

**bryg. dr inż. Renata Kamocka-Bronisz**

*Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego  
Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie*

**mł. kpt. inż. Michał Wilczyński**

*Absolwent Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego  
Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie*

**bryg. mgr inż. Sławomir Bronisz**

*Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego  
Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie*

## **Wpływ przyspieszonego starzenia na parametry wytrzymałościowe wybranych tkanin technicznych**

### **Abstrakt**

Zbadano wpływ przyśpieszonego starzenia na parametry wytrzymałościowe tkanin technicznych stosowanych m.in. do produkcji niepalnej odzieży ochronnej, na przykład dla strażaków, wojska i innych służb pracujących w ciężkich warunkach. Jednym z czynników odpowiedzialnych za powstanie negatywnych zmian w strukturze badanych tkanin jest efekt fotodegradacji, czyli rozpad polimerów pod wpływem promieniowania ultrafioletowego. Badaniom poddane zostały dwa rodzaje tkanin o różnym składzie surowcowym zawierające włókna aramidowe typu Nomex poli(m-fenyleneoizoftalamid) i Kevlar poli(tereftalano-1,4-fenylo diamid) oraz włókna polimerowe PBI (polybenzimidazole). Opisano podstawy teoretyczne procesu fotodegradacji. Negatywny wpływ fotodegradacji zbadano na podstawie określenia wytrzymałości na rozdzieranie próbek metodą pojedynczego rozdzierania oraz wytrzymałości na rozciąganie metodą paska po przyspieszonym starzeniu. Wyniki badań przedstawiono na wykresach oraz w tabelach. Wykazano dla tkaniny A po 100 oraz 200-godzinnej ekspozycji na UV spadek wytrzymałości na pojedyncze rozdzieranie odpowiednio 49% i 72%. W przypadku tkaniny B spadek ten wynosił 63% i 75%. Wytrzymałość na rozciąganie tkaniny B po 200 godzinach ekspozycji na promieniowanie UV w komorze starzeniowej spadła o 64%, natomiast dla tkaniny A o 50%.

**Słowa kluczowe:** fotodegradacja, rozdzieranie, tkaniny, odzież ochronna

## **The Influence of Accelerated Aging on the Strength Parameters of Selected Technical Fabrics**

### **Abstract**

The effect of accelerated aging on the strength of technical fabrics used as a surface layer used in protective clothing was examined. The main factor responsible for the creation of

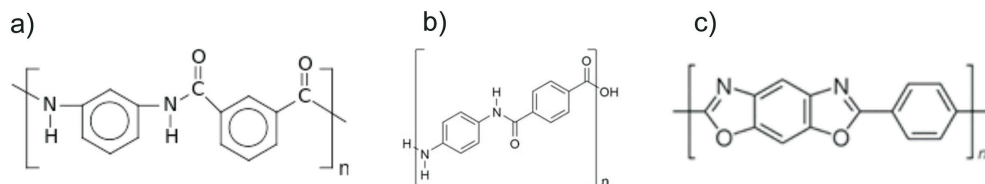
negative changes in the material structure is the photodegradation effect, i.e. the breakdown of the polymers under the influence of ultraviolet radiation. Two types of materials with different compositions were tested. The theoretical basis of the photodegradation process was described and the influence of this process on the fabric was characterized. The negative effect of photodegradation based on the determination of the tear strength and tensile strength of two types of fabric was examined. The material samples have been torn before and after the exposure to ultraviolet radiation. The results of the research are presented in diagrams and in the statistical tables. For the A fabric after 100 and 200 hours of exposure, the drop in tensile strength was found to be 49% and 72% respectively. In the case of the B fabric, the decrease was 63% and 75%. The tensile strength of the B fabric after 200h of exposure to the UV radiation in the aging chamber dropped by 64%, whereas for the A fabric, the strength dropped by 50%.

**Keywords:** photodegradation, tearing, fabrics, protective clothing

## 1. Wstęp

Tkaniny techniczne z włókien polimerowych cechują się wysoką wytrzymałością mechaniczną oraz termiczną. Z tego względu stały się powszechnie stosowane, m.in. do produkcji ubrań specjalnych dla strażaków, wojska i innych służb. Większość z tych materiałów posiada również wysoką odporność na zagrożenia chemiczne, stabilność w środowisku wilgotnym oraz spala się bez wytwarzania toksycznych związków. Najpopularniejszymi materiałami stosowanymi przy produkcji ubrań specjalnych są włókna aramidowe (Nomex® i Kevlar®), a następnie włókna PBO oraz PBI [12]. Cechują je wysokie parametry techniczne opisane przez D. Czerwienko, K. Lemańską i Ł. Pastuszkę (tabela 1) [12].

Jedną z nielicznych wad tkanin z tego typu włókien jest duża wrażliwość na oddziaływanie promieniowania ultrafioletowego określaną jako efekt fotodegradacji materiału. Strukturę budowy chemicznej wybranych polimerów przedstawiono na rys. 1.



**Rys. 1. Struktura chemiczna a) Nomexu , b) Kevlaru , c) PBO**

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 1. Porównanie parametrów włókien stosowanych w tkaninach technicznych**

Rodzaj włókien	Aramidowe				PBO		PBI	poliestrowe
	Nomex® (m-aramid)	Kevlar® (p-aramid)	Twaron®	Technora®	ZYLON® AS	ZYLON® HM	PBI®	Poliester
Producent	DuPont	DuPont	Teijin Aramid	Teijin Aramid	Toyobo Cor- poration	Toyobo Cor- poration	PBI Per- formance Products	-
Gęstość [g·cm <sup>-3</sup> ]	1,38	1,44	1,45	1,39	1,54	1,56	1,4	1,38
Wytrzymałość na rozciąganie [GPa]	0,59 - 0,86	2,9 - 3,0	2,4 - 3,6	3,4	5,8	5,8	0,4	1,1
Moduł sprężystości przy rozciąganiu [GPa]	7,9 - 12,1	70 - 112	60 - 120	72	180	270	5,6	15
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	20 - 45	2,4 - 3,6	2,2 - 4,4	4,6	3,5	2,5	30	25
Temperatura rozkładu [°C]	400 - 430	520 - 540	500	500	650	650	550	260
Absorpcja wody [%]	5,2	3,9	3,5 - 5,0	4,0	2,0	0,6	15	0,4
Wskaźnik ograniczo- nego indeksu tlenowego LOI	29	29	29	25	68	68	41	17

Źródło: [12]

## 2. Fotodegradacja

### 2.1. Wprowadzenie

Fotodegradacja jest to rozpad polimerów pod wpływem światła widzialnego i nadfioletu. Rozpadowi ulegają zarówno polimery naturalne, jak i syntetyczne [1]. Jest to proces niezwykle złożony i w różnym stopniu działa na określone tkaniny. Zależy od budowy chemicznej włókien tkaniny, a także od zastosowanych zabezpieczeń.

Szczególnie podatne na rozkład są materiały zbudowane z długich łańcuchów polimerowych, a więc także tkaniny techniczne wykonane właśnie z polimerów. Należy pamiętać, że nie tylko światło słoneczne, ale również promieniowanie emitowane w sytuacji pożarowej przyczynia się do niekorzystnych zmian fizykochemicznych w tkaninie.

Degradacja fotochemiczna oznacza zmiany fizyczne i chemiczne, których następstwem może być obniżenie wytrzymałości tkaniny na uszkodzenia mechaniczne.

Inicjacja reakcji fotochemicznej uwarunkowana jest obecnością w makrocząsteczce dodatkowych grup chromoforowych, czyli absorbujących światło. Większość grup chromoforowych absorbuje promieniowanie w zakresie nadfioletu, tzn. poniżej 400 nm.

Degradacja fotochemiczna jest szczególnie istotna ze względów praktycznych. Wyroby z tworzyw polimerowych znajdujące się w powszechnym użyciu narażone są zwykle na działanie światła słonecznego. Podstawowe rodzaje reakcji zachodzących podczas ekspozycji polimeru w świetle słonecznym można podzielić, według miejsca ich występowania, na dwie grupy: reakcje w łańcuchu głównym oraz reakcje grup bocznych. Reakcje w łańcuchu głównym powodują zmianę rozmiaru lub kształtu tego łańcucha, odpowiedzialne są one za większość efektów fotodegradacji. Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje reakcji w łańcuchu głównym, takie jak rozrywanie łańcucha głównego, sieciowanie, depolimeryzacja [9].

Aby polimer uległ fotodegradacji (degradacji fotochemicznej), musi zaabsorbować padające na niego promieniowanie UV/VIS. Zachodzi to, gdy [10]:

- energia zaabsorbowanego promieniowania ( $E_a$ ) jest większa lub co najmniej równa energii dysocjacji ( $E_d$ ) poszczególnych wiązań w makrocząsteczce:

$$E_a \geq E_d$$

- polimer zawiera grupy chromoforowe (tabela 2) absorbujące promieniowanie.

**Tabela 2. Długość fali zabsorbowanej przez chromofory występujące w polimerach**

Chromofor	$\lambda_{\max}$ (Å)
C=C	1800
C=O	2800
N=N	3500
C=C-C=C	2200
C=C-C=O	3200
N=O	3600
Benzen	2600

Źródło: [10]

## 2.2. Źródła promieniowania ultrafioletowego

Promieniowanie ultrafioletowe zostało odkryte w 1801 roku przez niemieckiego fizyka – Johanna Wilhelma Rittera i brytyjskiego chemika – Williama Hyde’a Wollastona. Składa się z fal elektromagnetycznych, których długość nie przekracza 400 nm. Dzieli się je na cztery strefy: ultrafiolet A, ultrafiolet B, ultrafiolet C oraz ultrafiolet D (tabela 3). Zalicza się je do promieniowania wysokoenergetycznego [1].

