

Politechnika Łódzka
Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów
Instytut Architektury Tekstyliów

Gabriela Kosiuk

**KOMPLEKSOWA CHARAKTERYSTYKA
GEOMETRYCZNEJ STRUKTURY POWIERZCHNI TKANIN
O ZRÓŻNICOWANEJ KONSTRUKCJI**

Rozprawa doktorska pod kierunkiem:
prof. dr hab. inż. Małgorzaty Matusiak

ŁÓDŹ, 2023

Składam serdeczne podziękowania Promotorowi pracy prof. dr hab. inż. Małgorzacie Matusiak za wyrozumiałość, za poświęcony czas. i ogromną pomoc

Badania częściowo finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego pt.: „Geometryczna, mechaniczna i biofizyczna parametryzacja trójwymiarowych struktur tkanych”; nr projektu: No. 2016/23/B/ST8/02041

SPIS TREŚCI

Lp.		str.
	Spis symboli	6
1.	Wprowadzenie	11
2.	Stan wiedzy na podstawie przeglądu literatury	14
2.1.	Struktura geometryczna powierzchni	14
2.2.	Pomiary struktury geometrycznej powierzchni	21
2.3.	Parametry i funkcje wyznaczane w badaniach struktury geometrycznej powierzchni	27
2.4.	Struktura geometryczna powierzchni materiałów włókienniczych	40
2.5.	Pomiar struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych	50
2.6.	Podsumowanie przeglądu literatury	68
3.	Rozważania teoretyczne	69
4.	Materiał i metody badawcze	90
4.1	Materiał badawczy	90
4.2	Metody badawcze	98
4.2.1.	Pomiar struktury geometrycznej powierzchni tkanin	98
4.2.2.	Wyznaczanie chropowatości tkanin za pomocą przyrządu KES-FB 4	105
4.2.3.	Wyznaczanie odporności płaskich wyrobów na ścieranie metodą Martindale'a	105
4.3.	Plan eksperymentu	111
5.	Wpływ struktury tkanin na strukturę geometryczną ich powierzchni	116
5.1.	Analiza wpływu splotu na parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tkanin	116
5.2.	Analiza wpływu licznosci wątku na parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tkanin.	149
5.3.	Analiza wpływu masy liniowej przędzy wątkowej na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin	170

5.4	Analiza zależności pomiędzy podstawowymi i pochodnymi parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin	181
6.	Analiza zmian struktury geometrycznej powierzchni tkanin poddanych procesowi ścierania za pomocą przyrządu Martindale'a.	186
6.1.	Analiza zmian parametrów struktury geometrycznej powierzchni tkanin pod wpływem ścierania	187
6.2.	Analiza zmian rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkanin	196
6.3	Analiza zmian kierunkowości struktury powierzchni na skutek procesu ścierania	208
6.4	Podsumowanie analizy zmian struktury geometrycznej powierzchni tkanin poddanych badaniom za pomocą przyrządu Martindale'a	220
7.	Analiza porównawcza wyników uzyskanych za pomocą profilometru i system KES-FB4	222
8.	Podsumowanie i wnioski	227
9.	Bibliografia	230

Wykaz symboli

λ_c – filtr wyznaczający próg między składową chropowatości, a składową falistości,

λ_f – filtr wyznaczający próg między składową falistości,

λ_s – filtr wyznaczający próg między składową chropowatości,

φ - zintegrowany współczynnik struktury tkaniny wg Milasiusa,

$A_0 - A_5$ – współczynniki wyznaczane eksperymentalnie,

$A_1 (A_o)$ – podziałka osnowy,

$A_2 (A_w)$ – podziałka przędzy wątkowej,

ACF – funkcja autokorelacji (z ang. *Autocorelation Function*),

BPF – filtr środkowoprzepustowy (z ang. *band-pass filter*),

c – współczynnik stały dla określonych przędz,

d – średnica przędzy,

$d_1 (d_o)$ – średnica przędzy osnowowej,

$d_2 (d_w)$ – średnica przędzy wątkowej,

d_f – liczba stopni swobody,

E_o – wypełnienie osnową,

$E_{\text{śred}}$ – średnie wypełnienie osnową i wątkiem,

E_w – wypełnienie wątkiem,

F – zmienna o rozkładzie F ,

FTT – *Fabric Touch Teser* firmy SDL Atlas,

$g_2 (g_w)$ – licznosc wątku

g_o – licznosc osnowy,

GSP - geometryczna struktura powierzchni,

h – grubość tkanin,

HPF – filtr górnoprzepustowy (z ang. *high-pass filter*),

K – liczba przędz w obszarze, w którym przędze przechodzą pod nitkami drugiego układu,

KES – *Kawabata Evaluation System*,

L_d – długość odcinka przędzy przechodzącego pod przędzami drugiego układu przędz w raporcie,

l_p – odcinek długości tkaniny, z którego wypruto mierzony odcinek przędzy,

LPF – filtr dolnoprzepustowy (z ang. *low-pass filter*),

l_r – długość odcinka elementarnego,

l_{rz} – odcinek długości rzeczywistej wyprostowanej przędzy,

L_u – długość odcinka przędzy, w regionie, w którym przechodzi nad przędzami drugiego układu,

L_y – odległość między przędzami w regionie, gdzie przędze przechodzą pod przędzami drugiego układu,

MIU – średnią wartość współczynnika tarcia,

MMD – odchylenie przeciętnego współczynnika tarcia,

m_p – masa powierzchniowa tkanin,

MS – średnie kwadratów,

N – liczba przeplotów osnowy i wątku w raporcie slotu,

OE – przędza rotorowa (z ang. *Open End*),

P – parametry określone z profilu pierwotnego – niefiltrowanego (z ang. *primary*),

p – poziom istotności,

Pa, Ra, Wa – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
Pc, Rc, Wc – średnia wysokość elementów profilu,
Pku, Rku, Wku – kurtoza,
po – liczba przegień osnowy,
Pp, Rp, Wp – wysokość najwyższego wzniesienia profilu,
Pq, Rq, Wq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości,
Psk, Rsk, Wsk – skośność profilu,
PSm, RSm, WSm – średnia szerokość elementu profilu,
Pt, Rt, Wt – całkowita wysokość profilu,
Pv, Rv, Wv – głębokość najniższego wgłębienia profilu,
pw – liczba przegień wątku,
Pz, Rz, Wz – największa wysokość profilu,
R – profil chropowatości,
R – wysokość nierówności powierzchni,
Ra - średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości
Rc – średnia wysokość elementów profilu,
Rk – głębokość części środkowej profilu, wyznaczona przez prostą linearyzującą krzywą udziału materiałowego,
Rku – kurtoza, miara koncentracji wyników,
Ro – raport osnowy,
Rp – wysokość najwyższego wzniesienia profilu,
Rpk – średnia wysokość wysokich wzniesień położonych ponad rdzeniem profilu chropowatości,

Rq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości w metodzie profilowej,

Rsk – skośność, miara asymetrii profilu,

Rt – całkowita wysokość elementów profilu,

Rv – wysokość najwyższego wzniesienia profilu,

Rvk – średnia głębokość głębokich wgłębień znajdujących się pod rdzeniem profilu chropowatości.

Rw – raport wątku,

Rz – największa wysokość profilu,

s – odstęp nierówności profilu

S – symbol parametrów uzyskiwanych z analizy przestrzennej (z ang. *surface*),

S_{al} - długość autokorelacji,

SMD – odchylenie przeciętne grubości próbki (z ang. *Surface Mean Deviarion*),

SP – splot tkaniny,

Sq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości w metodzie powierzchniowej,

sRa – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,

sRku – kurtoza, jej wartość jest miarą ostrości profilu chropowatości,

sRpk – średnia wysokość wzniesień położonych ponad rdzeniem profilu chropowatości,

sRq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości,

sRsk – skośność – parametr, który reprezentuje stopień odchylenia kształtu chropowatości

sRt – głębokość całkowita wysokości profilu chropowatości,

sRvk – średnia głębokość głębokich wgłębień wzniesień położonych pod rdzeniem profilu chropowatości,

sRz – największa wysokość profilu chropowatości,

SS – suma kwadratów,
S_{tr} - współczynnik proporcji tekstury,
T₁ – skręt przędzy osnowowej,
T₂ – skręt przędzy wątkowej,
TP – technologia przędzenia,
T_t lub tex – masa liniowa przędzy
T_{tex1} (T_{texo}) – masa liniowa osnowy,
T_{tex2} (T_{texw}) – masa liniowa wątku,
T_{texf1} – masa liniowa włókien w przędzy osnowowej,
T_{texf2} – masa liniowa włókien w przędzy wątkowej,
W – symbol parametrów falistości (z ang. *waviness*),
W – wrobienie przędzy,
W_o – wrobienie osnowy,
W_w - wrobienie wątku,
W_z – całkowita wysokość profilu,
Z_{max} – najwyższe wzniesienie,
Z_o – wypełnienie powierzchniowe osnową,
Z_{ow} – wypełnienie powierzchniowe osnową i wątkiem,
Z_t – średnia wysokość elementu profilu w obrębie długości elementarnej,
Z_w – wypełnienie powierzchniowe wątkiem,
Z_x – wartość rzędnych (wysokość punktu na powierzchni),
Θ₁ – połowa kąta opasania osnową.

1. Wprowadzenie

Celem pracy jest rozszerzenie istniejącego stanu wiedzy i pozyskanie nowej wiedzy w zakresie geometrycznej struktury powierzchni tkanin, badania tej struktury oraz wpływu czynników konstrukcyjnych tkanin na strukturę geometryczną ich powierzchni.

Najbardziej rozpowszechnioną i uznaną metodą pomiaru chropowatości materiałów włókienniczych jest metoda stykowa (kontaktowa) wykorzystana w przyrządzie KES (Kawabata Evaluation System) moduł FB4. Przyrząd ten dostarcza informacji o wartości tylko jednego parametru charakteryzującego jakość powierzchni materiałów włókienniczych – SMD (z ang. *Surface Mean Deviation*). Jest on odpowiednikiem średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości R_a , która potocznie zwana jest chropowatością. Jak każda średnia parametr R_a może przyjmować tę samą wartość dla zróżnicowanych zbiorów pojedynczych wartości. Dlatego też naukowcy zajmujący się zagadnieniami geometrycznej struktury powierzchni uważają, że parametr R_a nie w pełni charakteryzuje topografię powierzchni. Przy tej samej wartości R_a można mieć do czynienia z geometrią powierzchni bardzo zróżnicowaną. Ponadto badania stykowe nie w pełni oddają kształt badanej powierzchni, gdyż nierównomierności powierzchni mniejsze od wymiarów czujnika pomiarowego nie są rejestrowane.

Metody bezstykowe, optyczne są znacznie bardziej precyzyjne od metod stykowych. Poza tym metody optyczne dostarczają informacji o szeregu parametrach i funkcjach, które w kompleksowy sposób opisują strukturę geometryczną powierzchni. To, które z tych parametrów są istotne, zależy od badanego obiektu oraz jego przeznaczenia i pożądaných właściwości. W zakresie materiałów włókienniczych wiedza na ten temat jest bardzo ograniczona. Opublikowano już szereg badań powierzchni materiałów włókienniczych za pomocą metod bezstykowych, ale były to badania jednostkowe, ukierunkowane na ocenę zastosowanej metody, dobór filtrów, czy ocenę konkretnego wyrobu włókienniczego.

W ramach niniejszej pracy podjęto badania usystematyzowane, pozwalające na ocenę geometrycznej struktury powierzchni tkanin o programowo zróżnicowanej konstrukcji, a także ocenę wpływ parametrów konstrukcyjnych tkanin na wybrane parametry i funkcje charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni. Tkaniny poddane zostały także badaniom w zakresie właściwości użytkowych – odporności na tarcie oraz zdolności

transportu płynnej wilgoci, w celu analizy zależności pomiędzy strukturą geometryczną powierzchni tkanin, a wybranymi właściwościami użytkowymi.

Badania w omówionym zakresie są związane z komfortem użytkowania odzieży, zarówno komfortem fizjologicznym, jak również komfortem sensorycznym.

Teza pracy jest następująca:

Badania chropowatości powierzchni tkanin za pomocą metody stykowej są niewystarczające do pełnego scharakteryzowania geometrycznej struktury powierzchni tkanin oraz oceny wpływu geometrii powierzchni tkanin na ich właściwości użytkowe, takie jak: zwilżalność, odporność na ścieranie, absorbcyjność cieplna czy odbicie światła. Badania bezstykowe z wykorzystaniem metody optycznej pozwalają na kompleksowe scharakteryzowanie geometrycznej struktury powierzchni tkanin, jak również na analizę zależności pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi tkanin, a ich wybranymi parametrami struktury geometrycznej powierzchni.

Zakres pracy:

- Analiza stanu wiedzy na podstawie przeglądu literatury
- Rozważania teoretyczne w zakresie wpływu parametrów konstrukcyjnych tkanin (splot, zagęszczenie struktury) na ukształtowanie (geometrię) ich powierzchni
- Część eksperymentalna:
 - Opracowanie metodyki badań i badanie tkanin zróżnicowanych konstrukcyjnie (splot, liczność wątku, masa liniowa wątku) w zakresie geometrycznej struktury powierzchni za pomocą metody bezstykowej optycznej.
 - Analiza statystyczna wyników badań w celu oceny geometrycznej struktury powierzchni tkanin o różnym splocie, różnej liczności oraz masie liniowej wątku.
 - Analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych tkanin na geometryczną strukturę ich powierzchni oraz interakcji między czynnikami głównymi .
 - Badania chropowatości powierzchni tkanin za pomocą metody stykowej – KES-FB4.

- Analiza porównawcza wyników uzyskanych za pomocą przyrządu KES – FB4 i profilometru.
- Badania odporności na tarcie tkanin oraz analiza zmian parametrów struktury geometrycznej powierzchni tkanin na skutek tarcia.
- Wytypowanie istotnych parametrów struktury geometrycznej powierzchni tkanin z punktu widzenia wybranych właściwości użytkowych.

2. Stan wiedzy na podstawie przeglądu literatury

W niniejszej rozprawie doktorskiej badania dotyczą pomiarów geometrycznej struktury powierzchni tkanin za pomocą metody bezkontaktowej – optycznej z wykorzystaniem profilometru. Badania tego typu nie są jeszcze rozpowszechnione we włókiennictwie. Dlatego też niezbędne są odniesienia do pomiarów struktury geometrycznej powierzchni innych materiałów – niewłókienniczych. Wobec powyższego w przeglądzie literatury w pierwszej kolejności skupiono się na zagadnieniach dotyczących geometrycznej struktury powierzchni różnych obiektów i metodami jej pomiaru, a następnie dokonano przeglądu prac naukowych dotyczących pomiarów geometrycznej struktury powierzchni materiałów włókienniczych.

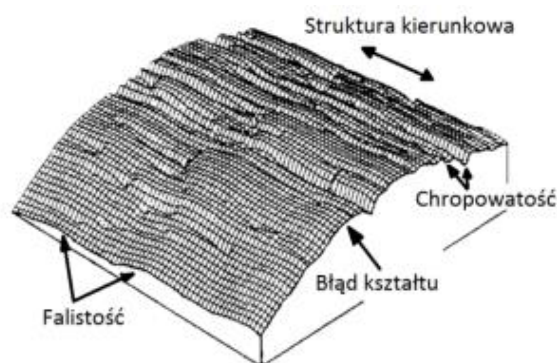
2.1. Struktura geometryczna powierzchni

Jakość powierzchni jest jedną z cech wszystkich obiektów. Powierzchnia stanowi swoistą powłokę „okrywającą” wnętrze obiektu, odgradzącą obiekt od otoczenia. Powierzchnia obiektu decyduje o jego wyglądzie, a także o interakcji z innymi obiektami oraz mediami otaczającymi obiekt, takimi jak płyny czy gazy. Istnieje wiele cech charakteryzujących jakość powierzchni obiektów. Należy tu wymienić, m. in. twardość, właściwości elektrostatyczne, zwilżalność, barwę, tarcie czy chropowatość [1-4]. Spośród wymienionych cech chropowatość jest tą cechą, którą najczęściej jest utożsamiana z jakością powierzchni. Chropowatość powierzchni rozumiana jest potocznie jako występowanie na powierzchni nierówności, które są spowodowane różnicami w wysokości poszczególnych punktów powierzchni. Nie jest to określenie precyzyjne. Nierównomierności powierzchni mogą mieć różny charakter – błędy kształtu, falistość i chropowatość, które razem tworzą topografię powierzchni. Jest ona definiowana jako konfiguracja powierzchni uwzględniająca jej kształt oraz obecność i wzajemne położenie jej punktów charakterystycznych. Przy charakteryzowaniu powierzchni obiektów używane jest pojęcie geometryczna struktura powierzchni (GSP) lub geometria powierzchni. Tak jak wcześniej wspomniano, na geometryczną strukturę powierzchni składają się trzy komponenty (rys. 2.1, 2.2) [5-7]:

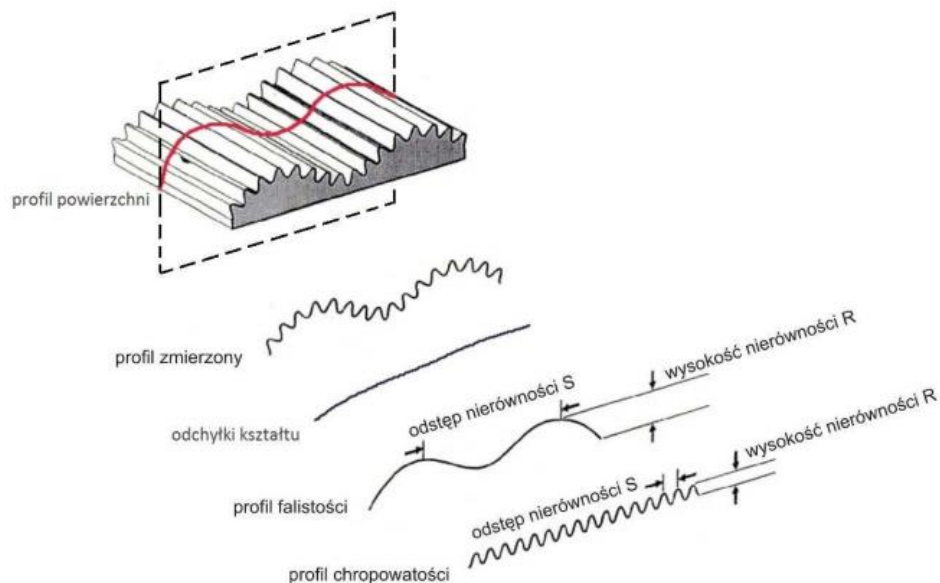
- błędy kształtu,

- falistość,
- chropowatość.

