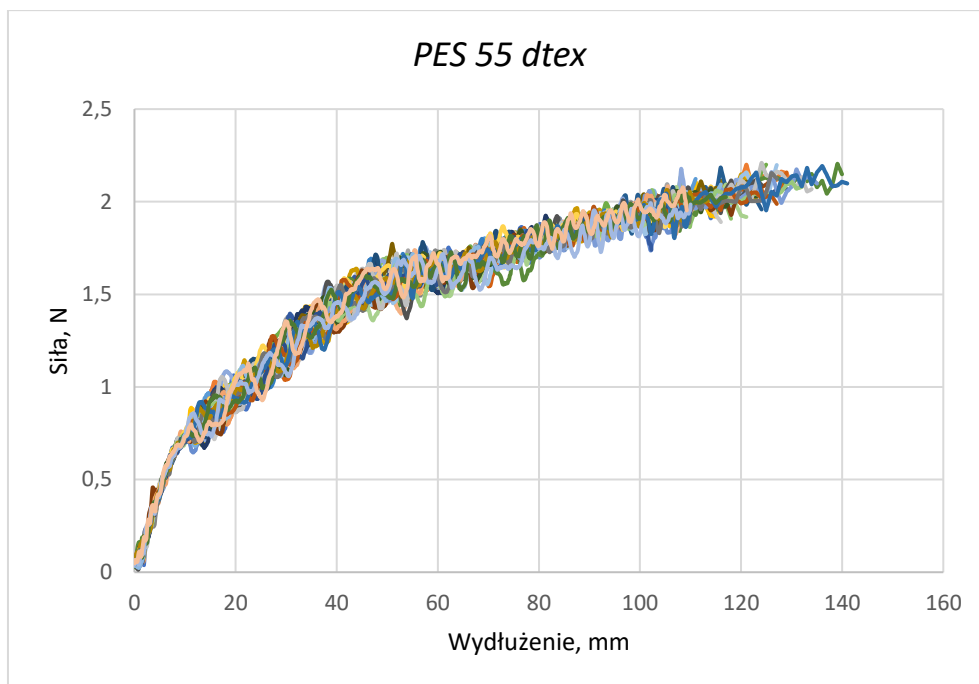
Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia dla przędzy poliestrowych o masie liniowej 55 i 111 dtex oraz przędzy poliamidowych o masie liniowej 56 i 156 dtex stanowiących materiał badań, poddanych procesowi rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Hounsfield model H50K-S.



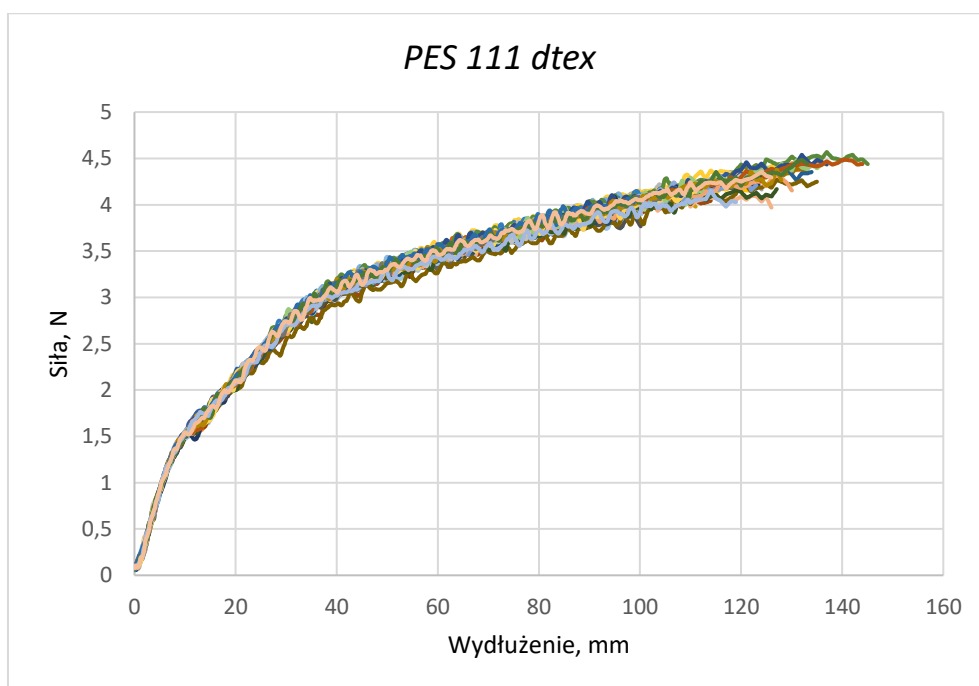
Rys. 4.1.2 Charakterystyki wytrzymałościowe przędzy PA 56 dtex. Wykres zbiorczy wykonany dla 50 przeprowadzonych pomiarów rozciągania
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.1.3 Charakterystyki wytrzymałościowe przędzy PA 156 dtex. Wykres zbiorczy wykonany dla 50 przeprowadzonych pomiarów rozciągania
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.1.4 Charakterystyki wytrzymałościowe przędzy PES 55 dtex. Wykres zbiorczy wykonany dla 50 przeprowadzonych pomiarów rozciągania
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.1.5 Charakterystyki wytrzymałościowe przędzy PES 111 dtex. Wykres zbiorczy wykonany dla 50 przeprowadzonych pomiarów rozciągania
Źródło: opracowanie własne

ZAŁĄCZNIK 2

TABELA 4.2.1 Warianty badań rozciąganych przędz

Lp.	Oznaczenie wariantu badań	Rodzaj i masa liniowa przędzy, dtex	Długość rozciąganego odcinka przędzy, mm	Prędkość rozciągania V, m/s
1	PA56-20ms-200mm	PA 56,00	200	20
2	PA56-40ms-200mm	PA 56,00	200	40
3	PA56-60ms-200mm	PA 56,00	200	60
4	PA56-80ms-200mm	PA 56,00	200	80
5	PA56-100ms-200mm	PA 56,00	200	100
6	PA56-20ms-400mm	PA 56,00	400	20
7	PA56-40ms-400mm	PA 56,00	400	40
8	PA56-60ms-400mm	PA 56,00	400	60
9	PA56-80ms-400mm	PA 56,00	400	80
10	PA56-100ms-400mm	PA 56,00	400	100
11	PA56-20ms-600mm	PA 56,00	600	20
12	PA56-40ms-600mm	PA 56,00	600	40
13	PA56-60ms-600mm	PA 56,00	600	60
14	PA56-80ms-600mm	PA 56,00	600	80
15	PA56-100ms-600mm	PA 56,00	600	100
16	PA56-20ms-800mm	PA 56,00	800	20
17	PA56-40ms-800mm	PA 56,00	800	40
18	PA56-60ms-800mm	PA 56,00	800	60
19	PA56-80ms-800mm	PA 56,00	800	80
20	PA56-100ms-800mm	PA 56,00	800	100
21	PA56-20ms-1000mm	PA 56,00	1000	20
22	PA56-40ms-1000mm	PA 56,00	1000	40
23	PA56-60ms-1000mm	PA 56,00	1000	60
24	PA56-80ms-1000mm	PA 56,00	1000	80
25	PA56-100ms-1000mm	PA 56,00	1000	100
26	PA156-20ms-200mm	PA 156,00	200	20
27	PA156-40ms-200mm	PA 156,00	200	40
28	PA156-60ms-200mm	PA 156,00	200	60
29	PA156-80ms-200mm	PA 156,00	200	80
30	PA156-100ms-200mm	PA 156,00	200	100
31	PA156-20ms-400mm	PA 156,00	400	20
32	PA156-40ms-400mm	PA 156,00	400	40
33	PA156-60ms-400mm	PA 156,00	400	60
34	PA156-80ms-400mm	PA 156,00	400	80

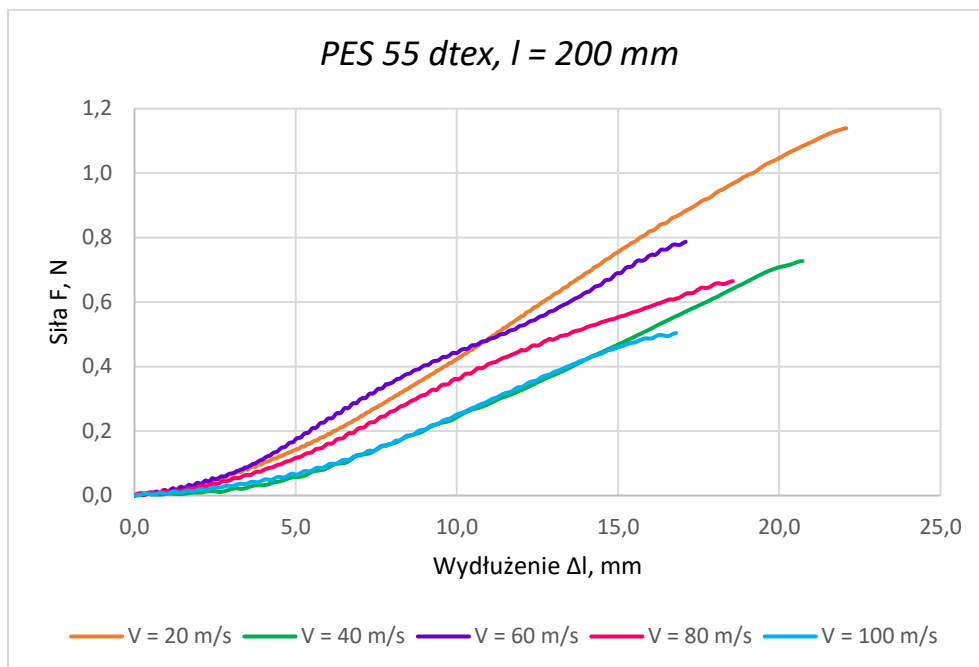
35	PA156-100ms-400mm	PA 156,00	400	100
36	PA156-20ms-600mm	PA 156,00	600	20
37	PA156-40ms-600mm	PA 156,00	600	40
38	PA156-60ms-600mm	PA 156,00	600	60
39	PA156-80ms-600mm	PA 156,00	600	80
40	PA156-100ms-600mm	PA 156,00	600	100
41	PA156-20ms-800mm	PA 156,00	800	20
42	PA156-40ms-800mm	PA 156,00	800	40
43	PA156-60ms-800mm	PA 156,00	800	60
44	PA156-80ms-800mm	PA 156,00	800	80
45	PA156-100ms-800mm	PA 156,00	800	100
46	PA156-20ms-1000mm	PA 156,00	1000	20
47	PA156-40ms-1000mm	PA 156,00	1000	40
48	PA156-60ms-1000mm	PA 156,00	1000	60
49	PA156-80ms-1000mm	PA 156,00	1000	80
50	PA156-100ms-1000mm	PA 156,00	1000	100
51	PES55-20ms-200mm	PES 55,56	200	20
52	PES55-40ms-200mm	PES 55,56	200	40
53	PES55-60ms-200mm	PES 55,56	200	60
54	PES55-80ms-200mm	PES 55,56	200	80
55	PES55-100ms-200mm	PES 55,56	200	100
56	PES55-20ms-400mm	PES 55,56	400	20
57	PES55-40ms-400mm	PES 55,56	400	40
58	PES55-60ms-400mm	PES 55,56	400	60
59	PES55-80ms-400mm	PES 55,56	400	80
60	PES55-100ms-400mm	PES 55,56	400	100
61	PES55-20ms-600mm	PES 55,56	600	20
62	PES55-40ms-600mm	PES 55,56	600	40
63	PES55-60ms-600mm	PES 55,56	600	60
64	PES55-80ms-600mm	PES 55,56	600	80
65	PES55-100ms-600mm	PES 55,56	600	100
66	PES55-20ms-800mm	PES 55,56	800	20
67	PES55-40ms-800mm	PES 55,56	800	40
68	PES55-60ms-800mm	PES 55,56	800	60
69	PES55-80ms-800mm	PES 55,56	800	80
70	PES55-100ms-800mm	PES 55,56	800	100
71	PES55-20ms-1000mm	PES 55,56	1000	20
72	PES55-40ms-1000mm	PES 55,56	1000	40
73	PES55-60ms-1000mm	PES 55,56	1000	60
74	PES55-80ms-1000mm	PES 55,56	1000	80

75	PES55-100ms-1000mm	PES 55,56	1000	100
76	PES111-10ms-200mm	PES 111,11	200	10
77	PES111-20ms-200mm	PES 111,11	200	20
78	PES111-30ms-200mm	PES 111,11	200	30
79	PES111-40ms-200mm	PES 111,11	200	40
80	PES111-50ms-200mm	PES 111,11	200	50
81	PES111-60ms-200mm	PES 111,11	200	60
82	PES111-70ms-200mm	PES 111,11	200	70
83	PES111-80ms-200mm	PES 111,11	200	80
84	PES111-90ms-200mm	PES 111,11	200	90
85	PES111-100ms-200mm	PES 111,11	200	100
86	PES111-10ms-400mm	PES 111,11	400	10
87	PES111-20ms-400mm	PES 111,11	400	20
88	PES111-30ms-400mm	PES 111,11	400	30
89	PES111-40ms-400mm	PES 111,11	400	40
90	PES111-50ms-400mm	PES 111,11	400	50
91	PES111-60ms-400mm	PES 111,11	400	60
92	PES111-70ms-400mm	PES 111,11	400	70
93	PES111-80ms-400mm	PES 111,11	400	80
94	PES111-90ms-400mm	PES 111,11	400	90
95	PES111-100ms-400mm	PES 111,11	400	100
96	PES111-10ms-600mm	PES 111,11	600	10
97	PES111-20ms-600mm	PES 111,11	600	20
98	PES111-30ms-600mm	PES 111,11	600	30
99	PES111-40ms-600mm	PES 111,11	600	40
100	PES111-50ms-600mm	PES 111,11	600	50
101	PES111-60ms-600mm	PES 111,11	600	60
102	PES111-70ms-600mm	PES 111,11	600	70
103	PES111-80ms-600mm	PES 111,11	600	80
104	PES111-90ms-600mm	PES 111,11	600	90
105	PES111-100ms-600mm	PES 111,11	600	100
106	PES111-10ms-800mm	PES 111,11	800	10
107	PES111-20ms-800mm	PES 111,11	800	20
108	PES111-30ms-800mm	PES 111,11	800	30
109	PES111-40ms-800mm	PES 111,11	800	40
110	PES111-50ms-800mm	PES 111,11	800	50
111	PES111-60ms-800mm	PES 111,11	800	60
112	PES111-70ms-800mm	PES 111,11	800	70
113	PES111-80ms-800mm	PES 111,11	800	80
114	PES111-90ms-800mm	PES 111,11	800	90

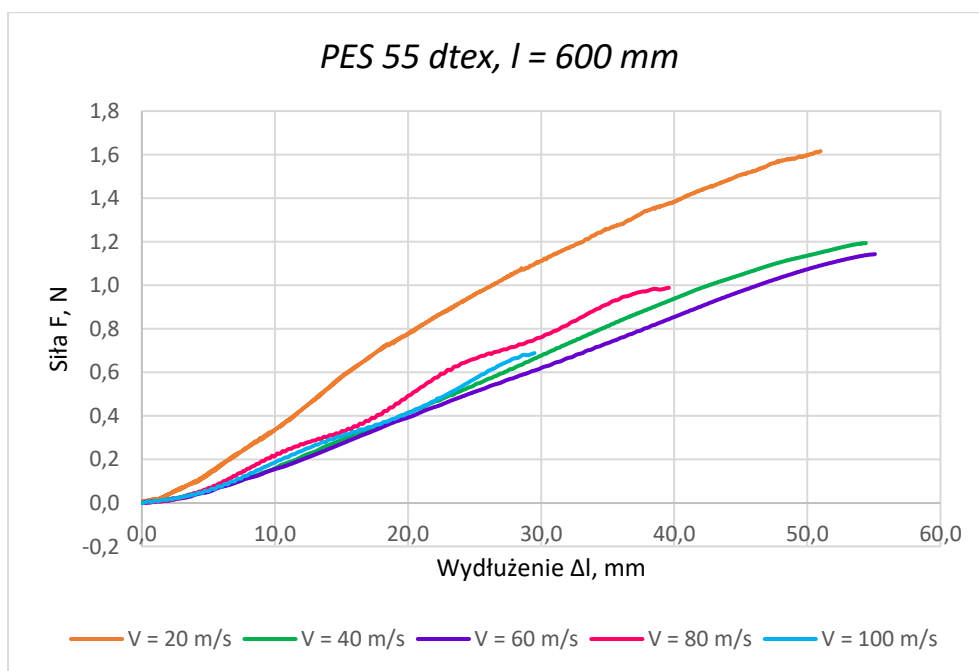
115	PES111-100ms-800mm	PES 111,11	800	100
116	PES111-10ms-1000mm	PES 111,11	1000	10
117	PES111-20ms-1000mm	PES 111,11	1000	20
118	PES111-30ms-1000mm	PES 111,11	1000	30
119	PES111-40ms-1000mm	PES 111,11	1000	40
120	PES111-50ms-1000mm	PES 111,11	1000	50
121	PES111-60ms-1000mm	PES 111,11	1000	60
122	PES111-70ms-1000mm	PES 111,11	1000	70
123	PES111-80ms-1000mm	PES 111,11	1000	80
124	PES111-90ms-1000mm	PES 111,11	1000	90
125	PES111-100ms-1000mm	PES 111,11	1000	100
126	PES167-20ms-200mm	PES 166,67	200	20
127	PES167-40ms-200mm	PES 166,67	200	40
128	PES167-60ms-200mm	PES 166,67	200	60
129	PES167-80ms-200mm	PES 166,67	200	80
130	PES167-100ms-200mm	PES 166,67	200	100
131	PES167-20ms-200mm	PES 166,67	400	20
132	PES167-40ms-200mm	PES 166,67	400	40
133	PES167-60ms-200mm	PES 166,67	400	60
134	PES167-80ms-200mm	PES 166,67	400	80
135	PES167-100ms-200mm	PES 166,67	400	100
136	PES167-20ms-200mm	PES 166,67	600	20
137	PES167-40ms-200mm	PES 166,67	600	40
138	PES167-60ms-200mm	PES 166,67	600	60
139	PES167-80ms-200mm	PES 166,67	600	80
140	PES167-100ms-200mm	PES 166,67	600	100
141	PES167-20ms-200mm	PES 166,67	800	20
142	PES167-40ms-200mm	PES 166,67	800	40
143	PES167-60ms-200mm	PES 166,67	800	60
144	PES167-80ms-200mm	PES 166,67	800	80
145	PES167-100ms-200mm	PES 166,67	800	100
146	PES167-20ms-200mm	PES 166,67	1000	20
147	PES167-40ms-200mm	PES 166,67	1000	40
148	PES167-60ms-200mm	PES 166,67	1000	60
149	PES167-80ms-200mm	PES 166,67	1000	80
150	PES167-100ms-200mm	PES 166,67	1000	100

ZAŁĄCZNIK 3

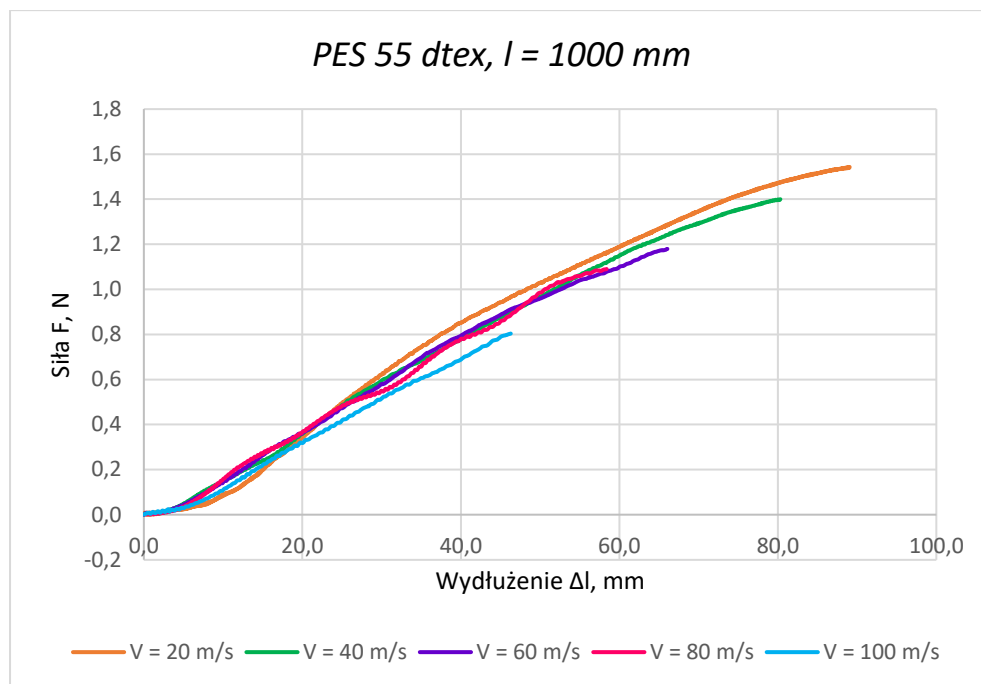
Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia $F = f(\Delta l)$ otrzymane podczas dynamicznego rozciągania przędzy stanowiących materiał badań, przedstawione w postaci wykresów zbiorczych.



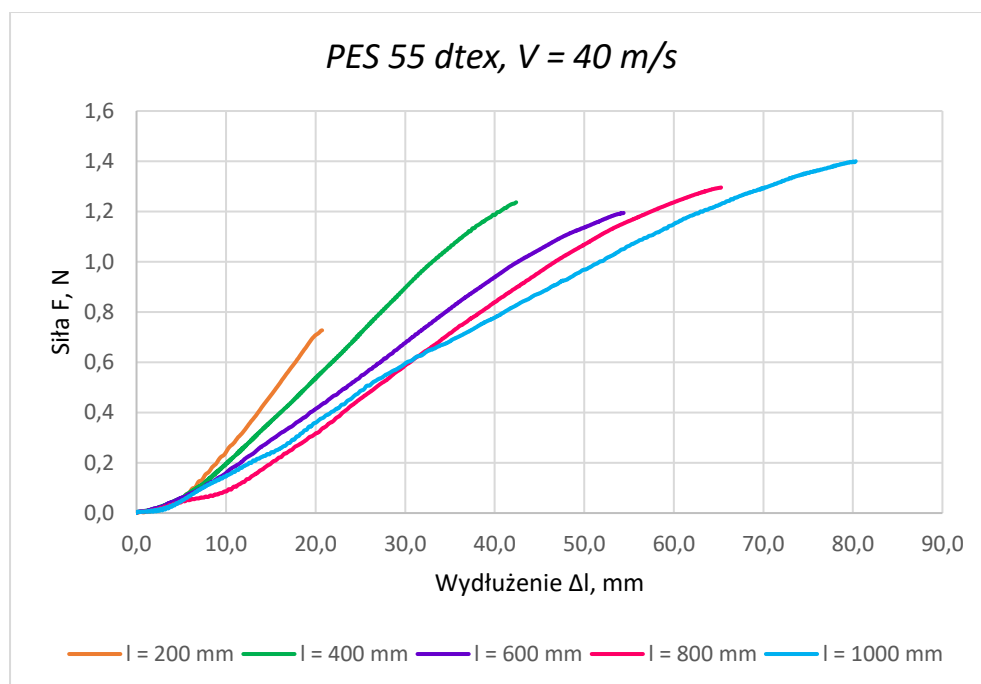
Rys. 6.1.23 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 200$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



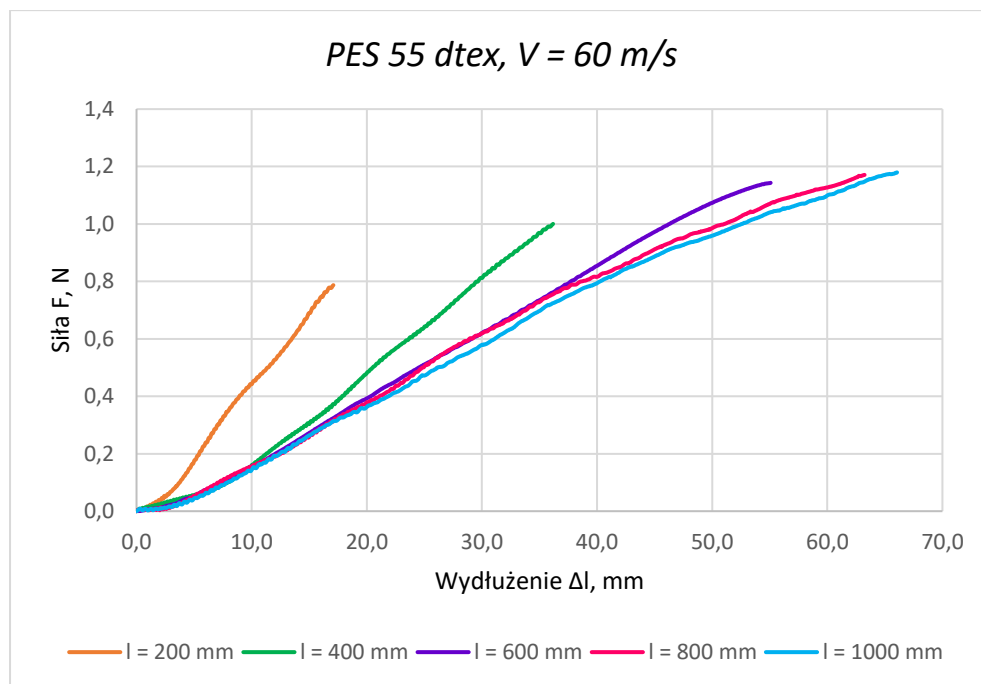
Rys. 6.1.24 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 600$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.1.25 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 1000$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne

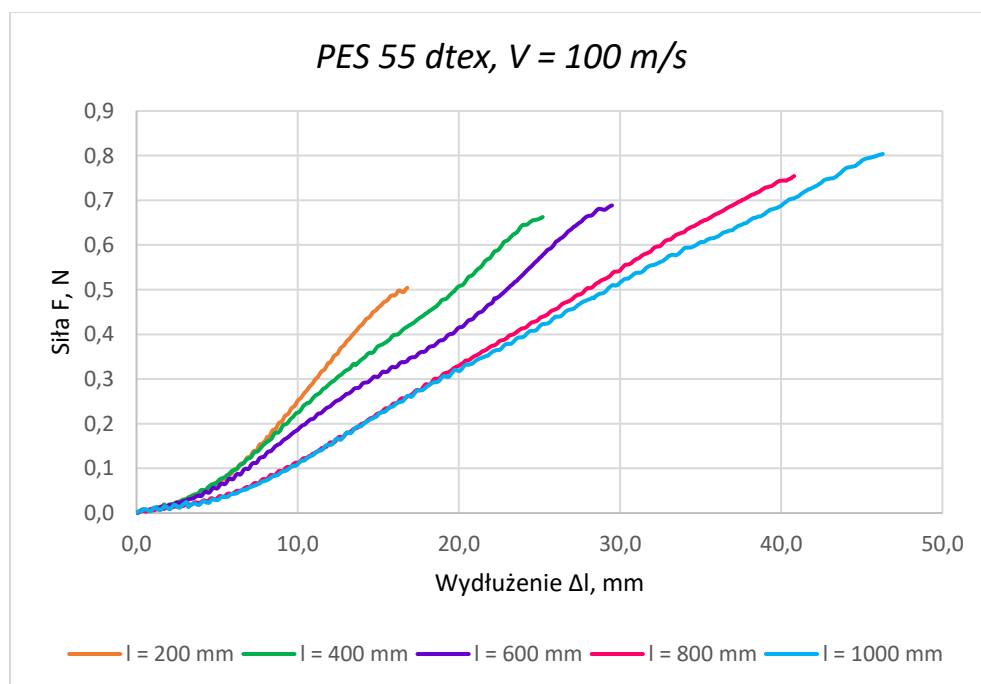


Rys. 6.1.26 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 40$ m/s i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