**Tabela 3. Długości fali i kwanty energii promieniowania UV**

Nazwa fal	Długość fali [nm]	Częstość [Hz]	Kwant energii [eV]
UV-A (abiotyczne)	400 – 320	$7,5 \cdot 10^{14}$ – $9,37 \cdot 10^{14}$	3,10 – 3,88
UV-B (biologicznie czynne)	320 – 280	$9,37 \cdot 10^{14}$ – $10,71 \cdot 10^{14}$	3,88 – 4,43
UV-C (jonizujące)	280 – 200	$10,71 \cdot 10^{14}$ – $15 \cdot 10^{14}$	4,43 – 6,21
UV-D (jonizujące)	200 – 10	$15 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{16}$	6,21 – 124,2

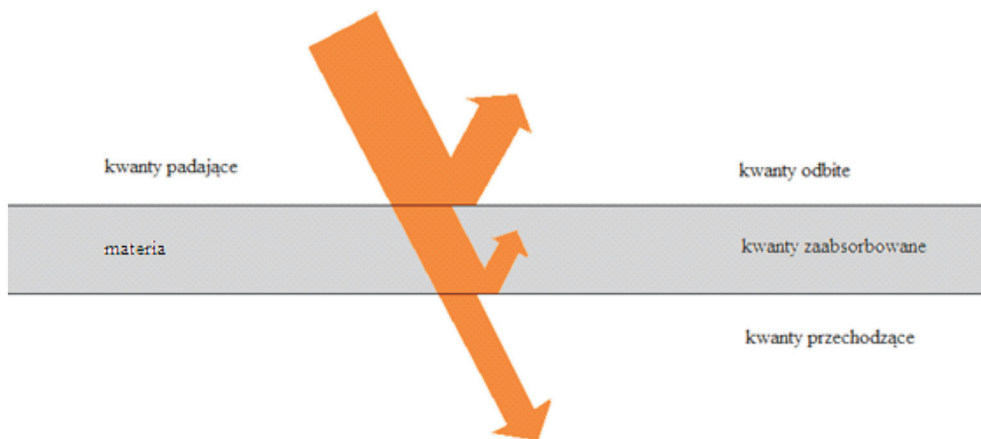
Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

Głównym źródłem promieniowania UV jest promieniowanie słoneczne. Średnia wartość natężenia promieniowania słonecznego w Polsce wynosi około 1000 W/m<sup>2</sup>.

W zależności od regionu, waha się od 900 do 1100 W/m<sup>2</sup>. Jedyne ok. 6% całego promieniowania wyemitowanego przez Słońce, które dotarło do powierzchni Ziemi, stanowi promieniowanie ultrafioletowe. W 97% jest to pasmo UV-A. Pozostałą część stanowi UV-B, natomiast UV-C i UV-D są w całości pochłaniane przez atmosferę (głównie za sprawą warstwy ozonowej). Promieniowanie UV jest także wysyłane przez wszystkie ciała, które są zbudowane z atomów, mających znaczną ilość elektronów, i które są rozgrzane do wysokich temperatur rzędu 1000°C. Najbardziej rozpowszechnionymi urządzeniami emitującymi promieniowanie UV są lampy łukowe, w których możliwe jest wytwarzanie promieniowania ultrafioletowego o określonych zakresach. Powstawanie promieniowania UV jest możliwe również w niektórych procesach technologicznych. Jednym z najbardziej znanych i rozpowszechnionych jest spawanie łukowe [1].

### 2.3. Oddziaływanie ultrafioletu na materię

Promieniowanie UV może oddziaływać na materię na trzy sposoby: przez odbicie, absorpcję lub przenikanie (rys. 2). Wszystko zależy od tego, jaki kwant energii niesie ze sobą owe promieniowanie. Najbardziej powszechnym podziałem promieniowania, ze względu na sposób, w jaki oddziałuje ono z materią, jest podział na promieniowanie jonizujące i niejonizujące [1, 13].



**Ryc. 2. Oddziaływanie promieniowania na tkaninę**

Źródło: [1]

Do promieniowania jonizującego zalicza się UV-C, UV-D oraz inne promieniowania o jeszcze krótszej długości fali (rentgenowskie i gamma). Są to promieniowania wysokoenergetyczne, zatem będą miały duży negatywny wpływ na materię. Trzeba jednak przypomnieć, że promieniowanie UV-C i UV-D jest całkowicie pochłaniane przez ziemską atmosferę, w związku z tym nie będzie w żaden sposób oddziaływać na materię. Zdecydowaną większość promieniowania UV, docierającego do powierzchni Ziemi, stanowi UV-A i zalicza się ono już do promieniowania niejonizującego, a więc teoretycznie mniej szkodliwego dla otoczenia. Mimo to, promieniowanie niejonizujące UV-A w większych dawkach może powodować takie same szkody, jak promieniowanie jonizujące. Cząsteczki substancji, które przyjęły odpowiednią ilość tego promieniowania niejonizującego, zwiększają swoją energię elektronową. O takiej cząsteczce mówi się, że doznała wzbudzenia elektronowego.

Nauką, zajmującą się reakcjami chemicznymi wywołanymi promieniowaniem, jest fotochemia. Istnieją dwa prawa, które stoją u podstaw fotochemii:

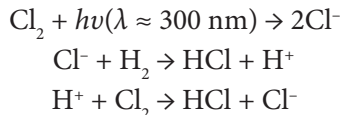
- prawo Grothusa i Drapera:

*Promieniowanie zaabsorbowane jest fotochemicznie aktywne*

- prawo Starka i Einsteina:

*Każdy pochłonięty kwant promieniowania w akcie pierwotnym wzbudza tylko jedną cząsteczkę.*

Kiedy znana jest ilość pochłoniętych kwantów promieniowania UV, można określić ile cząsteczek substancji zostało wzbudzonych elektronowo. Każda taka cząsteczka jest zdolna do wzięcia udziału w reakcji fotochemicznej. Odpowiednio duże promieniowanie, o energii kilku kwantów, rozbija cząsteczki na mniejsze. Wówczas powstaje więcej substratów, które mogą zostać zużyte w reakcjach fotochemicznych. Reakcja ta musi być zainicjowana również przez kwant energii. Na dodatek, ten sam kwant energii może być przyczyną kolejnych reakcji wtórnych. W specyficznych okolicznościach istnieje możliwość powstania złożonych reakcji łańcuchowych, wówczas liczba reakcji może osiągnąć wartość  $10^7$  [1, 13]. Przykładową reakcją łańcuchową, zainicjowaną przez promieniowanie UV, jest naświetlanie mieszaniny wodoru i chloru:

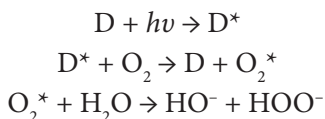
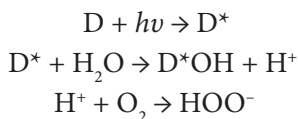


gdzie:

$h\nu$  – kwant energii,

$\lambda$  – długość fali.

Z punktu widzenia tkanin, diametralne znaczenie ma jakość oraz ilość użytej substancji do barwienia włókien. Wiele barwników absorbuje promieniowanie ultrafioletowe, a następnie zmienia kolor. Zjawisko to jest określane jako fotochromizm, czyli odwracalna zmiana barwy związku chemicznego pod wpływem działania światła lub temperatury [2, 13]. Mechanizm tego procesu jest bardzo złożony, ponieważ może składać się z wielu reakcji chemicznych, a każda z nich może być zapoczątkowana lub katalizowana przez różnej długości fale. Promieniowanie jest zdolne do wzbudzenia cząsteczki barwnika, która następnie może reagować z wodą lub tlenem.



gdzie:

D – cząsteczka barwnika,

D\* – wzbudzona cząsteczka barwnika.

W celu zapobiegania niepożądanym skutkom naświetlania promieniowaniem UV, stosuje się przeciwutleniacze lub nieznacznie zmienia się strukturę barwnika [1].

#### 2.4. Negatywne działanie promieniowania UV na tkaniny polimerowe

W latach 1986 i 1987, Centrum Lotów Kosmicznych imienia George’a C. Marshalla (ang. *Marshall Space Flight Center*, MSFC) testowało materiały syntetyczne, nadające się do wykorzystania w czasie 14-dniowej misji promu kosmicznego. Badanie w MSFC było ściśle związane z misją kosmiczną i dotyczyło parametrów spotykanych w kosmosie. Jednak jednym z aspektów badań była ekspozycja na promieniowanie UV, trwająca 55 równoważnych godzin słonecznych, w próżni mniejszej niż  $10^{-3}$  mm słupa rtęci (ok. 0,2 Pa). Próby rozciągania wykazały, że wytrzymałość liny z Kevlaru spadła o 12% w porównaniu z początkową wytrzymałością. Badanie mikroskopowe próbek uwięzi nie ujawniło żadnych widocznych różnic strukturalnych przed i po ekspozycji na ultrafiolet. Naukowcy doszli jednak do wniosku, że utrata wytrzymałości była spowodowana odgazowaniem wilgoci i w niewielkiej części środka spajającego zastosowanego w tym materiale.

Kolejnym testowanym przez MSFC materiałem był Nomex. Próbką składała się z linki z włóknami wytrzymałościowymi z Kevlaru o zewnętrznym splocie z Nomexu. Została ona poddana takim samym badaniom jak próbka z Kevlaru. Okazało się, że włókna Nomexu, pod wpływem działania promieniowania ultrafioletowego, straciły 9,7% wytrzymałości na rozciąganie. Dodatkowo wycięto kilka pasków z materiału Nomex i poddano je ekspozycji na ultrafiolet oraz na tlen atomowy. Próbki po badaniu nieznacznie ściemniały [3, 13].