Odchyłki (błędy) kształtu to maksymalna dopuszczalna różnica pomiędzy rzeczywistym kształtem, a jego idealnym, prawidłowym odpowiednikiem (rys. 2.1) [5]. Falistość powierzchni to nierówności o charakterze przypadkowym lub zbliżonym do postaci okresowej, których odstępy s (rys. 2.1) znacznie przewyższają odstępy chropowatości powierzchni. Natomiast chropowatość powierzchni definiowana jest jako zbiór nierówności powstających w wyniku obróbki, charakteryzujących się małym odstępem s między wierzchołkami o wysokości R . Podział ten oparty jest na proporcjach wysokości i długości fali nierówności. Interpretacje składowych topografii powierzchni ilustrują rysunki poniżej (rys. 2.1, 2.2).

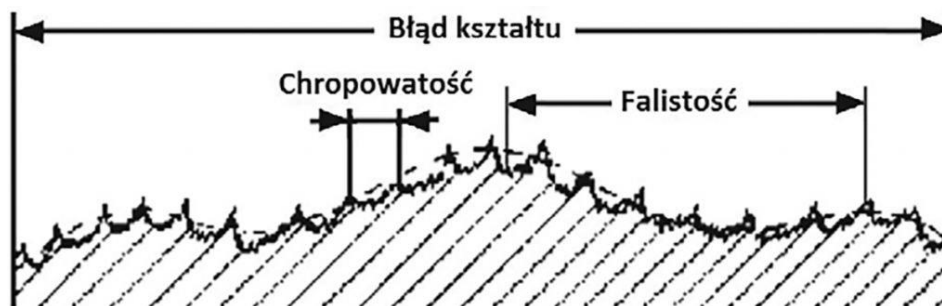


Rys. 2.1. Podstawowe elementy geometrycznej struktury powierzchni [6]



Rys. 2.2. Składowe geometrycznej struktury powierzchni [5]

Interpretację składowych geometrycznej struktury powierzchni przedstawia również rysunek 2.3.



Rys. 2.3. Interpretacja składowych geometrycznej struktury powierzchni; *Wieczorkowski M., Chropowatość nie jest taka straszna. Pomiar nierówności powierzchni [6]*
(Chropowatość nie jest taka straszna... (ita-polska.com.pl))

Falistość jest okresową nierównością, która może być opisana falą, przy czym strzałka fali jest mniejsza co najmniej 40 razy od długość fali. Z kolei w przypadku chropowatości stosunek strzałki do długości fali jest mniejszy od 40. Dla chropowatości powinno być spełnione równanie:

$$\frac{s}{R} < 40 \quad (2.1)$$

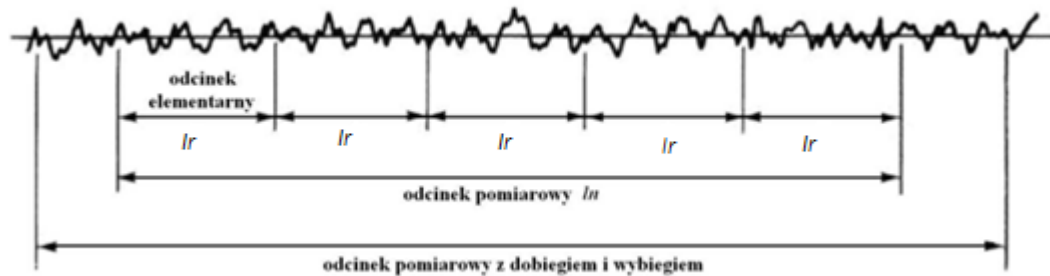
gdzie:

s – odstęp nierówności,

R – wysokość nierówności.

Wyodrębnienie poszczególnych składowych geometrycznej struktury powierzchni uzyskuje się poprzez zastosowanie odpowiednich filtrów.

Pomiaru falistości powierzchni dokonuje się poprzez wyznaczenie średniej arytmetycznej pięciu największych odchyłeń na długości odcinka pomiarowego (rys. 2.4) mierzonych w mikrometrach.



Rys. 2.4. Interpretacja odcinka pomiarowego [5]

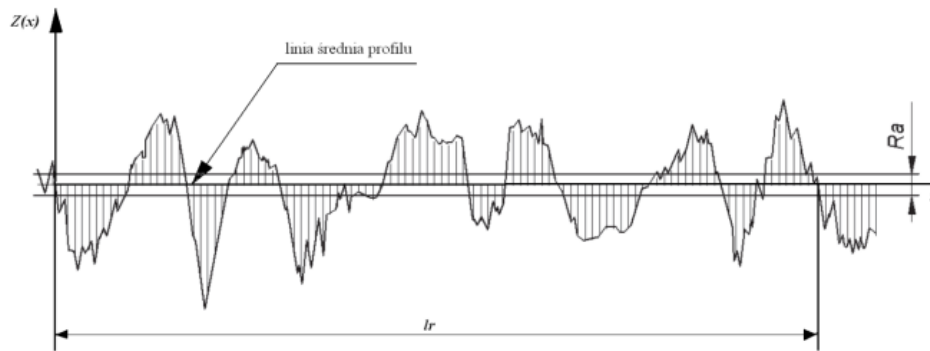
Struktura geometryczna powierzchni charakteryzowana jest przez szereg parametrów i funkcji [6-10]. Za podstawowy i najczęściej wyznaczany parametr geometrycznej struktury powierzchni przyjmuje się średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości R_a , który potocznie zwany jest chropowatością. Parametr R_a obliczany jest wg poniższego wzoru:

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z_x| dx \quad (2.2)$$

gdzie:

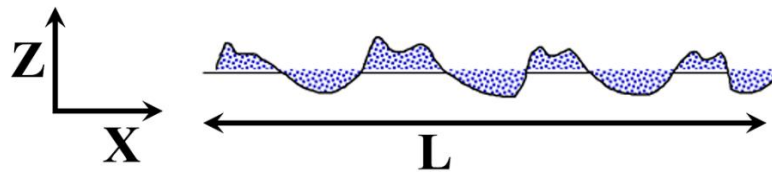
l_r – długość odcinka elementarnego (rys. 2.5),

Z_x – wartość rzędnych (wysokość punktu na powierzchni).



Rys. 2.5. Zasada wyznaczania parametru R_a [5]

Średnia chropowatość R_a to najczęściej określany parametr tekstury powierzchni [5]. Stanowi ona ogólną miarę wysokości tekstury na powierzchni. Dokładniej, parametr R_a jest średnią wartością tego, jak daleko każdy punkt na powierzchni odbiega w wysokości od średniej wysokości (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Interpretacja parametru R_a

Źródło: <https://michmet.com/average-roughness-basics/>

Pozioma linia na rysunku przechodząca przez profil reprezentuje średnią arytmetyczną wysokości. Niebieskie obszary reprezentują odchylenia od tej linii. R_a jest zatem całkowitym niebieskim obszarem podzielonym przez długość profilu L .

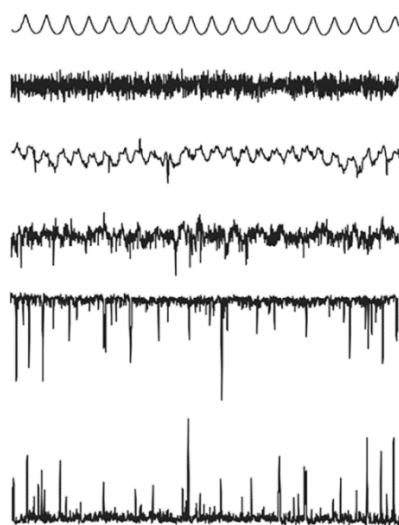
Z punktu widzenia analizy nierówności powierzchni bardzo ważnym aspektem jest właściwy dobór długości odcinka elementarnego chropowatości. Zgodnie z definicją zawartą w normie [12] odcinek elementarny l_r jest to znormalizowana długość w kierunku linii średniej, stosowana do identyfikacji nierówności charakteryzujących profil chropowatości. Odcinek elementarny profilu chropowatości l_r jest liczbowo równy charakterystycznej długości fali filtru profilu λ_c . Umożliwia on oddzielenie składowej chropowatości od składowej falistości. Właściwe przyjęcie długości odcinka elementarnego ma istotny wpływ

na wartości uzyskiwanych parametrów. Długość odcinka elementarnego powinna być wystarczająco duża, aby uzyskać prawidłowy obraz powierzchni, a jednocześnie odpowiednio krótka, aby nie uwzględniać długofalowych elementów geometrycznej struktury powierzchni (GSP). Zalecane długości odcinków elementarnych l_r do pomiaru parametru chropowatości R_a podano w poniższej tabeli [7, 13, 14].

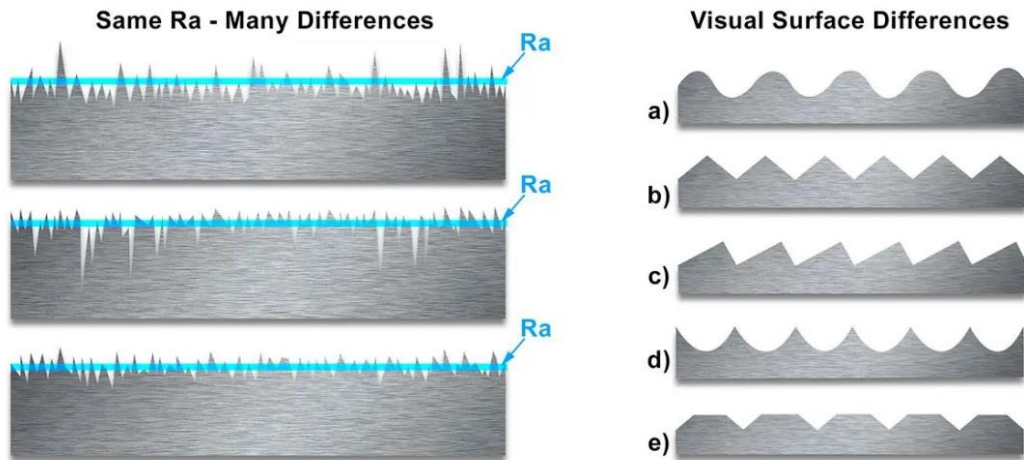
Tabela 1. Zalecane wartości odcinków elementarnych nieokresowych profili chropowatości powierzchni [7, 13, 14, 15]

R_a [μm]	l_r [mm]
$0,006 < R_a \leq 0,025$	0,08
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8
$2 < R_a \leq 10$	2,5
$10 < R_a \leq 80$	8,0

Z definicji parametr R_a stanowi średnią z wielu wartości. Jak każda średnia może przyjmować tę samą wartość dla zróżnicowanych zbiorów pojedynczych wartości. Dlatego naukowcy zajmujący się zagadnieniami struktury geometrycznej powierzchni uważają, że parametr R_a nie w pełni charakteryzuje topografię powierzchni. Przy tej samej wartości R_a można mieć do czynienia z geometrią powierzchni bardzo zróżnicowaną (rys. 2.7, 2.8).



Rys. 2.7. Przykładowe profile powierzchni o tej samej wartości parametru R_a
 [11; <https://michmet.com/average-roughness-basics/>]



Rys. 2.8. Porównanie różnych powierzchni o tej samej wartości parametru Ra;
<https://isofinishing.com/surface-roughness-chart/>

Dlatego też w badaniach topografii powierzchni wyznacza się i analizuje szereg parametrów i funkcji charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni. Parametry te i funkcje zostały znormalizowane w Polskich Normach [12, 16] i w normach międzynarodowych. Są to:

- parametry pionowe (amplitudowe) wysokości wzniesień i głębokości wgłębień,
- parametry pionowe (amplitudowe) – wartości średnie rzędnych (wysokości),
- parametry poziome (odległościowe),
- parametry hybrydowe (mieszane),
- charakterystyczne krzywe i parametry z nimi związane [12].

Są to parametry i funkcje wyznaczone metodą profilową [12]. Wybrane metody oraz parametry i funkcje zostaną opisane w kolejnym rozdziale. Wg Kacalaka i zespołu [17] podstawą wyboru parametrów, które zostaną wykorzystane do oceny określonej powierzchni, powinno być przeznaczenie elementu i warunki jego eksploatacji.

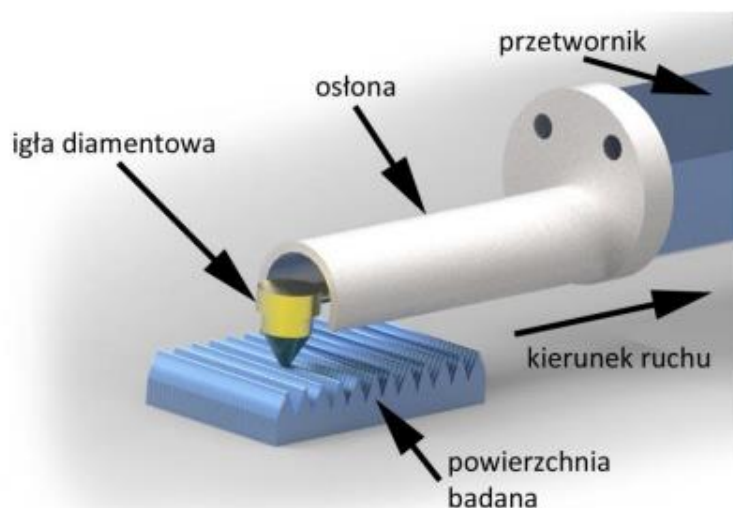
2.2. Pomiary geometrycznej struktury powierzchni

Pomiary geometrycznej struktury powierzchni są stosunkowo nowym obszarem metrologii. Do niedawna jako pomiary mikrogeometrii powierzchni rozumiało się pomiar chropowatości oraz falistości. W pomiarach tych stosowano głównie urządzenia do ręcznego, stykowego (kontaktowego) pomiaru. Przyrządy pomiarowe oparte na ostrzach odwzorowujących - rysikach (rys. 2.9) to najpowszechniejsze narzędzia do pomiaru tekstury powierzchni.



Rys. 2.9. Przykładowe instrumenty rysikowe do pomiaru mikrogeometrii powierzchni metodą kontaktową; Źródło: <https://michmet.com/average-roughness-basics/>

W tych instrumentach ostrze styka się z mierzoną powierzchnią badanego obiektu dzięki naciskowi pomiarowemu (rys. 2.10). Pionowe przemieszczenie się ostrza pomiarowego przetwarzane jest na sygnał elektryczny, który następnie po wzmocnieniu może być poddany filtracji w celu oddzielenia niepożądanych składowych. Otrzymany sygnał pomiarowy można zarejestrować w postaci profilografu oraz przetworzyć w celu uzyskania wartości liczbowych parametrów chropowatości. Przyrządy wykorzystywane w badaniach stykowych noszą nazwę profilografometrów [5].

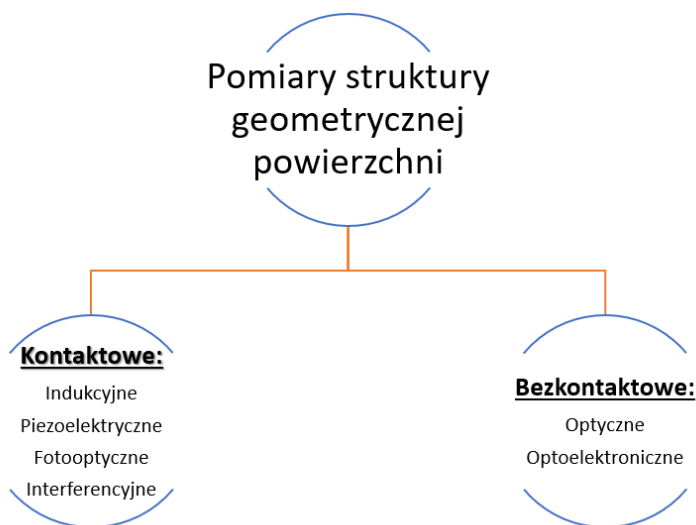


Rys. 2.10. Zasada pomiaru struktury geometrycznej powierzchni metodą stykową [18]

W dobie intensywnego rozwoju automatyzacji procesów produkcyjnych oraz technologii pomiarowych, przy jednoczesnym podwyższeniu standardów jakościowych, konieczne stało się zautomatyzowanie procesów pomiarowych. Spowodowało to dynamiczny rozwój zarówno urządzeń jak i technik pomiarowych. Obecnie stosuje się metody pomiarowe należące do dwóch podstawowych grup:

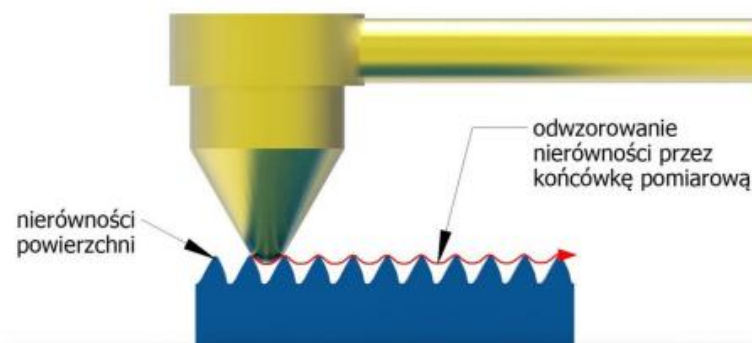
- pomiary stykowe (kontaktowe),
- pomiary bezstykowe (bezkontaktowe).

Podział metod pomiaru struktury geometrycznej powierzchni przedstawiono na schemacie poniżej (rys. 2.11).