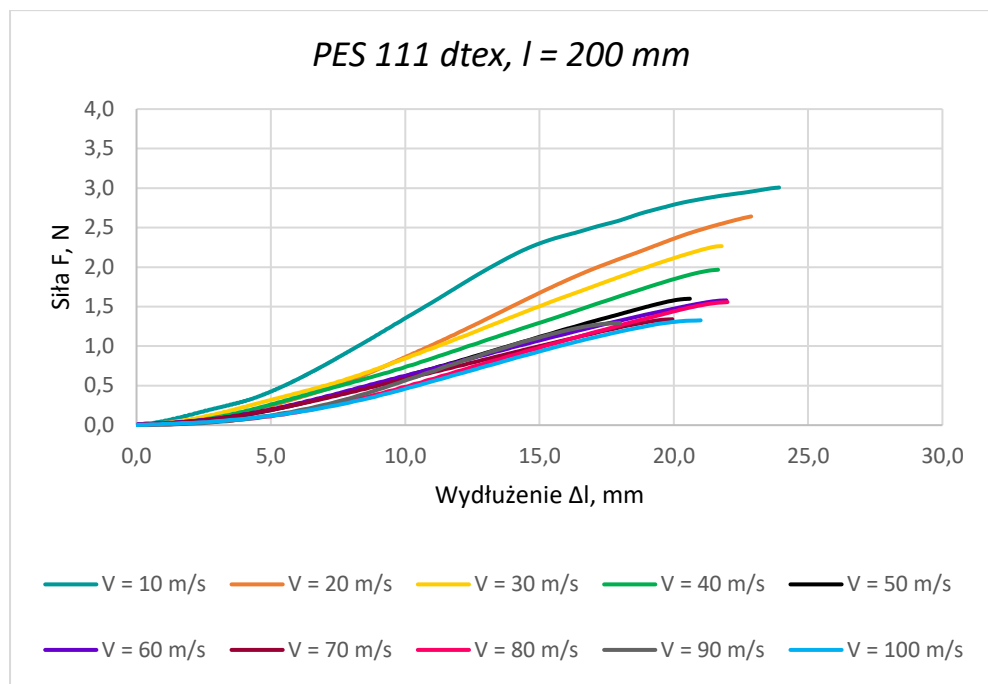
Rys. 6.1.27 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 60$ m/s i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne

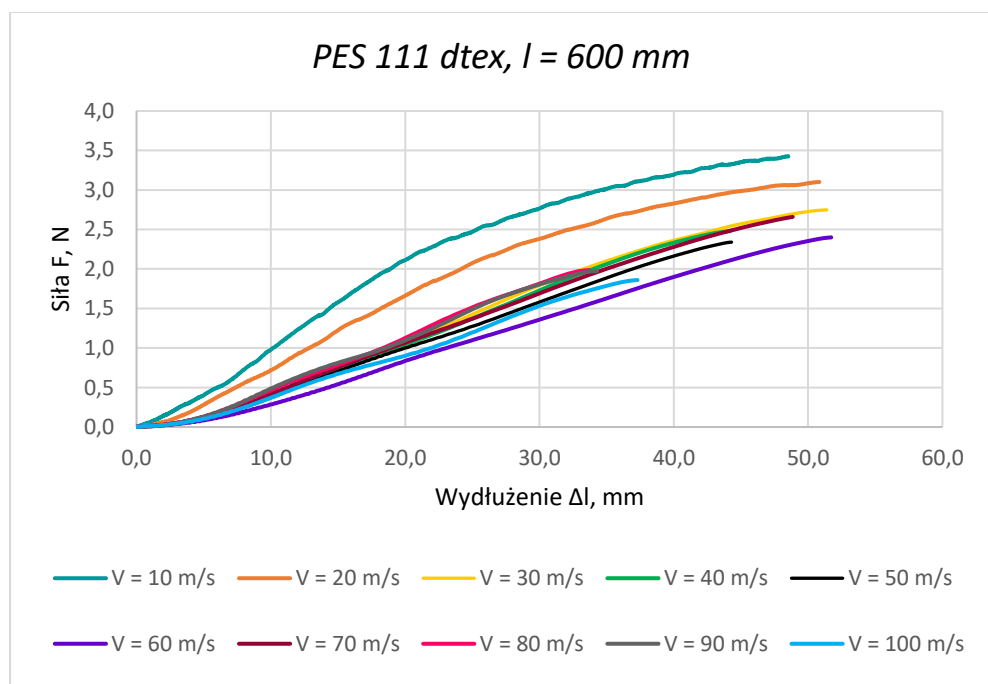


Rys. 6.1.28 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 100$ m/s i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

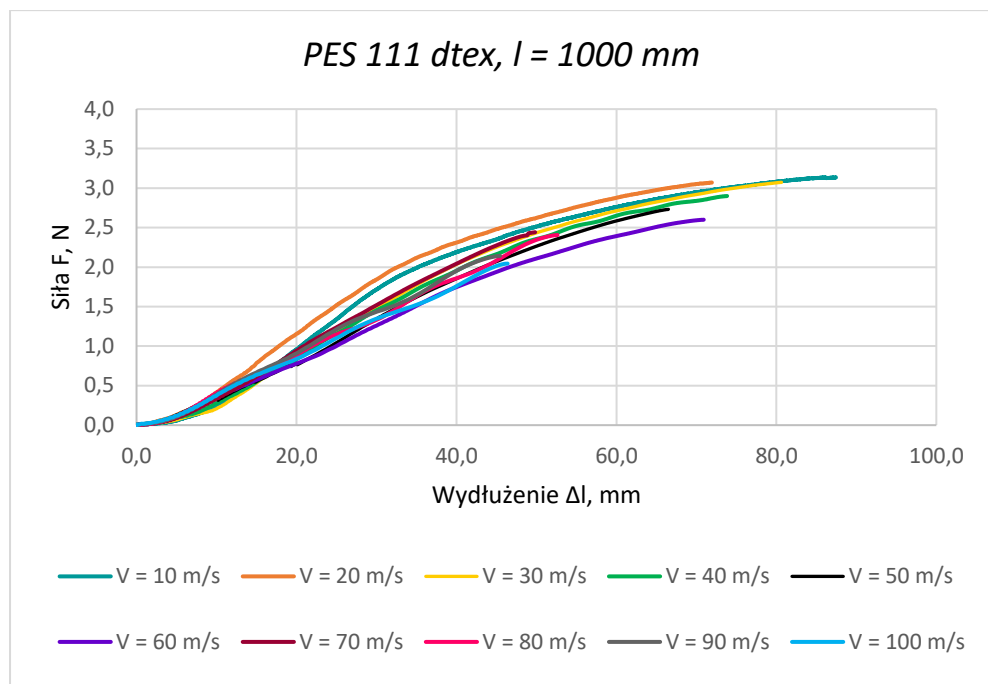
Źródło: opracowanie własne



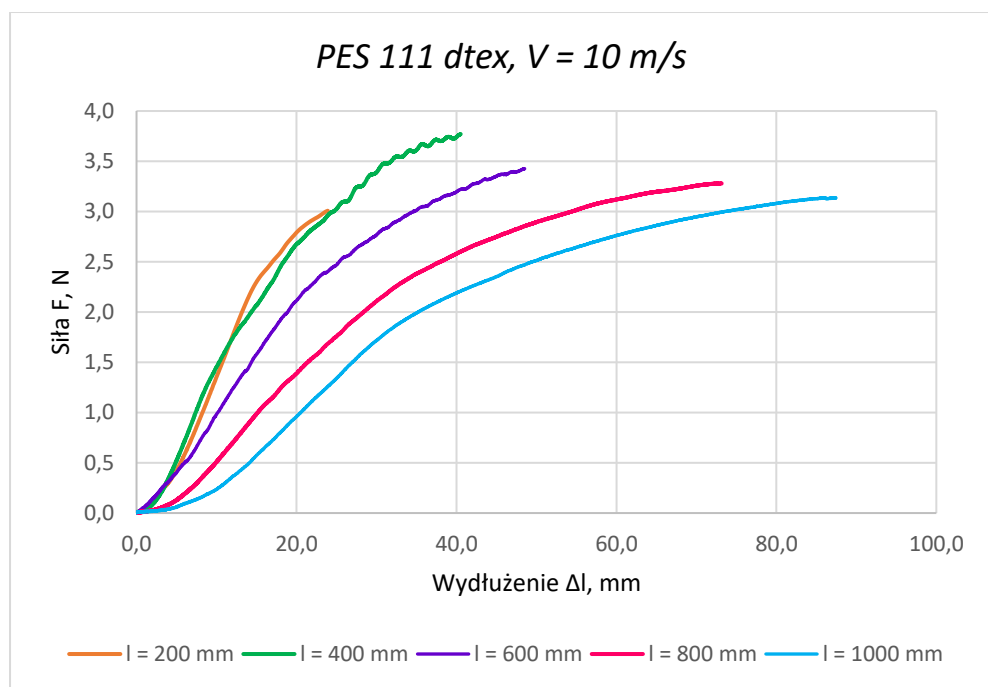
Rys. 6.1.29 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 200$ mm i prędkości rozciągania $V = 20 \div 100$ m/s
 Źródło: opracowanie własne



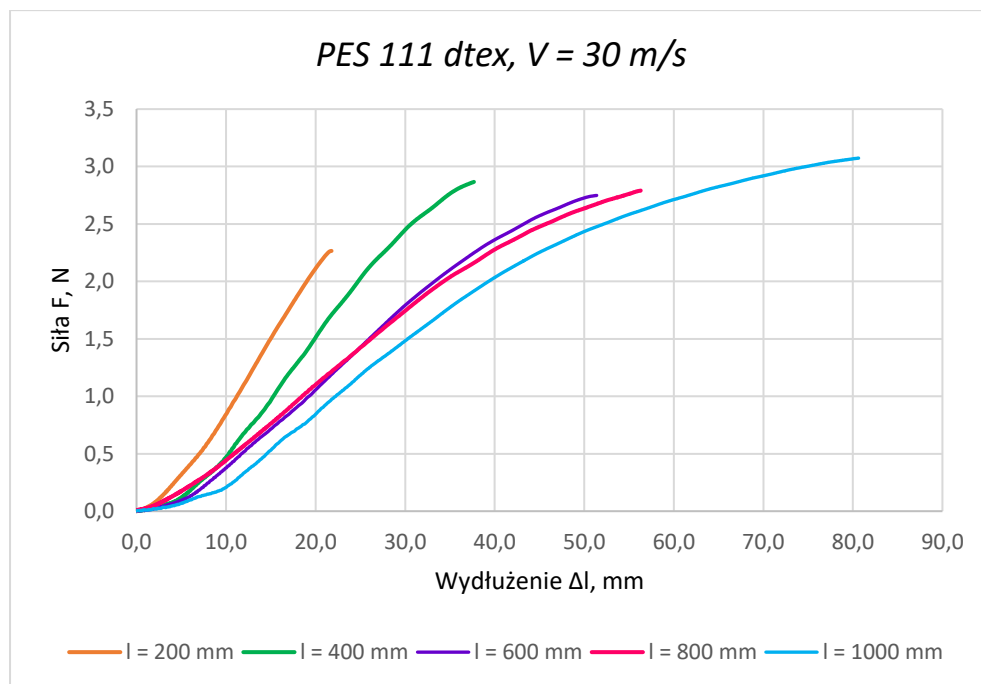
Rys. 6.1.30 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 600$ mm i prędkości rozciągania $V = 20 \div 100$ m/s
 Źródło: opracowanie własne



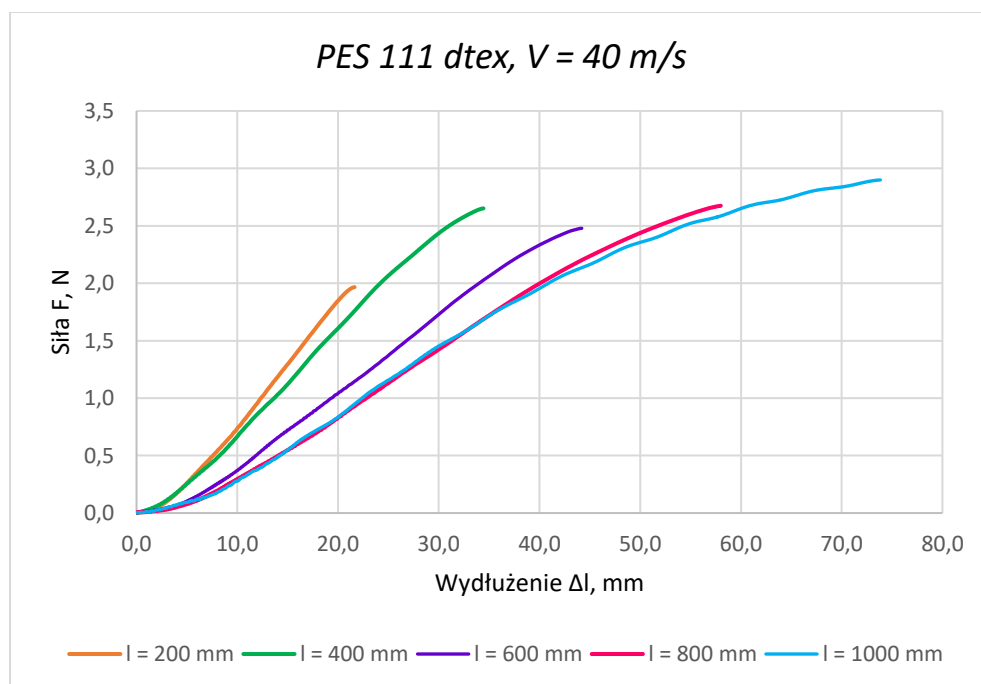
Rys. 6.1.31 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 1000$ mm i prędkości rozciągania $V = 20 \div 100$ m/s
 Źródło: opracowanie własne



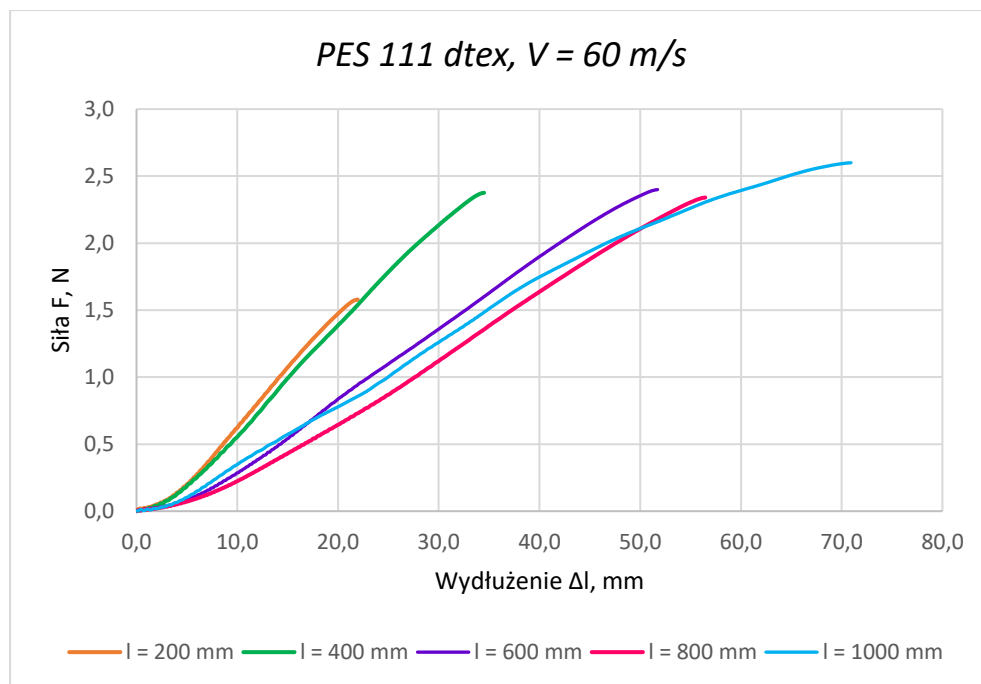
Rys. 6.1.32 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 10$ m/s i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
 Źródło: opracowanie własne



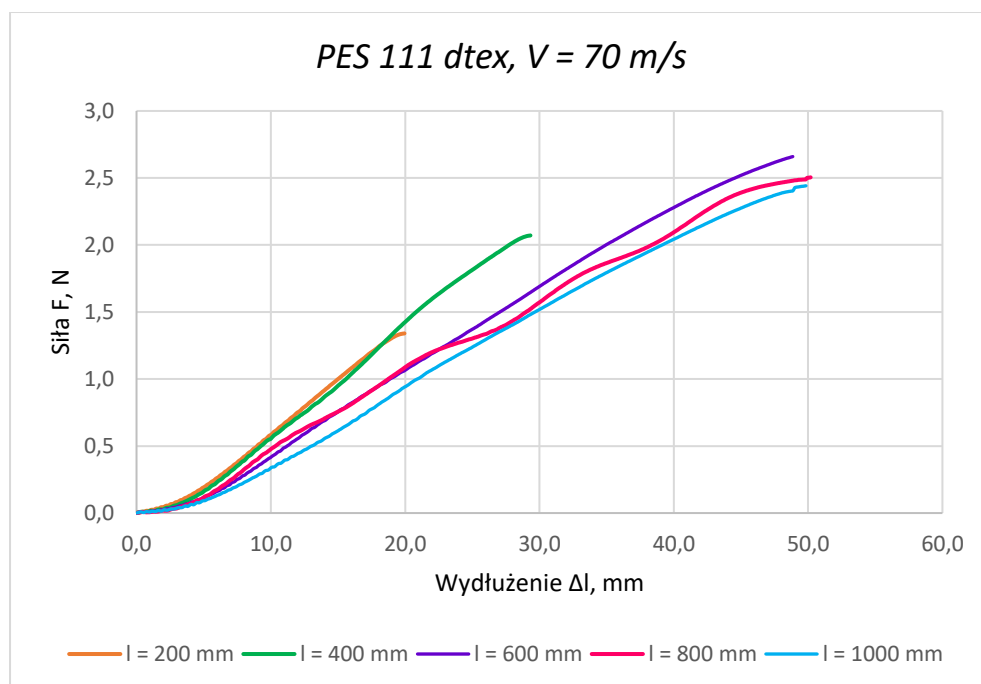
Rys. 6.1.33 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 30 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



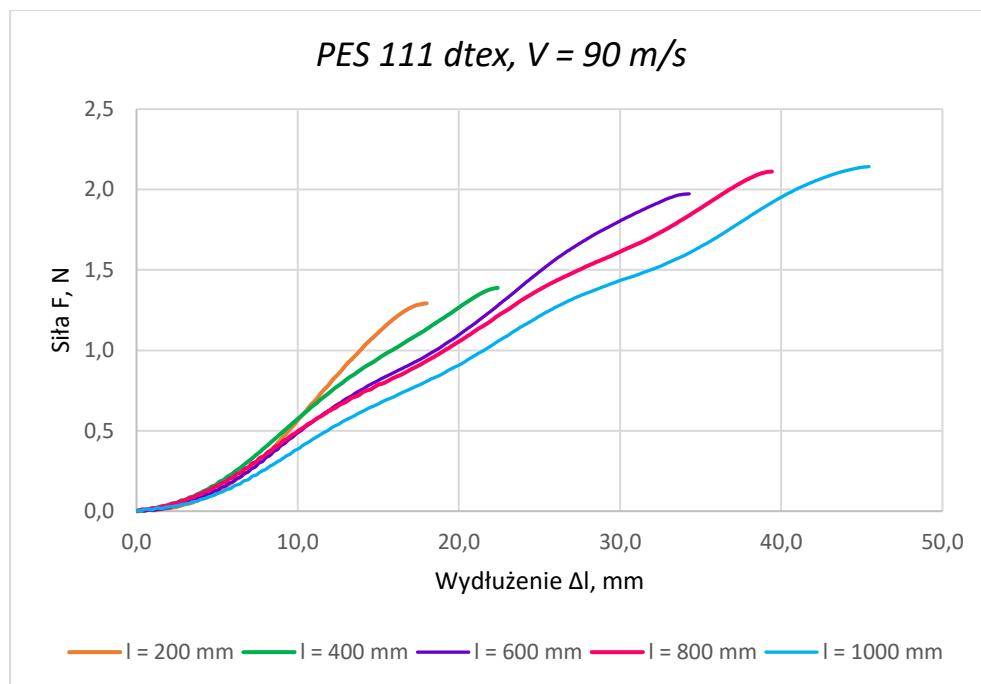
Rys. 6.1.34 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 40 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



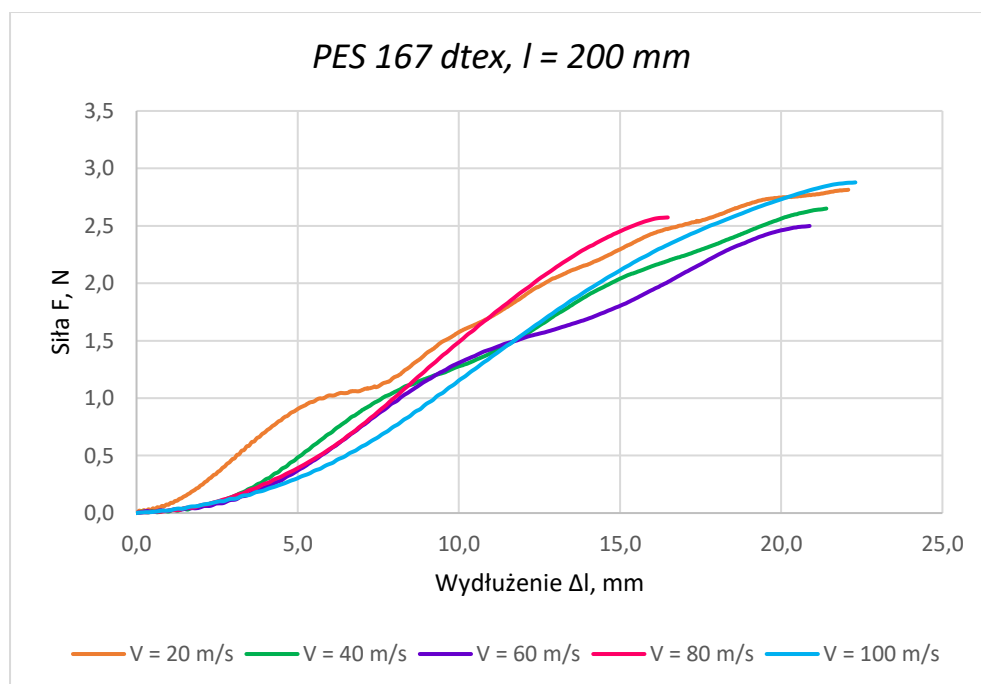
Rys. 6.1.35 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 60$ m/s i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



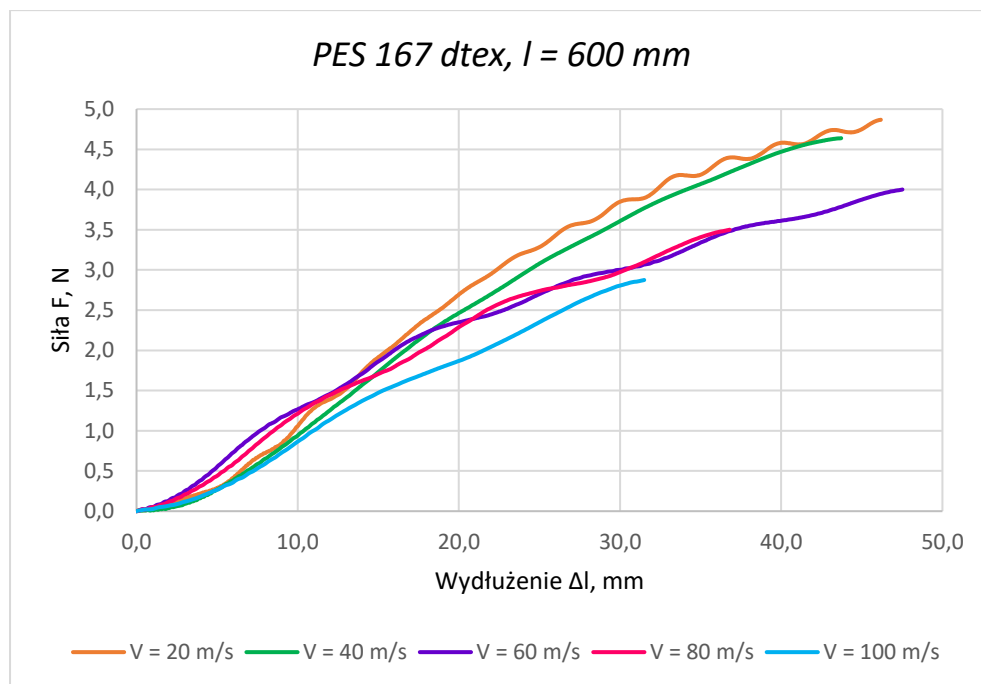
Rys. 6.1.36 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 70$ m/s i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



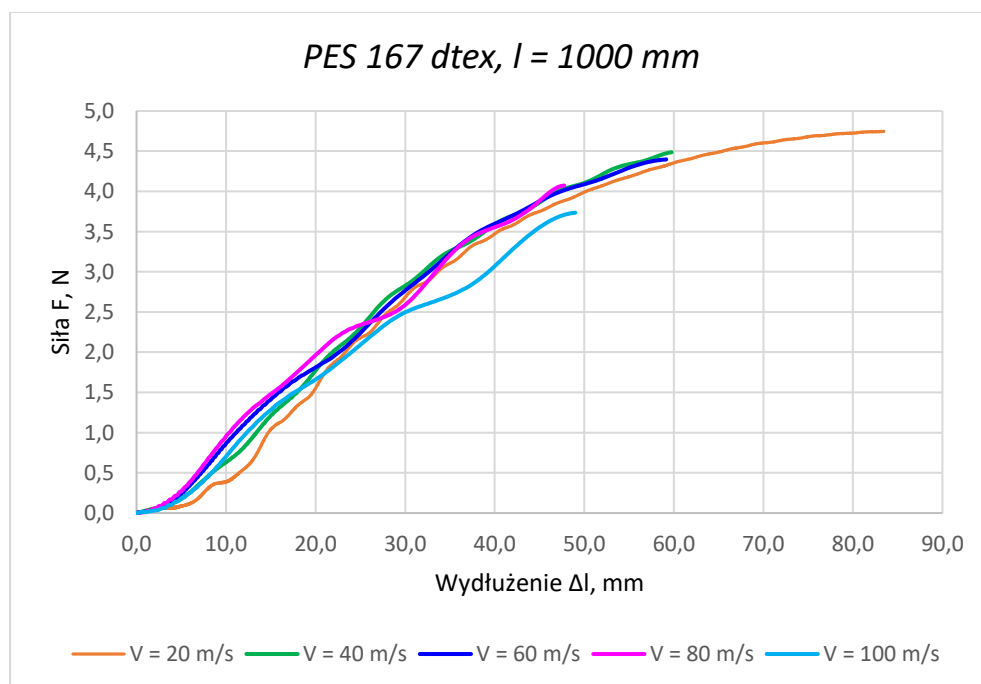
Rys. 6.1.37 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 111 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 90 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