Tematem starzenia się tkanin polimerowych pod wpływem promieniowania UV zajął się również Narodowy Instytut Standaryzacji i Technologii (ang. *National Institute of Standards and Technology*, NIST). W 1995 roku opublikowano dane pokazujące, że ekspozycja włókien PBO i Kevlaru na światło o długości fali 340 nm przez 450 godzin, spowodowała utratę odpowiednio 98% i 89% początkowej wytrzymałości na rozciąganie tych włókien. Już w 1973 roku dowiedziano, że pierścień benzoksazolowy, który jest podstawowym związkem w polibenzimidazolu, jest niestabilny w kontakcie z ultrafioletem. Naukowcy, używając spektroskopii elektronowego rezonansu paramagnetycznego, udowodnili, że promieniowanie ultrafioletowe skierowane na benzoksazol, powoduje powstanie wolnych rodników. Te zaś biorą udział w złożonych reakcjach chemicznych w materiale, powodując jego degradację. Z tego względu włókna PBO poli(p-fenyleno-2,6-benzobisoksazolu), PBI (polybenzimidazole), jak również włókna Kevlaru są tak wrażliwe na promieniowanie UV [4]. Badania skutków oddziaływania promieniowania słonecznego na wybrane tkaniny prowadzono również w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, a ich wyniki przedstawiono w [7, 8].

### 3. Badania tkanin technicznych po przyspieszonym starzeniu

#### 3.1. Opis metody badawczej

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu procesu przyspieszonego starzenia na wytrzymałość mechaniczną tkanin technicznych zawierających włókna polimerowe. Użyto dwóch rodzajów tkanin, dla których zbadano wytrzymałość na rozdzieranie i rozciąganie przed i po starzeniu:

- 1) tkanina A, składająca się w 75% włókien Nomexu, 23% włókien Kevlaru oraz 2% z włókna węglowego P10 o gramaturze 195 g/m<sup>2</sup>, kolor granat, grubość 0,43 mm oraz
- 2) tkanina B, składająca się w 58% z włókien paraaramidowych, 40% włókien PBI oraz 2% z włókien antystatycznych, wykonana w kolorze złotym o grubości 0,41 mm posiadająca gramaturę 205 g/m<sup>2</sup>.

Część próbek została poddana przyspieszonemu procesowi starzenia w komorze Suntest XLS+ do badań starzeniowych z lampą ksenonową (rys. 3).

Próbki tkanin A i B, zostały narażone na działanie promieniowania w zakresie ultrafioletu i światła widzialnego (300–800 nm) przez 200 godzin. Natężenie promieniowania było równe 700 W/m<sup>2</sup>, temperatura wewnątrz komory wynosiła 65°C. Część

próbek tkanin została poddana badaniom wytrzymałości na rozdzieranie po 100 h, w celu porównania wyników testu dla ekspozycji 100 oraz 200 h. Dawka promieniowania, na jaką były narażone tkaniny po 100 h ekspozycji, wynosiła 216 000 kJ/m<sup>2</sup>, po 200 h 432000 kJ/m<sup>2</sup>. Próbki przed i po badaniu różniły się wizualnie, ultrafiolet spowodował ściemnienie materiału. Dodatkowo, tkanina była bardziej sztywna i szorstka w dotyku. Po kondycjonowaniu, próbki zostały poddane testom na pojedyncze rozdzieranie oraz na rozciąganie przy użyciu zrywarki ramowej dwukolumnowej, firmy LaborTest 6100SP12-2300 (rys. 4).



**Rys. 3. Urządzenie Suntest XLS+**

Źródło: opracowanie własne

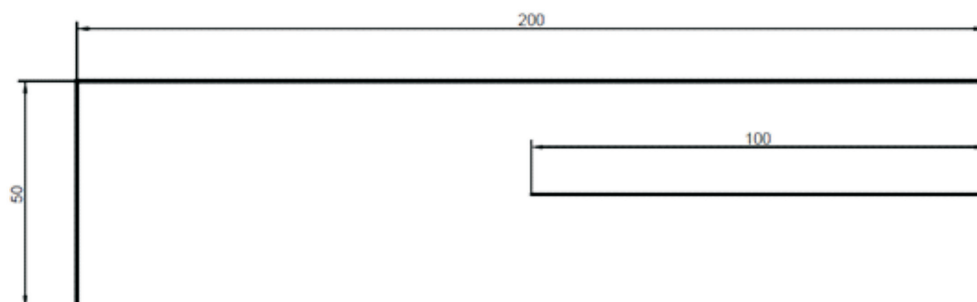


**Rys. 4. Zrywarka LabTest 6100SP1-2-2300 oraz szczęki do mocowania próbek tkaniny**

Źródło: opracowanie własne

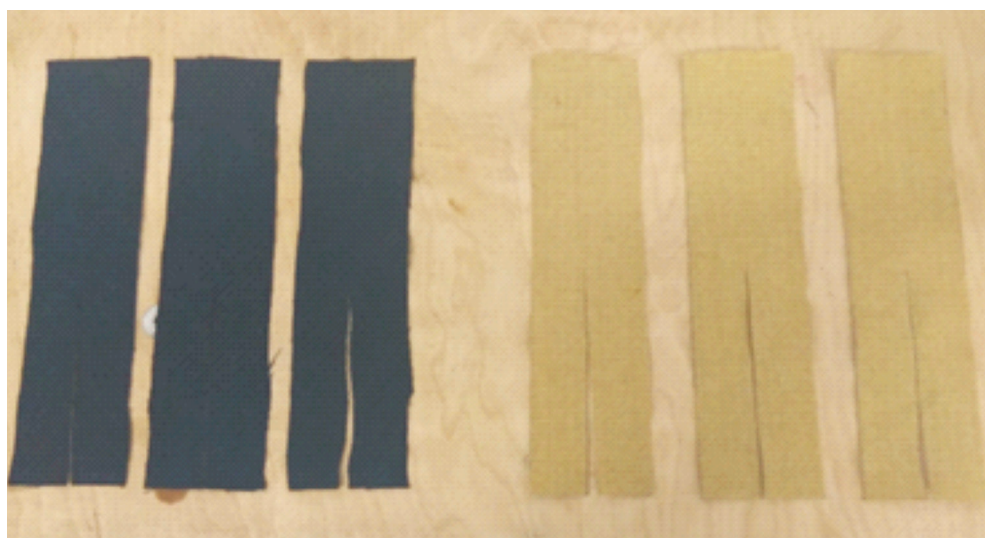
### 3.2. Badanie wytrzymałości tkanin na rozdzieranie

Do badania wytrzymałości tkanin na rozdzieranie pobrano próbki z tkanin nowych oraz tkanin postarzanych zgodnie z normą PN-EN ISO 13937-2 (rys. 5). Próbki zostały pobrane wzdłuż osnowy tkaniny i poddane rozdzieraniu w kierunku wzdłużnym (rys. 6).



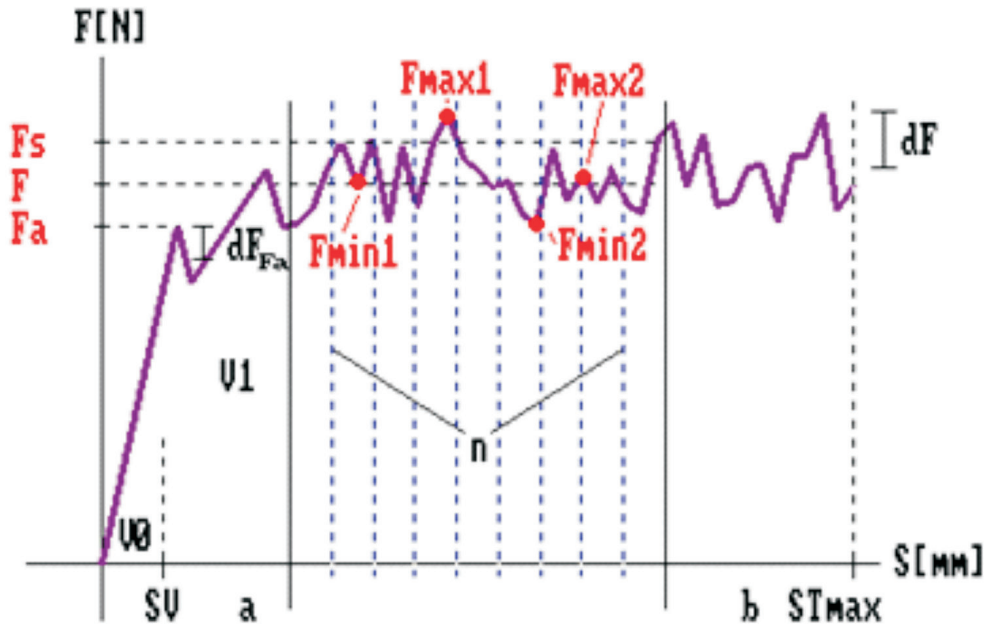
**Rys. 5. Schemat próbki w kształcie spodni według normy PN-EN ISO 13937-2:2002**

Źródło: [6]



**Rys. 6. Próbki przed ekspozycją (od lewej: 3 próbki z tkaniny A, 3 próbki z tkaniny B)**

Źródło: [13]



**Rys. 7. Poglądowy wykres rozdierania**

Źródło: [13]

Wzrost siły rozdierania powoduje wydłużanie próbek, jednak nie jest to wzrost liniowy. Miejsca, w których wykres siły lokalnie osiąga maksymalną wartość, a następnie spada, określane są przez normę jako piki. Każde takie miejsce oznacza rozerwanie struktury tkaniny.