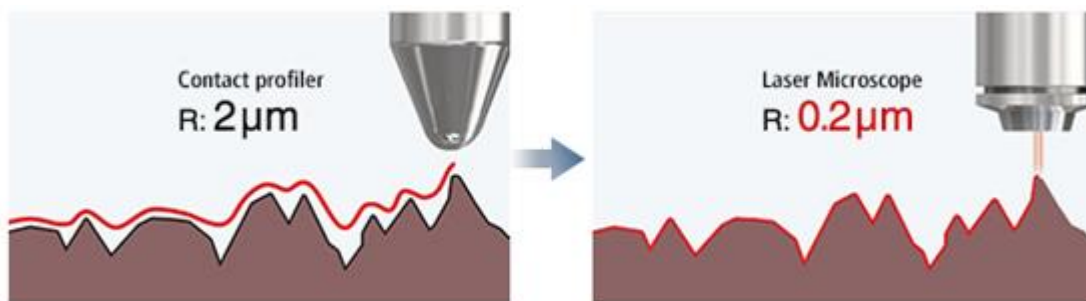
Rys. 2.11. Metody pomiaru struktury geometrycznej powierzchni

W metodach kontaktowych ostrze pomiarowe mierzy w dwóch wymiarach, rejestrując wysokość w każdym punkcie wzdłuż linii. W metodach bezkontaktowych przyrządy optyczne mogą mierzyć w trzech wymiarach, dostarczając danych na temat całego obszaru. Metody bezkontaktowe, optyczne są znacznie bardziej dokładne od metod kontaktowych. Wynika to z faktu, że w metodach kontaktowych wymiary ostrza pomiarowego decydują o tym, jakie nierówności są przez przyrząd rejestrowane (rys. 2.12). Wgłębienia mniejsze od wymiarów ostrza nie są przez ostrze penetrowane. To sprawia, że kształt profilu zarejestrowanego przez profilometr kontaktowy może w istotny sposób odbiegać od rzeczywistego kształtu profilu mierzonej powierzchni.



Rys. 2.12. Niedokładność odwzorowania nierówności powierzchni przez końcówkę pomiarową [18]

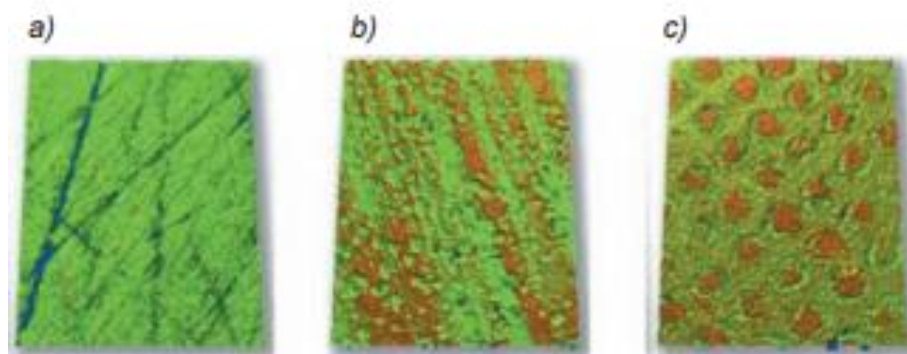
Natomiast w metodach optycznych promień może dotrzeć niemal do każdego zagłębienia na powierzchni, odwzorowując profil czy obszar bardzo precyzyjnie (rys. 2.13)



Rys. 2.13. Porównanie precyzji pomiaru struktury geometrycznej powierzchni za pomocą metody kontaktowej i bezkontaktowej;

Źródło: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sal-auto-correlation-length.jsp>

Wielu naukowców uważa, że dwuwymiarowa ocena geometrycznej struktury powierzchni jest niewystarczająca, gdyż większość interakcji powierzchni to zjawiska trójwymiarowe [7]. Zatem coraz większą uwagę poświęca się analizie przestrzennej – trójwymiarowej. Dzięki zastosowaniu analizy przestrzennej możliwe jest odwzorowanie nie tylko profilu powierzchni badanego obiektu, ale także struktury geometrycznej całej powierzchni poddanej badaniu (rys. 2.14).

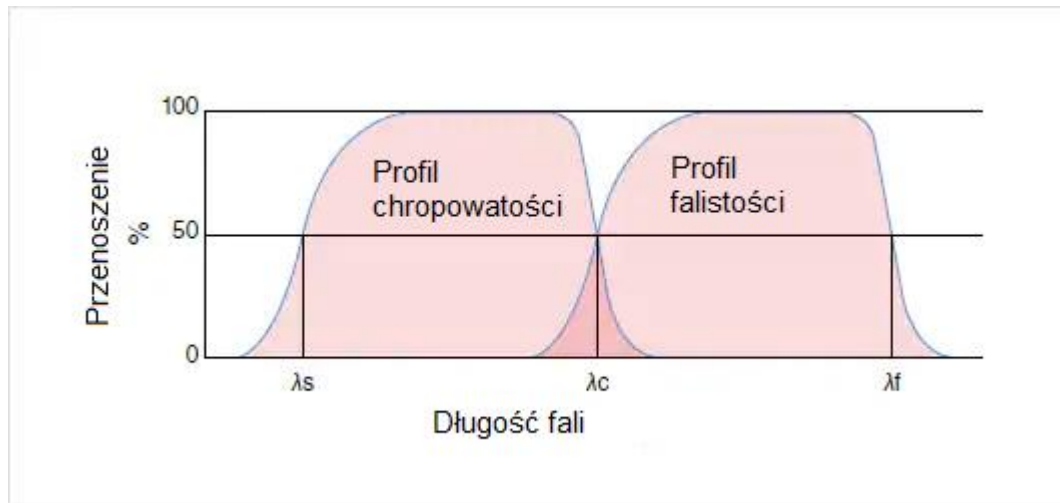


Rys. 2.14. Trójwymiarowe odwzorowanie powierzchni tarcz sprzęgłowych [19, 20]

Metody analizy przestrzennej dzieli się na dwie kategorie: metody powierzchniowe [12] i profilowe [15]. Metody powierzchniowe umożliwiają jednoczesną obserwację wskazanego obszaru (fragmentu) powierzchni. Metody profilowe polegają na zbliżaniu

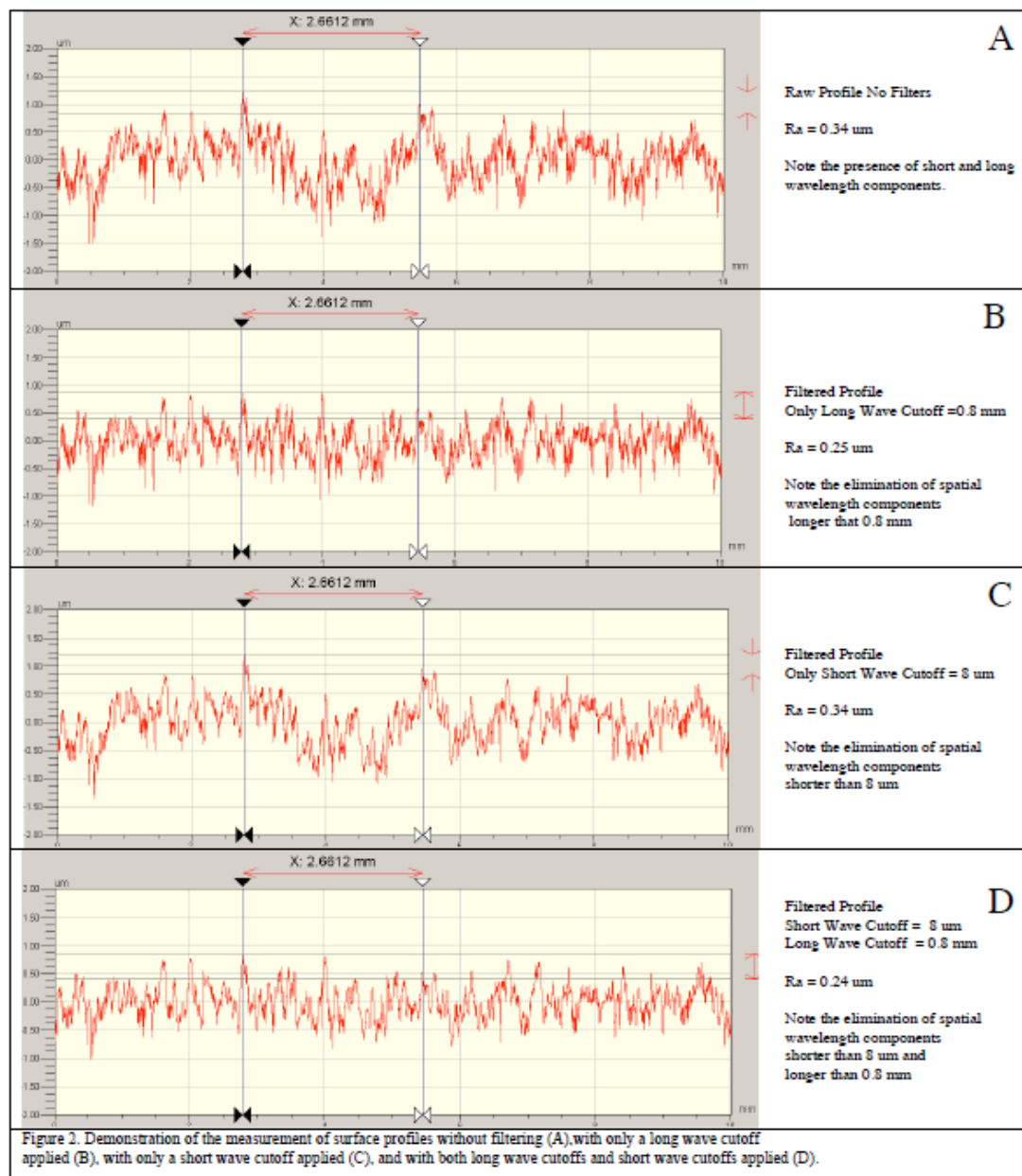
danych pomiarowych w określonych punktach w kierunkach X i Y, a następnie na ich podstawie odtwarzany jest obraz powierzchni.

W pomiarach struktury geometrycznej powierzchni istotnym problemem jest oddzielenie poszczególnych składowych nierównomierności. W tym celu stosuje się odpowiednie filtry: λ_s , λ_c , λ_f (rys. 2.15). Filtr λ_s jest to filtr wyznaczający próg między składową chropowatości, a składową krótszej fali (eliminuje szum pomiarowy). Filtr λ_c (*cut-off*) jest to filtr wyznaczający próg między składową chropowatości, a składową falistości. Natomiast filtr λ_f jest filtrem wyznaczającym próg między składową falistości, a składową dłuższej fali (składową kształtu).



Rys. 2.15. Charakterystyki przenoszenia profilu chropowatości i falistości

Dobór odpowiednich filtrów zależy od szeregu czynników, przede wszystkim charakteru powierzchni. Generalnie zakłada się, że filtr λ_c odpowiada długości odcinka elementarnego [13]. W wielu pracach naukowych spotyka się zastosowanie standardowej wartości filtra $\lambda_c = 0,8\text{mm}$. Zalecana wartość filtra λ_s powinna być 100 razy mniejsza od wartości filtra λ_c [21]. Jednakże nie jest to jednoznaczne. Cohen [21] porównał wyniki badania geometrycznej struktury powierzchni przy zastosowaniu różnych filtrów (rys. 2.16).



Rys. 2.16. Ilustracja pomiaru profili powierzchni: A) bez filtrowania B) tylko z odcięciem fali długiej - $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, C) z zastosowanym odcięciem tylko dla fal krótkich - $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$, D) z zastosowanym odcięciem zarówno dla fal długich, jak i krótkich - $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$, $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ [21]

Wyraźnie widać, że bez zastosowania filtra oraz przy zastosowaniu poszczególnych filtrów o określonej wielkości, wartość parametru R_a jest różna. Również kształt profili

uzyskanych bez zastosowania filtra oraz z zastosowaniem różnych filtrów jest zróżnicowany. Należy to brać pod uwagę przy przetwarzaniu danych z profilometrów.

Badania struktury geometrycznej powierzchni za pomocą metod bezstykowych są rozpowszechnione w wielu obszarach, zwłaszcza w mechanice. Metody optyczne odwzorowania powierzchni, a następnie przetwarzania danych za pomocą specjalistycznych programów stosowane są m.in. do oceny procesu szlifowania i jakości powierzchni elementów szlifowanych [22], do badania zużywania się elementów maszyn [23, 24], w przemyśle motoryzacyjnym, m.in. do oceny warstwy lakieru karoserii samochodowej [24, 25], metalurgii [26-28] w stomatologii [14] i wielu innych.

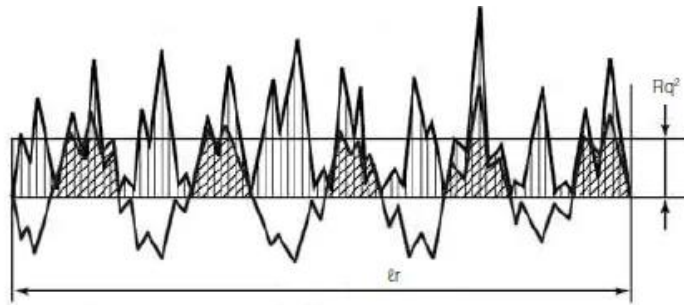
2.3. Parametry i funkcje wyznaczone w badaniach geometrycznej struktury powierzchni

W zależności od zastosowanej metody bezstykowej wyznaczone są różne parametry i funkcje pozwalające na kompleksową analizę struktury geometrycznej powierzchni. Parametry uzyskiwane z analizy profilu chropowatości przyjęto oznaczać następująco: R – wszystkie parametry chropowatości (z ang. *roughness*), W – parametry falistości (z ang. *waviness*), P – parametry określone z profilu pierwotnego – niefiltrowanego (z ang. *primary*), natomiast parametry uzyskane z analizy przestrzennej oznaczają się literą S (z ang. *surface*) [29]. Sposób obliczania konkretnych parametrów jest taki sam dla wszystkich składowych profilu, a zatem w taki sam sposób wyznacza się całą rodzinę parametrów, np. P_t , W_t i R_t , różnicą jest jedynie profil, z którego pochodzą dane. W podobny sposób określa się również adekwatne parametry wyznaczone metodą powierzchniową.

Przykładowo, parametr R_q – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości w metodzie profilowej wyznaczany jest wg wzoru:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} z^2(x) dx} \quad (2.3)$$

z następującą reprezentacją graficzną (rys. 2.17):



Rys. 2.17. Interpretacja parametru Rq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości w metodzie profilowej;

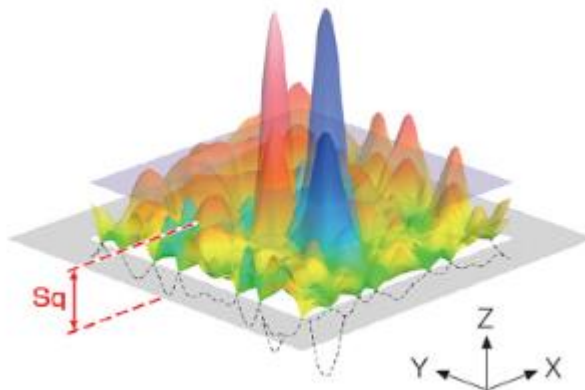
<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/root-mean-square-deviation.jsp>

Natomiast w metodzie powierzchniowej parametr Sq – odpowiednik parametry Rq – obliczany jest wg wzoru:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (2.4)$$

gdzie A oznacza badaną powierzchnię.

Parametr Sq przedstawiany jest graficznie w sposób następujący (rys. 2.18):



Rys. 2.18. Interpretacja parametru Sq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości w metodzie powierzchniowej;

<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

W metodzie profilowej wyznaczane są:

- parametry pionowe (amplitudowe) – wysokości wzniesień i głębokości wgłębień,
- parametry pionowe (amplitudowe) – wartości średnie rzędnych (wysokości),
- parametry poziome (odległościowe),
- parametry hybrydowe (mieszane),
- charakterystyczne krzywe i parametry z nimi związane [12].

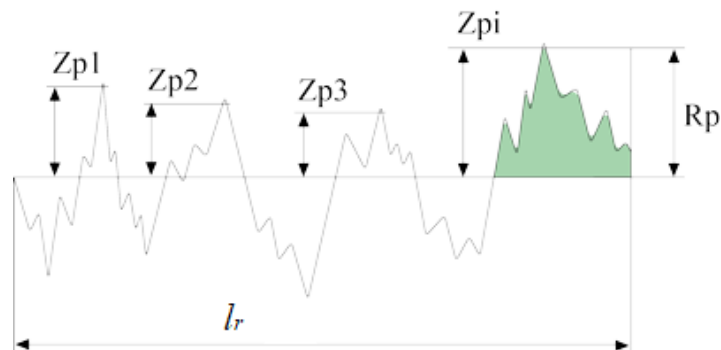
Parametry pionowe (amplitudowe) wysokości wzniesień i głębokości wgłębień są następujące [12, 18]:

- wysokość najwyższego wzniesienia profilu – Pp , Rp , Wp ,
- głębokość najniższego wgłębienia profilu – Pv , Rv , Wv ,
- największa wysokość profilu – Pz , Rz , Wz ,
- średnia wysokość elementów profilu – Pc , Rc , Wc ,
- całkowita wysokość profilu – Pt , Rt , Wt .

Litery P , R i W odpowiadają odpowiednio parametrom wyznaczanym z profilu pierwotnego (P), chropowości (R) i faliści (W).

Wysokość najwyższego wzniesienia profilu (Rp) oznacza maksymalną wysokość (wartość z) odnotowaną wzdłuż odcinka elementarnego (rys. 2.19).

$$R_p = \max (Z(x))$$

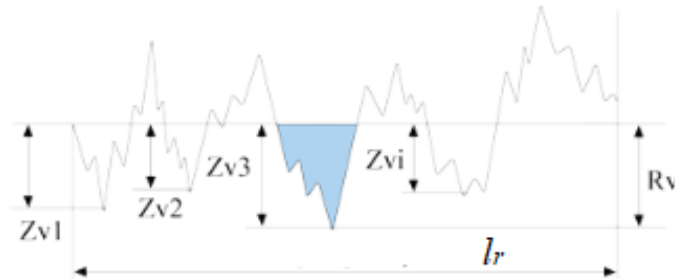


Rys. 2.19. Interpretacja parametru R_p – wysokość najwyższego wzniesienia profilu;

<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

Głębokość najniższego wgłębienia profilu oznacza wartość bezwzględnej głębokości największego wgłębienia odnotowanego na długości odcinka elementarnego (rys. 2.20).