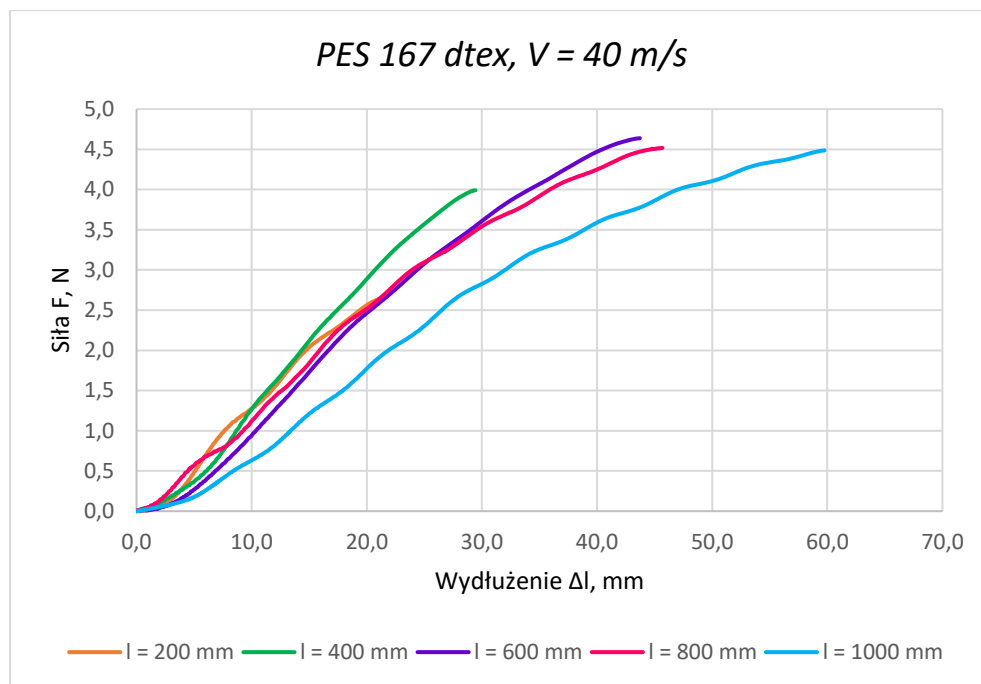
Rys. 6.1.38 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 200 \text{ mm}$ i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



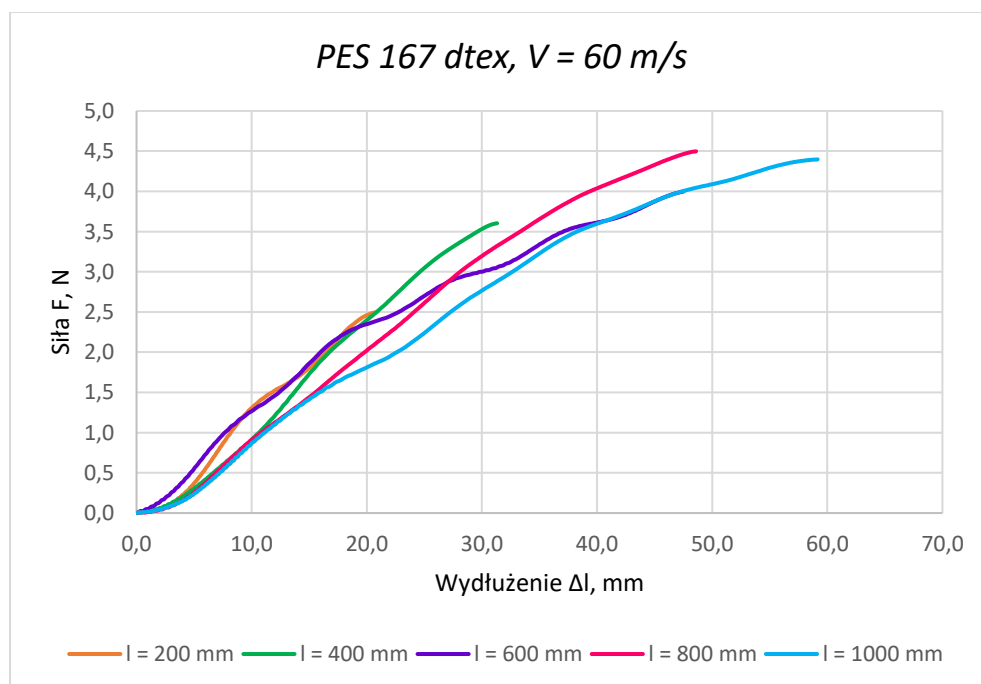
Rys. 6.1.39 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 600$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



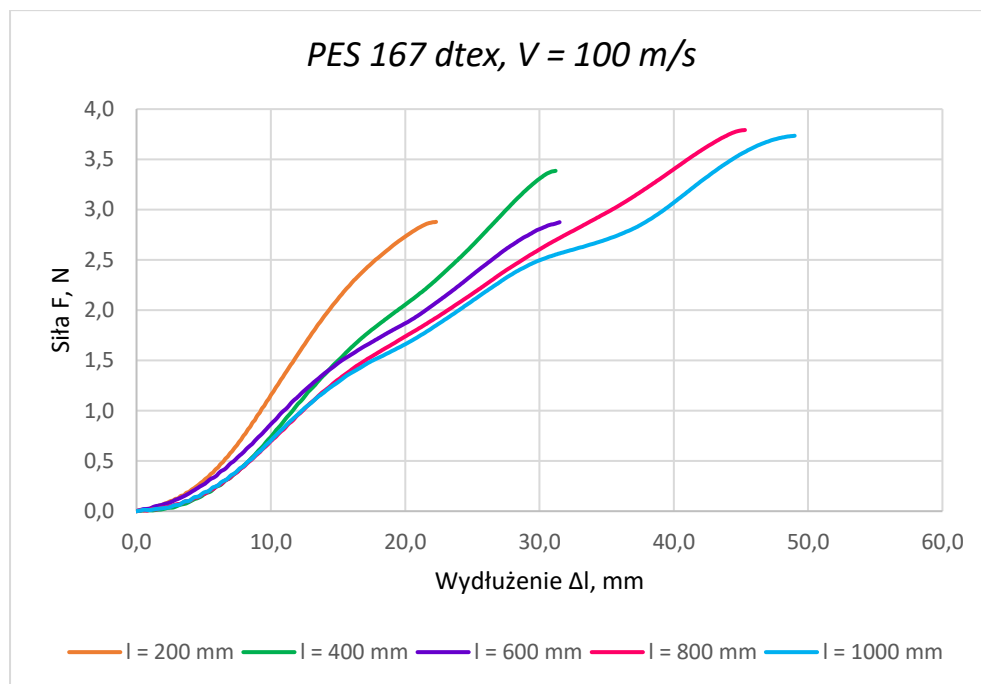
Rys. 6.1.40 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 1000$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



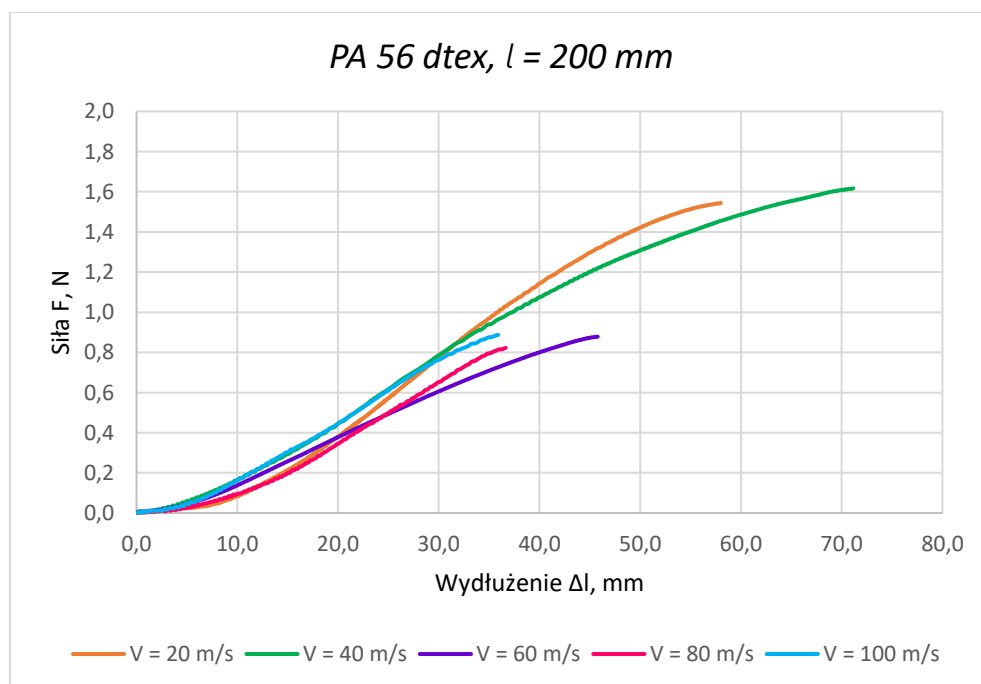
Rys. 6.1.41 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 40 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



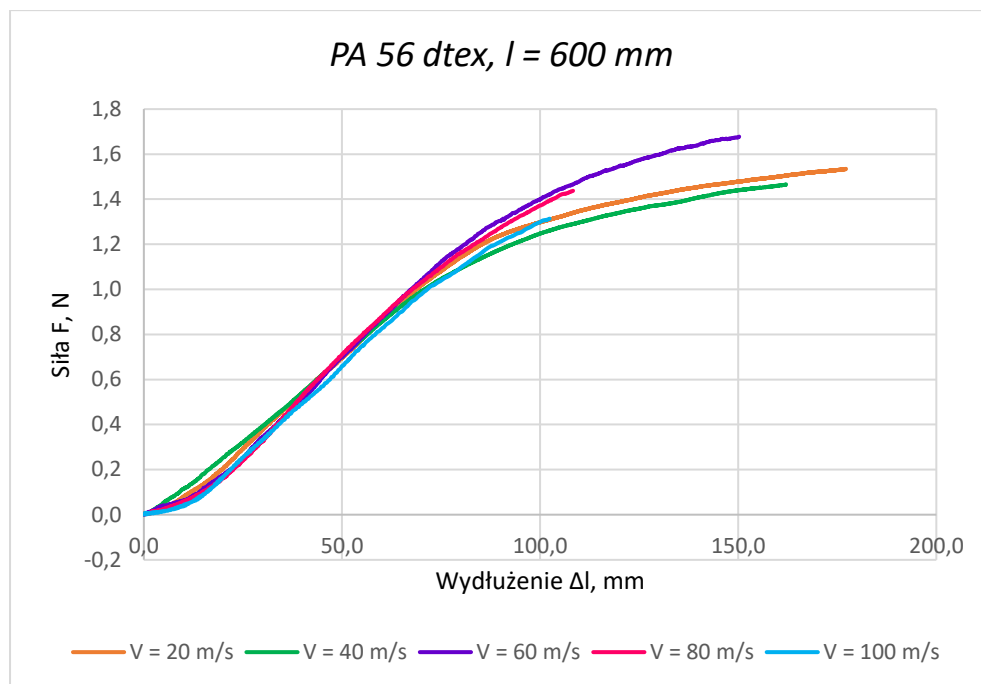
Rys. 6.1.42 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 60 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



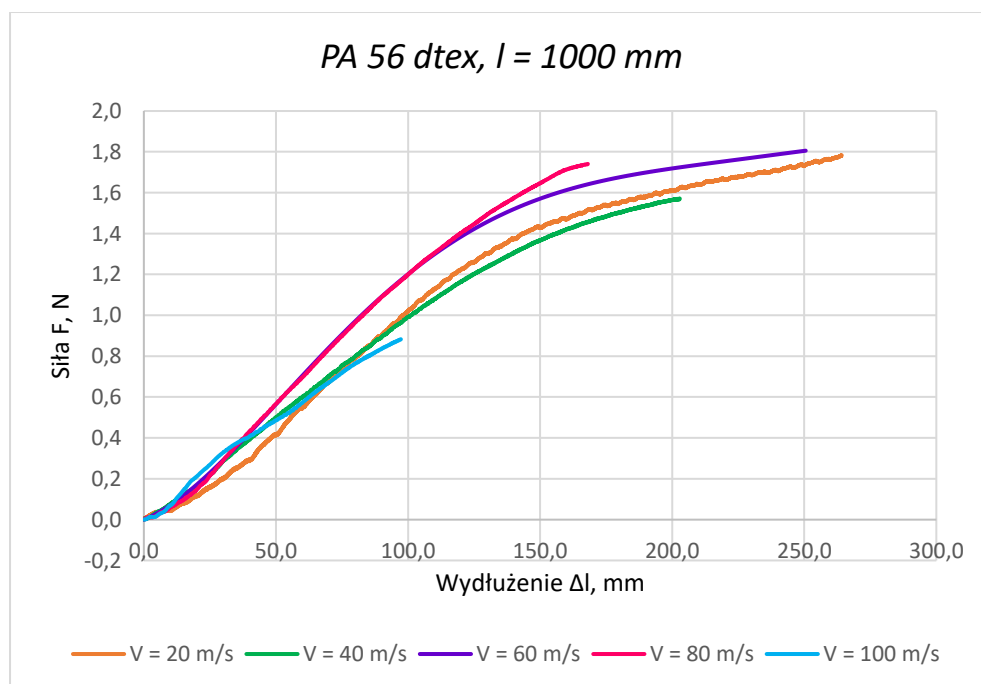
Rys. 6.1.43 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 100 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



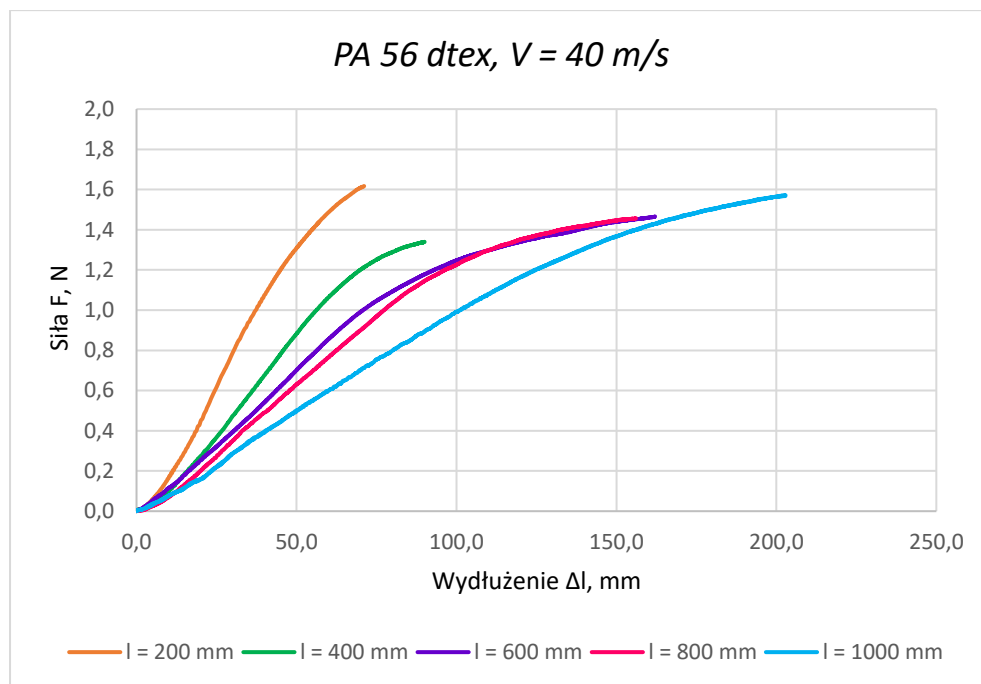
Rys. 6.1.44 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 200 \text{ mm}$ i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.1.45 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 600$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne

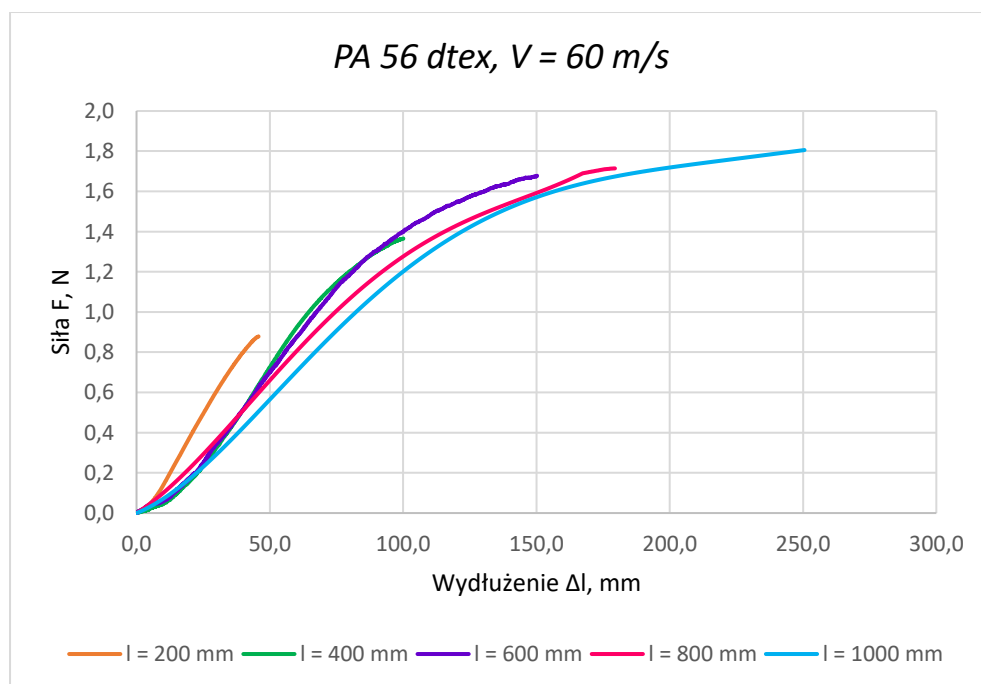


Rys. 6.1.46 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 1000$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



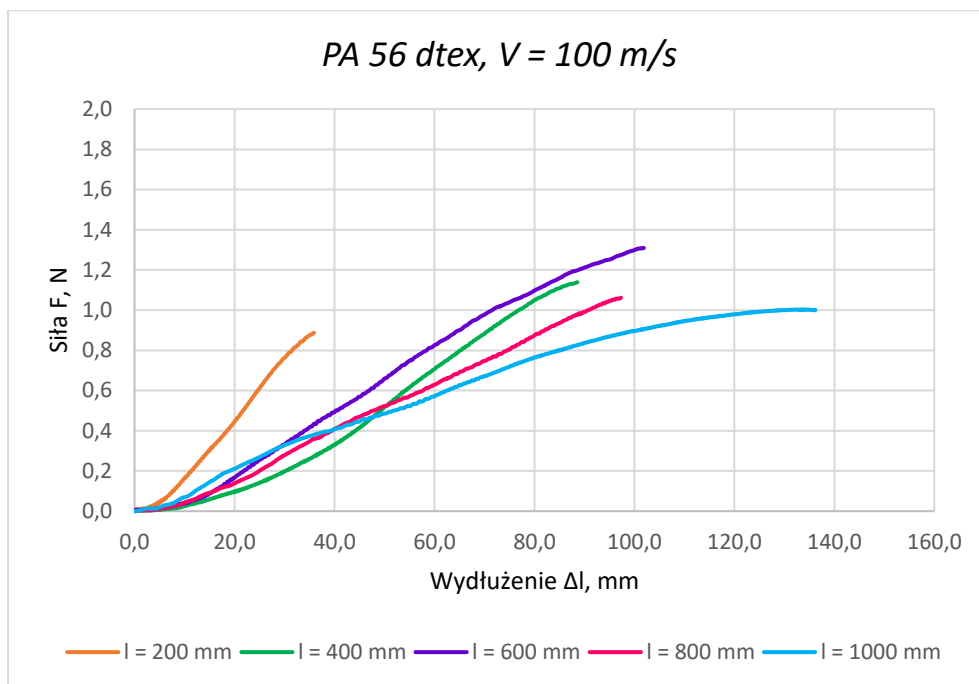
Rys. 6.1.47 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 40 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne

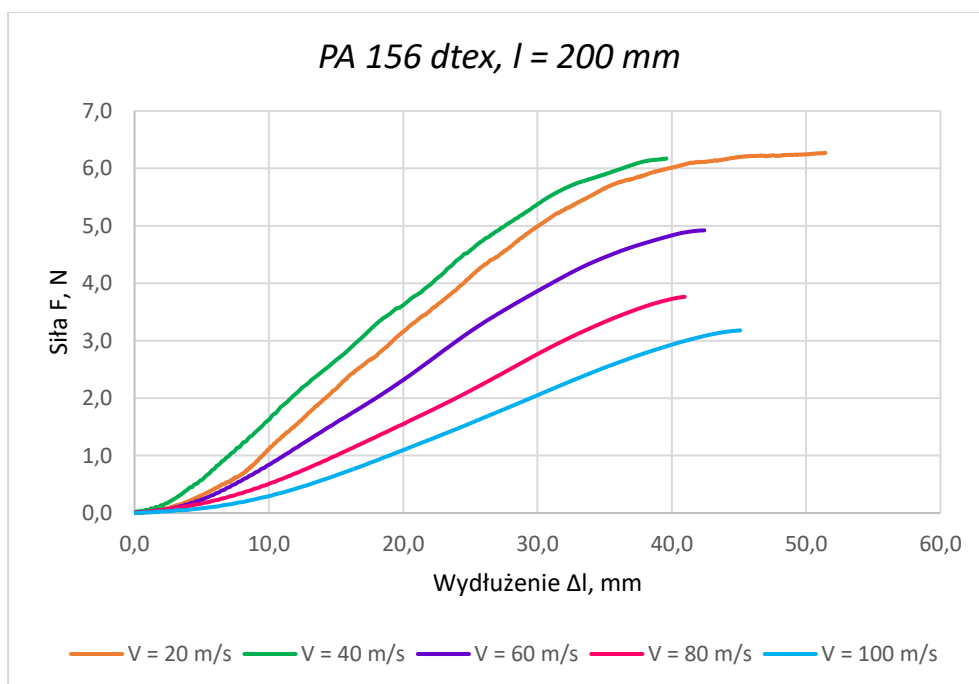


Rys. 6.1.48 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 60 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

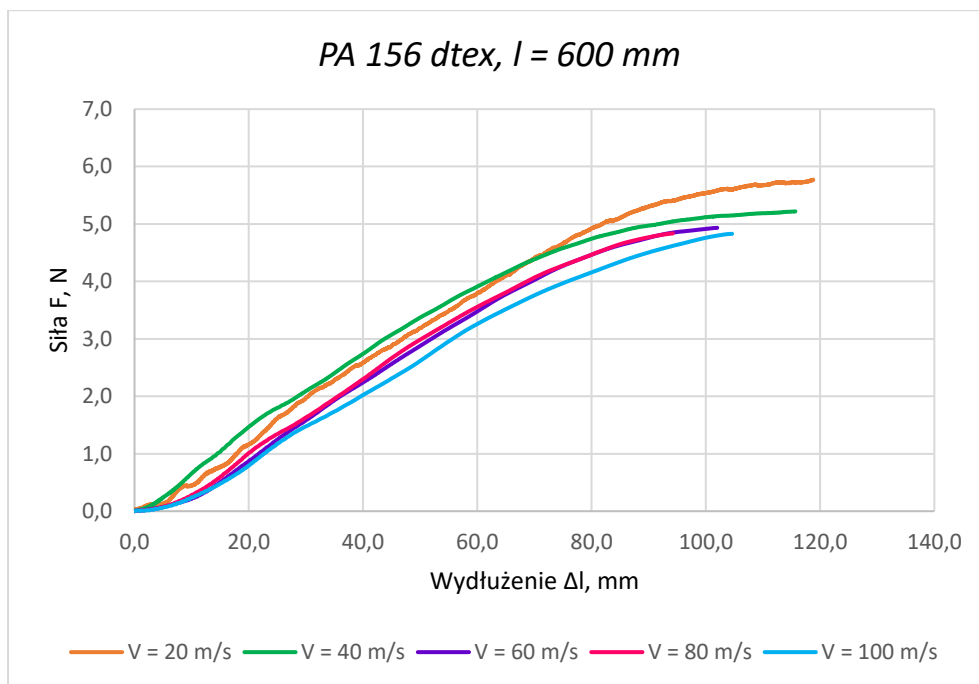
Źródło: opracowanie własne



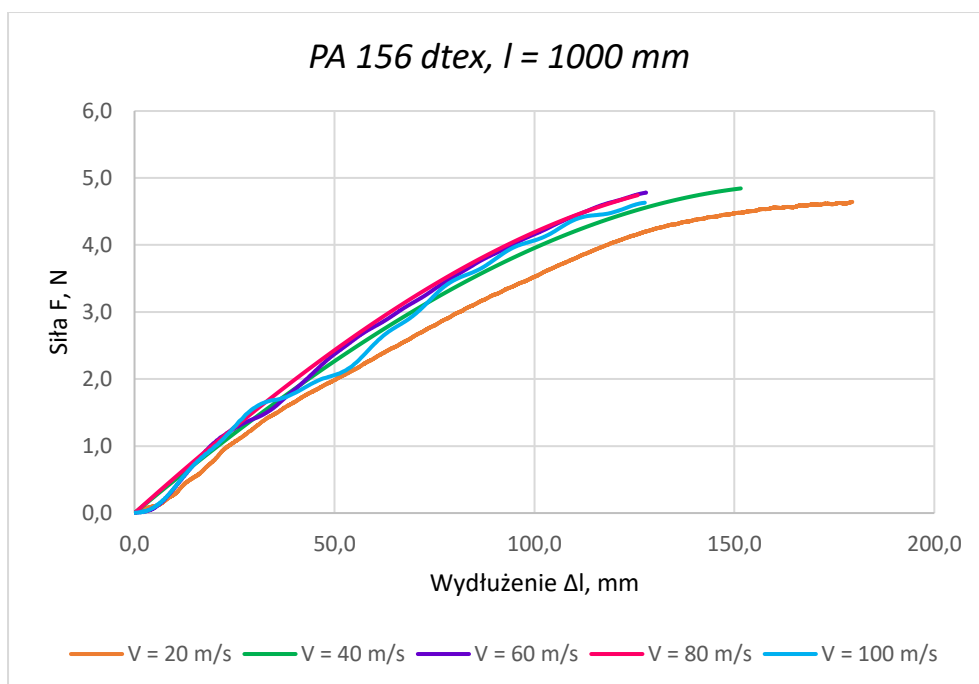
Rys. 6.1.49 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 100$ m/s i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



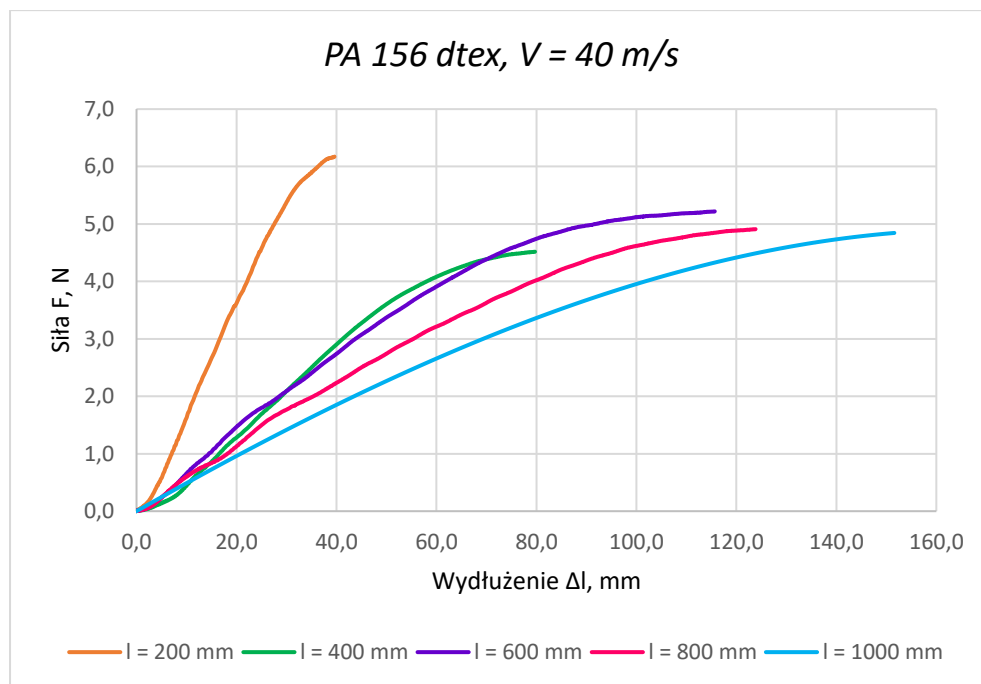
Rys. 6.1.50 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 200$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.1.51 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 600$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne