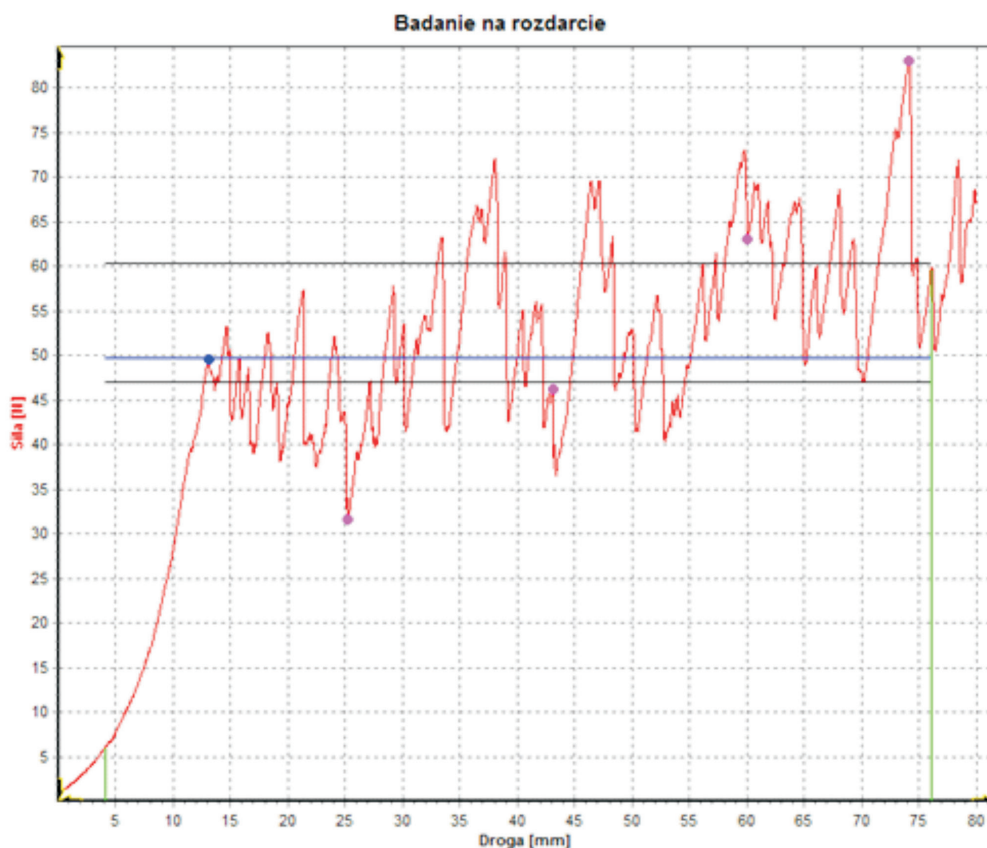
Podczas próby rozdierania rejestrowano następujące parametry (rys. 7):

- $S$  – przemieszczenie szczęk, długość rozdarcia [mm],
- $F$  – średnia siła rozdierająca [N],
- $a, b$  – wartości, wyznaczające przedział badania, który jest brany pod uwagę w dalszych obliczeniach siły rozdierania (w badaniu ustalono ten przedział od 5% do 95% całkowitego wydłużenia),
- $F_a$  – wartość siły, przy której nastąpiło pierwsze zerwanie włókien tkaniny [N],
- $F_{max1}$  – największa wartość siły rozdierania, osiągnięta w czasie badania [N] (najwyższa wartość piku),
- $F_{max2}$  – siła określająca najniższy szczyt wykresu [N] (najniższy z pików),
- $F_{min1}$  – siła określająca najwyższy dolny wierzchołek wykresu [N],
- $F_{min2}$  – najniższa wartość siły rozdierania, osiągnięta w czasie badania [N],

- $F_{so}$  – siła określająca średnią wartość szczytów wykresu [N],
- $F_{su}$  – siła określająca średnią wartość dolnych wierzchołków wykresu [N].

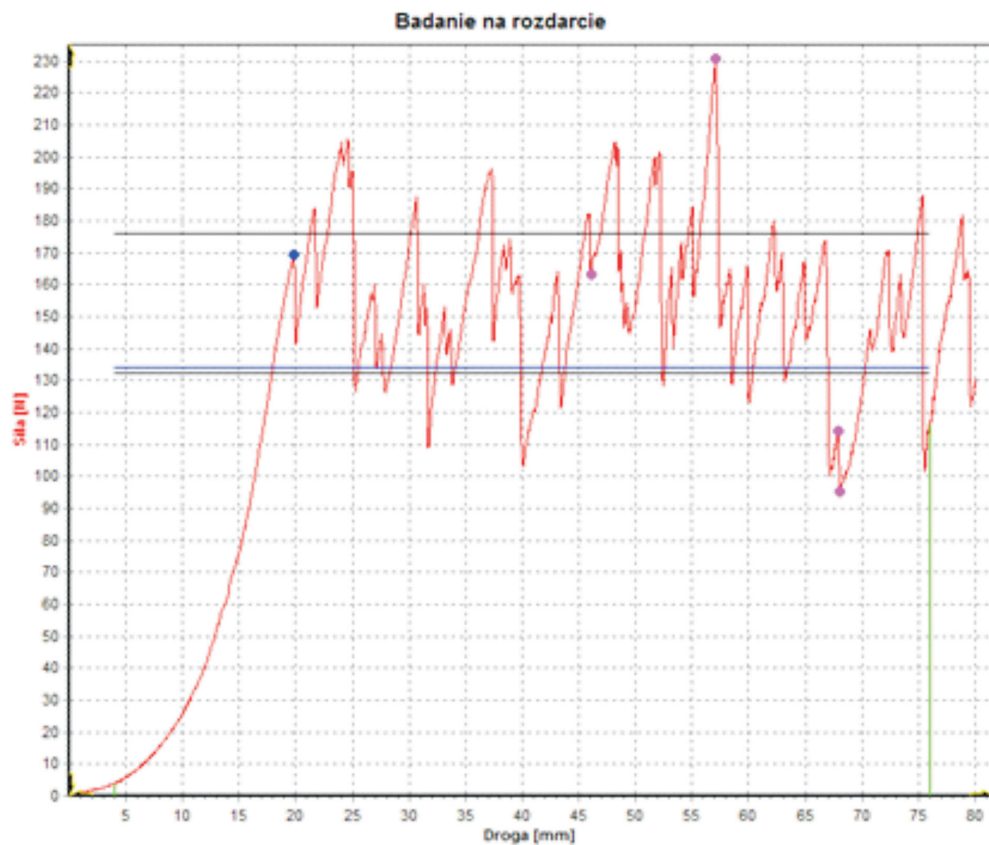
### 3.2.1. Wyniki badań

Badanie średniej wytrzymałości na rozdieranie tkanin A i B przeprowadzono na podstawie trzech prób: przed ekspozycją na promieniowanie UV, po 100 h ekspozycji oraz po 200 h ekspozycji. Na rys. 8–13 zostały przedstawione przykładowe wykresy z wartościami charakterystycznymi.



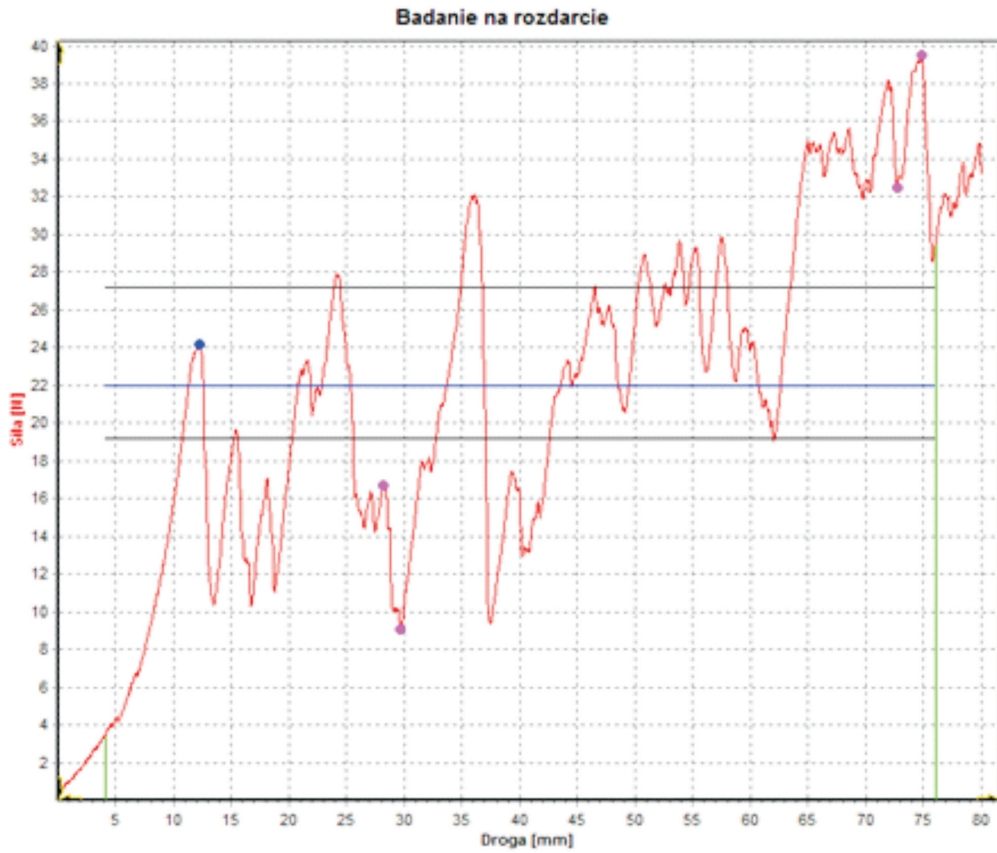
**Rys. 8. Wykres rozdierania tkaniny A przed ekspozycją UV (próbka 1)**