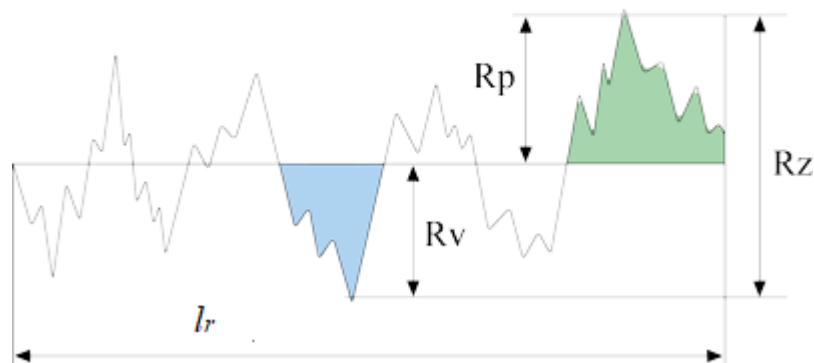
$$R_v = \min (Z(x))$$



Rys. 2.20. Interpretacja parametru R_v – wysokość najwyższego wzniesienia profilu;
<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

Największa wysokość profilu jest sumą wysokości największego wzniesienia profilu i głębokości najniższego wgłębienia profilu (rys. 2.21)

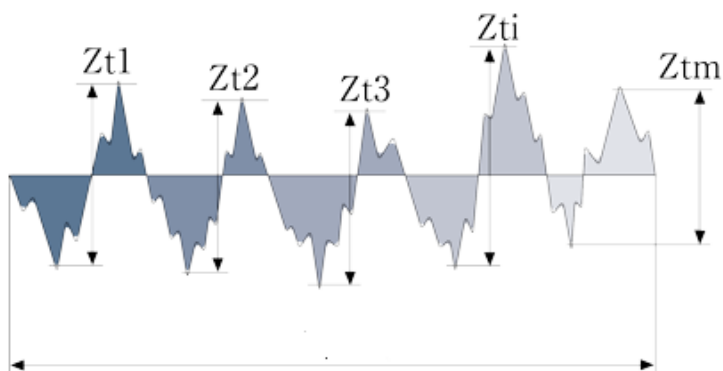
$$R_z = R_p + R_v$$



Rys. 2.21. Interpretacja parametru R_z – największa wysokość profilu;
<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

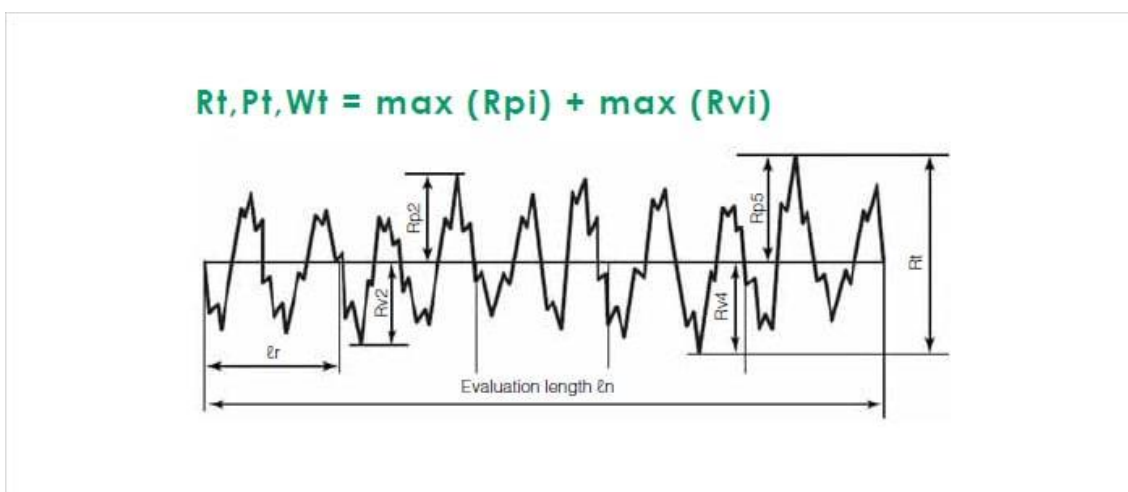
Średnia wysokość elementów profilu reprezentuje średnią wysokości Z_t elementów profilu w obrębie długości elementarnej (rys. 2.22).

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti}$$



Rys. 2.22. Interpretacja parametru R_c – średnia wysokość elementów profilu;
<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

Całkowita wysokość profilu to odległość w pionie między maksymalną wysokością szczytu profilu, a maksymalną głębokością doliny profilu na długości odcinka elementarnego (rys. 2.23)

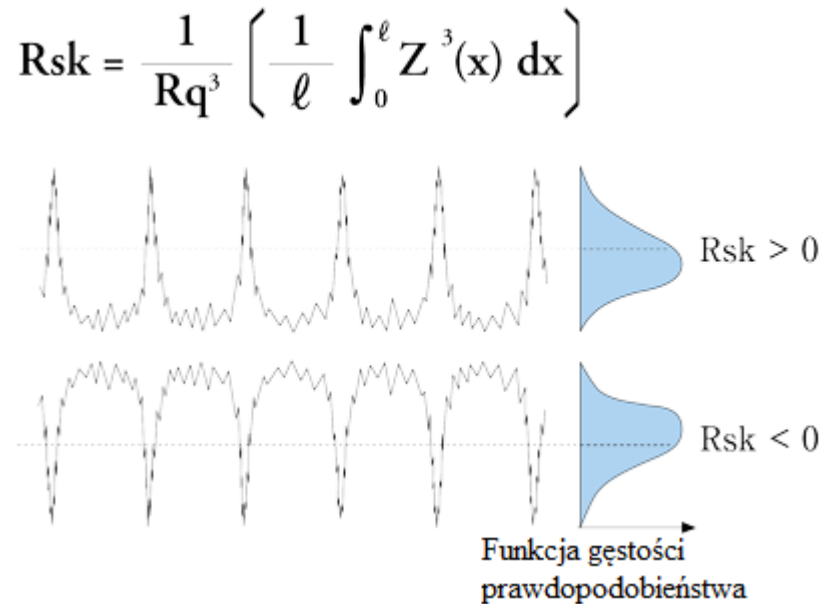


Rys. 2.23. Interpretacja parametru R_t – całkowita wysokość elementów profilu;
<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/total-height-of-profile.jsp>

Parametry pionowe (amplitudowe) – wartości średnie rzędnych (wysokości) są następujące:

- średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości – Pa , Ra , Wa (rys. 2.5),
- średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości – Pq , Rq , Wq (rys. 2.17),
- skośność profilu – Psk , Rsk , Wsk ,
- kurtoza – Pku , Rku , Wku .

Skośność profilu zwana jest inaczej wskaźnikiem asymetrii profilu. Jest to miara asymetrii rozkładu wartości z (rys. 2.24).

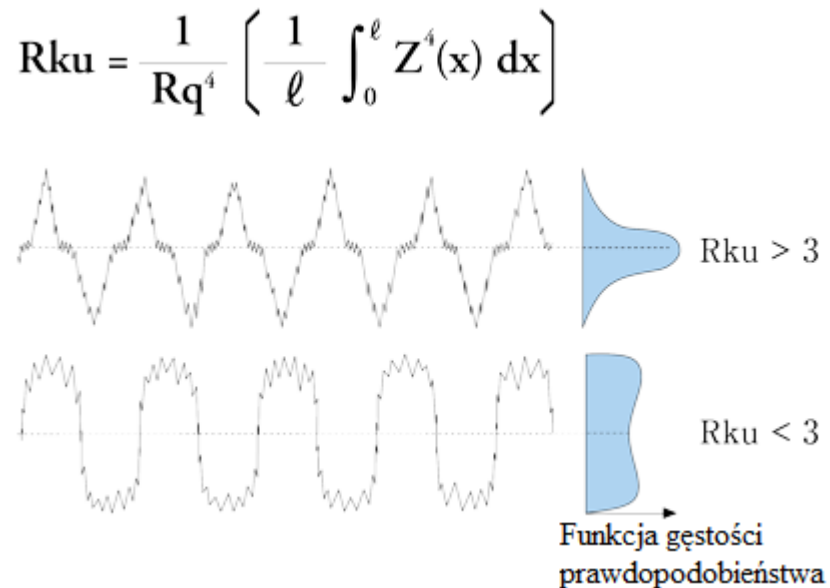


Rys. 2.24. Interpretacja parametru Rsk – skośność, miara asymetrii profilu;
<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

Współczynnik skośności przyjmuje wartość zero dla rozkładu symetrycznego (normalnego), wartości ujemne dla rozkładów o lewostronnej asymetrii (wydłużone lewe ramię rozkładu) i wartości dodatnie dla rozkładów o prawostronnej asymetrii (wydłużone prawe ramię rozkładu) (rys. 2.24).

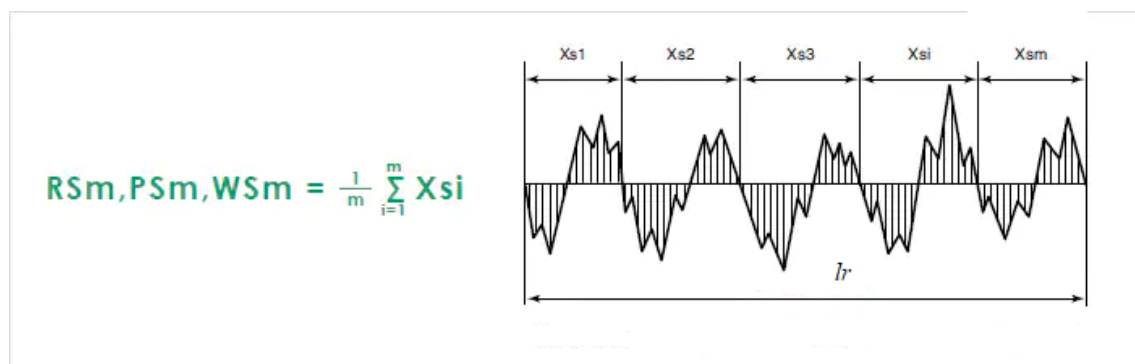
Kurtoza jest miarą koncentracji wyników. Parametr ten nazywany jest również miarą spłaszczenia rozkładu. Kurtoza informuje o tym, na ile wyniki są skoncentrowane wokół

średniej. Jeżeli Rku jest równa 3, oznacza to rozkład normalny. Wartość kurtozy wyższa od 3 oznacza rozkład ostry. Natomiast przy wartości kurtozy poniżej 3 wykres rozkładu wartości z jest spłaszczony (rys. 2.25).



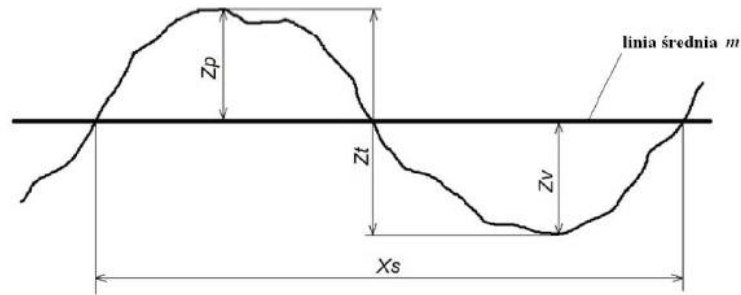
Rys. 2.25. Interpretacja parametru Rku – kurtosa, miara koncentracji wyników;
<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

Parametr poziomy (odległościowy) to średnia szerokość elementu profilu PSm , RSm , WSm . Parametr ten wskazuje średnią wartość długości elementu profilu wzdłuż odcinka elementarnego (rys. 2.26).



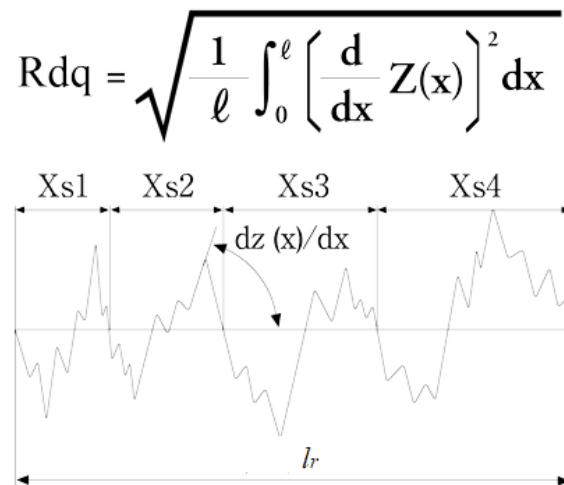
Rys. 2.26. Interpretacja parametru RSm – średnia szerokość elementów profilu;
<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/RSm-PSm-WSm.jsp>

Przy czym element profilu definiowany jest jako wzniesienie i sąsiadujące z nim wgłębienie profilu (rys. 2.27) [5].



Rys. 2.27. Element profilu [5]

Parametr hybrydowy (mieszany) to średni kwadratowy wznios profilu oznaczany $R\Delta q$ lub Rdq [15]. Średniokwadratowe nachylenie wskazuje średnią kwadratową lokalnego nachylenia dZ/dX wzdłuż odcinka elementarnego (rys. 2.28). Za pomocą tego parametru można przedstawić liczbowo nachylenie powierzchni.

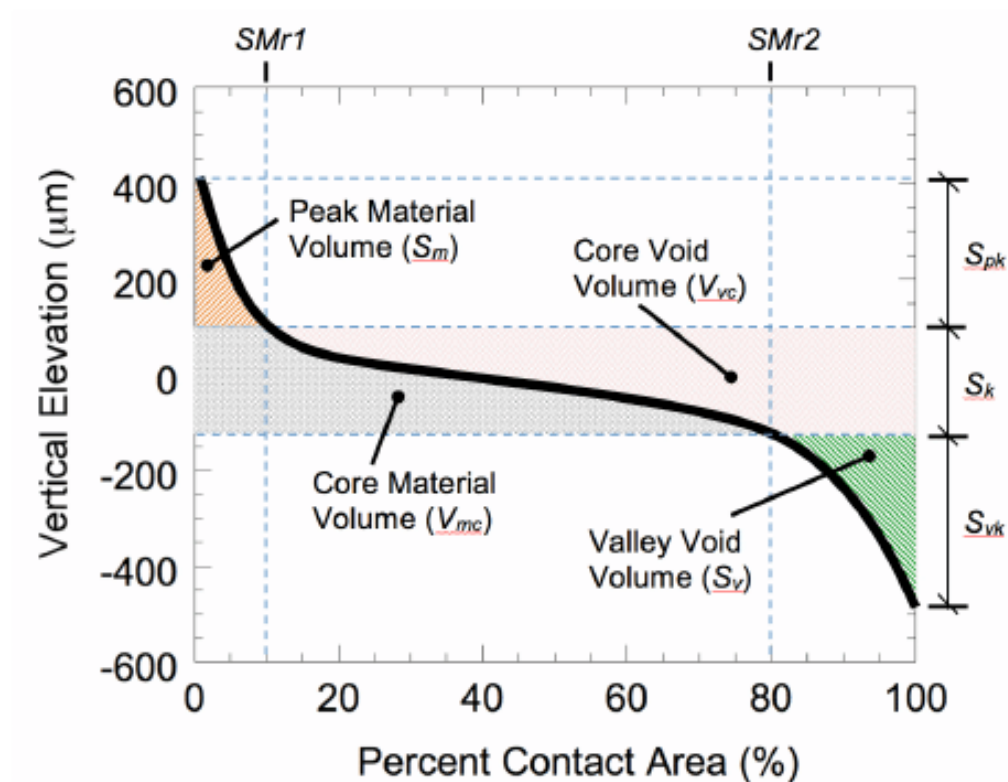


Rys. 2.28. Interpretacja parametru Rdq – średni kwadratowy wznios profilu;
<https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>

Za pomocą metody profilowej można wyznaczyć również charakterystyczne krzywe i parametry z nimi związane:

- krzywa materiałowa,
- krzywa gęstości amplitudowej.

Krzywa materiałowa przedstawia udział materiałowy profilu jako funkcję wysokości cięcia. Jest to krzywa ilustrująca funkcję kumulacyjną – skumulowaną gęstość prawdopodobieństwa wysokości rzędnych profilu powierzchni (rys. 2.29) [30, 31].



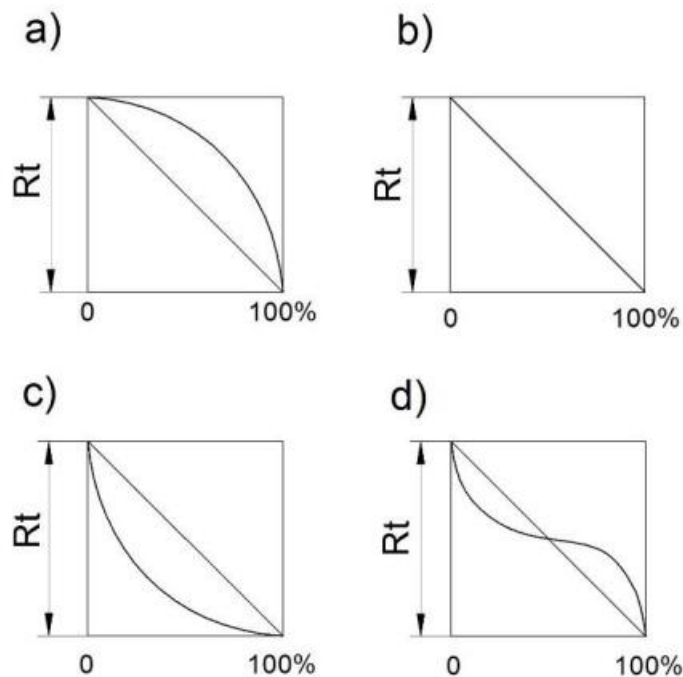
Rys. 2.29. Krzywa materiałowa i parametry z nią związane;

<https://www.ita-polska.com.pl/baza-wiedzy/chropowatosc-i-kontur/trojwymiarowa-analiza-nierownosci-powierzchni>

W zależności od kształtu profilu otrzymuje się różną postać krzywej udziału materiałowego. Wyróżnia się następujące rodzaje krzywych udziału materiałowego:

- progresywne,
- proporcjonalne,
- degresywne,

- mieszane (degresywno-progresywne, progresywno-degresywne, proporcjonalno-degresywne itp.). (rys. 2.30) [32].