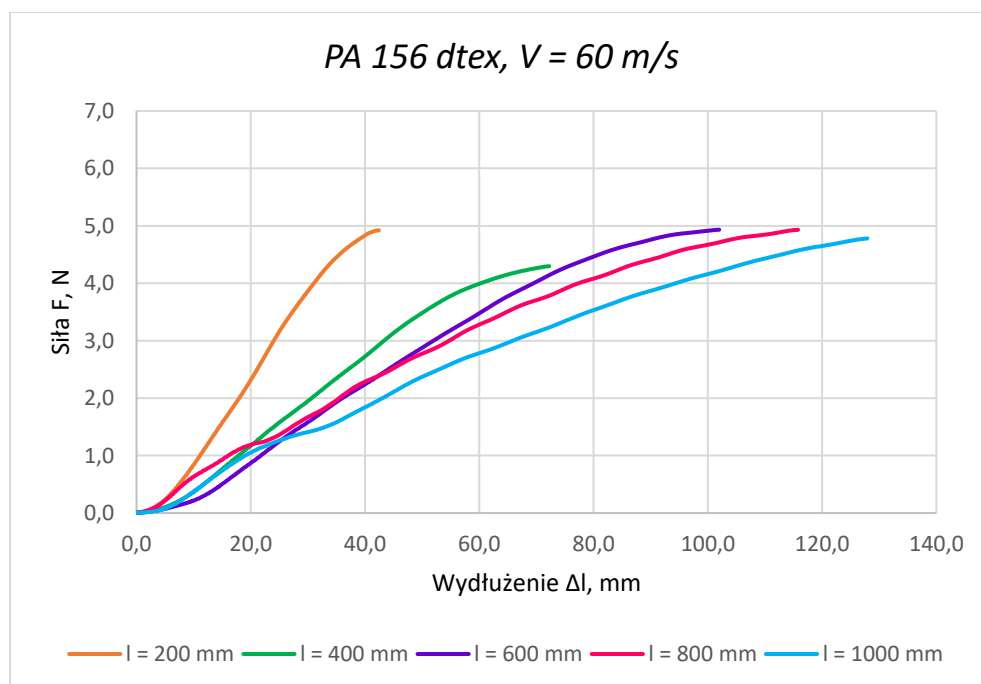


Rys. 6.1.52 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla długości rozciąganego odcinka $l = 1000$ mm i prędkości rozciągania $V = 20, 40, 60, 80$ i 100 m/s
Źródło: opracowanie własne



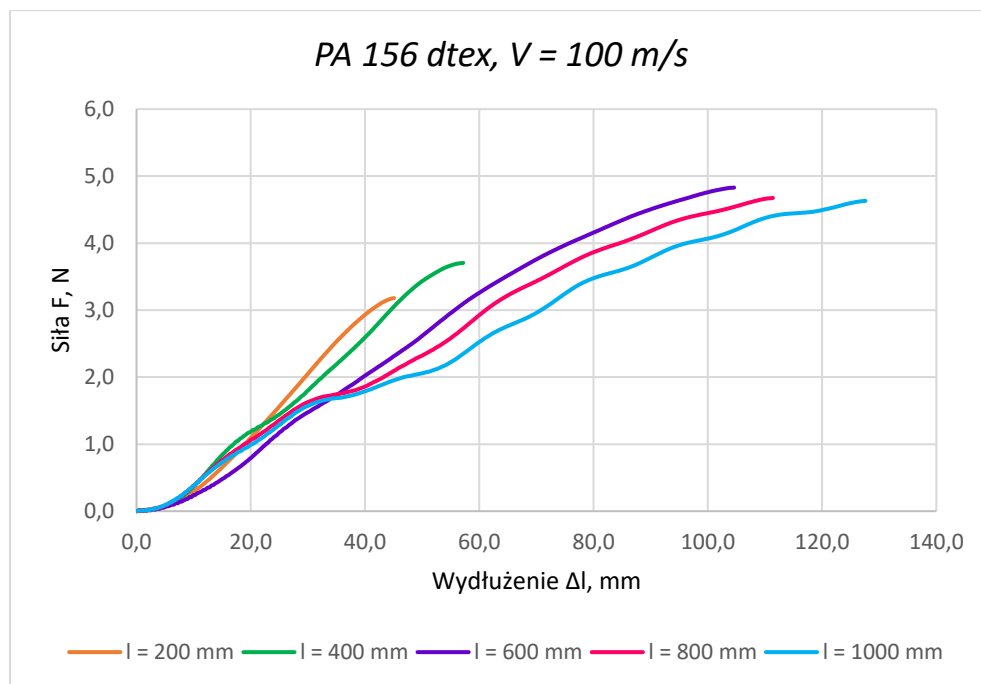
Rys. 6.1.53 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 40 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.1.54 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 60 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne

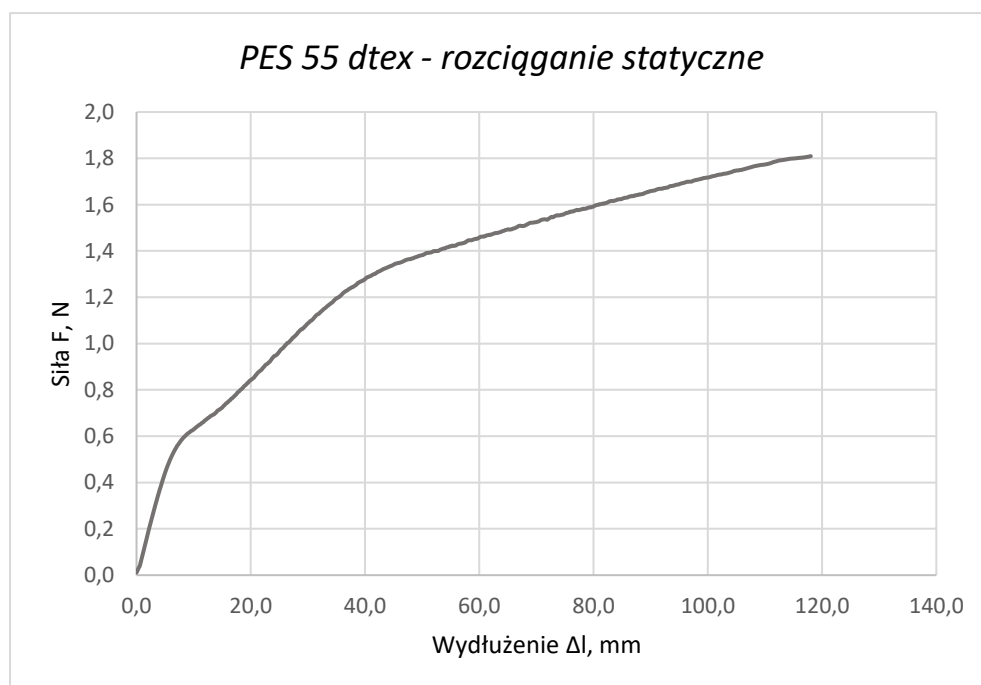


Rys. 6.1.55 Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia podczas dynamicznego rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex. Wykres zbiorczy dla prędkości rozciągania $V = 100 \text{ m/s}$ i długości rozciąganego odcinka $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

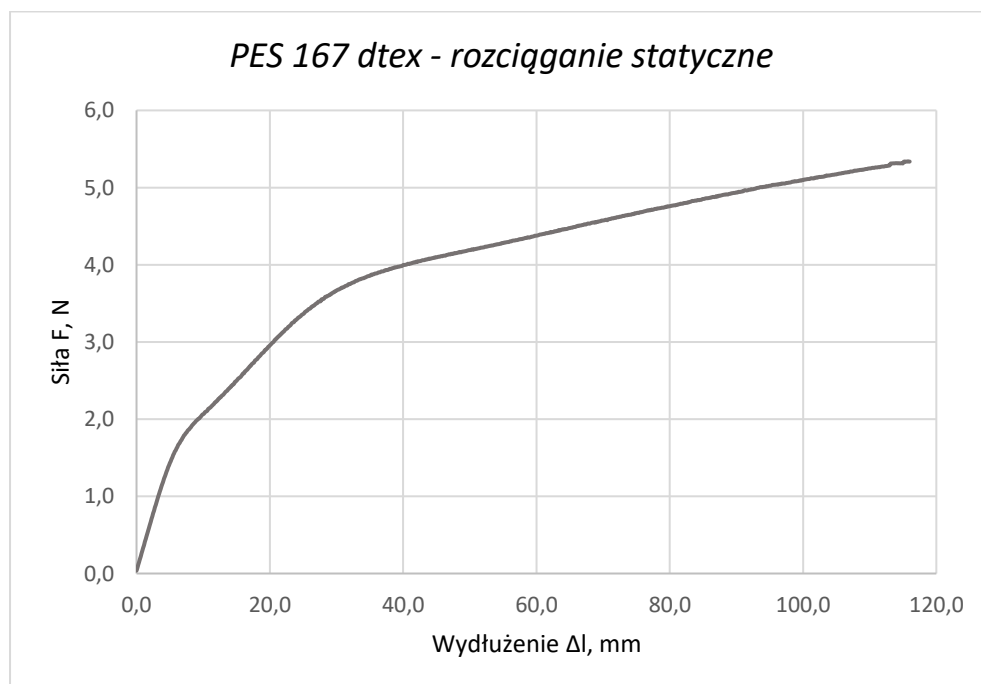
Źródło: opracowanie własne

ZAŁĄCZNIK 4

Charakterystyki siły w funkcji wydłużenia dla przędzy poliestrowych o masie liniowej 55 i 167 dtex oraz przędzy poliamidowych o masie liniowej 56 i 156 dtex stanowiących materiał badań, poddanych procesowi rozciągania na maszynie wytrzymałościowej Hounsfield model H50K-S.

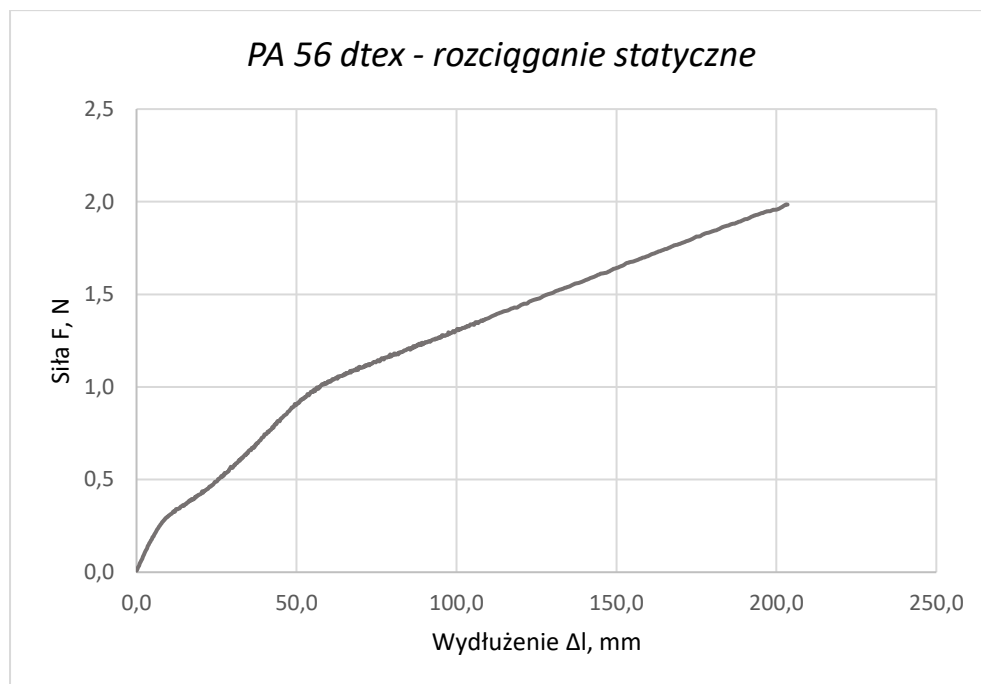


Rys. 8.1.2 Charakterystyka rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$, $l = 500 \text{ mm}$
Źródło: opracowanie własne

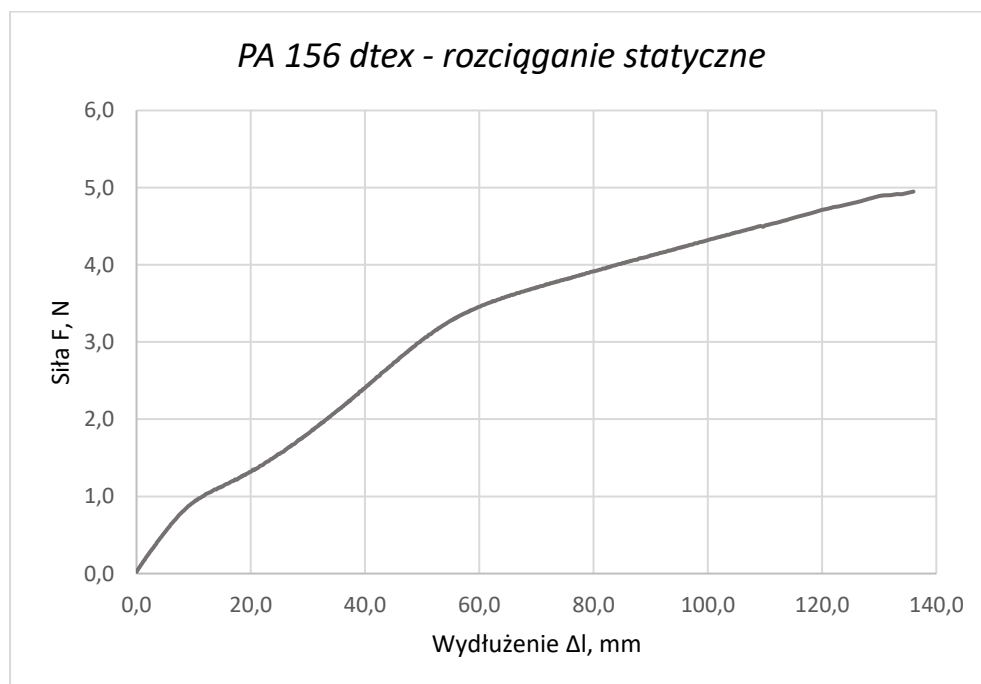


Rys. 8.1.3 Charakterystyka rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$, $l = 500 \text{ mm}$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 8.1.4 Charakterystyka rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$, $l = 500 \text{ mm}$
 Źródło: opracowanie własne

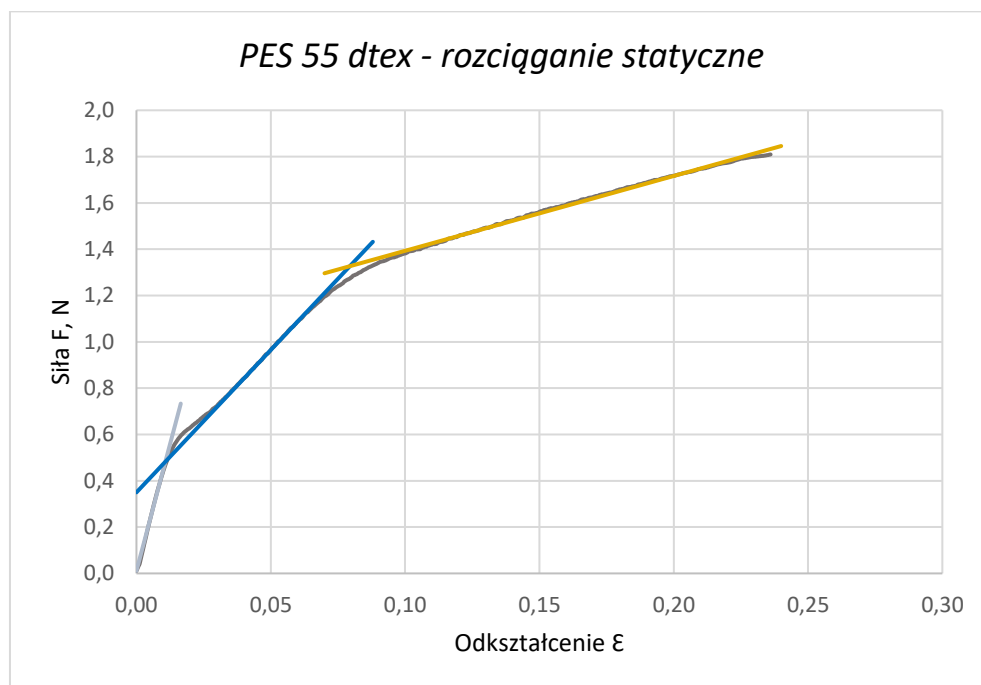


Rys. 8.1.5 Charakterystyka rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$,
 $l = 500 \text{ mm}$

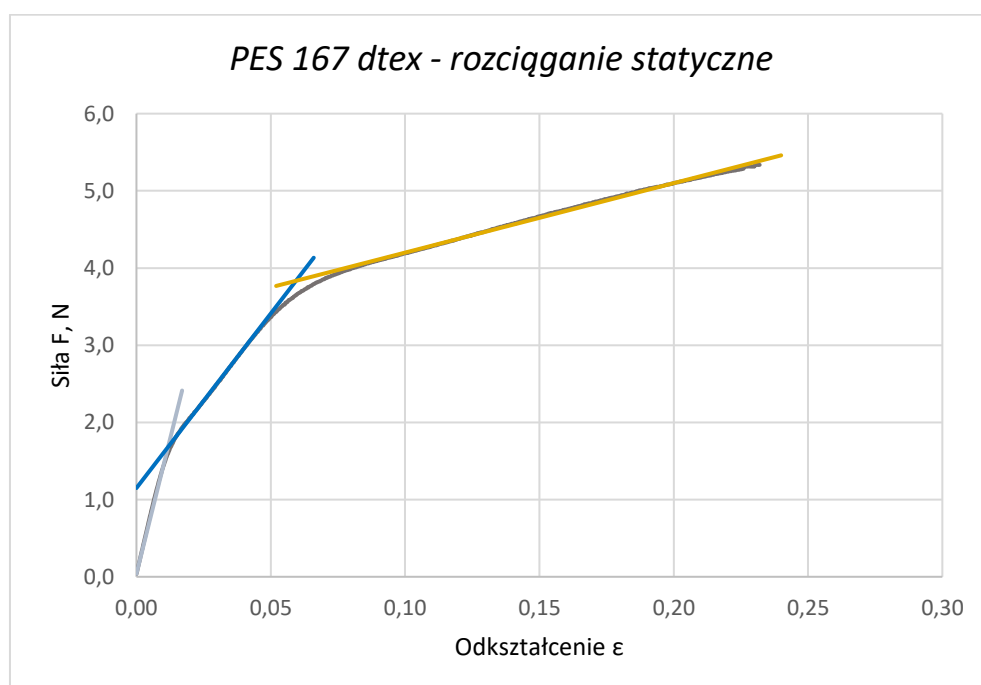
Źródło: opracowanie własne

ZAŁĄCZNIK 5

Charakterystyki siły w funkcji odkształcenia dla przędzy poliestrowych o masie liniowej 55 i 167 dtex oraz przędzy poliamidowych o masie liniowej 56 i 156 dtex z naniesionymi stycznymi pozwalającymi na wyznaczenie współczynnika sprężystości statycznej.

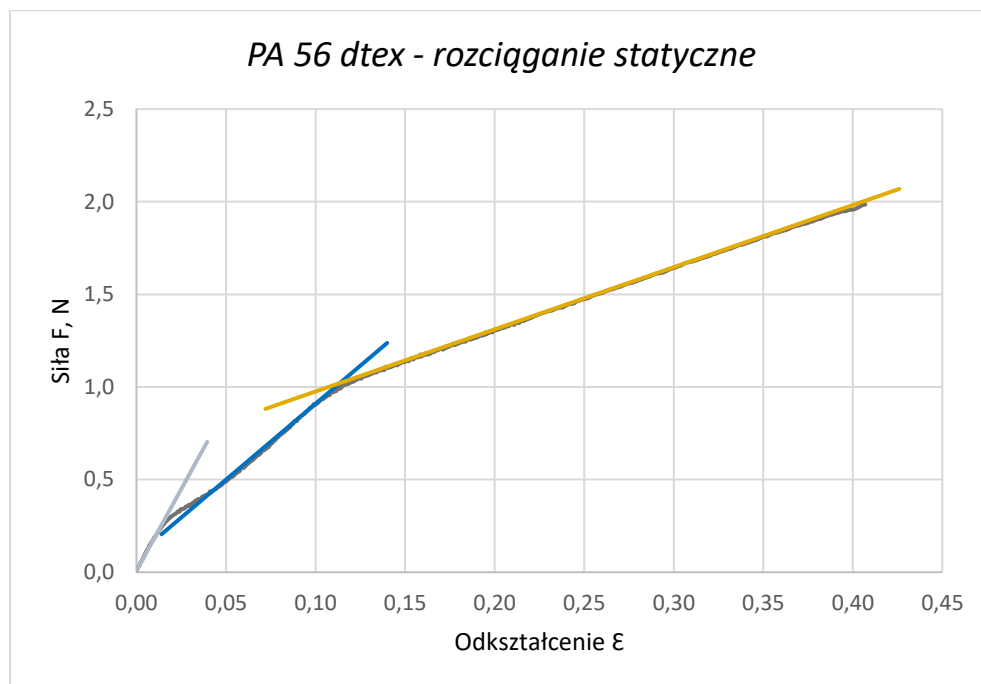


Rys. 8.1.7 Charakterystyka rozciągania przędzy poliestrowej PES 55 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$, $l = 500 \text{ mm}$
Źródło: opracowanie własne

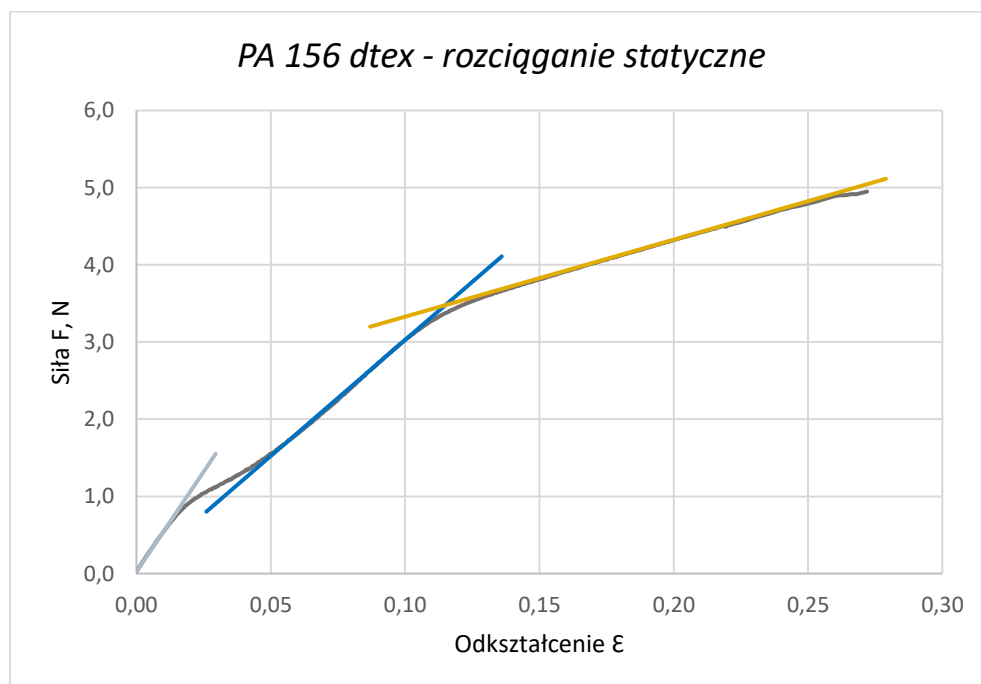


Rys. 8.1.8 Charakterystyka rozciągania przędzy poliestrowej PES 167 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$, $l = 500 \text{ mm}$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 8.1.9 Charakterystyka rozciągania przędzy poliamidowej PA 56 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$, $l = 500 \text{ mm}$
 Źródło: opracowanie własne

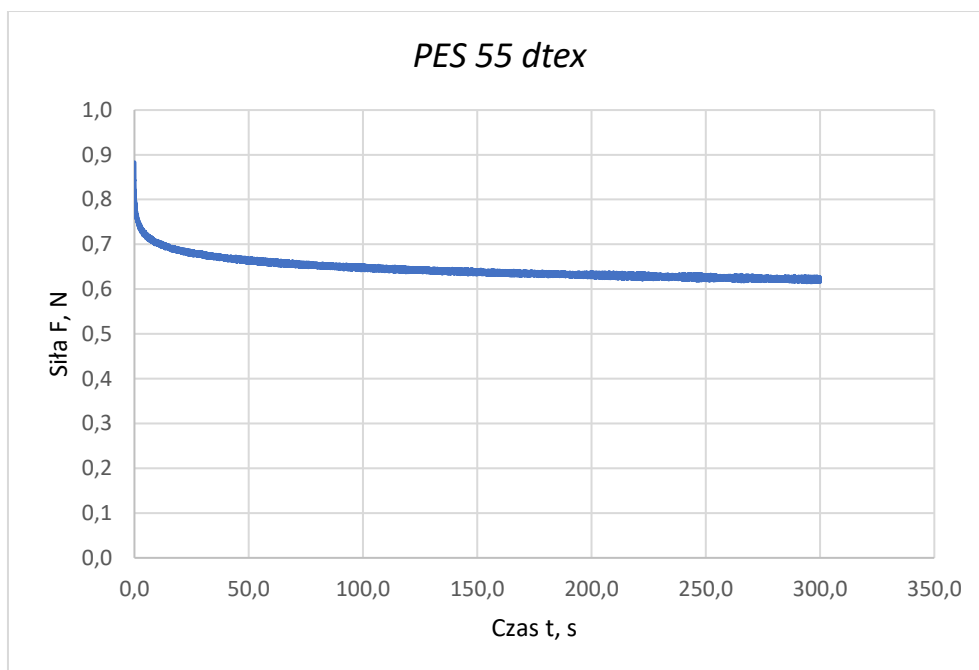


Rys. 8.1.10 Charakterystyka rozciągania przędzy poliamidowej PA 156 dtex, $V = 2 \text{ mm/min}$,
 $l = 500 \text{ mm}$

Źródło: opracowanie własne

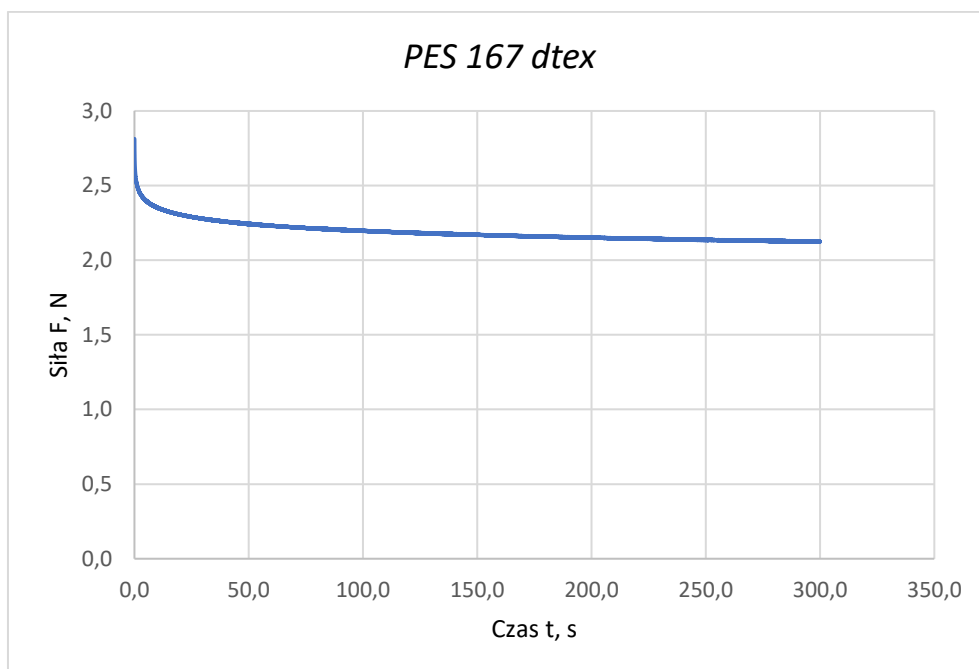
ZAŁĄCZNIK 6

Wykresy wartości sił otrzymane podczas pomiaru relaksacji naprężeń w nitkach dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 55 i 167 dtex oraz przędzy poliamidowej o masie liniowej 56 i 156 dtex.