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]



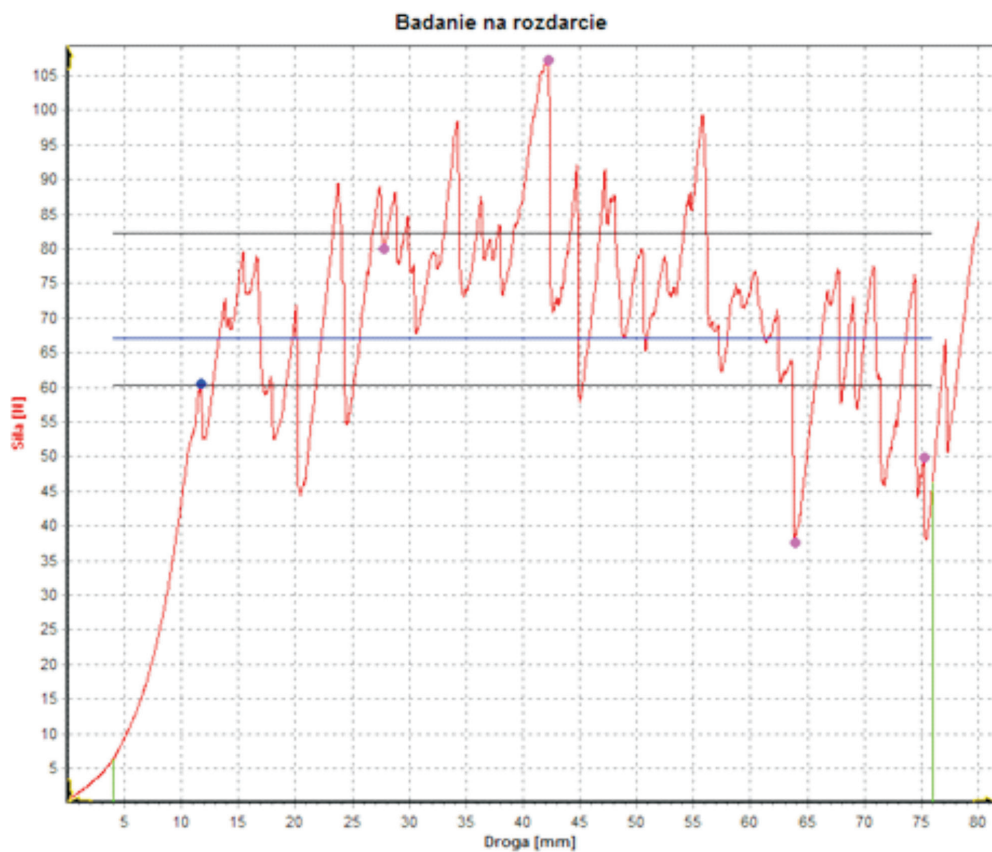
**Rys. 9. Wykres rozdzierania tkaniny B przed ekspozycją UV (próbka 1)**

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]



**Rys. 10. Wykres rozdzierania tkaniny A po 100 h ekspozycji UV (próbka 1)**

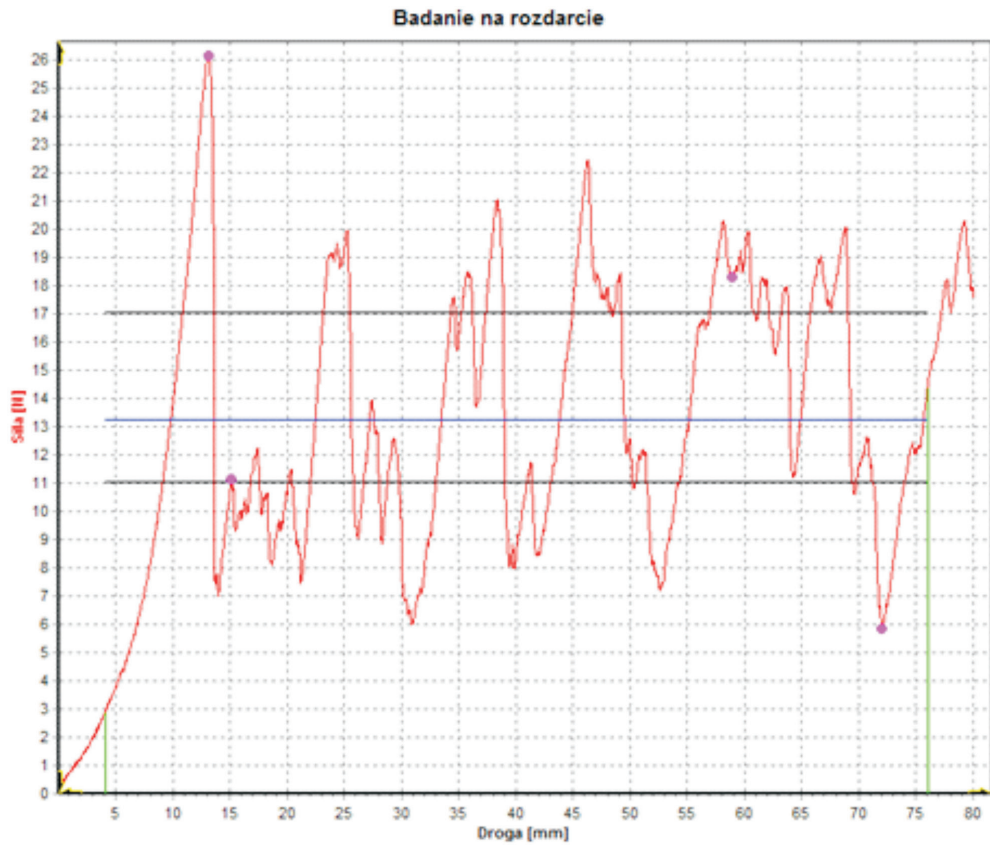
Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]



**Rys. 11. Wykres rozdierania tkaniny B po 100 h ekspozycji UV (próbka 1)**

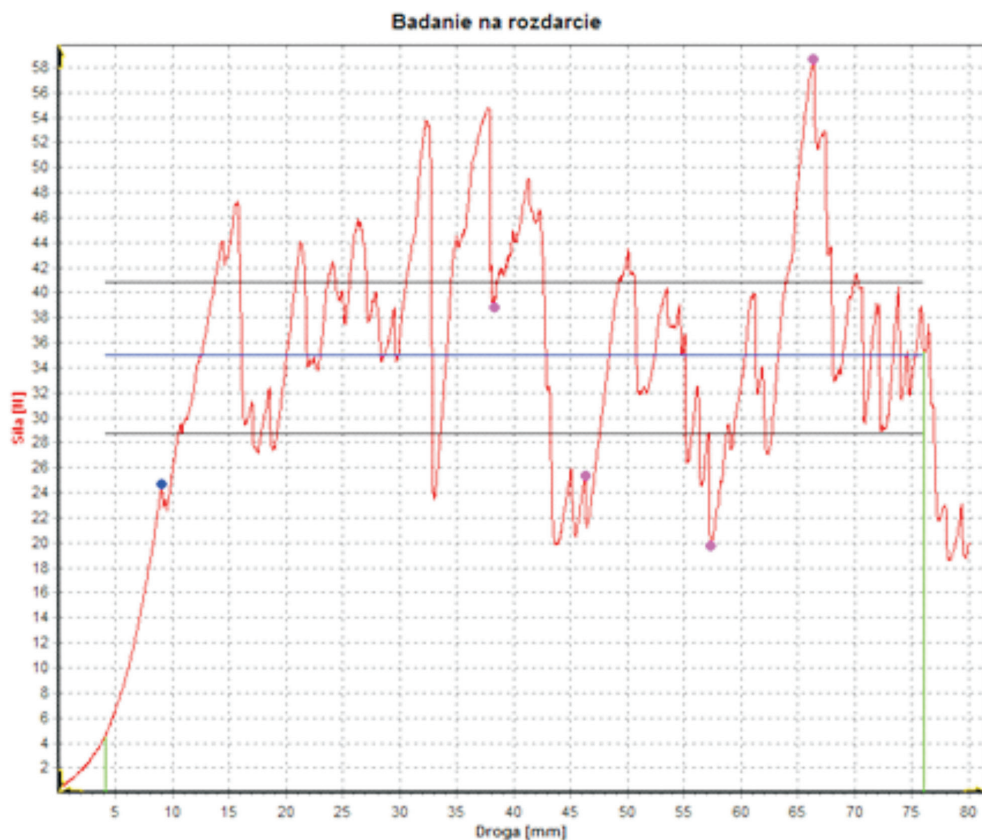
Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]





**Rys. 12.** Wykres rozdzierania tkaniny A po 200 h ekspozycji UV (próbka 1)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]



**Rys. 13. Wykres rozdierania tkaniny B po 200 h ekspozycji UV (próbka 1)**

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

### 3.2.2. Opracowanie wyników badań

Z otrzymanych wyników badań dla trzech próbek w każdej serii obliczono średnie wartości siły rozdierania dla każdego typu badania. Dodatkowo w tabelach statystycznych (tabele 5–9) uwzględniono odchylenie standardowe oraz wartości minimalne i maksymalne prób. Liczbę wykonanych prób dla poszczególnych wariantów badania określa liczba  $n$ .