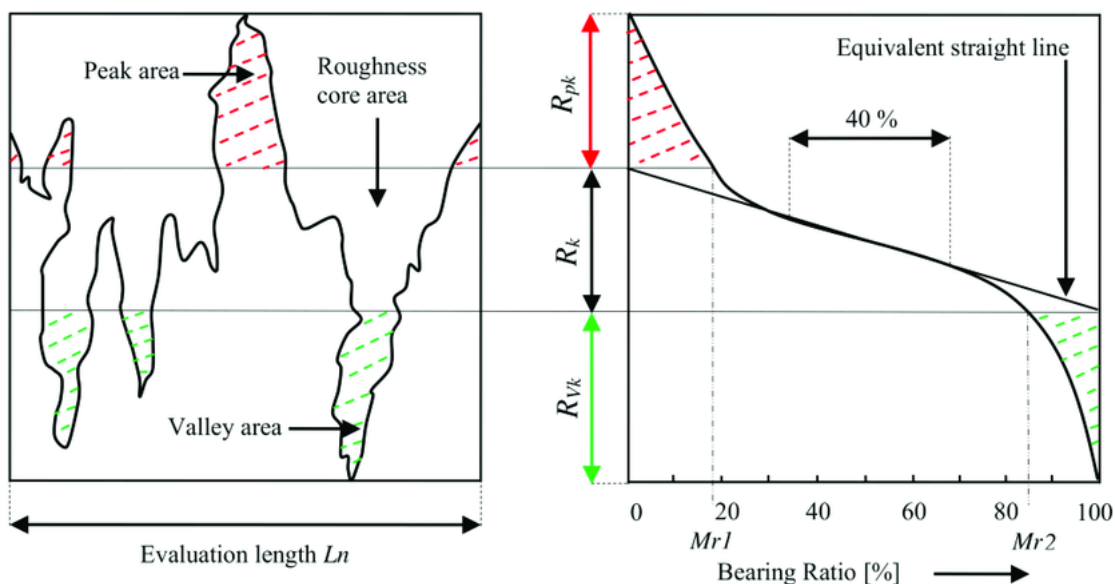


Rys. 2.30. Rodzaje krzywych materiałowych [32]:

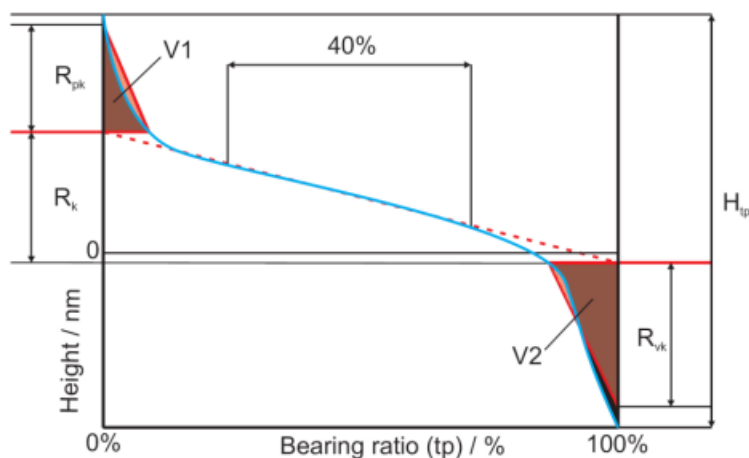
a) progresywna, b) proporcjonalna, c) degresywna, d) degresywno-progresywna (przykład mieszanej)

Krzywa materiałowa pozwala na wyznaczenie szeregu parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni (rys 2.31, 2.32) [18, 33]:

- zredukowana wysokość wzniesień Rpk – średnia wysokość wysokich wzniesień położonych ponad rdzeniem profilu chropowatości,
- głębokość rdzenia chropowatości Rk – głębokość części środkowej profilu, wyznaczona przez prostą linearyzującą krzywą udziału materiałowego,
- zredukowana głębokość wgłębień Rvk – średnia głębokość głębokich wgłębień znajdujących się pod rdzeniem profilu chropowatości.



Rys. 2.31. Ilustracja parametrów wyznaczanych z krzywej materiałowej [34]



Rys. 2.32. Ilustracja parametrów wyznaczanych z krzywej materiałowej [33]

Zarówno parametry charakteryzujące kierunkowość struktury, jak również parametry odczytywane z krzywej materiałowej stosowane są w inżynierii materiałowej oraz mechanice do oceny powierzchni oraz oceny procesów obróbki powierzchni metali (np. szlifowania oraz zużywania się powierzchni na skutek tarcia) [30, 33].

W badaniach powierzchniowych w układzie 3D najczęściej stosowane są profilometryczne metody pomiaru. Metody te polegają na zbieraniu danych pomiarowych w określonych punktach w dwu kierunkach (pojedynczych profilów), a następnie sumowaniu

tych pomiarów, co powoduje powstanie topografii powierzchni. Większość stosowanych parametrów trójwymiarowych jest rozwinięciem parametrów profilu nierówności i ich definicje są analogiczne (np. $Ra \rightarrow Sa$, $Rq \rightarrow Sq$, $Rz \rightarrow Sz$, $Rt \rightarrow St$, $Rk \rightarrow Sk$, $Rpk \rightarrow Spk$, $Rvk \rightarrow Svk$, itd.) [35].

Parametry wyznaczone w metodzie powierzchniowej opisane są w normie PN-EN ISO 25178-2:2012 E [16].

W analizie geometrycznej struktury powierzchni wykorzystuje się również funkcję autokorelacji. Głównym zastosowaniem funkcji autokorelacji jest badanie polegające na ustaleniu, w jakim stopniu wartość sygnału w pewnej określonej chwili wpływa na wartość tego sygnału w pewnej chwili w przyszłości. W pomiarach powierzchni autokorelacja oznacza korelację krzyżową sygnału z samym sobą, a tym samym daje informacje o samo podobieństwie. Autokorelacja jest narzędziem matematycznym do znajdowania powtarzających się wzorców, takich jak obecność struktur okresowych [36].

Funkcja autokorelacji (Autocorrelation Function – *ACF*) jest miarą losowości lub okresowości powierzchni. *ACF* można znaleźć, tworząc duplikat (($Z(x-Dx, y-Dy)$)) mierzonej powierzchni (($Z(x, y)$)), a następnie przesuwając duplikat względem oryginału we wszystkich kierunkach. Z każdym przesunięciem dwa zestawy danych są mnożone razem, a wynik jest całkowany. Następnie wynik normalizowany jest do wartości znalezionej dla przesunięcia zerowego, aby uzyskać miarę stopnia nakładania się tych dwóch funkcji. Jeśli przesunięta wersja powierzchni jest identyczna z oryginalną powierzchnią wtedy *ACF* wynosi 1,00. Jeśli przesunięta powierzchnia jest taka, że wszystkie piki są wyrównane z odpowiednimi dolinami, wówczas *ACF* zbliży się do -1,00 [37].

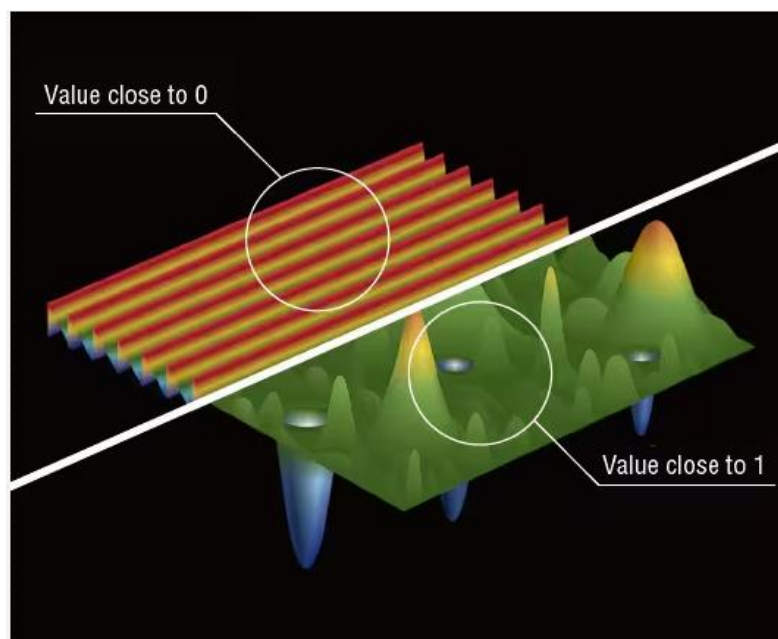
Z funkcji autokorelacji wyznacza się dwa parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni:

- *Sal* - długość autokorelacji,
- *Str* - współczynnik proporcji tekstury,

Oba parametry wyznacza się w oparciu o pomiary topografii powierzchni metodą powierzchniową. Długość autokorelacji *Sal* jest miarą odległości nad powierzchnią, dzięki

której nowa lokalizacja będzie miała minimalną korelację z pierwotną lokalizacją. Kierunek na powierzchni wybrany do znalezienia *Sal* jest kierunkiem, który daje najniższą wartość *Sal*.

Współczynnik proporcji tekstury *Str* jest miarą przestrzennej izotropii lub kierunkowości tekstury powierzchni. Współczynnik ten jest obliczany jako iloraz długości najszybszego zaniku *ACF* w dowolnym kierunku i długości najwolniejszego zaniku *ACF* w dowolnym kierunku (rys. 2.33). W przypadku powierzchni z dominującym ułożeniem parametr *Str* będzie dążył do 0,00, podczas gdy przestrzennie izotropowa tekstura będzie skutkowałą wartością *Str* równą 1,00 (rys. 2.33) [39]. Parametr *Str* może znaleźć zastosowanie w wykrywaniu subtelnej kierunkowości na teksturze uważanej za izotropową [38].



Rys. 2.33. Interpretacja wartości parametru *Str*;

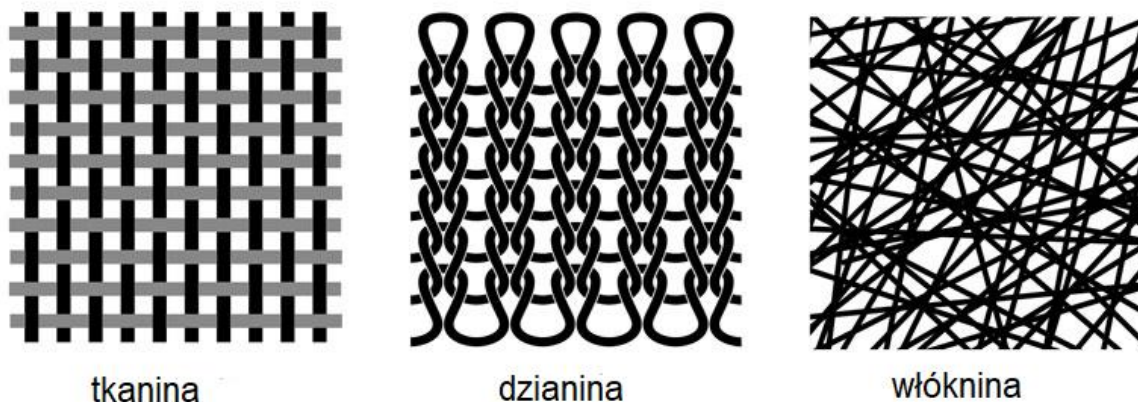
<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/str-texture-aspect-ratio.jsp>

Parametr *Sal* jest miarą ilościową określającą odległość wzdłuż powierzchni, przy której można znaleźć teksturę, która jest statystycznie różna od pierwotnej lokalizacji. *Sal* jest przydatne w ustalaniu odległości między wielokrotnymi pomiarami wykonanymi na

powierzchni, aby odpowiednio określić ogólną specyfikację tekstury powierzchni. *Sal* może znaleźć zastosowanie związane z oddziaływaniem promieniowania elektromagnetycznego z powierzchnią, a także właściwościami tribologicznymi, takimi jak tarcie i zużycie [38].

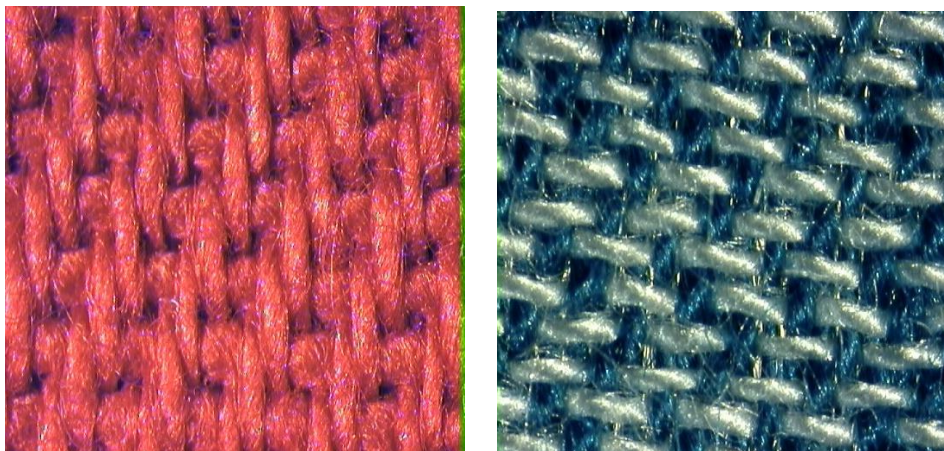
2.4. Geometryczna struktura powierzchni materiałów włókienniczych

Podstawowe materiały włókiennicze to tkaniny, dzianiny i włókniny (rys. 2.34).



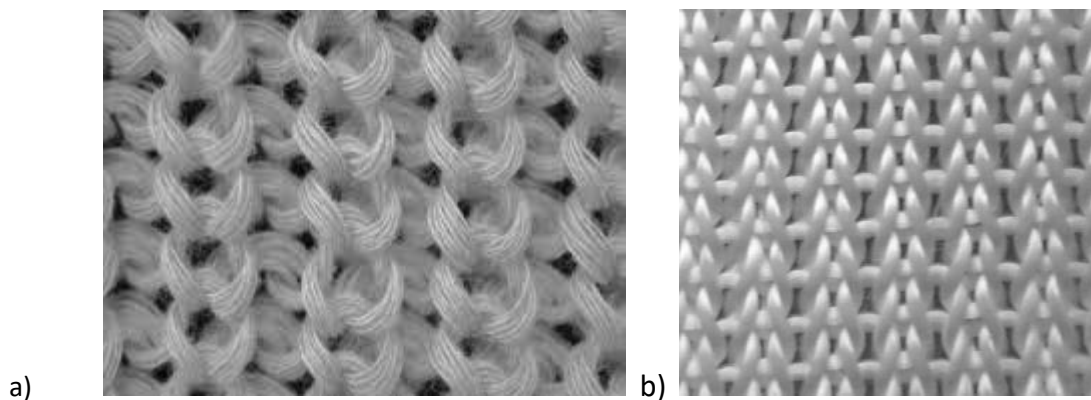
Rys. 2.34. Schematy struktury materiałów włókienniczych,
na podstawie: <https://alisonhoenes.com/2019/02/finding-the-right-fabric-for-your-design-how-to-articulate-what-you-are-looking-for/>

Tkaniny i dzianiny wytwarzane są z przędz, natomiast włókniny – z luźnej masy włókien. Standardowe tkaniny (rys. 2.35) złożone są z dwóch układów przędz: osnowy i wątku, prostopadłych do siebie i wzajemnie się przeplatających [41 – 43]. Sposób przeplatania się osnowy i wątku nazywany jest splotem.



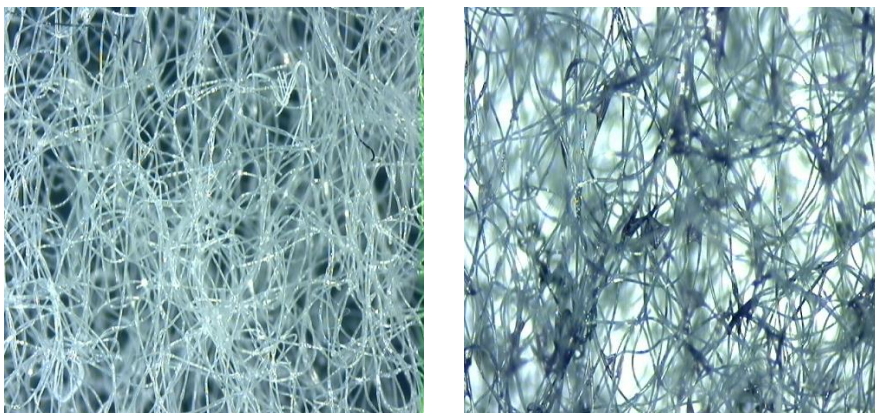
Rys. 2.35. Zdjęcia przykładowych tkanin

Dzianina jest płaskim wyrobem włókienniczym, który powstaje poprzez tworzenie rzędów lub kolumn z połączonych ze sobą oczek [44 – 46]. Oczko jest podstawowym elementem struktury dzianin (rys. 2.36).



Rys. 2.36. Mikroskopowe obrazy dzianin: rys. 2.36.a [46], rys. 2.36 b [47].

Z kolei włóknina (rys. 2.37) to płaski wyrób włókienniczy, który jest wytwarzany bezpośrednio ze strumienia włókien, m.in. przez ich spilśnianie, sklejanie, igłowanie lub przesywanie.



Rys. 2.37. Mikroskopowe obrazy włóknin

Od zarania dziejów materiały włókiennicze stosowane są przede wszystkim w odzieży i tekstyliach domowych. Wraz z rozwojem nowych polimerów włóknotwórczych, włókien oraz technik i technologii włókienniczych pojawiły się materiały włókiennicze o unikatowych właściwościach, pozwalających na coraz szersze zastosowanie tych materiałów w wielu innych dziedzinach życia. Obecnie zastosowanie materiałów włókienniczych jest powszechne niemal we wszystkich obszarach, w tym: w medycynie, przemyśle motoryzacyjnym, budownictwie, transporcie, rolnictwie, sporcie, nie tylko w odzieży sportowej, ale także w sprzęcie sportowym i wielu innych. Tak powszechne zastosowanie materiałów włókienniczych wynika z ich unikatowych właściwości, m. in. właściwości powierzchniowych.