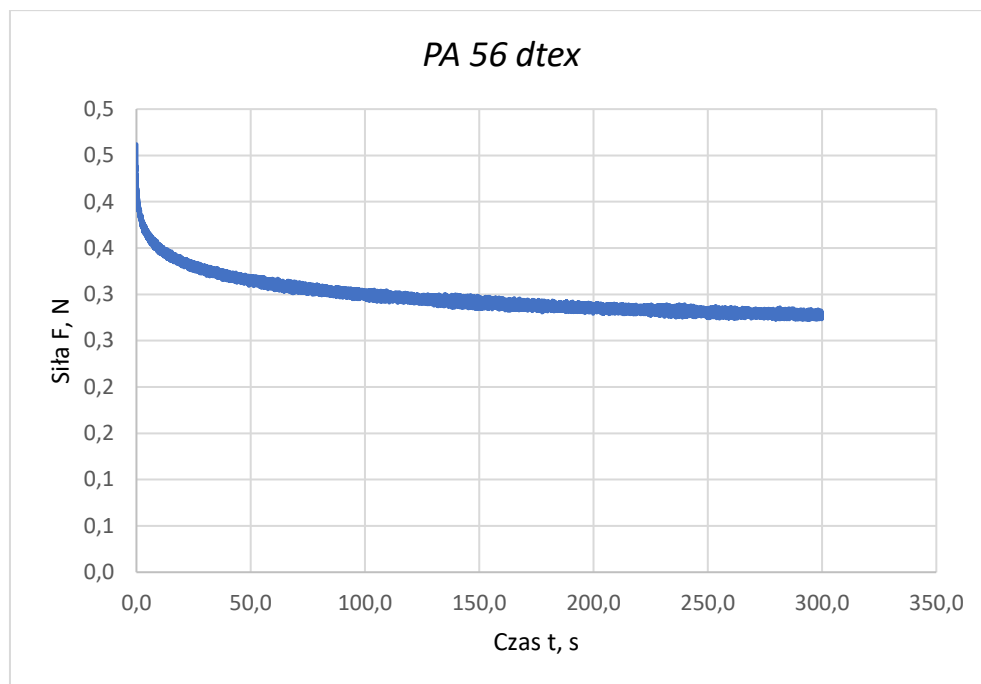
Rys. 11.3.5 Wykres uśrednionej wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach poddanych procesowi rozciągania: przędza poliestrowa PES 55 dtex, długość rozciąganego odcinka $l = 1000$ mm, wydłużenie $\Delta l = 20$ mm

Źródło: opracowanie własne



Rys. 11.3.6 Wykres uśrednionej wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach poddanych procesowi rozciągania: przędza poliestrowa PES 167 dtex, długość rozciąganego odcinka $l = 1000$ mm, wydłużenie $\Delta l = 20$ mm

Źródło: opracowanie własne



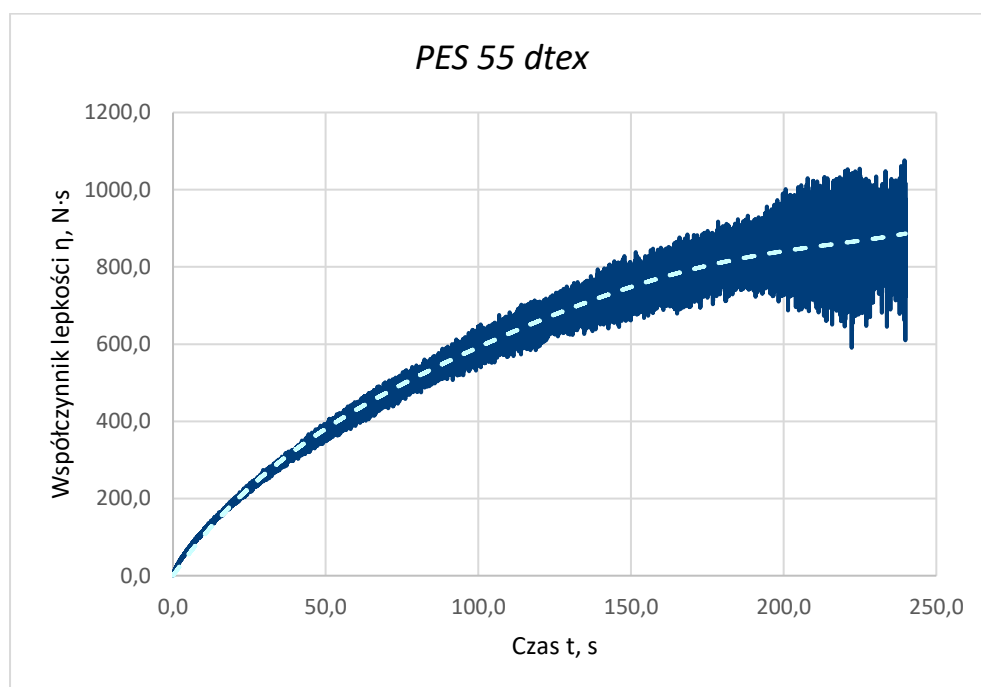
Rys. 11.3.7 Wykres uśrednionej wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach poddanych procesowi rozciągania: przędza poliamidowa PA 56 dtex, długość rozciąganego odcinka $l = 1000\text{mm}$, wydłużenie $\Delta l = 20\text{ mm}$
Źródło: opracowanie własne



Rys. 11.3.8 Wykres uśrednionej wartości sił podczas relaksacji naprężeń w nitkach poddanych procesowi rozciągania: przędza poliamidowa PA 156 dtex, długość rozciąganego odcinka $l = 1000\text{mm}$, wydłużenie $\Delta l = 20\text{ mm}$
Źródło: opracowanie własne

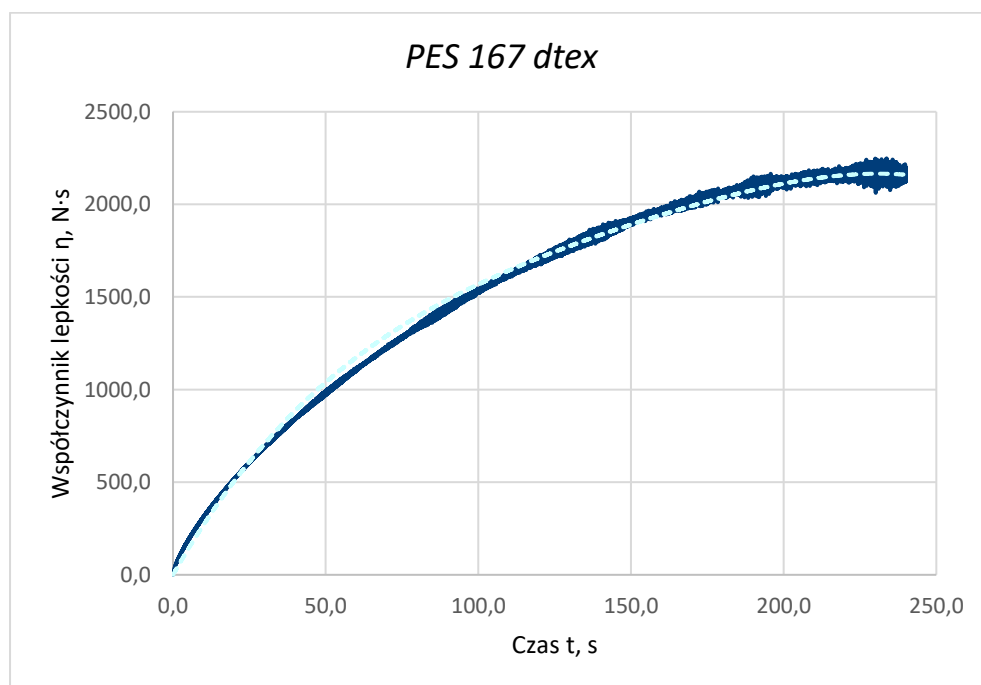
ZAŁĄCZNIK 7

Wykresy wartości współczynnika lepkości wyznaczonego dla przędzy poliestrowej o masie liniowej 55 i 167 dtex oraz przędzy poliamidowej o masie liniowej 56 i 156 dtex.



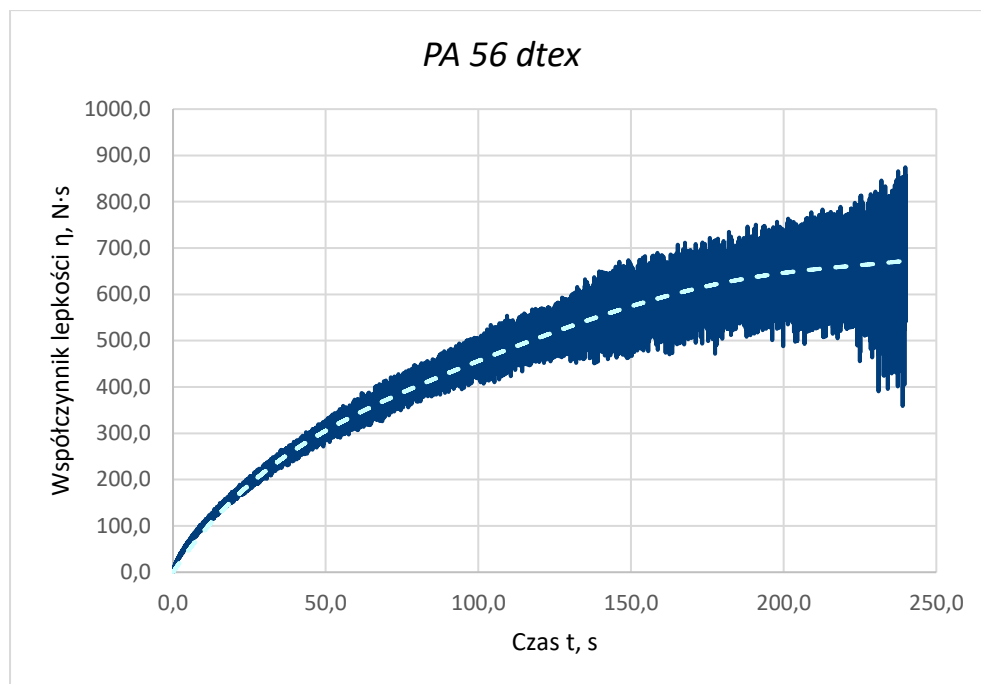
Rys. 11.4.2 Wykres wartości współczynnika lepkości wyznaczonego dla przędzy poliestrowej PES 55 dtex

Źródło: opracowanie własne



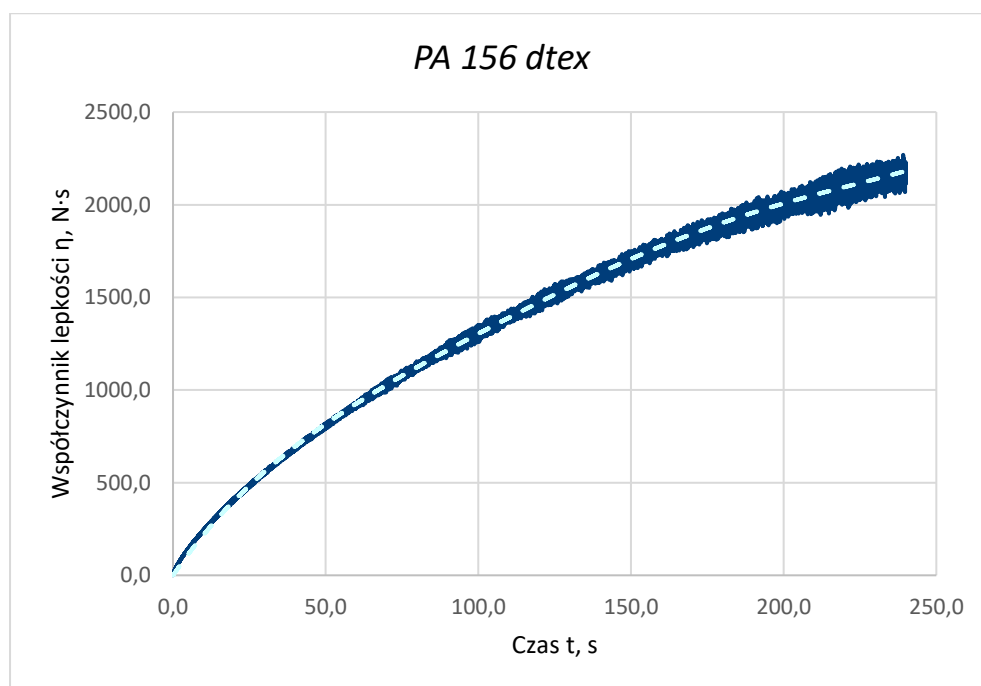
Rys. 11.4.3 Wykres wartości współczynnika lepkości wyznaczonego dla przędzy poliestrowej PES 167 dtex

Źródło: opracowanie własne



Rys. 11.4.4 Wykres wartości współczynnika lepkości wyznaczonego dla przędzy poliamidowej PA 56 dtex

Źródło: opracowanie własne

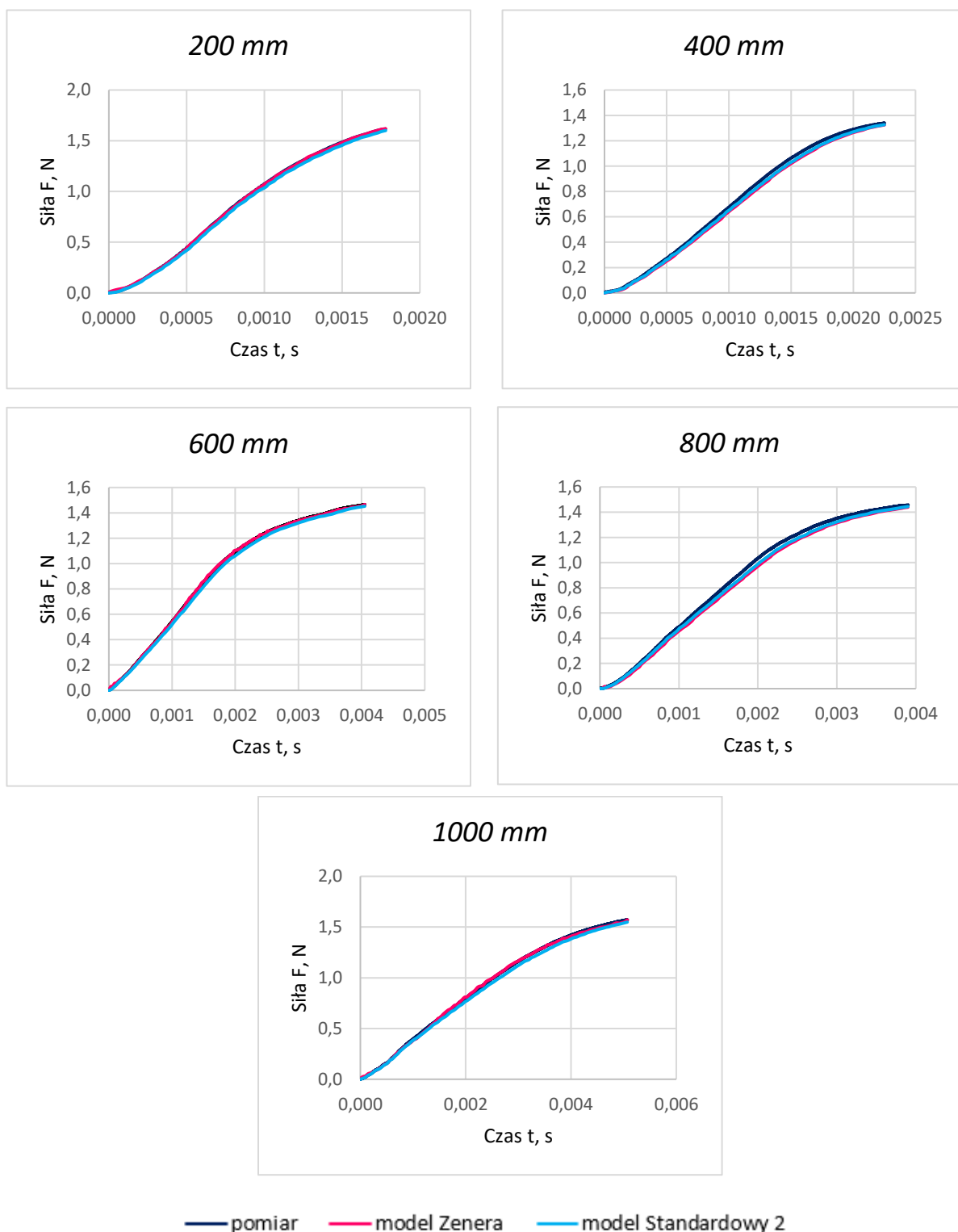


Rys. 11.4.5 Wykres wartości współczynnika lepkości wyznaczonego dla przędzy poliamidowej PA 156 dtex

Źródło: opracowanie własne

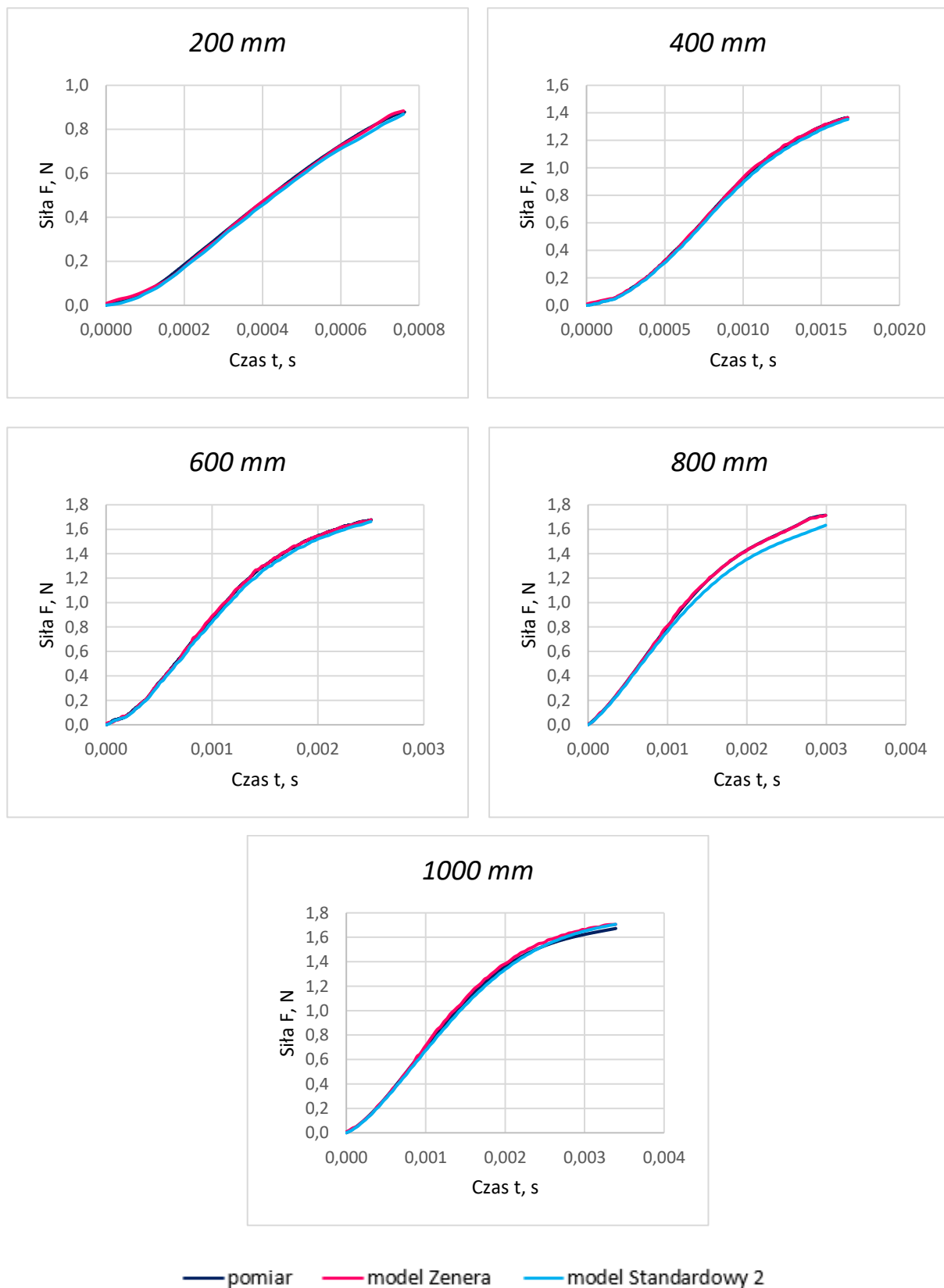
ZAŁĄCZNIK 8

Charakterystyki siły w funkcji czasu $F = f(t)$ otrzymane w wyniku przeprowadzonej analizy porównawczej krzywych rzeczywistych i modelowych.



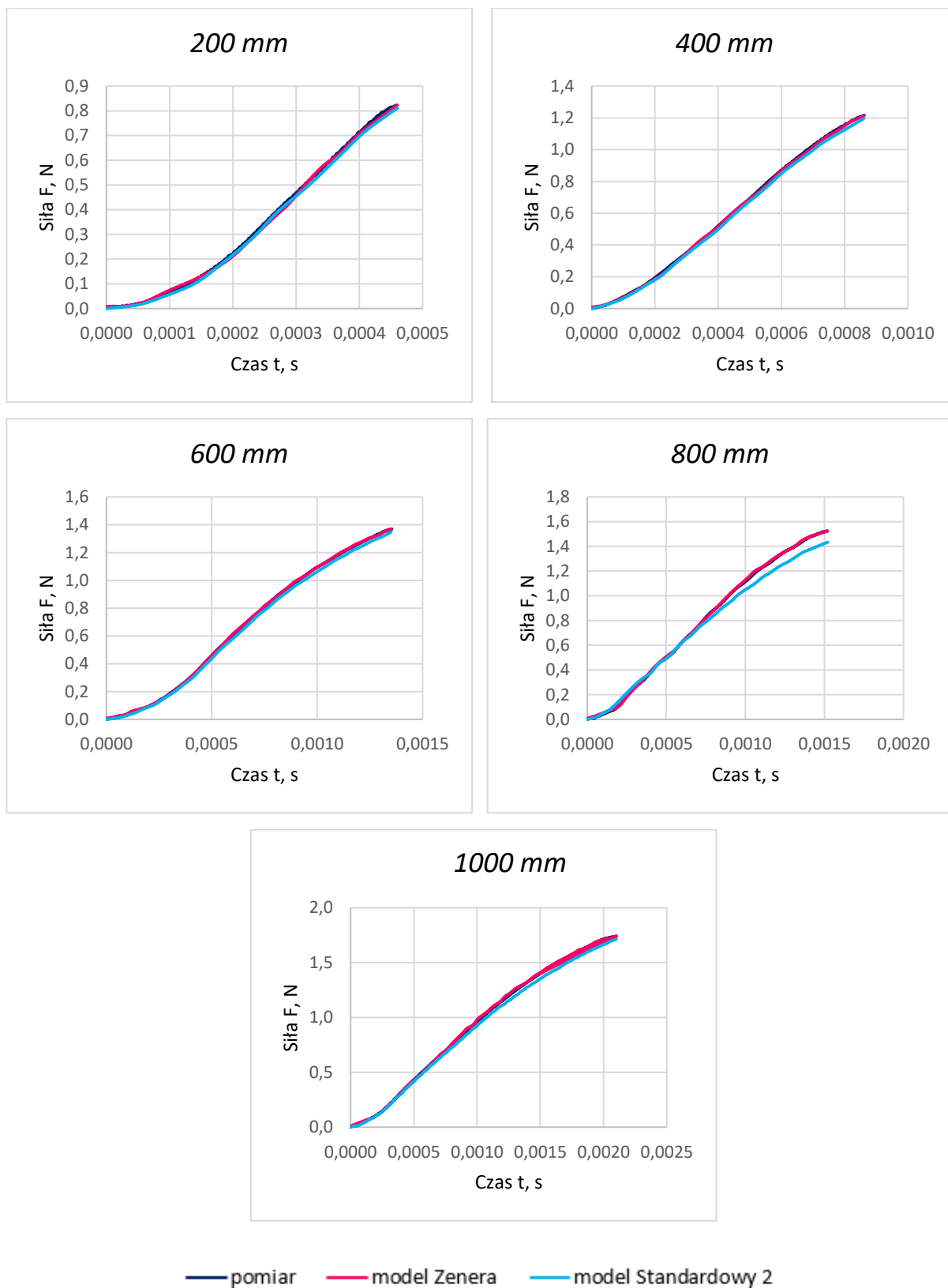
Rys. 13.6 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 56 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 40 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