**Tabela 4. Wyniki badania siły rozdierającej dla tkaniny A przed ekspozycją UV**

Statystyka n = 3	F[N]	F <sub>max1</sub> [N]	F <sub>max2</sub> [N]	F <sub>min1</sub> [N]	F <sub>min2</sub> [N]	F <sub>so</sub> [N]	F <sub>su</sub> [N]	F <sub>a</sub> [N]
Wartość średnia (X)	51,21	79,79	45,37	61,67	31,08	61,00	46,89	54,79
Odchylenie stand. (s)	1,56	3,44	1,74	2,13	3,87	1,03	0,94	6,44
Minimum	49,69	76,14	43,37	59,22	26,95	60,32	45,9	49,56
Maksimum	52,81	82,97	46,47	63,05	34,63	62,19	47,76	61,98

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

**Tabela 5. Wyniki badania siły rozdierającej dla tkaniny A po 100 h ekspozycji UV**

Statystyka n = 3	F[N]	F <sub>max1</sub> [N]	F <sub>max2</sub> [N]	F <sub>min1</sub> [N]	F <sub>min2</sub> [N]	F <sub>so</sub> [N]	F <sub>su</sub> [N]	F <sub>a</sub> [N]
Wartość średnia (X)	26,12	42,38	19,8	33,37	10,22	31,24	22,27	23,7
Odchylenie stand. (s)	5,79	4,11	4,38	1,3	1,65	5,75	4,34	0,7
Minimum	22,02	39,48	16,7	32,45	9,06	27,17	19,21	23,2
Maksimum	30,22	45,29	22,9	34,29	11,39	35,31	25,34	24,19

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

**Tabela 6. Wyniki badania siły rozdierającej dla tkaniny A po 200 h ekspozycji UV**

Statystyka n = 3	F[N]	F <sub>max1</sub> [N]	F <sub>max2</sub> [N]	F <sub>min1</sub> [N]	F <sub>min2</sub> [N]	F <sub>so</sub> [N]	F <sub>su</sub> [N]	F <sub>a</sub> [N]
Wartość średnia (X)	14,15	26,26	11,29	19,64	6,59	18,11	11,68	18,76
Odchylenie stand. (s)	1,41	1,99	0,57	1,28	0,91	1,19	1,48	6,4
Minimum	13,27	24,33	10,8	18,29	5,87	17,04	10,62	14,88
Maksimum	15,78	28,3	11,92	20,82	7,61	19,39	13,37	26,15

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

**Tabela 7. Wyniki badania siły rozdierającej dla tkaniny B przed ekspozycją UV**

Statystyka n = 3	F[N]	F <sub>max1</sub> [N]	F <sub>max2</sub> [N]	F <sub>min1</sub> [N]	F <sub>min2</sub> [N]	F <sub>so</sub> [N]	F <sub>su</sub> [N]	F <sub>a</sub> [N]
Wartość średnia (X)	136,06	214,57	139,37	165,89	88,78	177,14	134,17	149,62
Odchylenie stand. (s)	1,87	14,12	22,54	9,39	12,56	5,51	2,63	25,01
Minimum	134,09	203,87	114,44	157,99	74,29	172,13	132,19	121,58
Maksimum	137,82	230,58	158,32	176,28	96,76	183,04	137,15	169,59

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

**Tabela 8. Wyniki badania siły rozdzierającej dla tkaniny B po 100 h ekspozycji UV**

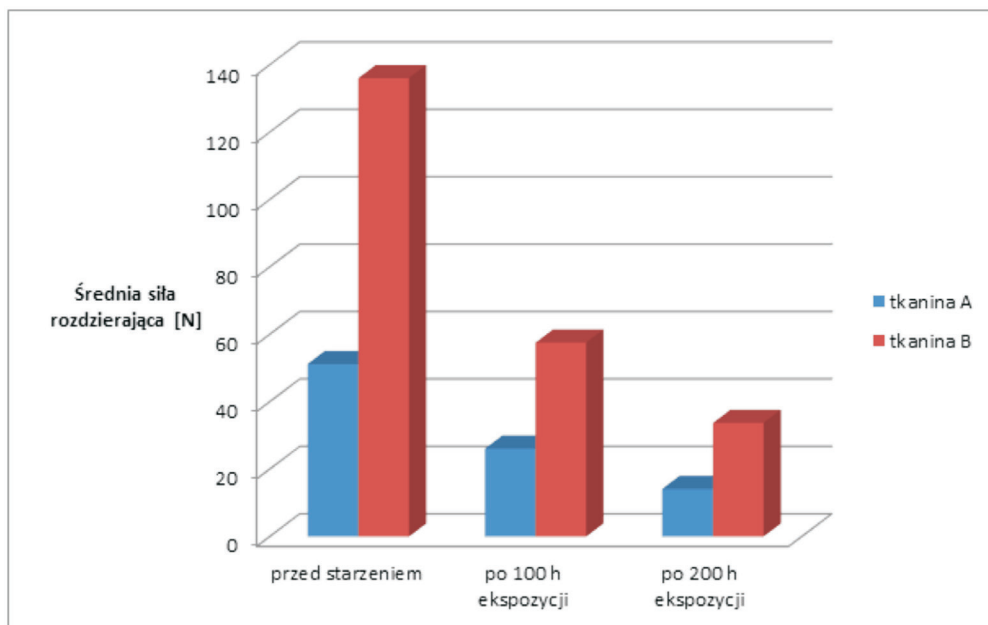
Statystyka n = 3	F[N]	F <sub>max1</sub> [N]	F <sub>max2</sub> [N]	F <sub>min1</sub> [N]	F <sub>min2</sub> [N]	F <sub>so</sub> [N]	F <sub>su</sub> [N]	F <sub>a</sub> [N]
Wartość średnia (X)	57,58	94,99	46,18	70,63	32,3	71,61	51,51	51,99
Odchylenie stand. (s)	8,41	13,1	3,51	9,19	4,79	9,35	7,6	7,38
Minimum	51,02	81,13	43,05	61,59	28,2	64,53	46,34	47,24
Maksimum	67,06	107,18	49,97	79,97	37,56	82,21	60,23	60,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

**Tabela 9. Wyniki badania siły rozdzierającej dla tkaniny B po 200 h ekspozycji UV**

Statystyka n = 3	F[N]	F <sub>max1</sub> [N]	F <sub>max2</sub> [N]	F <sub>min1</sub> [N]	F <sub>min2</sub> [N]	F <sub>so</sub> [N]	F <sub>su</sub> [N]	F <sub>a</sub> [N]
Wartość średnia (X)	33,75	55,37	27,35	41,85	19,54	41,01	28,94	24,89
Odchylenie stand. (s)	1,75	2,81	2,03	2,71	1,82	0,88	0,25	2,25
Minimum	31,76	53,69	25,37	38,82	17,62	40,2	28,7	22,77
Maksimum	35,05	58,61	29,43	44,02	21,23	41,94	29,2	27,25

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]



**Rys. 14. Wykres porównawczy średnich wytrzymałości na rozdieranie tkanin przed i po starzeniu**

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

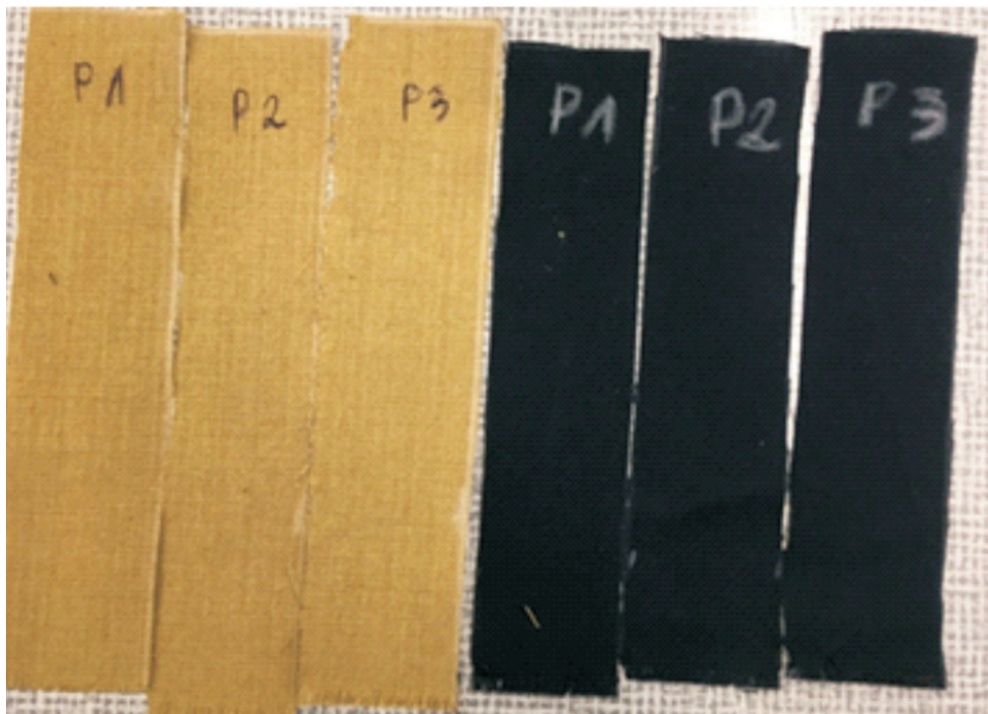
### 3.3. Badanie wytrzymałość tkanin na rozciąganie

Tkaniny A i B zostały poddane również badaniu wytrzymałości na rozciąganie. Badania prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 13934-1:2013-07 Tekstyli. Właściwości płaskich wyrobów przy rozciąganiu. Część 1: Wyznaczanie maksymalnej siły i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile metodą paska [11].