Jednakże w przeciwieństwie do innych obiektów, zwłaszcza stosowanych np. w mechanice jako elementy maszyn i urządzeń albo produkty technologii mechanicznych, geometryczna struktura powierzchni materiałów włókienniczych nie jest w pełni rozpoznana. W czterotomowym wydawnictwie „Metrologia Włókiennicza” w tomie II wydanym w 1969 r. [48] wśród właściwości materiałów ważnych z punktu widzenia przydatności użytkowej wyrobów włókienniczych wymienione jest tylko tarcie oraz odporność wybarwień i odporność powierzchni na mechacenie się, wyblyszczanie się i piling. W tym obszernym opracowaniu, ujmującym kompleksowo, wg stanu wiedzy aktualnego w momencie wydania, zagadnienia chropowatości powierzchni materiałów włókienniczych nie są w ogóle wspomniane. Również badania struktury powierzchni materiałów włókienniczych nie są rozpowszechnione w takim stopniu, jak badania innych

właściwości użytkowych, zwłaszcza mechanicznych i biofizycznych. Badania te zaczęto prowadzić na szerszą skalę dopiero po opracowaniu przez Kawabatę systemu KES (*Kawabata Evaluation System*) do instrumentalnego pomiaru parametrów chwytu. Jeden z modułów systemu – KES FB4 umożliwia pomiar właściwości powierzchniowych – chropowatości i tarcia, przy czym pomiar chropowatości odbywa się metodą stykową. Natomiast pomiary struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych metodami bezstykowymi, optycznymi należą nadal do rzadkości, a opublikowane dotychczas prace należy traktować jako studium przypadku, dotyczące konkretnego rodzaju tkanin lub rozpoznania danej metody. Brak jest w tym zakresie badań systemowych.

A chropowatość powierzchni, czy szerzej ujmując geometryczna struktura powierzchni materiałów włókienniczych jest nie mniej ważna niż struktura geometryczna powierzchni innych obiektów, których badania w tym zakresie są rozpowszechnione, w tym także z zastosowaniem metod bezstykowych. Zostało to szerzej opisane w poprzednim rozdziale. Geometryczna struktura powierzchni materiałów włókienniczych, podobnie jak innych materiałów i obiektów, wpływa na ich wygląd oraz ich interakcję z innymi obiektami i mediami (płyny, gazy). Jednakże, w przeciwieństwie do innych obiektów, materiały włókiennicze mają kontakt z organizmem człowieka, zwłaszcza ze skórą. Wynika to z faktu, że jednym z najważniejszych zastosowań materiałów włókienniczych jest odzież. Właściwości dzieży kształtowane są głównie poprzez dobór odpowiednich materiałów. Szczególnie w przypadku odzieży mającej bezpośredni kontakt ze skórą użytkownika właściwości powierzchniowe, w tym struktura geometryczna powierzchni materiałów mogą odgrywać kluczową rolę.

Struktura geometryczna powierzchni materiałów włókienniczych w istotny sposób wpływa na komfort użytkowania odzieży wykonanej z tych materiałów. Komfort jest to kompatybilność psychologiczna i fizjologiczna człowieka z otaczającym go otoczeniem. Oprócz względów estetycznych, komfort uwarunkowany jest odczuciami sensorycznymi wynikającymi z kontaktu między skórą ludzką, a noszoną odzieżą oraz odczuciami fizjologicznymi wynikającymi z zapewnienia odpowiedniej ochrony cieplnej, możliwości odprowadzania pary wodnej i dwutlenku węgla z powierzchni skóry oraz ochrony skóry przed obciążającym działaniem otoczenia. **Komfort użytkowania odzieży** jest wypadkową

wielu cech użytkowych odzieży zapewniających, w subiektywnym odczuciu użytkownika, idealne spełnienie funkcji ustalonych istotą odzieży i związanych z zapewnieniem odbiorcy pełnej sprawności umysłowej i fizycznej, połączonych z niezawodnością eksploatacyjną i przydatnością odzieży do określonych zabiegów konserwacyjnych [49]

W odniesieniu do odzieży komfort użytkownika charakteryzuje brak negatywnych odczuć spowodowanych przez odzież w trakcie jej użytkowania. Te negatywne odczucia to zarówno niedopasowanie, ucisk, brak swobody ruchów, brak odparowania par potu z powierzchni skóry, niezadowolenie z wyglądu odzieży, ale także podrażnienie skóry, uczucie zimna lub przegrzania, pocenie się itp.

Rozróżnia się cztery kategorie komfortu użytkownika odzieży [50 – 53]:

- komfort sensoryczny – subiektywny stan zadowolenia z charakteru fizycznego kontaktu odzieży ze skórą,
- komfort psychologiczny – subiektywny stan zaspokojenia potrzeb emocjonalnych w zakresie użytkowania odzieży,
- komfort fizjologiczny, zwany także komfortem termo-fizjologicznym – stan zapewniający człowiekowi odpowiedni mikroklimat w warstwach przyskórnych w czasie jego fizycznej aktywności w zmiennych warunkach klimatycznych przy zachowaniu pewnej sprawności fizycznej i umysłowej,
- komfort dopasowania – stan zapewniający człowiekowi wygodę podczas użytkowania odzieży oraz swobodę ruchów.

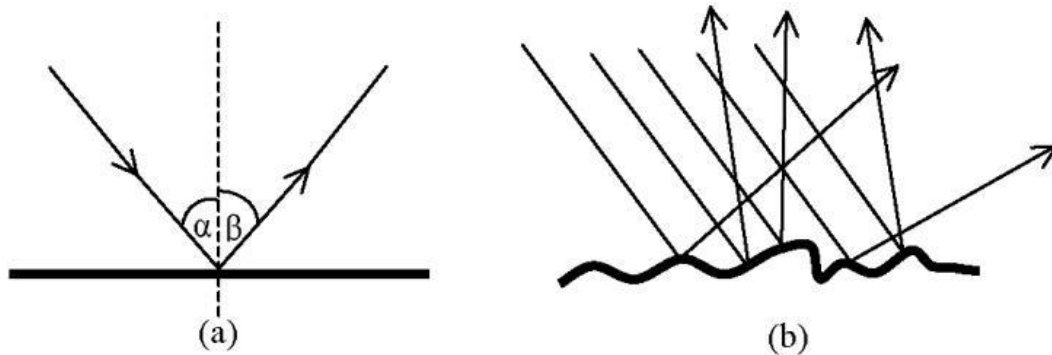
Pomiędzy poszczególnymi kategoriami komfortu istnieją powiązania. Komfort sensoryczny jest powiązany z komfortem fizjologicznym, gdyż odzież po wchłonięciu wilgoci (potu) zmienia swoje właściwości powierzchniowe i może np. „lepić” się do skóry. Komfort psychologiczny związany jest z odczuciami estetycznymi, na które mają wpływ takie cechy wyrobu, jak: kolor, konstrukcja, fason odzieży, zgodność z tendencjami mody, odpowiedniość odzieży do okazji. Dopasowanie odzieży do sylwetki użytkownika również wpływa na odczucia użytkownika odzieży w kontekście jego zadowolenia z własnego wyglądu, a zatem na komfort psychologiczny. Podstawą komfortu fizjologicznego jest

komfort cieplny. Komfort termo-fizjologiczny jest uzależniony od właściwości odzieży, które decydują o zachowaniu równowagi bilansu cieplnego, a więc o wymianie ciepła oraz o transporcie wilgoci pomiędzy organizmem człowieka, a otoczeniem. Komfort psychologiczny jest niejako wypadkową komfortu sensorycznego i fizjologicznego, ale też jest związany z pojęciem estetyki i gustu użytkownika. Brak poczucia komfortu fizjologicznego i sensorycznego powoduje obniżenie poczucia komfortu psychologicznego. Jednak komfort psychologiczny ma znacznie szersze pojęcie. Wpływ na odczucia psychiczne człowieka mają również bodźce odbierane z otoczenia, niezwiązane z warunkami atmosferycznymi czy samym ubiorem [54].

Geometryczna struktura powierzchni materiałów włókienniczych zastosowanych w odzieży jest powiązana z trzema kategoriami komfortu:

- komfortem psychologicznym,
- komfortem sensorycznym,
- komfortem psychologicznym.

Struktura geometryczna powierzchni wpływa na wygląd materiałów włókienniczych i odzieży z niej wykonanej. Tym samym wpływa na odczucia estetyczne, będące jednym z aspektów komfortu psychologicznego. Wpływ struktury geometrycznej powierzchni materiału na wygląd odzieży dotyczy nie tylko postrzegania materiału odzieży w aspekcie jego gładkości i jednorodności powierzchni. Zgodnie z prawami optyki kąt padania światła jest równy kątowi odbicia. Jeśli światło pada na gładką powierzchnię, ulega odbiciu zgodnie z zasadami optyki (rys. 2.38 a), a powierzchnia postrzegana jest jako błyszcząca. Gdy natomiast światło pada na nierównomierną, chropowatą powierzchnię, promienie światła padają na wycinki powierzchni pod różnymi kątami, co powoduje rozproszenie promieni świetlnych (rys. 2.38 b).



Rys. 2.38. Efekt rozpraszania światła przez jego padanie na nierównomierną powierzchnię: a) padanie i odbicie światła w przypadku gładkiej powierzchni, b) padanie i odbicie światła przy nierównomiernej powierzchni
Szlifowanie i polerowanie powierzchni | autoEXPERT

Struktura geometryczna powierzchni materiałów zastosowanych w odzieży wpływa na komfort sensoryczny, gdyż decyduje o odczuciach przy bezpośrednim kontakcie skóry użytkownika z materiałem odzieży. Odczucia te związane są z takimi właściwościami powierzchniowymi materiału, jak m. in.: gładkość, szorstkość, sztywność, włochatość. Komfort sensoryczny jest powiązany z receptorami dotyku, które są rozmieszczone na ciele człowieka. W wyniku kontaktu między skórą człowieka, a odzieżą, użytkownik może stwierdzić, czy noszona odzież zapewnia mu komfort. W dużym stopniu intensywność pobudzenia receptorów zależy od właściwości mechanicznych wyrobu. Komfort sensoryczny jest związany z mechanicznymi właściwościami wyrobu i jest opisywany kompletnym wskaźnikiem zwanym chwytem [55]. Znalazło to odzwierciedlenie w ocenie chwytu materiałów włókienniczych. Chwytem definiowany jest jako właściwość danego materiału wyczuwana przy jego dotyku. Właściwość ta jest związana z subiektywną oceną takich parametrów, jak m.in.: szorstkość, sztywność, gładkość, chropowatość, elastyczność, grubość oraz wiele innych. Parametr ten jest podstawowym wyznacznikiem jakości materiału, który określa wartość tkaniny podczas pierwszego kontaktu człowieka z wyrobem [56]. Chwytem bierze się bardzo często pod uwagę przy zakupie wyrobów włókienniczych, zwłaszcza wyrobów odzieżowych i bieliznianych. Nie odgrywa natomiast znaczącej roli przy ocenie wyrobów technicznych, które nie mają bezpośredniego kontaktu ze skórą człowieka. Przez lata chwytem oceniany był organoleptycznie. Subiektywna (organoleptyczna) ocena chwytu wyrobu polega na ściśnięciu wyrobu palcami z jednoczesnym przesuwaniem

palców po powierzchni wyrobu, a następnie scharakteryzowaniu odczuć sensorycznych – dotykowych (rys. 2.39, 2.40).



Rys. 2.39. *Organoleptyczna ocena chwytu tkaniny;*
Objectively evaluating fabric handle (innovationintextiles.com)

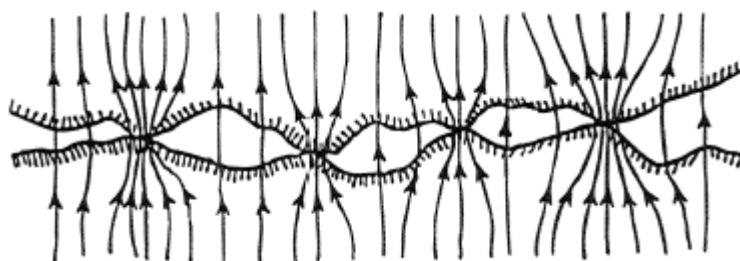


Rys. 2.40. *Organoleptyczna ocena chwytu tkaniny [57]*

Ściśnięcie próbki palcami pozwala określić jej grubość, puszystość, ściśliwość i cieplny charakter dotyku, natomiast przesuwanie palcami po powierzchni wyrobu umożliwia ocenę gładkości i struktury powierzchni oraz sztywności wyrobu [55, 57, 58].

Od kilkudziesięciu lat prowadzone są badania w celu standaryzacji subiektywnych metod oceny chwytu. W 1996 roku stwierdzono, że najważniejszymi cechami określającymi właściwości tkaniny są gładkość (28%) i miękkość (22%). Na pozostałe 50% składa się 21 innych cech [59]. Kawabata i Niva prowadzili badania nad zinstrumentalizowaniem oceny chwytu [47, 49, 60]. W wyniku tych prac opracowany został system pomiarowy KES (Kawabata Evaluation System), który służy do pomiaru właściwości materiałów włókienniczych wpływających na ich chwyt. W tym systemie znajduje się moduł KES-FB4, który służy do oceny właściwości powierzchniowych materiałów włókienniczych – tarcia i chropowatości. Moduł ten zostanie opisany w następnym rozdziale.

Struktura geometryczna powierzchni ma również wpływ na komfort termofizjologiczny i to w różnych aspektach. Należy tu wymienić wpływ na wymianę ciepła pomiędzy organizmem użytkownika odzieży a otoczeniem. W przypadku odzieży wielowarstwowej w kształtowaniu oporu cieplnego wielowarstwowego układu odzieży ważną rolę odgrywa tzw. opór cieplny kontaktowy [61 – 64]. W przestrzeniach na styku dwóch powierzchni, powstałych w wyniku nierówności stykających się powierzchni, znajduje się powietrze, które jest izolatorem cieplnym. Ponadto, na skutek nierówności, stykające się powierzchnie nie przylegają do siebie na całym obszarze styku. Zatem przepływ ciepła na skutek przewodzenia przez materiał włóknisty nie odbywa się na całej powierzchni, lecz jest ograniczony do miejsc kontaktu (rys. 2.41).



Rys. 2.41. Interpretacja oporu cieplnego kontaktowego [61, 62]

Geometryczna struktura powierzchni materiałów włókienniczych wpływa również na wyniki pomiaru oporu cieplnego przy zastosowaniu płytowych metod pomiaru, jak np. przyrząd Alambeta [50, 53, 62, 65 - 67]. W metodach tych próbkę badanego materiału umieszcza się pomiędzy dwiema płytami, rejestrując przepływ energii między płytą ciepłą i

zimną poprzez materiał. Na skutek nierównomierności powierzchni badanego materiału, pomiędzy powierzchniami materiału, a powierzchniami płyt pomiarowych występują przestrzenie wypełnione powietrzem. Opór cieplny powietrza zamkniętego w przestrzeniach pomiędzy mierzonym materiałem, a płytami pomiarowymi jest również rejestrowany przez przyrząd i wpływa na ostateczne wyniki.

Wpływ geometrycznej struktury powierzchni na komfort termo-fizjologiczny dotyczy również aspektu odprowadzania potu z powierzchni skóry użytkownika odzieży. Pocenie się jest naturalnym mechanizmem termoregulacji organizmu człowieka. Pot wydzielany jest w postaci pary i odprowadzany jest z przestrzeni pododzieżowej poprzez materiał odzieży do otaczającego powietrza. Jest to możliwe dzięki porowatości materiałów włókienniczych. Właściwością, która determinuje odprowadzanie potu z przestrzeni pododzieżowej, jest opór pary wodnej [50, 53, 68 – 70]. Opór ten jest rutynowo wyznaczany za pomocą metody zaizolowanej cieplnie pocącej się płyty zwanej modelem skóry. Jednakże ocena materiałów włókienniczych pod względem oporu pary wodnej jest niewystarczająca do pełnego scharakteryzowania tych materiałów i wykonanej z nich odzieży pod względem ich zdolności do odprowadzania potu. Przy intensywnym poceniu się, wynikającym np. z intensywnego wysiłku fizycznego, odprowadzanie par potu przez odzież może być niewystarczające. Część par potu pozostaje w przestrzeni pododzieżowej i skrapla się na powierzchni skóry użytkownika odzieży. W takiej sytuacji, w celu zapewnienia komfortu fizjologicznego, niezbędne jest odprowadzanie skroplonego potu ze skóry użytkownika. To pociąga za sobą konieczność oceny materiałów włókienniczych pod względem transportu potu w postaci płynu.

Jednym z czynników decydujących o zdolności materiałów włókienniczych do transportu płynnej wilgoci jest zwilżalność powierzchni. Miarą zwilżalności jest tzw. kąt zwilżania. Jest to kąt, jaki tworzy styczna do powierzchni kropli płynu osadzonej na powierzchni ciała stałego, w punkcie styku trzech faz: stałej, ciekłej i gazowej. Kąt zwilżania informuje jak dobrze ciecz rozprowadza się po powierzchni materiału. Chropowatość powierzchni materiału włókienniczego wpływa na kąt zwilżania (rys. 2.42), a tym samym na zdolność materiału do transportu płynnej wilgoci [71].



Rys. 2.42. Zwilżalność powierzchni o różnej chropowatości [72]

Geometryczna struktura powierzchni wpływa także na właściwości technologiczne materiałów włókienniczych, m.in., na proces powlekania materiałów [73, 74], a także na tarcie w układzie tkanina- tkanina. To wpływa na zachowanie się tkani w procesach technologicznych [75] lecz także na swobodę ruchów podczas użytkowania wielu warstw odzieży.