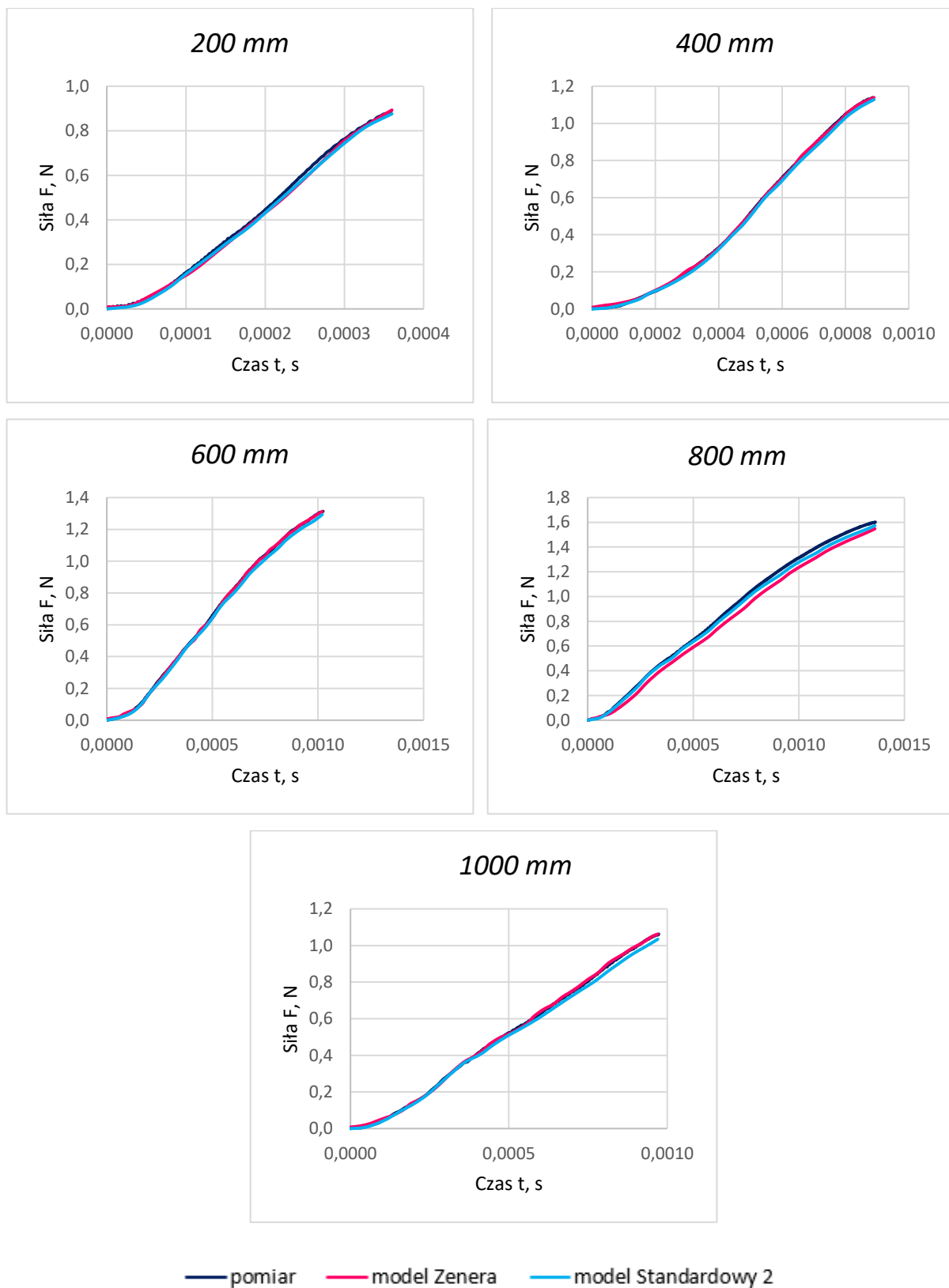
Rys. 13.7 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 56 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 60 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



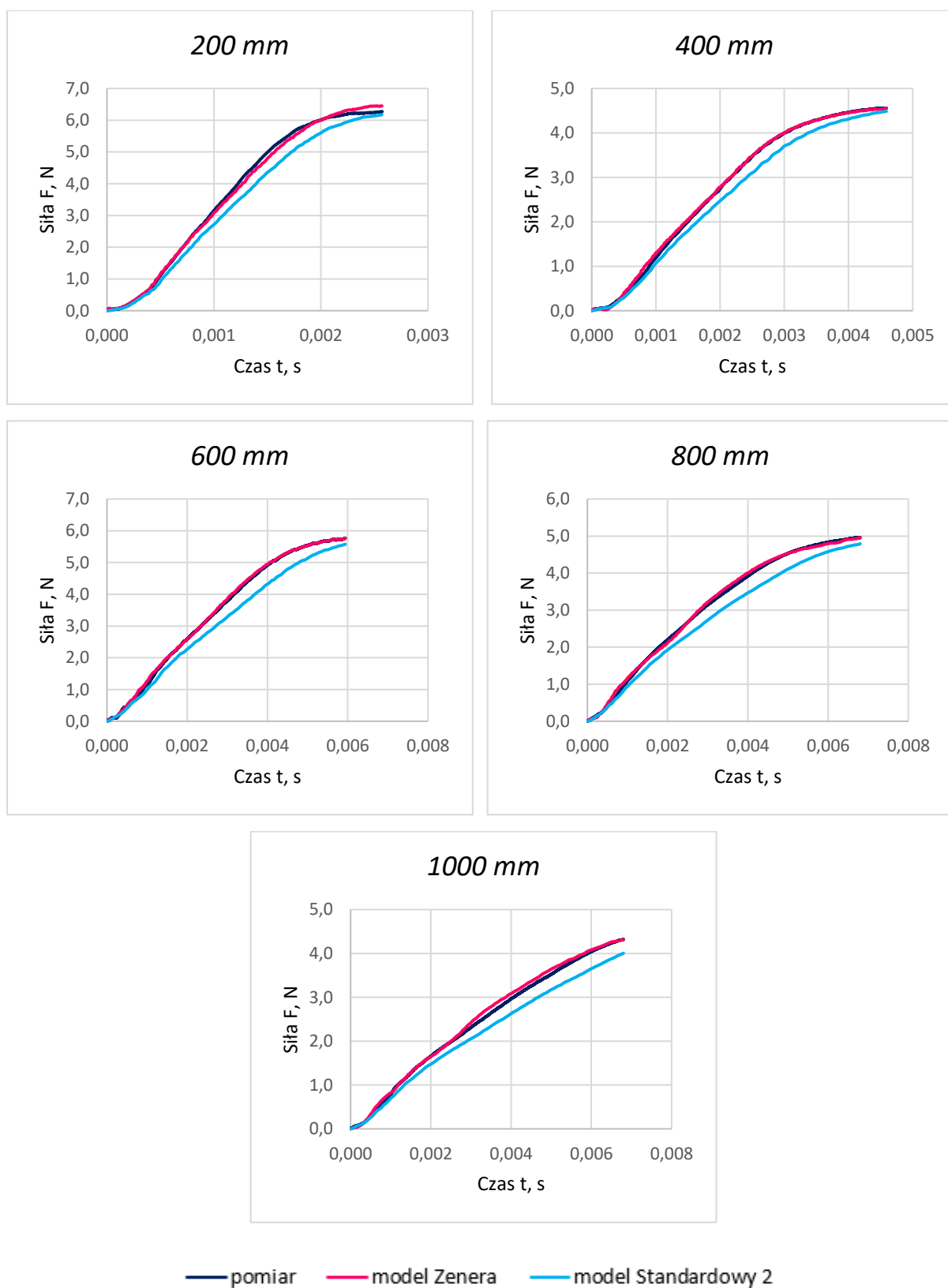
Rys. 13.8 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 56 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 80 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



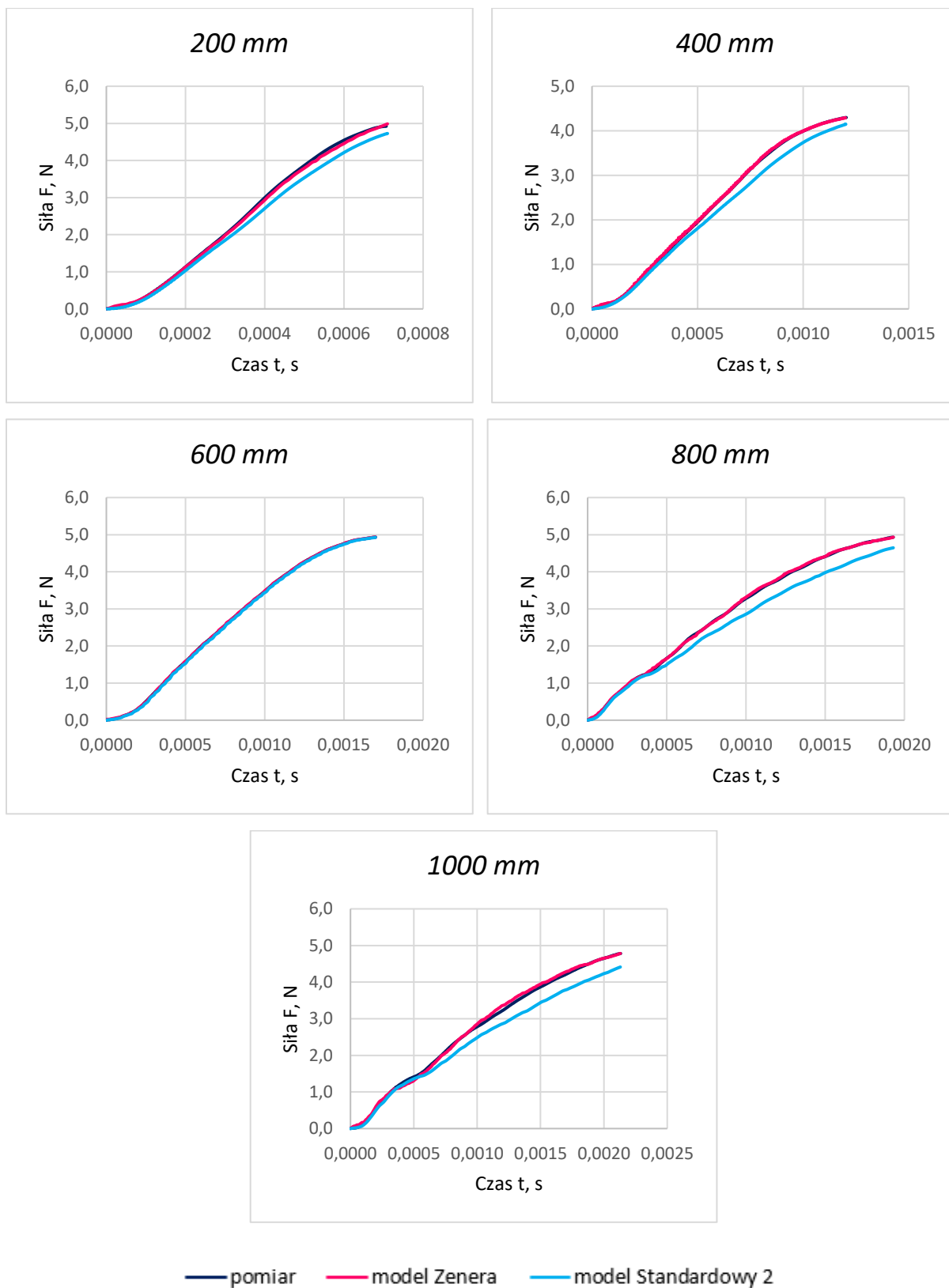
Rys. 13.9 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 56 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 100 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne

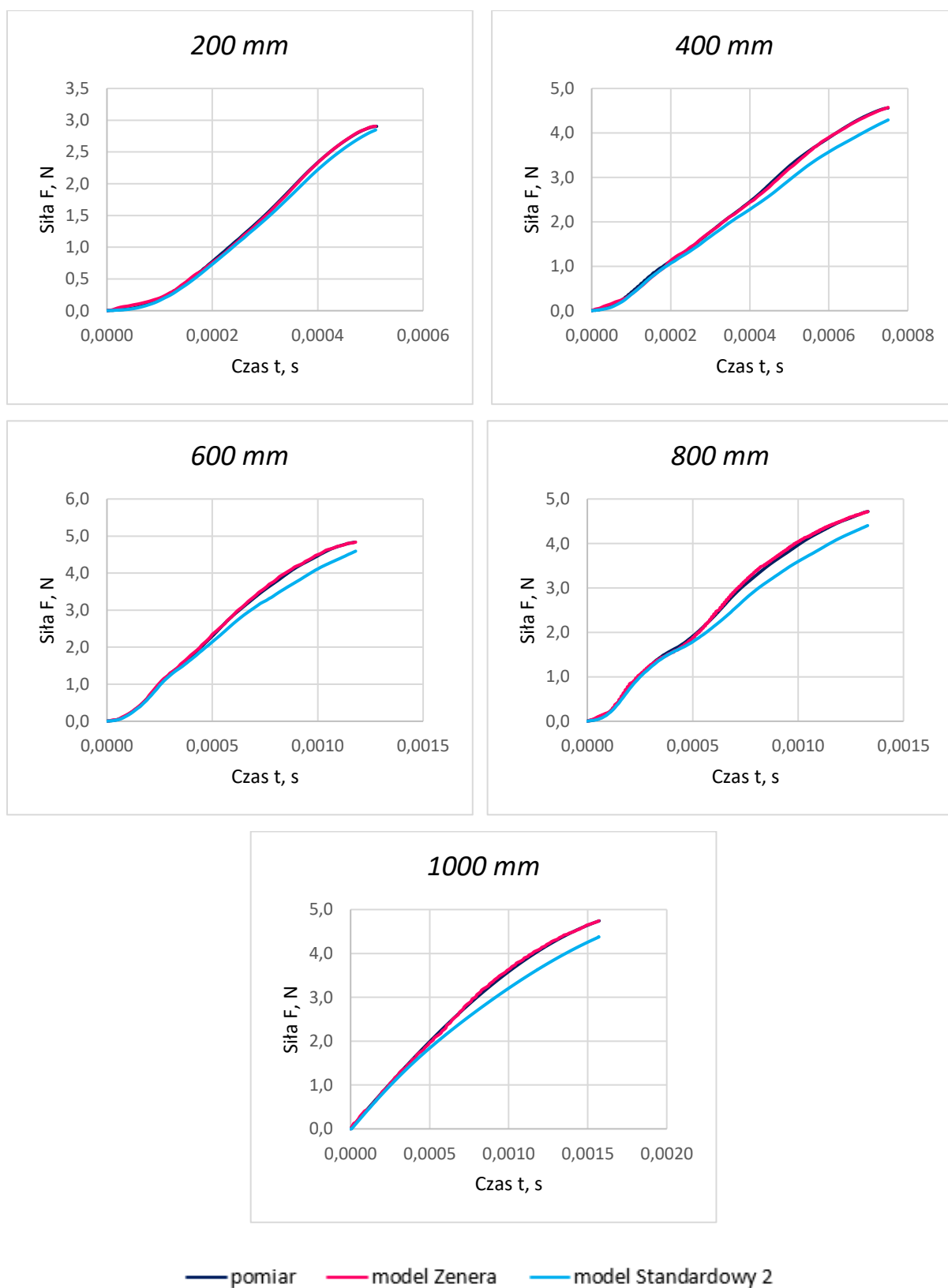


Rys. 13.10 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 156 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 20 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

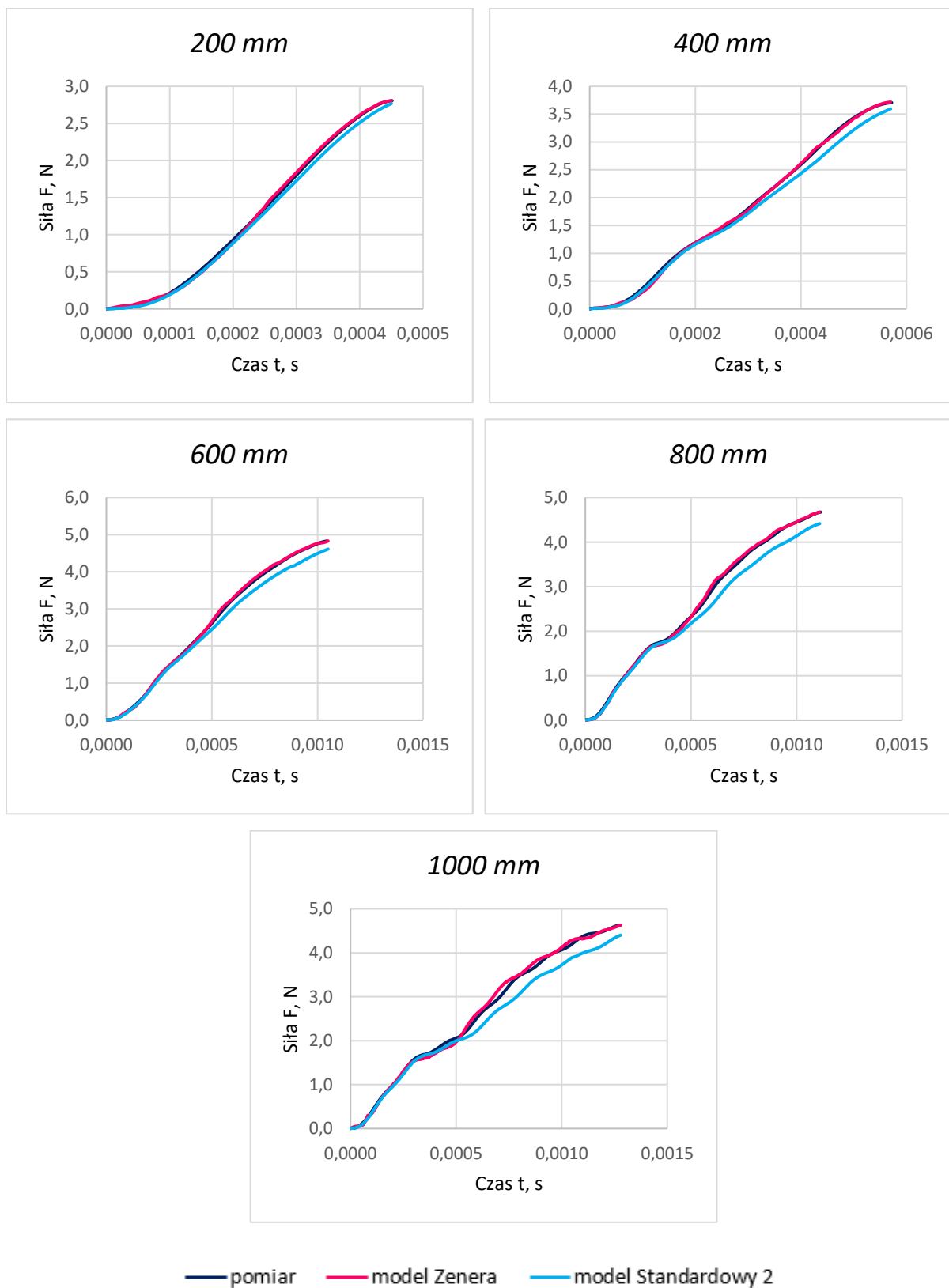
Źródło: opracowanie własne



Rys. 13.11 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 156 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 60 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne

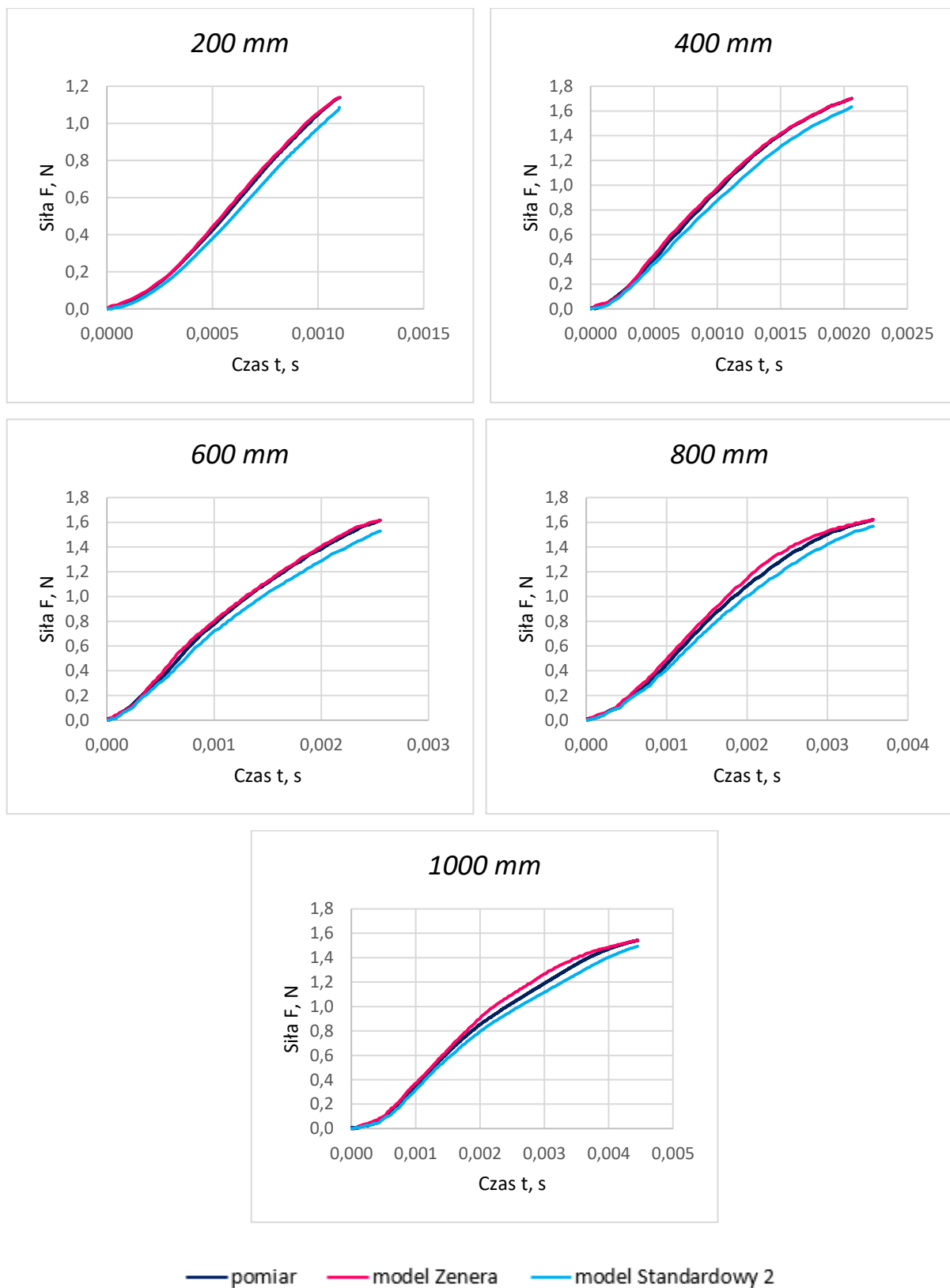


Rys. 13.12 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 156 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 80 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm
Źródło: opracowanie własne



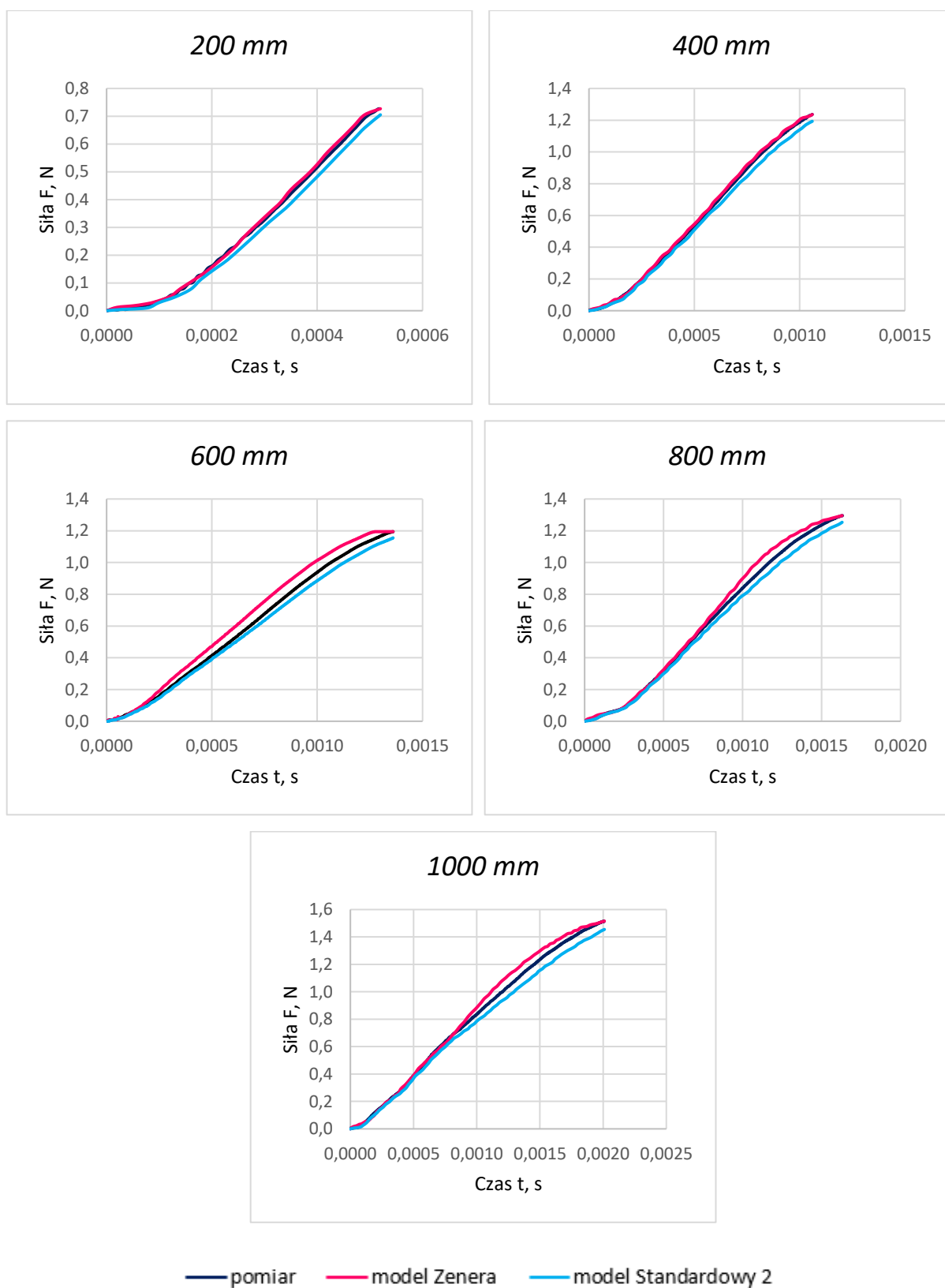
Rys. 13.13 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliamidowej PA 156 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 100 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



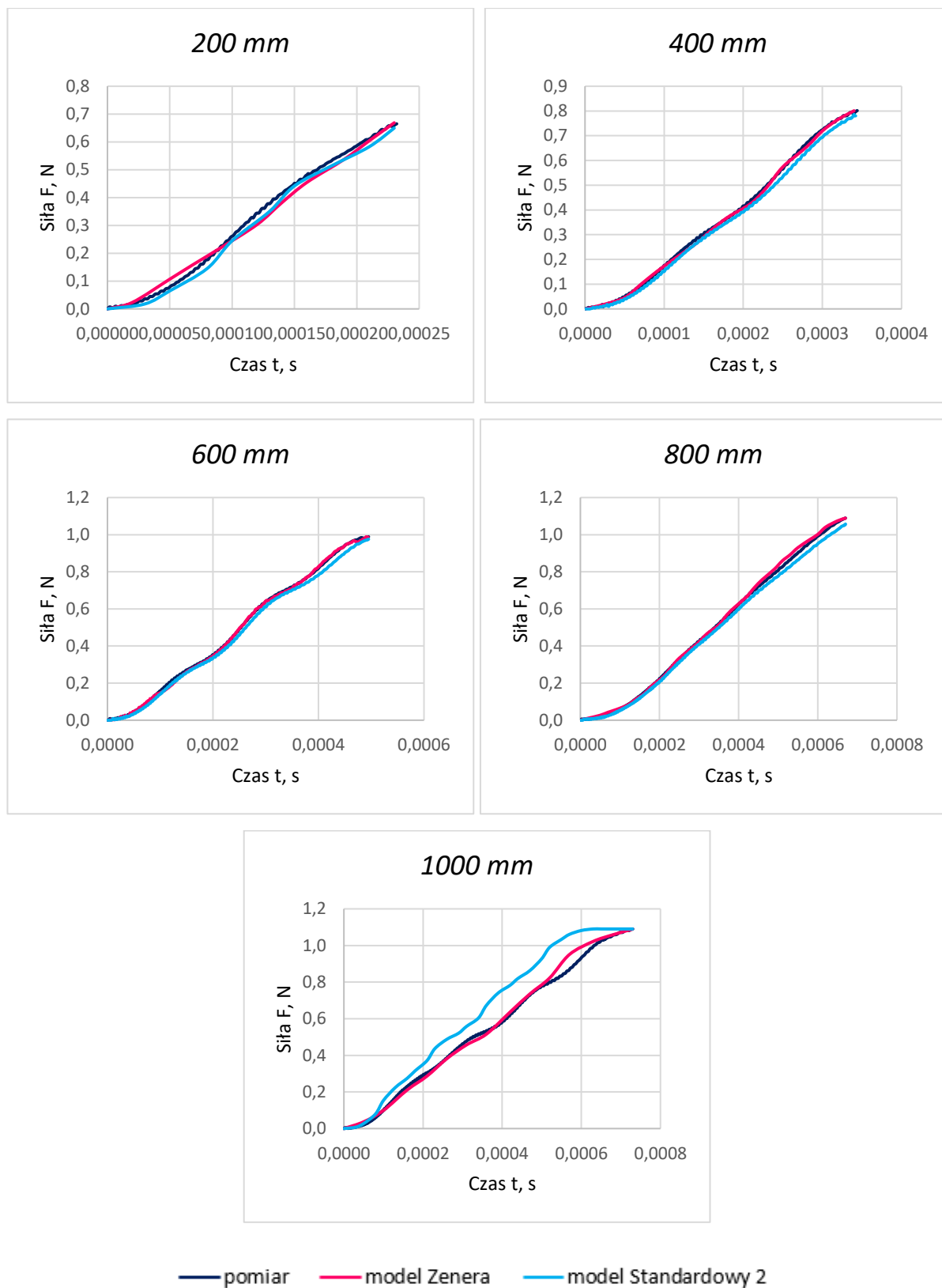
Rys. 13.14 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 55 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 20 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