#### Parametry badania

Głowica pomiaru siły	10 kN
Prędkość rozciągania do osiągnięcia obciążenia wstępnego 20N	5 mm/min
Prędkość rozciągania	100 mm/min
Długość zakleszczenia	100 mm

Z każdej tkaniny wycięto próbki do badań w kształcie paska 50 mm × 200 mm w kierunku osnowy. Każdy zestaw roboczy składał się z trzech próbek (rys. 15).

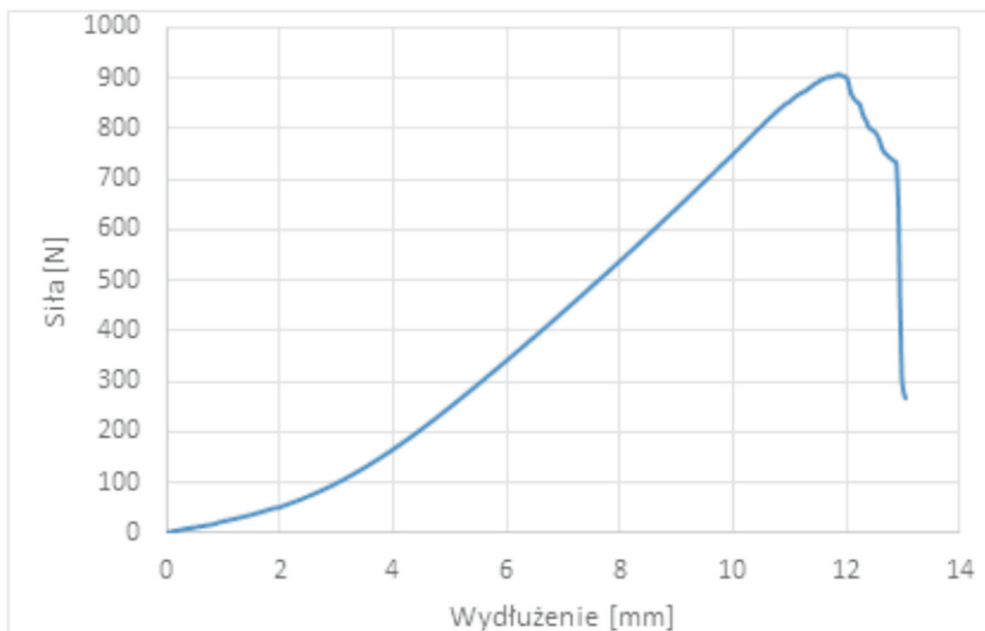


**Rys. 15. Próbki do badań na rozciąganie: z lewej strony – tkanina B, z prawej – tkanina A**

Źródło: opracowanie własne

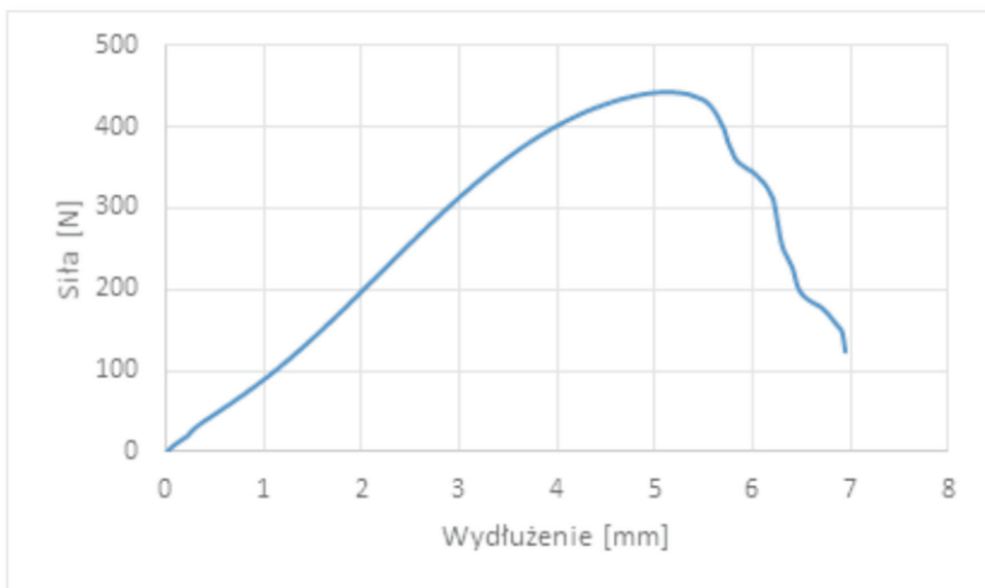
### 3.3.1. Wyniki badań

Badanie średniej maksymalnej siły na rozdieranie tkanin A i B przeprowadzono na podstawie prób: przed ekspozycją na promieniowanie UV oraz po 200 h ekspozycji. Na rys. 16–19 zostały przedstawione przykładowe wykresy z wartościami charakterystycznymi.



**Rys. 16. Wykres rozciągania tkaniny A przed ekspozycją (próbka 1)**

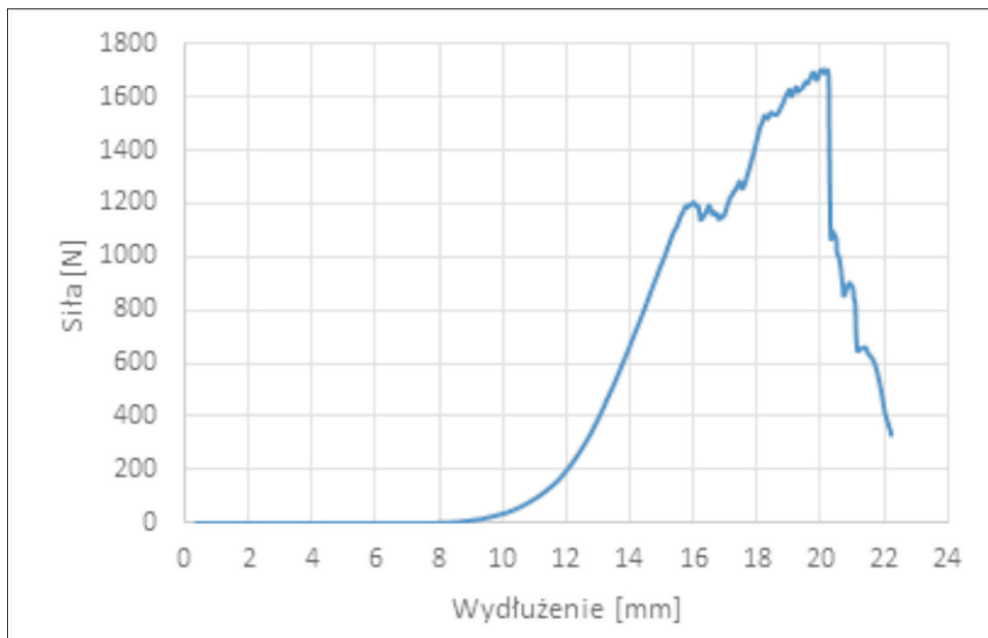
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 17. Wykres rozciągania tkaniny B przed ekspozycją (próbka 1)**

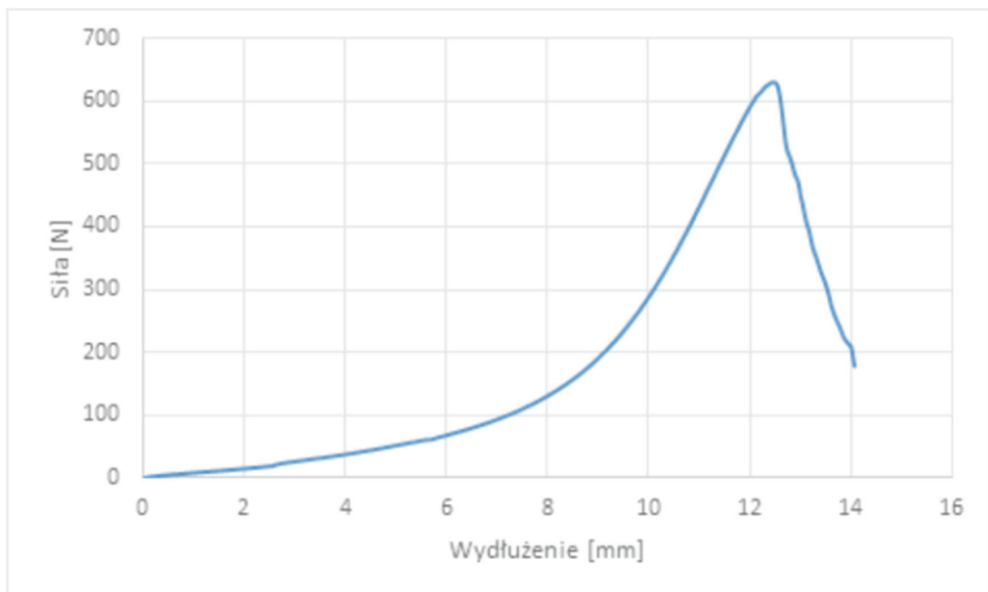
Źródło: opracowanie własne





**Rys. 18. Wykres rozciągania tkaniny B przed ekspozycją (próbka 1)**

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 19. Wykres rozciągania tkaniny B po 200 h ekspozycji UV (próbka 1)**

Źródło: opracowanie własne

### 3.3.2. Opracowanie wyników badań

Z otrzymanych wyników badań dla trzech próbek w każdej serii obliczono średnie wartości maksymalnej siły rozciągającej i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile dla każdego typu badania. Dodatkowo w tabelach statystycznych (tabele 10–13) uwzględniono odchylenie standardowe oraz wartości minimalne i maksymalne prób. Liczba wykonanych prób dla poszczególnych wariantów badania określa liczba n.