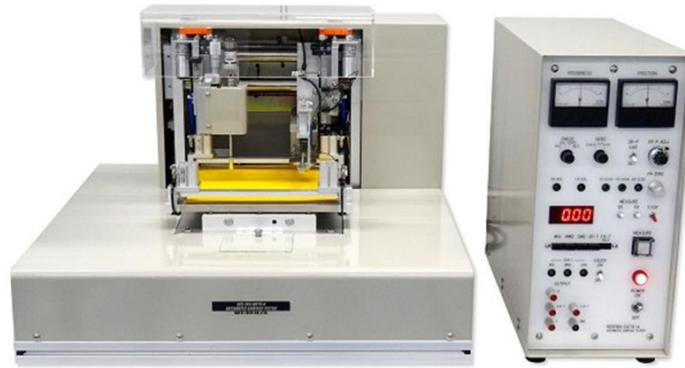
2.5. Pomiar struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych

Istnieje wiele metod i przyrządów pomiarowych stosowanych w ocenie chropowatości powierzchni materiałów włókienniczych [76]. Podobnie, jak w przypadku pomiaru innych obiektów, metody pomiaru struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych można podzielić na metody:

- stykowe (kontaktowe),
- bezstykowe (bezkontaktowe).

Kontaktowe metody pomiaru chropowatości powierzchni materiałów włókienniczych

Najbardziej rozpowszechnioną i uznaną metodą pomiaru chropowatości materiałów włókienniczych jest wspomniana wcześniej metoda stykowa wykorzystana w przyrządzie KES-FB4 (rys. 2.43).



Rys. 2.43. Przyrząd KES-FB4

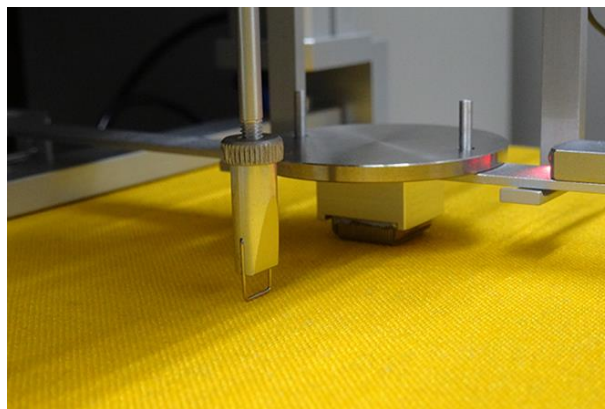
Źródło: <https://www.bing.com/>

Przyrząd ten umożliwia zarówno pomiar chropowatości powierzchni jak i tarcia [54, 87- 79].

Za pomocą przyrządu KES-FB4 wyznacza się:

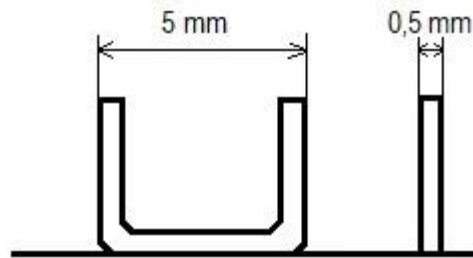
- średnią wartość współczynnika tarcia – *MIU*,
- odchylenie przeciętnego współczynnika tarcia – *MMD*,
- odchylenie przeciętne grubości próbki – *SMD*.

KES-FB4 wyposażony jest w dwa czujniki. Jeden z nich służy do pomiaru chropowatości, drugi – do pomiaru tarcia. Czujnik do pomiaru chropowatości (rys. 2.44) jest wykonany ze stalowego drutu i ma kształt litery C (rys. 2.45).



Rys. 2.44. Czujnik do pomiaru chropowatości w przyrządzie KES – FB 4

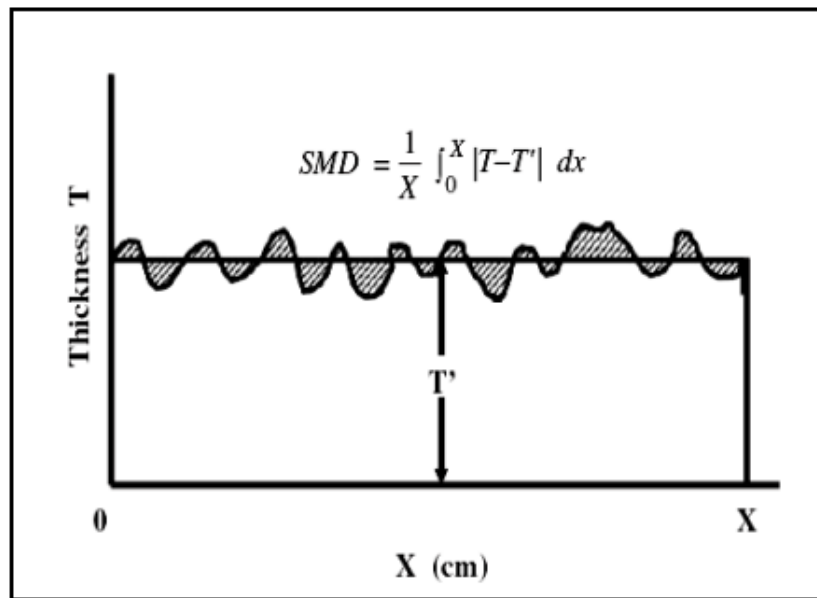
Źródło: <https://www.bing.com/>



Rys. 2.45. Kształt i wymiary detektora służącego do pomiaru chropowatości

Źródło: opracowanie własne

Wskaźnik *SMD* jest miarą chropowatości materiałów włókienniczych. Jego interpretację przedstawiono na rys. 2.46.



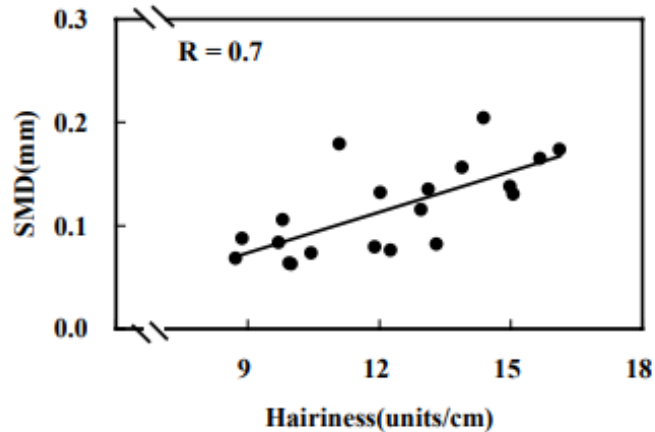
Rys. 2.46. Interpretacja parametru *SMD* wyznaczanego z pomocą przyrządu KES-FB4

[76]

Badania chropowatości powierzchni za pomocą przyrządu KES-FB4 prowadziło wielu naukowców [80 – 86]. Vassiliadis zastosował pomiary za pomocą przyrządu KES-FB4 do analizy strukturalnej tkanin [80]. Dane uzyskane z KES-FB4 zostały poddane przetwarzaniu za pomocą technik cyfrowych w celu uzyskania charakterystyki widmowej sygnału. Na podstawie przeprowadzonych badań Vassiliadis stwierdził, że składniki o większej mocy, a tym samym dominujące w otrzymanym widmie, dostarczają przydatnych

informacji o strukturze tkaniny i wpływają na ostateczne odczuwanie tkanin pod względem cech sensorycznych.

Park i in. [81] stwierdzili silną zależność korelacyjną pomiędzy parametrem SMD otrzymywanym za pomocą przyrządu KES-FB 4, a włochatością tkanin o splocie płóciennym i skośnym przeznaczonych na męskie garnitury. (rys. 2.47).

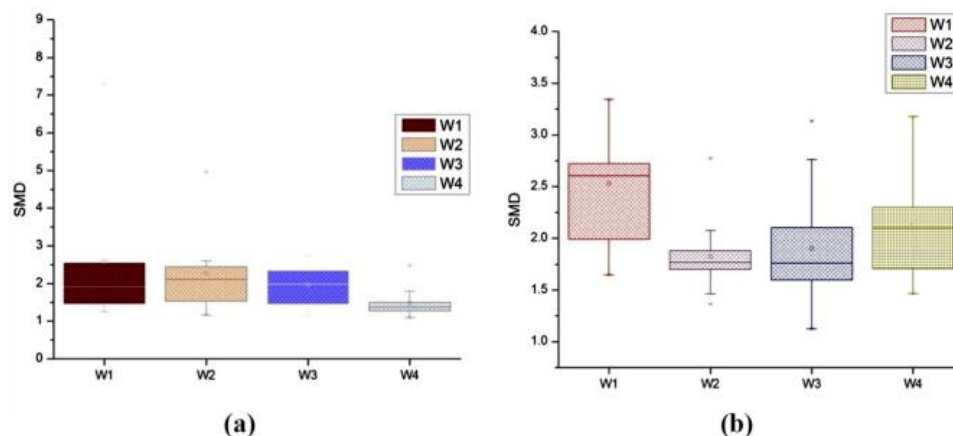


Rys. 2.47. Zależność pomiędzy chropowatością (SMD z przyrządu KES-FB4) a włochatością [81]

Z uwagi na fakt, że metoda kontaktowa może prowadzić do zniekształcania powierzchni mierzonej tkaniny, zwłaszcza w zakresie jej włochatości, Park i in. prowadzili jednocześnie badania za pomocą metody bezstykowej z wykorzystaniem skanowania laserowego oraz przetwarzania obrazu w programie MATLAB. Potwierdzili przydatność zastosowanej metody do pomiaru chropowatości tkanin, a wyniki uzyskane za pomocą metody bezkontaktowej w niewielkim stopniu były lepiej skorelowane ($R = 0,72$) z włochatością powierzchni tkanin, niż wyniki uzyskane za pomocą przyrządu KES-FB4.

Atalie i Rotich [82] badali wpływ parametrów włókien bawełny na właściwości związane z komfortem sensoryczny tkanin bawełnianych. Badali tkaniny wykonane z włókien bawełny charakteryzujących się różną wartością wskaźnika Micronaire (od 3,85 do 4,25). Stwierdzili, że tkanina wykonana z bawełny o najwyższej wartości wskaźnika Micronaire (rys. 2.48), wynoszącym 4,25, charakteryzuje się znacznie niższą

chropowatością w kierunku osnowy, niż pozostałe tkaniny W kierunku wątku nie stwierdzili jednoznacznej tendencji zależności chropowatości od wartości wskaźnika Micronaire.



Rys. 2.48. Chropowatość tkanin bawełnianych wykonanych z włókien bawełny o różnej wartości wskaźnika Micronaire; a) w kierunku osnowy, b) w kierunku wątku [82]

Kolcavova Sirkova badała grubość i chropowatość powierzchni tkanin w funkcji ich parametrów konstrukcyjnych. W badaniach chropowatości zastosowała przyrząd KES-FB4. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdziła, że chropowatość tkaniny zależy od splotu i liczby pojedynczych porów w raporcie splotu, a także od liczności przędz oraz nierównomierności grubości przędzy [85].

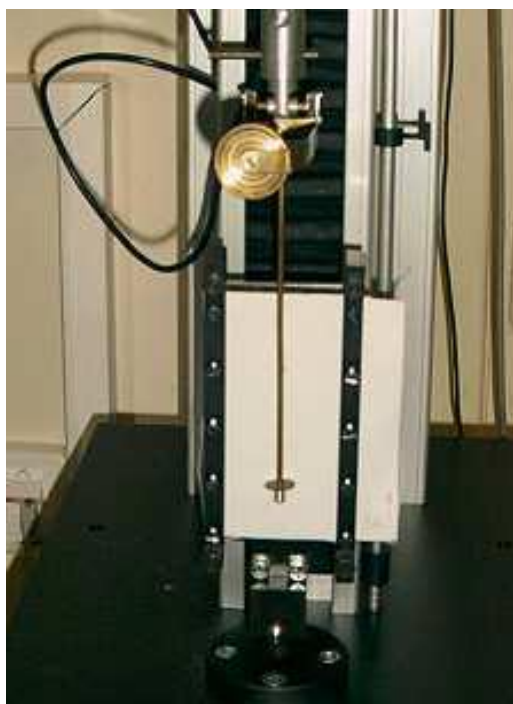
Sürala i in. [86] zastosowali przyrząd KES-FB 4 do pomiaru tkanin poliestrowych. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzili, że istnieje związek między chropowatością, a właściwościami tarcia. Wykazali, że wzrost liczności wątku powoduje spadek chropowatości tkanin. Badając zależności między wartościami tarcia i chropowatości, wykazali statystycznie istotne i silne korelacje zarówno dla tkanin bawełnianych, jak i poliestrowych.

Matusiak i Bajzik zastosowali przyrząd KES-FB4 do pomiaru chropowatości tkanin gofrowanych [78]. W wyniku przeprowadzonych badań zidentyfikowali ograniczenia metody w odniesieniu do pomiaru tkanin gofrowanych i innych tkanin z reliefem. Wymiary czujnika w przyrządzie KES-FB4 (rys. 2.45) sprawiają, że tkaniny o rozwiniętej topografii powierzchni mogą nie być dokładnie zbadane, gdyż czujnik nie jest w stanie wykryć

wszystkich nierówności powierzchni, a zwłaszcza tych wgłębień, których rozmiar jest mniejszy od rozmiaru czujnika. W takiej sytuacji czujnik przemieści się nad tymi wgłębieniami. Ponadto stwierdzili, że badania chropowatości tkanin w kierunku wątku tkanin gofrowanych mogą być obarczone grubym błędem, gdyż podczas pomiaru wystąpiły problemy z przemieszczaniem się czujnika w kierunku wątku.

Prowadzono również badania, które miały na celu porównanie wyników pomiaru chropowatości za pomocą przyrządu KES-FB 4 z innymi metodami, w tym z metodami bezstykowymi [83, 84].

Militky i Bajzik opracowali technikę pomiarową, którą zastosowali w pomiarach chropowatości odzieży ochronnej odpornej na ciepło [87]. Metoda polega na rejestrowaniu ruchu metalowego ostrza na powierzchni materiału włókienniczego i zapisie wymaganego obciążenia w wyniku zmian położenia ostrza (rys. 2.49). Ciągły pomiar obciążenia wykonano na maszynie wytrzymałościowej TIRATEST, która pokazuje zmiany siły powierzchniowej zmieniającej się przy różnych odległościach ostrza od linii odniesienia.

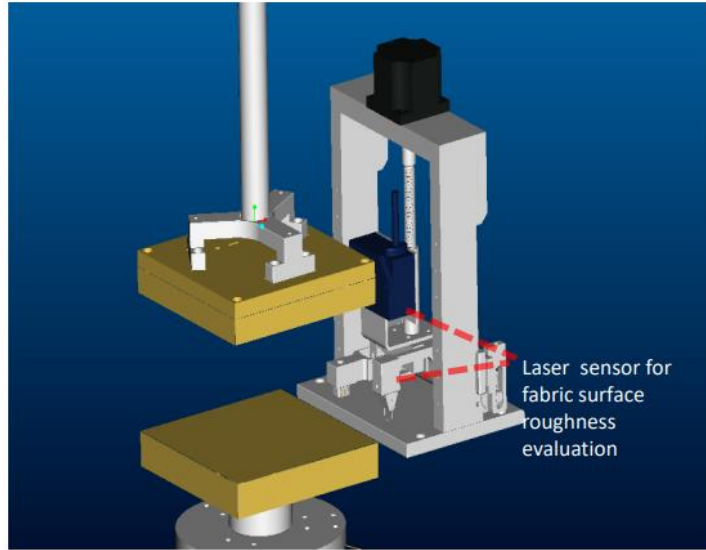


Rys. 2.49. Przyrząd zastosowany przez Militky'ego i Bazika do pomiaru chropowatości metodą kontaktową [87, 88]

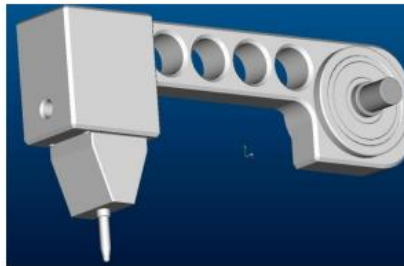
Najnowszym rozwiązaniem, które umożliwia pomiary chropowatości powierzchni materiałów włókienniczych jest przyrząd FTT (Fabric Touch Teser) firmy SDL Atlas (rys. 2.50) [89 – 92]. Podobnie, jak przyrząd KES-FB 4, przyrząd FTT został opracowany w celu zobjektywizowanego pomiaru parametrów chwytu materiałów włókienniczych. Przyrząd FTT jest jednomodułowy i umożliwia pomiar szeregu właściwości. Przyrząd wyposażony jest w 5 rodzajów czujników do pomiaru: strumienia ciepła, temperatury, nacisku, tarcia i przemieszczenia. Pomiar chropowatości odbywa się metodą kontaktową. Próbką badanego materiału przemieszcza się, podczas gdy sensor rejestruje w sposób bezkontaktowy, z zastosowaniem lasera, ruch pionowy czujnika (rys. 2.51). Czujnik tarcia ma kształt ostrza (rys. 2.52). Zasadę pomiaru chropowatości powierzchni za pomocą przyrządu FTT przedstawiono na rys. 2.53.