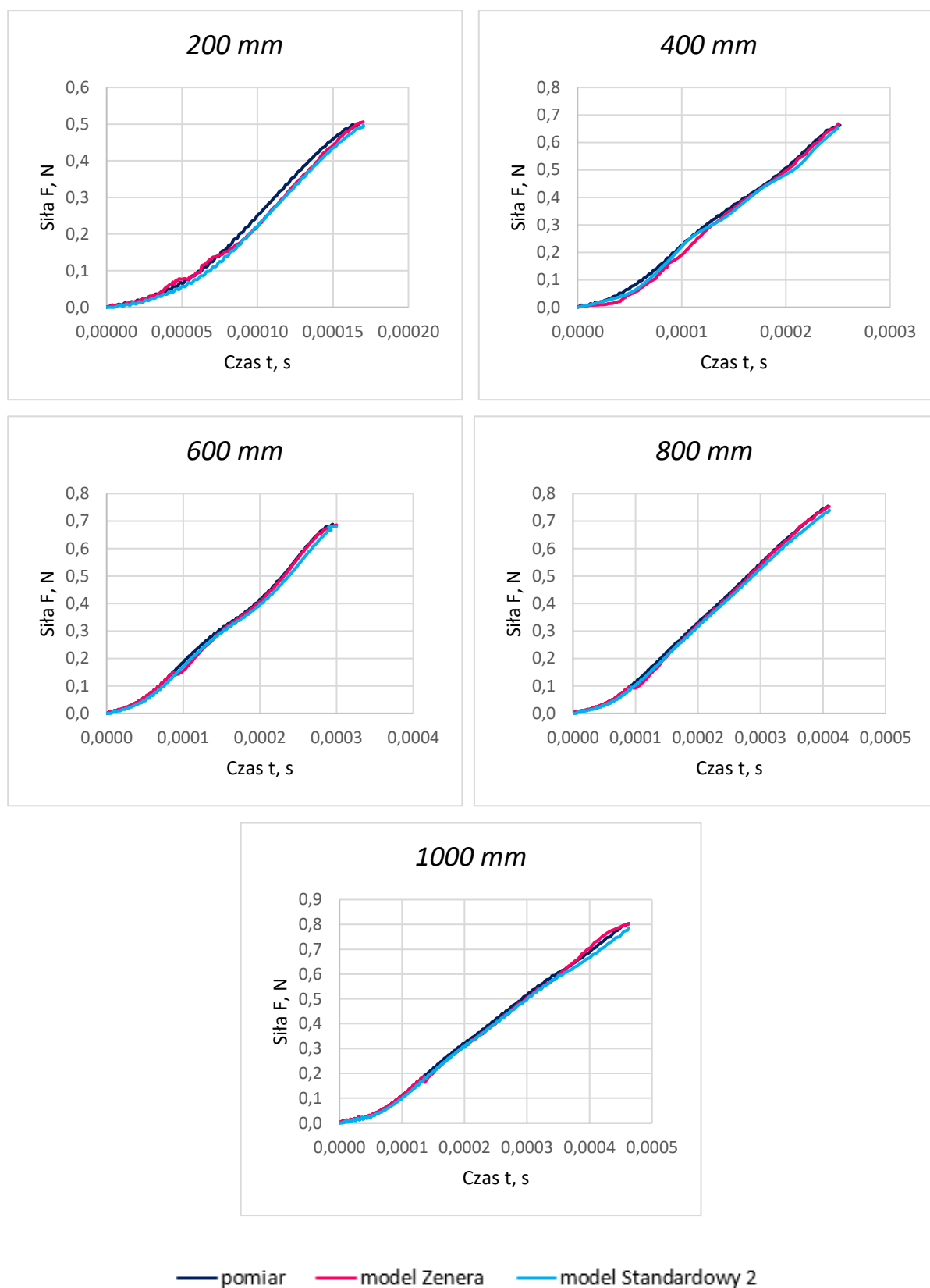
Rys. 13.15 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 55 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 40 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



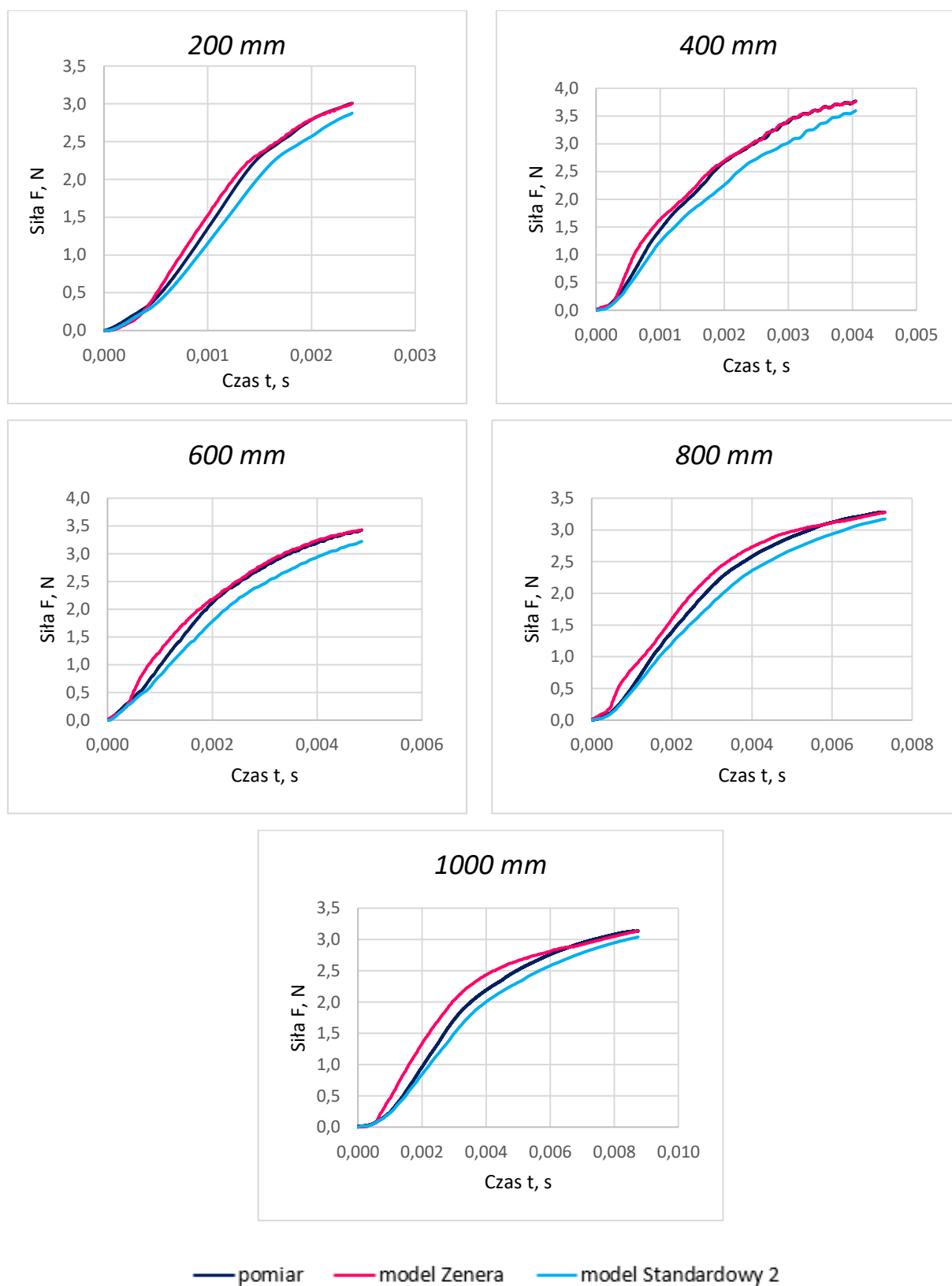
Rys. 13.16 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 55 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 80 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



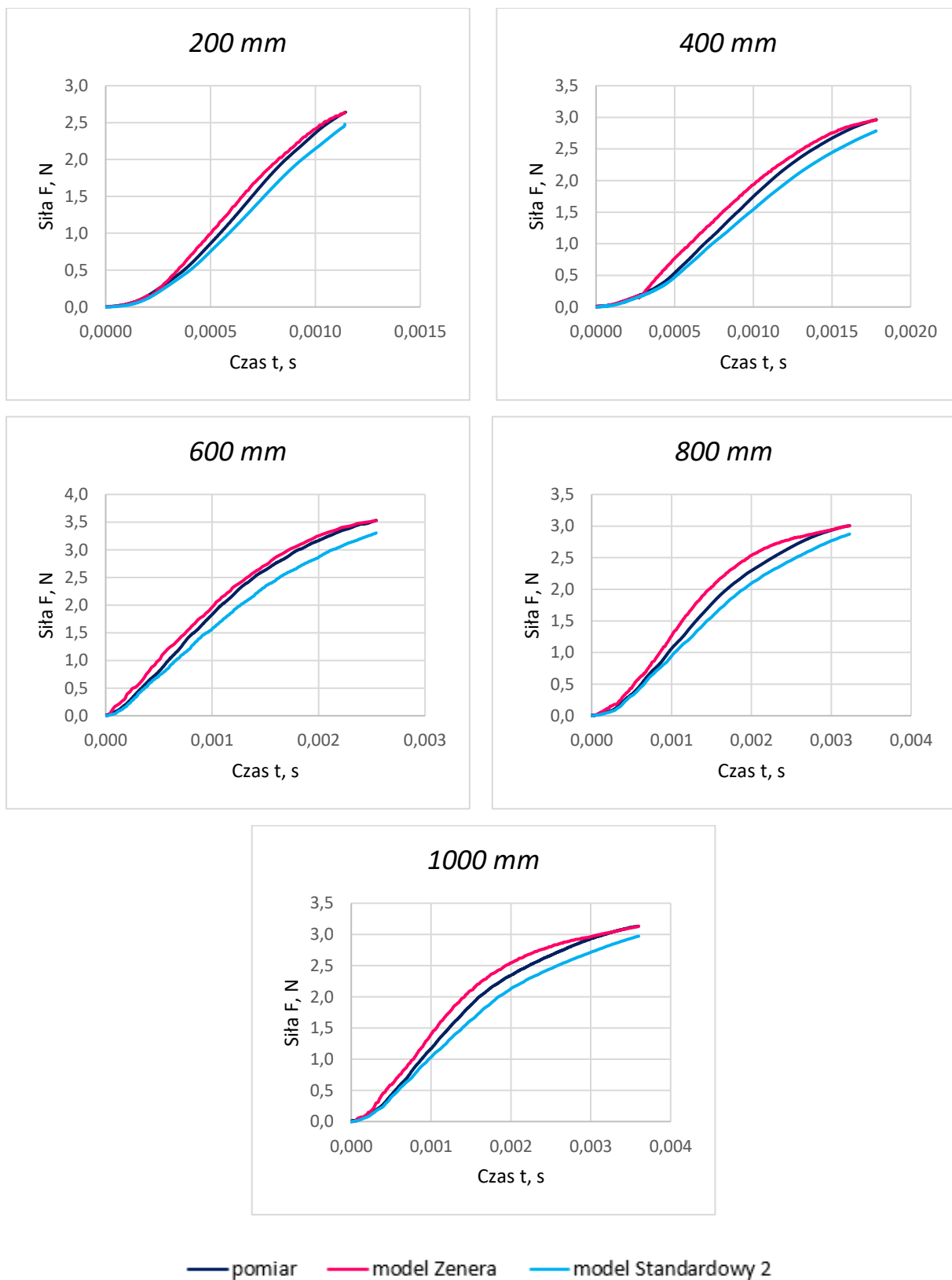
Rys. 13.17 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 55 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 100 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



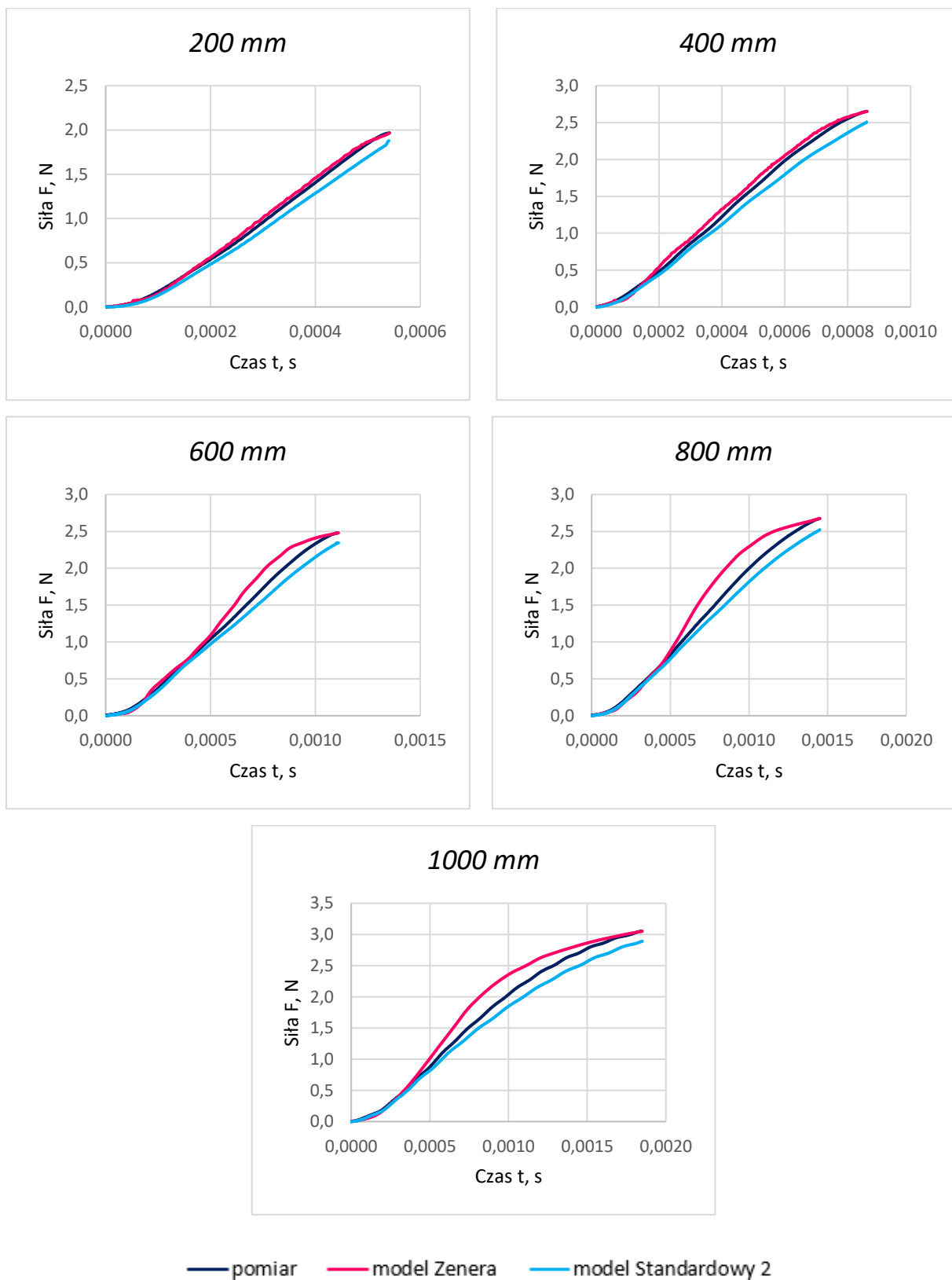
Rys. 13.18 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 10 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



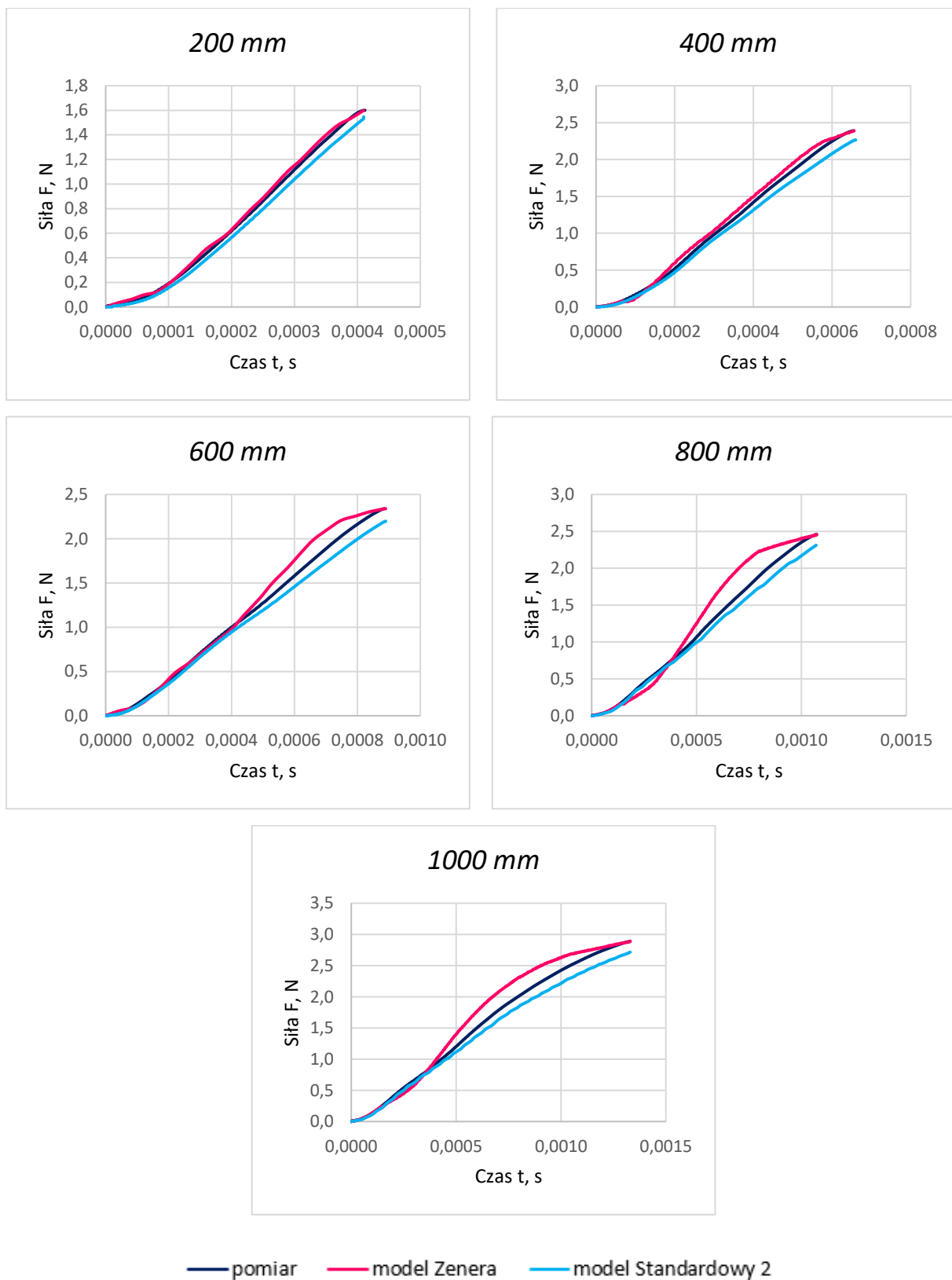
Rys. 13.19 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 20 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



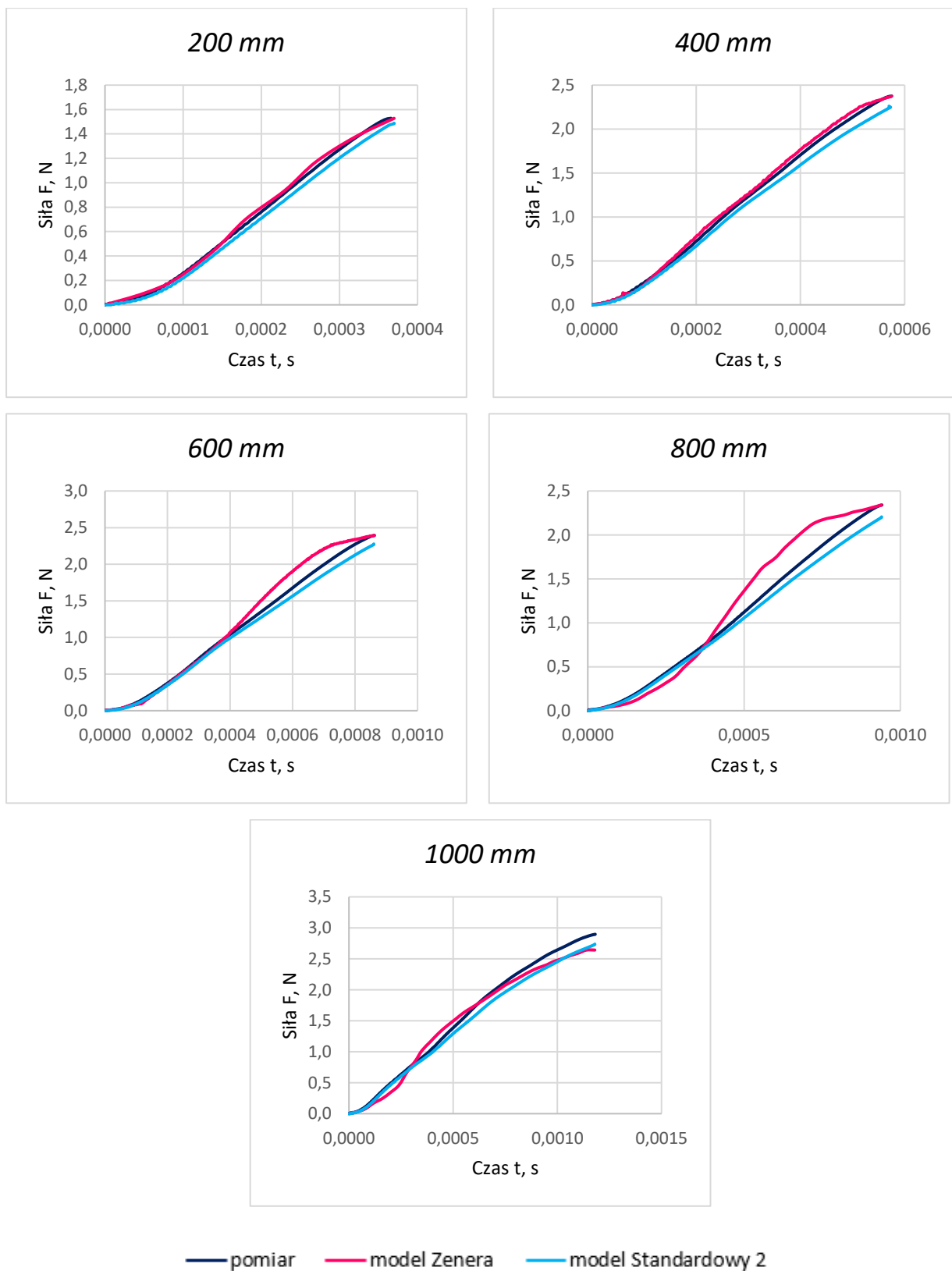
Rys. 13.20 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 40 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



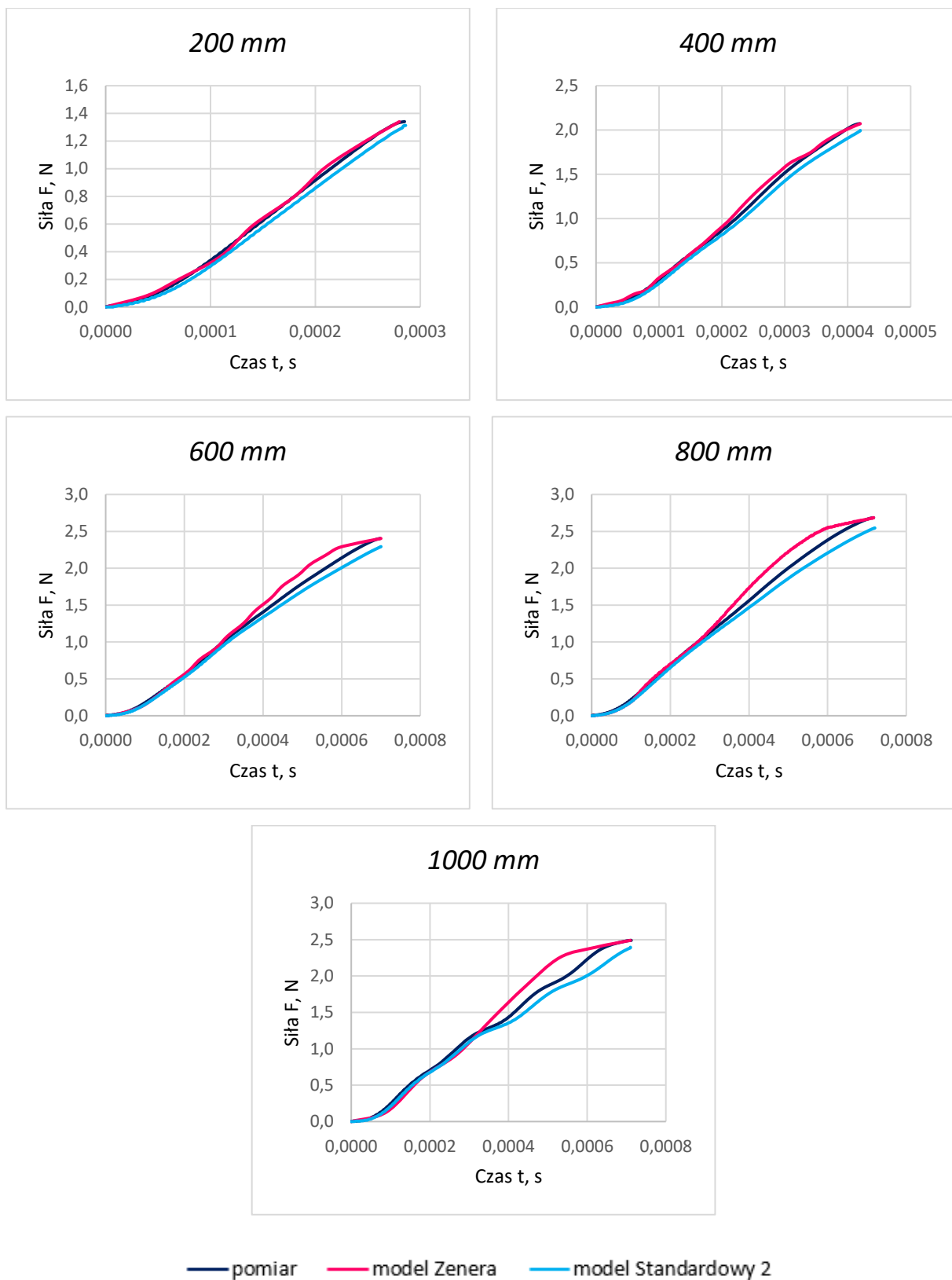
Rys. 13.21 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 50 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