**Tabela 10. Wyniki badania maksymalnej siły rozciągającej i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile dla tkaniny A przed ekspozycją**

Statystyka n = 3	FH [N]	AH [%]
Wartość średnia	891,91	12,95
Odchylenie stand.	63,85	2,68
Minimum	821,18	10,89
Maksimum	945,31	15,97

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 11. Wyniki badania maksymalnej siły rozciągającej i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile dla tkaniny A po 200 h ekspozycji UV**

Statystyka n = 3	FH [N]	AH [%]
Wartość średnia	448,46	4,9
Odchylenie stand.	30,06	0,42
Minimum	421,43	4,52
Maksimum	480,84	5,34

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 12. Wyniki badania maksymalnej siły rozciągającej i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile dla tkaniny B przed ekspozycją**

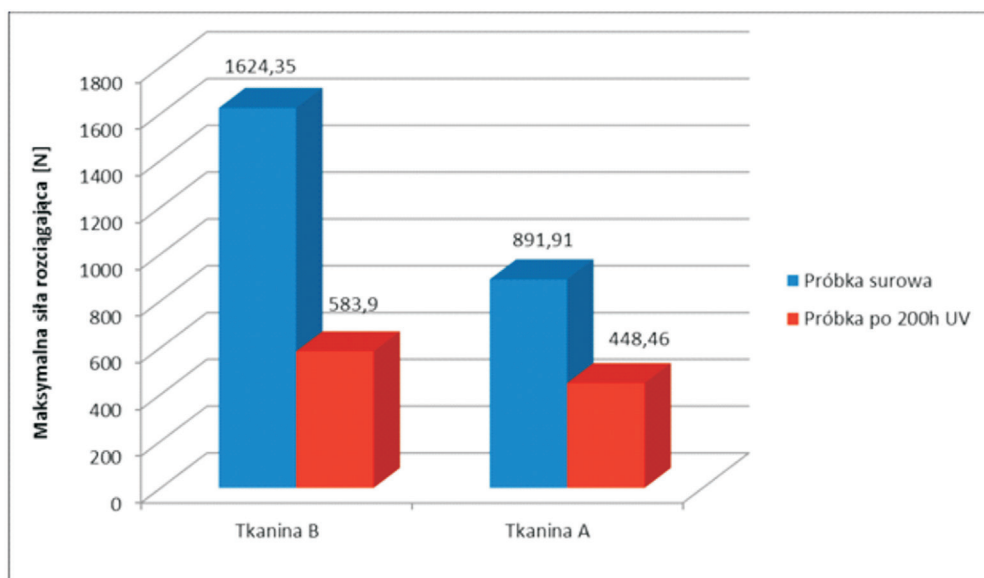
Statystyka n = 3	FH [N]	AH [%]
Wartość średnia	1624,35	17,89
Odchylenie stand.	99,48	1,33
Minimum	1509,59	16,89
Maksimum	1686,08	19,4

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 13. Wyniki badania maksymalnej siły rozciągającej i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile dla tkaniny B po 200 h ekspozycji UV**

Statystyka n = 3	FH [N]	AH [%]
Wartość średnia	583,9	8,91
Odchylenie stand.	43,09	0,86
Minimum	543,52	7,99
Maksimum	629,26	9,67

Źródło: opracowanie własne

**Rys. 20. Wykres porównawczy średnich sił maksymalnych przy rozciąganiu tkanin przed i po starzeniu**

Źródło: opracowanie własne

#### 4. Wnioski

Analiza wyników przeprowadzonych badań wykazała duży wpływ przyspieszonego starzenia na parametry wytrzymałościowe badanych tkanin technicznych. Według danych meteorologicznych na obszarze naszego kraju całkowite napromieniowanie

słoneczne waha się w przedziale 900–1100 kWh/m<sup>2</sup> w ciągu roku, a średnie usłonecznienie wynosi około 1600 h/rok, czyli ok. 4,5 h/dzień i bliskie jest usłonecznieniu Warszawy. Stąd wynika, że przy ustawionym natężeniu lampy 700 W/m<sup>2</sup> w zakresie długości fal 300–800 nm, w aparacie Suntest uzyskuje się w ciągu 200 godzin ekwiwalent energii naturalnego promieniowania w Polsce w ciągu 50 dni. Na taką dawkę promieniowania zostały zatem narażone próbki podczas testu przyspieszonego starzenia. Badanie wytrzymałości próbek tkanin na rozdieranie wykazało, że tkanina B przed starzeniem ma niemal trzykrotnie większą wytrzymałość na rozdieranie niż tkanina A z uwagi na zastosowanie bardziej odpornych polimerów, takich jak włókna PBI. Tkanina A, w większości składa się z Nomexu. Jest to materiał dobrze sprawdzający się w trakcie pracy w ekstremalnych warunkach, jednakże postęp technologiczny spowodował pojawienie się na rynku nowszych rozwiązań.

Ekspozycja na promieniowanie UV znacząco obniżyła wytrzymałość próbek na rozdieranie. Spadek wytrzymałości w stosunku do czasu badania nie jest zależnością liniową. Tkanina A po 100 oraz 200-godzinnej ekspozycji straciła na wytrzymałości odpowiednio 49% i 72%. W przypadku tkaniny B, spadek ten wynosił 63% i 75%. Jest więc ona mniej odporna na działanie promieniowania ultrafioletowego, ponieważ szybciej traci swoje właściwości wytrzymałościowe. Przyczyna tego zjawiska tkwi również w budowie tkanin. Włókna PBI (polybenzimidazole) stosowane w produkcji tkaniny B, wykazują większą wrażliwość na działanie światła w zakresie UV i światła widzialnego. Mniej wrażliwy na ten czynnik jest Nomex, który aż w 75% wchodzi w skład tkaniny A.

Norma PN-EN 469:2008 [5] podaje, że materiał zewnętrzny ubrania specjalnego dla strażaków powinien wytrzymać oddziaływanie siły rozdierającej nie mniejszej niż 25 N, siły rozciągającej o wartości  $\geq 450$  N.

Tkanina B zachowuje normową wartość wytrzymałości na rozdieranie, nawet po 200 h ekspozycji, podczas gdy wytrzymałość tkaniny A, już po 100 h spada do minimalnej wartości 25 N.

Tkanina B charakteryzuje się dwukrotnie wyższą wytrzymałością na rozciąganie w stanie surowym (przed starzeniem) niż tkanina A. Maksymalna siła na rozciąganie tkaniny B po 200 h ekspozycji na promieniowanie UV w komorze starzeniowej spadła o 64%, natomiast dla tkaniny A wytrzymałość spadła o 50%. Dla tkanin A i B zaobserwowano spadek wydłużenia względnego przy maksymalnej sile o około 50%. Wyniki badań parametrów wytrzymałościowych tkanin po przyspieszonym starzeniu wskazują na konieczność stosowania fotostabilizatorów, które zmniejszyłyby szkodliwy wpływ światła na tkaniny z włókien polimerowych.

## Literatura

- [1] Latanowicz L., Latosińska J., *Promieniowanie UV a środowisko*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.
- [2] Pawłowa M. i in., *Materiałoznawstwo odzieżowe*, wyd. I, Politechnika Radomska, Radom 2004.
- [3] Finckenor M., *Comparison of High-Performance Fiber Materials Properties in Simulated and Actual Space Environments*, July 2017, Proceedings of Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama 2017, s. 3–22.
- [4] Holmes G., *Ballistic fibers: A review of the thermal, ultraviolet and hydrolytic stability of the benzoxazole ring structure*, Proceedings of National Institute of Standards and Technology, Polymers Division, Characterization and Measurement Group, Gaithersburg, Maryland 2006, s. 4105–4016.
- [5] PN-EN 469:2008 Odzież ochronna dla strażaków. Wymagania użytkowe dotyczące odzieży ochronnej przeznaczonej do akcji przeciwpożarowej.
- [6] PN-EN ISO 13937-2:2002 Tekstyliia. Metody badania rozdzierania płaskich wyrobów. Część 2: Wyznaczanie siły rozdzierania próbek roboczych w kształcie spodni (metoda pojedynczego rozdzierania).
- [7] Kamocka-Bronisz R., Bronisz S., *Wpływ promieniowania słonecznego na wytrzymałość tkanin zewnętrznych ubrania specjalnego strażaka*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2018, nr 66 (2), s. 27–34.
- [8] Kamocka-Bronisz R., *Tensile strength analysis of aramid fabric of firefighter's clothing after accelerated aging and abrasion*, MATEC Web of Conferences 247, 00052 (2018), FESE 2018, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700052>.
- [9] Rojek M., *Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej*, “Studies of the Institute of Engineering Materials and Biomaterials” 2011, Volume 2.
- [10] Rabek J., *Współczesna wiedza o polimerach*, PWN, Warszawa 2008.
- [11] PN-EN ISO 13934-1:2013-07 Tekstyliia. Właściwości płaskich wyrobów przy rozciąganiu. Część 1: Wyznaczanie maksymalnej siły i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile metodą paska.
- [12] Czerwienko D., Lemańska K., Pastuszka Ł., *Technologia materiałów na ubrania strażackie*, „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza” 2012, nr 4.
- [13] Wilczyński M., *Wpływ przyspieszonego starzenia na wytrzymałość tkanin wierzchnich ubrania specjalnego strażaka, praca dyplomowa inżynierska*, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2019.