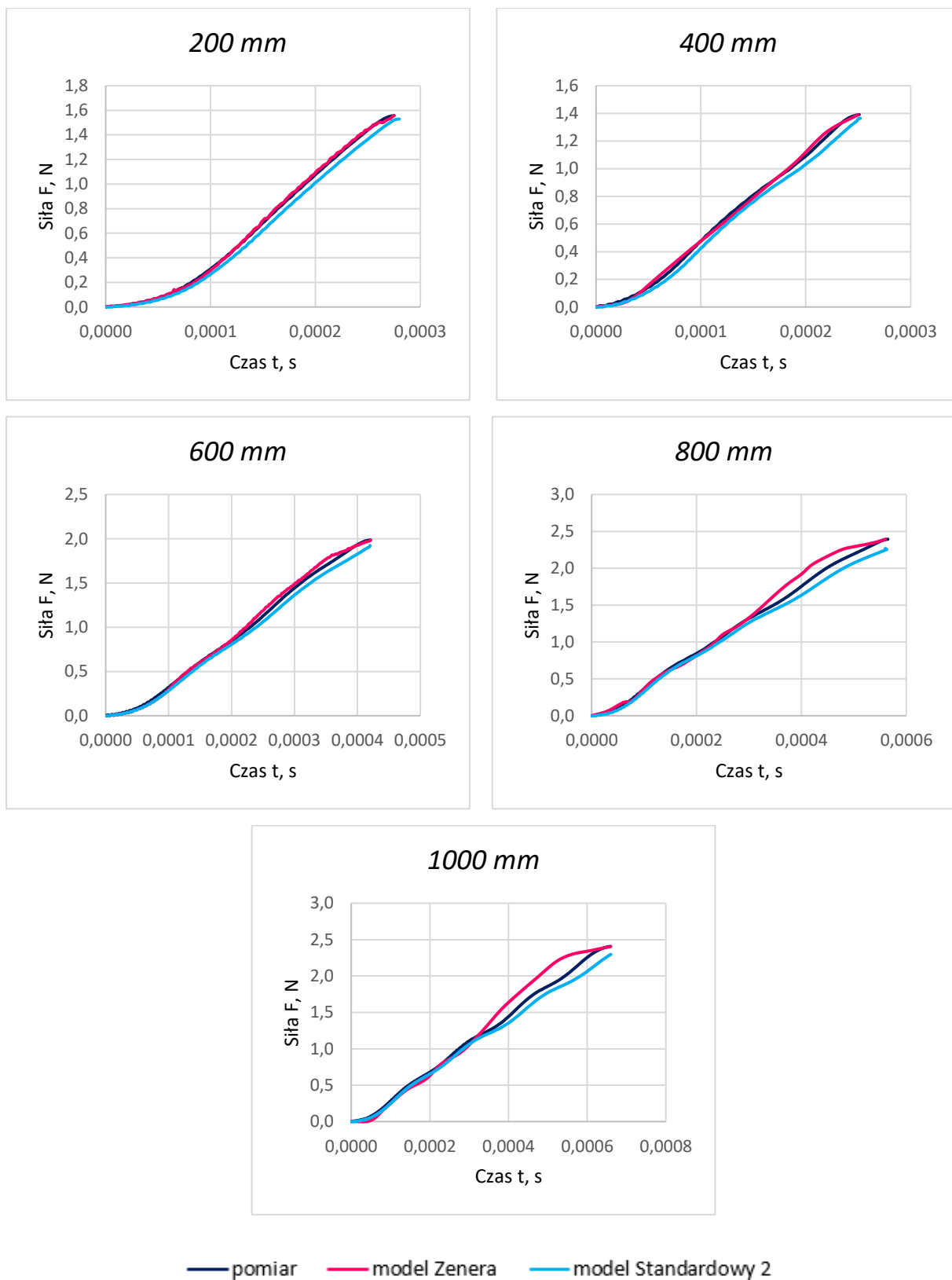
Rys. 13.22 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 60 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



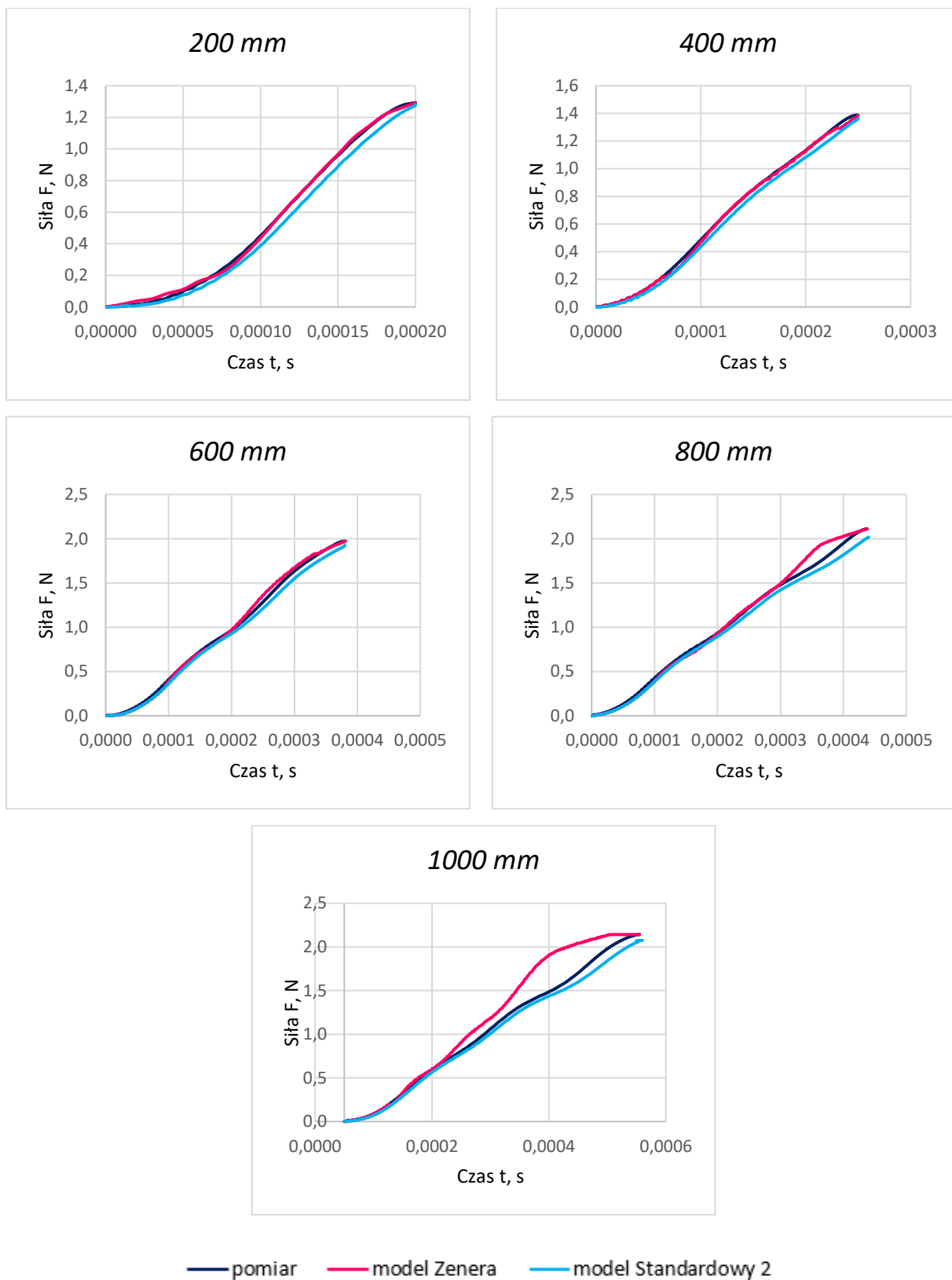
Rys. 13.23 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 70 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



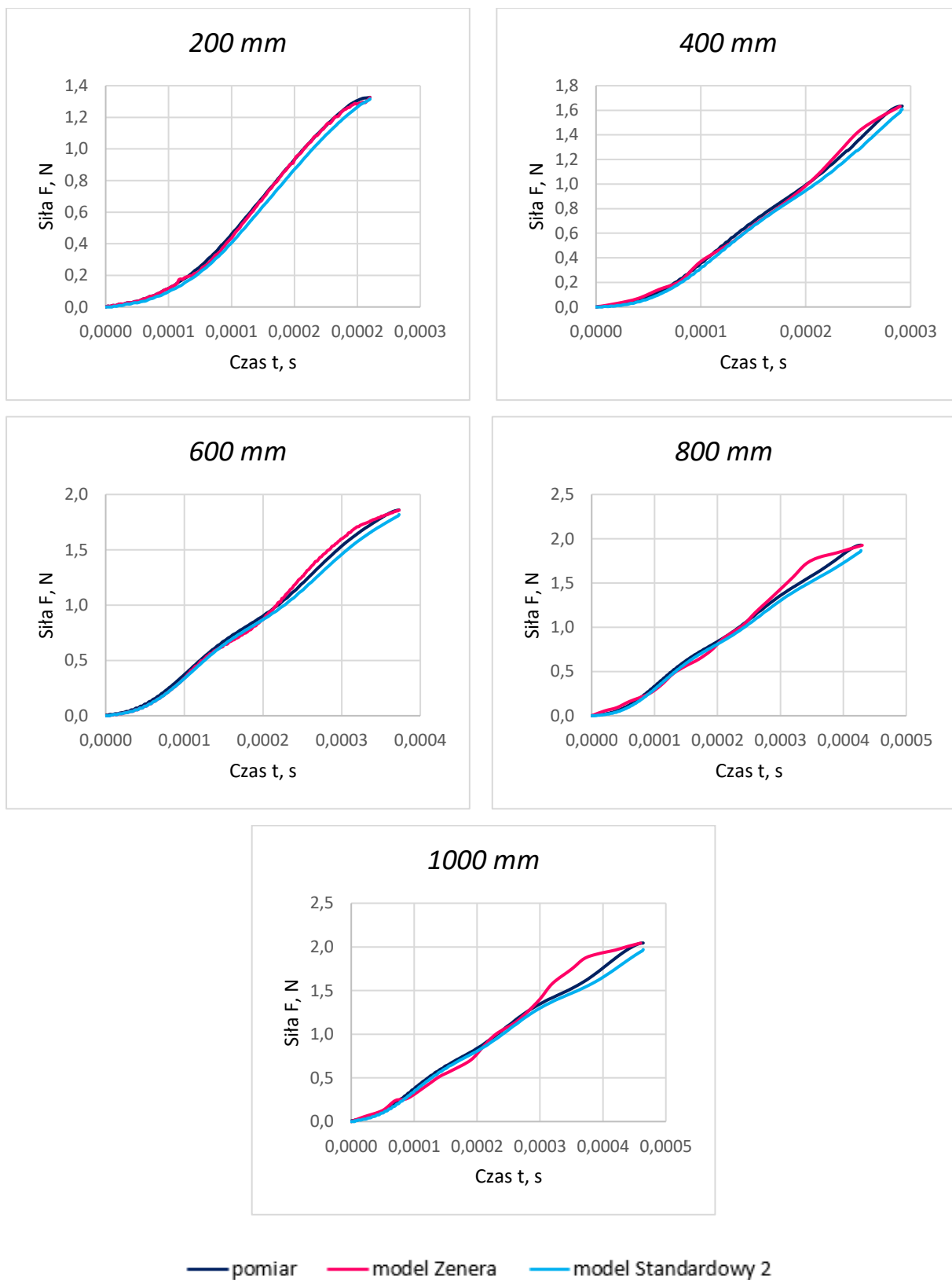
Rys. 13.24 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 80 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



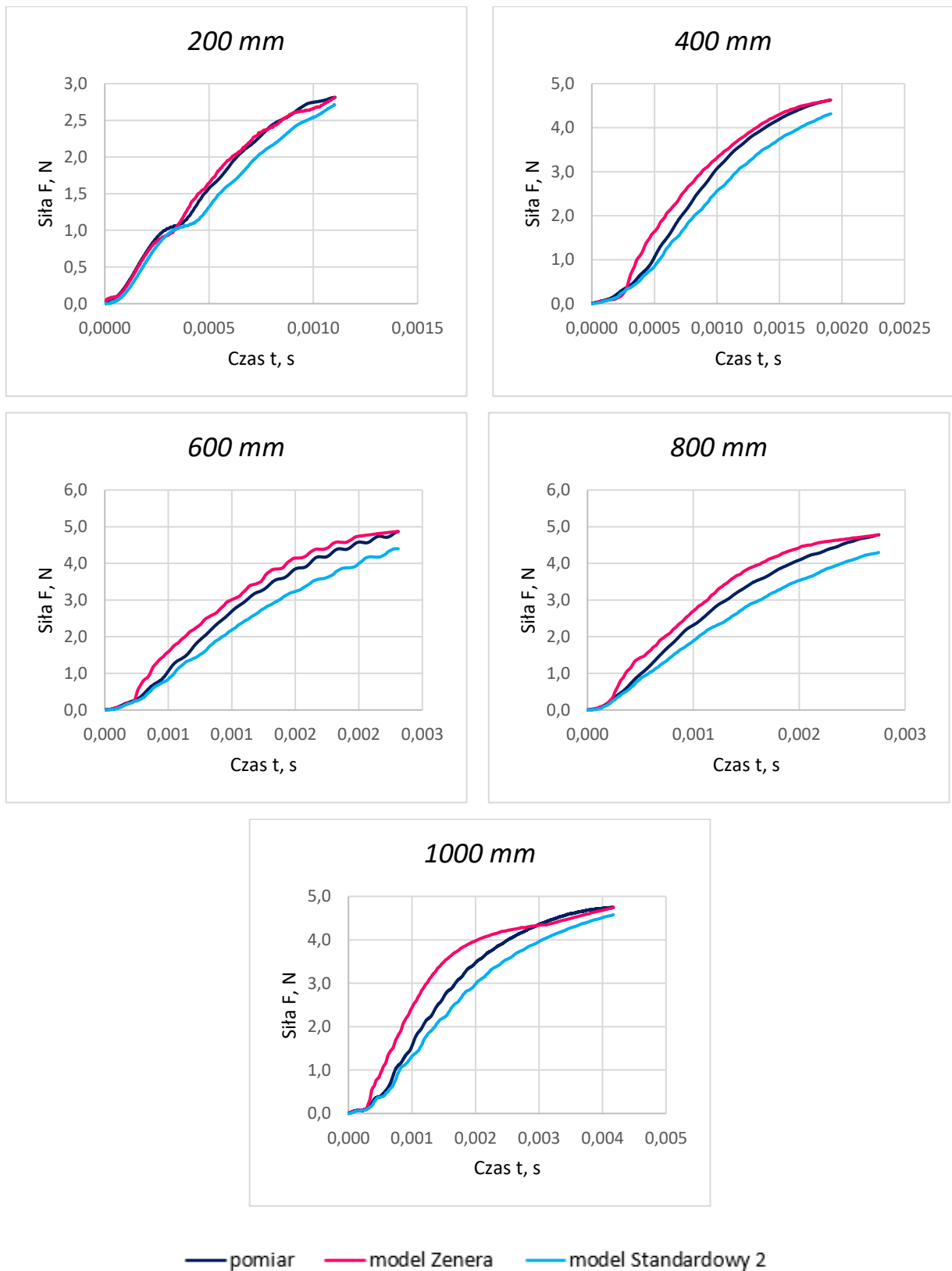
Rys. 13.25 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 90 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



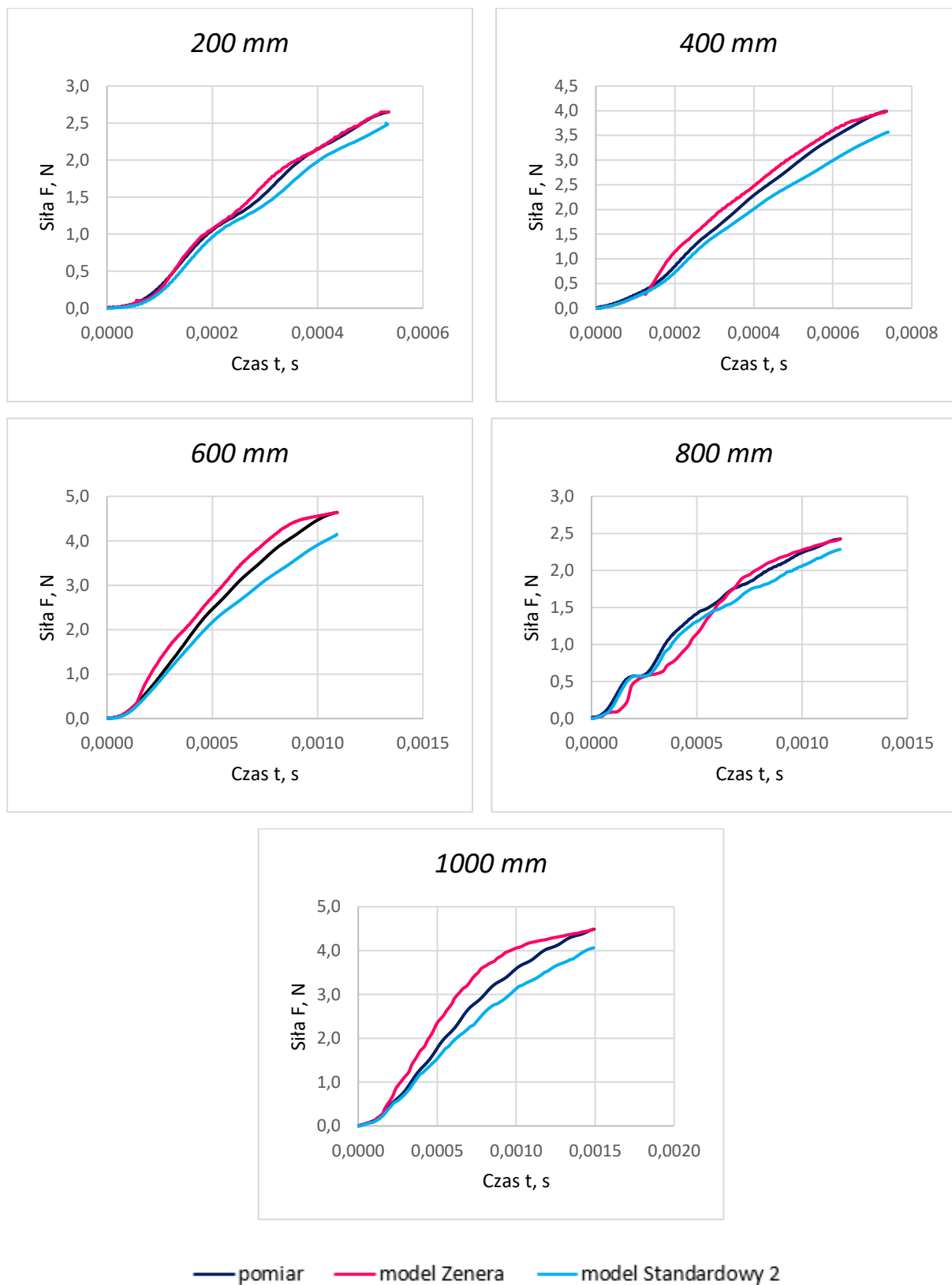
Rys. 13.26 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 111 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 100 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



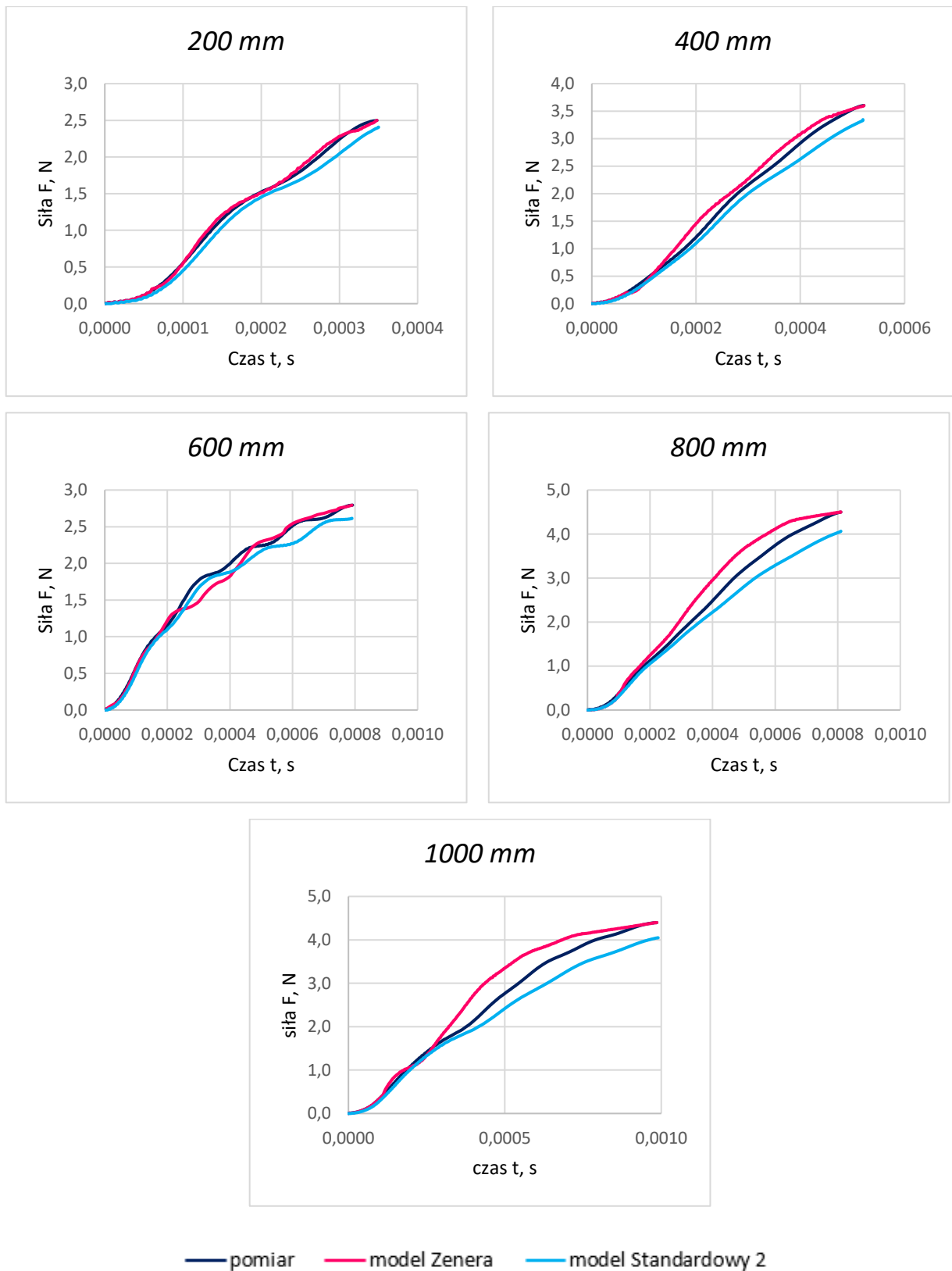
Rys. 13.27 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 167 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 20 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



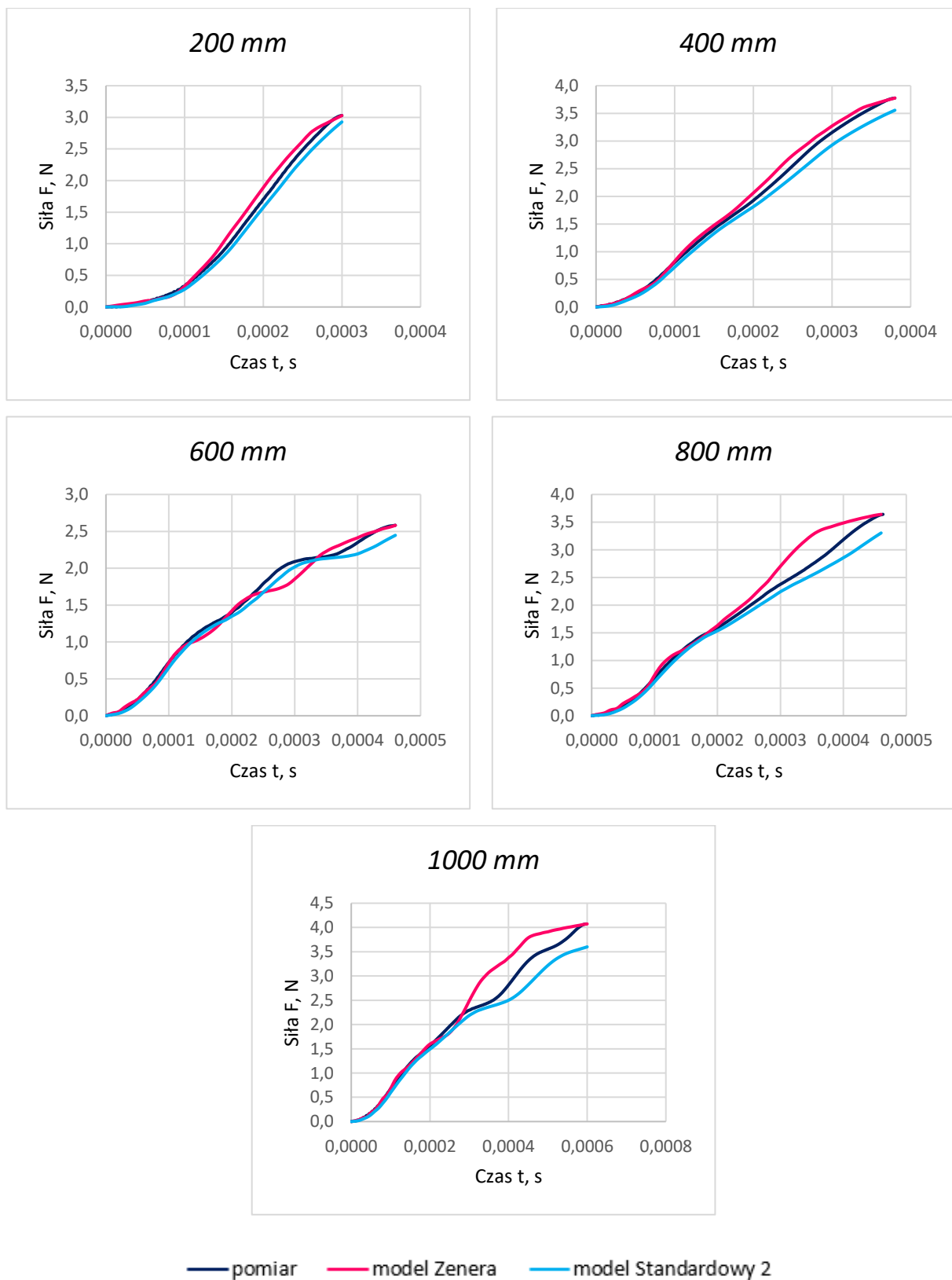
Rys. 13.28 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 167 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 40 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



Rys. 13.29 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 167 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 60 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne



Rys. 13.30 Porównanie charakterystyk rzeczywistych i modelowych dla przędzy poliestrowej PES 167 dtex otrzymanych dla prędkości rozciągania 80 m/s i długości rozciąganego odcinka przędzy $l = 200, 400, 600, 800$ i 1000 mm

Źródło: opracowanie własne