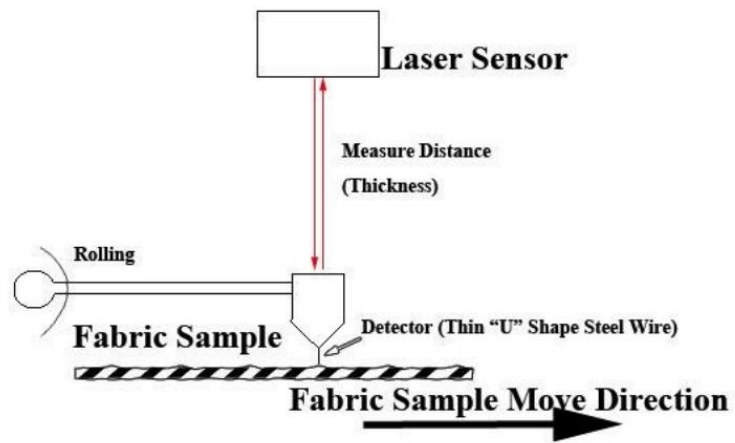
Rys. 2.50. Przyrząd FTT firmy SDL Atlas [90]



Rys. 2.51. Zasada pomiaru chropowatości za pomocą przyrządu FTT [92]

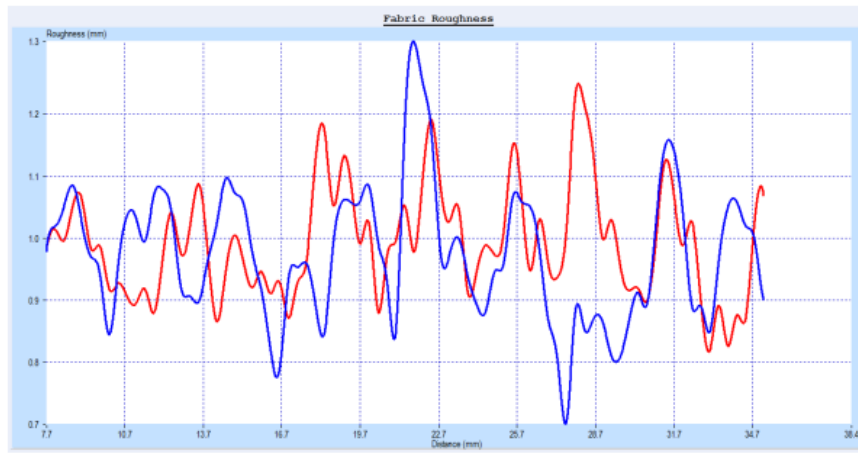


Rys. 2.52. Czujnik chropowatości przyrządu FTT [92]



Rys. 2.53. Zasada pomiaru chropowatości za pomocą przyrządu FTT [92]

Przykładowy wykres z pomiaru chropowatości materiału włókienniczego za pomocą przyrządu FTT przedstawiono na rys. 2.54.



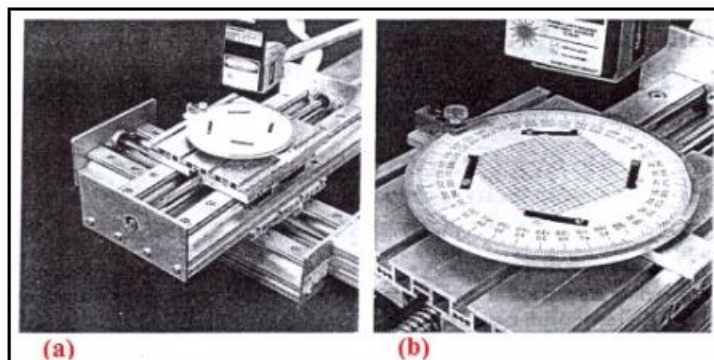
Rys. 2.54. Przykładowy wykres z pomiaru chropowatości materiału włókienniczego za pomocą przyrządu FTT: linia czerwona – w kierunku osnowy, linia niebieska – w kierunku wątku [92]

Bezkontaktowe metody pomiaru chropowatości powierzchni materiałów włókienniczych

Omówione wcześniej ograniczenia metod kontaktowych pomiaru chropowatości oraz fakt, że metody kontaktowe dostarczają zazwyczaj wyniki w postaci jednego parametry (Ra), sprawiły, że naukowcy zajmujący się zagadnieniem jakości powierzchni materiałów włókienniczych zwrócili się w kierunku metod bezkontaktowych [76]. Ogólnie metody bezkontaktowe stosowane w pomiarach materiałów włókienniczych można podzielić na metody:

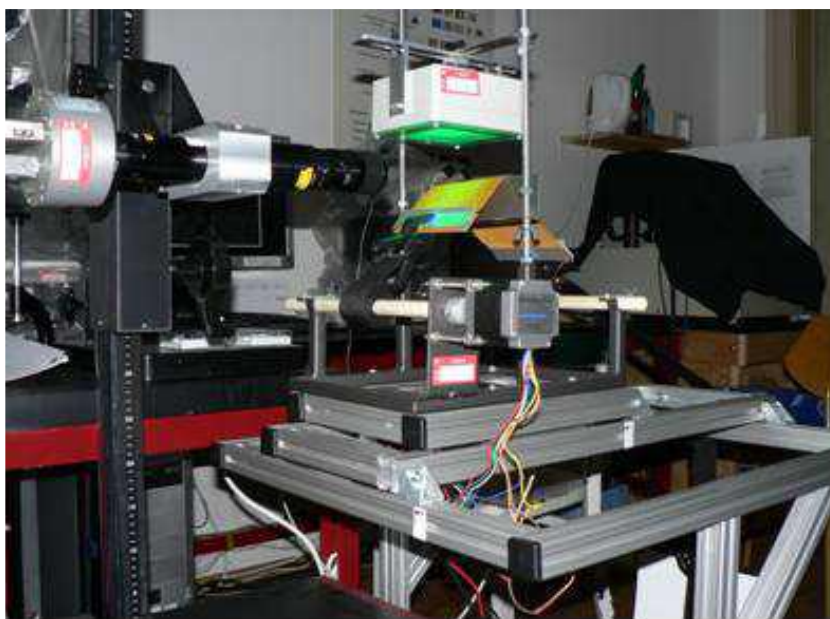
- optyczne,
- metody oparte o analizę obrazu i wymiar fraktalny [76].

Pierwszą bezkontaktową metodę przedstawili w 1993 r. Ramgulam, Amirbayat i Porat [93]. Opracowane przez nich urządzenie (rys. 2.55) jest w stanie zmierzyć chropowatość powierzchni tkanin z wykorzystaniem techniki laserowej.

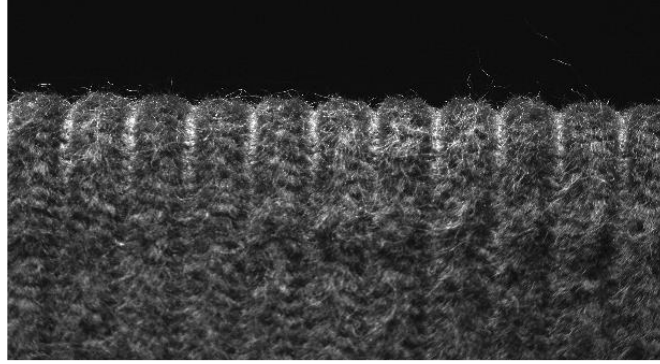


Rys. 2.55. Optyczna metoda pomiaru struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych: a) widok ogólny pierwszego urządzenia optycznego, b) sposób mocowania próbki [93]

Militky i in. [94] opisali system RCM pozwalający na uzyskanie zestawu obrazów profilu powierzchni tkaniny. System składa się z kamery CCD, systemu oświetlenia i specjalnego uchwyty na próbki sterowanego przez komputer (rys. 2.56). Opracowany system został wykorzystany m.in. do badań tkanin przeznaczonych na kordy opon (rys. 2.57).

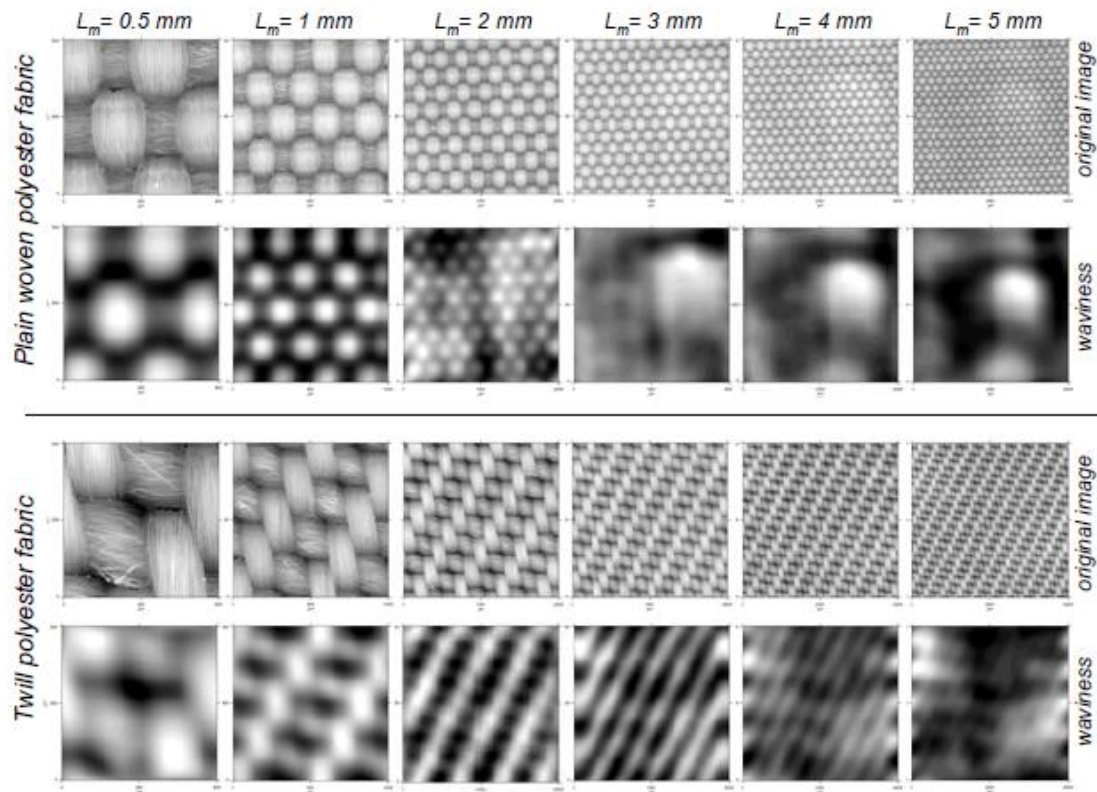


Rys.2.56. System RCM do pomiaru profilów powierzchni tkanin [88]



Rys. 2.57. Profil chropowatości w kierunku poprzecznym badanej tkaniny uzyskany za pomocą systemu RCM [88]

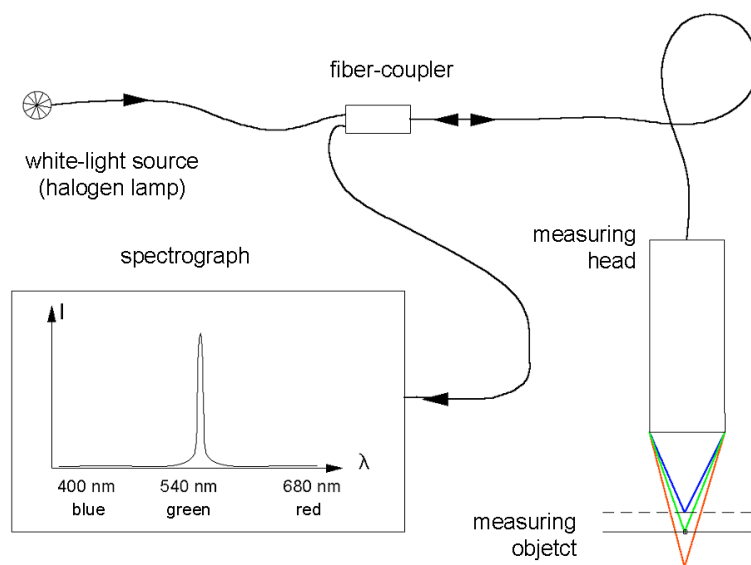
Calvimontes i in. [95] zastosowali badania struktury geometryczne powierzchni tkanin metodą optyczną do oceny wpływu topografii powierzchni tkanin na ich zwilżalność. Naukowcy wyznaczyli parametr falistości przy różnych wartościach filtra λ_c (rys. 2.58).



Rys. 2.58. Oryginalne i filtrowane obrazy powierzchni tkanin poliestrowych w funkcji długości odcinków elementarnych [95]

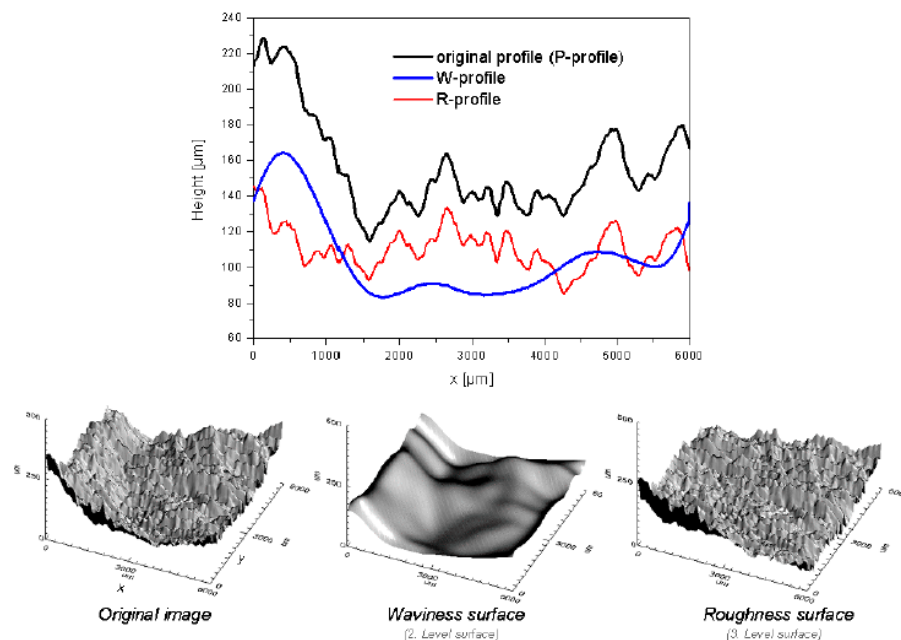
Autorzy wykazali, że topograficzna charakterystyka tkanin jest silnie zależna od ich parametrów konstrukcyjnych, takich jak rodzaj i masa liniowa włókien, masa liniowa przędzy, liczność przędzy oraz rodzaj splotu. Cechy te mają silny wpływ na właściwości zwilżające tkanin i w wielu przypadkach pozwalają je kontrolować [96]. Ponadto wykazali, że badania topografii powierzchni tkanin oraz wykorzystanie koncepcji długości elementarnej pozwala skutecznie charakteryzować powierzchnię i analizować korelację między topografią a zwilżalnością.

Calvimontes i in. [96] prowadzili też badania nad opracowaniem systematyki i procedury topograficznej charakteryzacji materiałów kompozytowych w celu ich badania i identyfikacji wpływu warunków produkcji na jakość powierzchni kompozytów. Naukowcy zastosowali chromatyczną mikroskopię konfokalną (rys. 2.59) do pozyskania obrazów powierzchni badanych kompozytów.



Rys. 2.59. Schematyczne przedstawienie zasady pomiaru chromatycznej mikroskopii konfokalnej [96]

Ponownie, jak w poprzednich badaniach [95] analizowali dobór wartości filtrów w celu oddzielenia komponentów chropowatości i falistości (rys. 2.60).



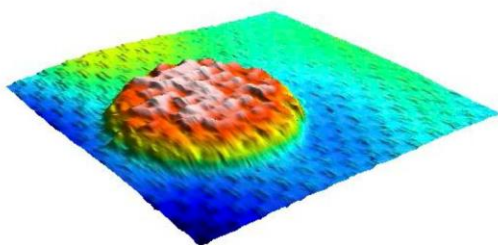
Rys. 2.60. Falistość i chropowatość powierzchni uzyskano stosując filtrowanie FFT do oryginalnych danych topograficznych [96]

Inną metodą bezkontaktową stosowaną do badania topografii materiałów włókienniczych jest wysokorozdzielczy system profilowania powierzchni 3D TALYSURF CLI-500 (rys. 2.61)

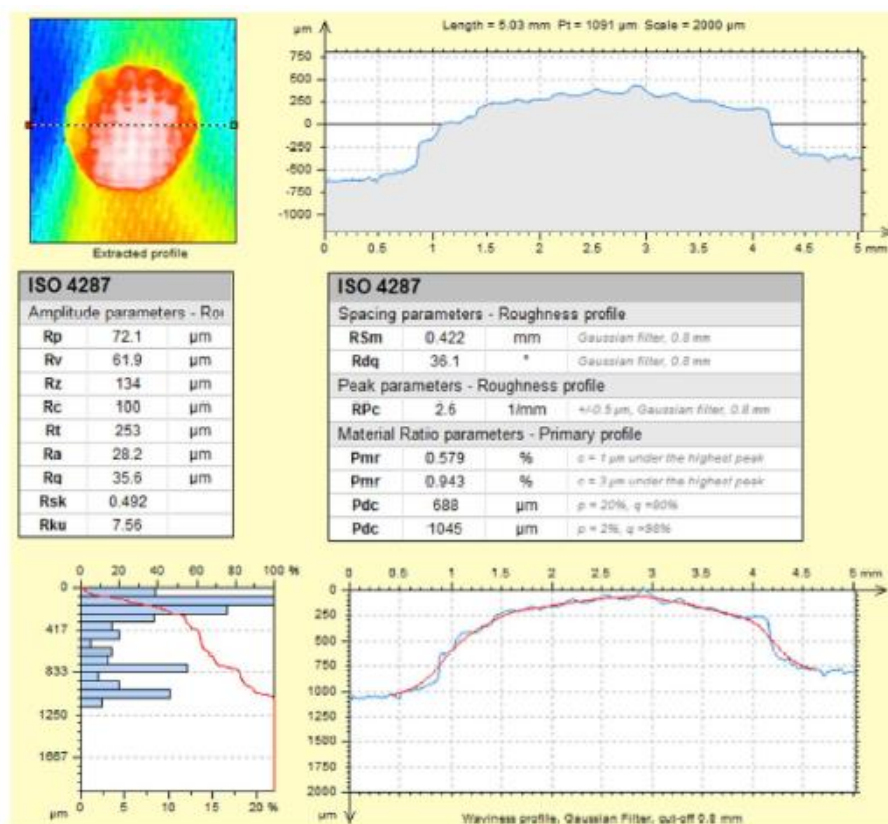


Rys. 2.61. Profilometr Talysurf [97]

Przyrząd ten został m.in. zastosowany w badaniach zmian struktury powierzchni membran z nanowłókien [98]. Profilometr Talysurf wykorzystano również w badaniach metek odzieżowych z nadrukowanymi symbolami pisma Braille'a [99]. Przykładowe skan symbolu na tkaninie satynowej oraz wyniki analizy topografii powierzchni za pomocą profilometru Talysurf 500 przedstawiono poniżej (rys. 2.62, 2.63).

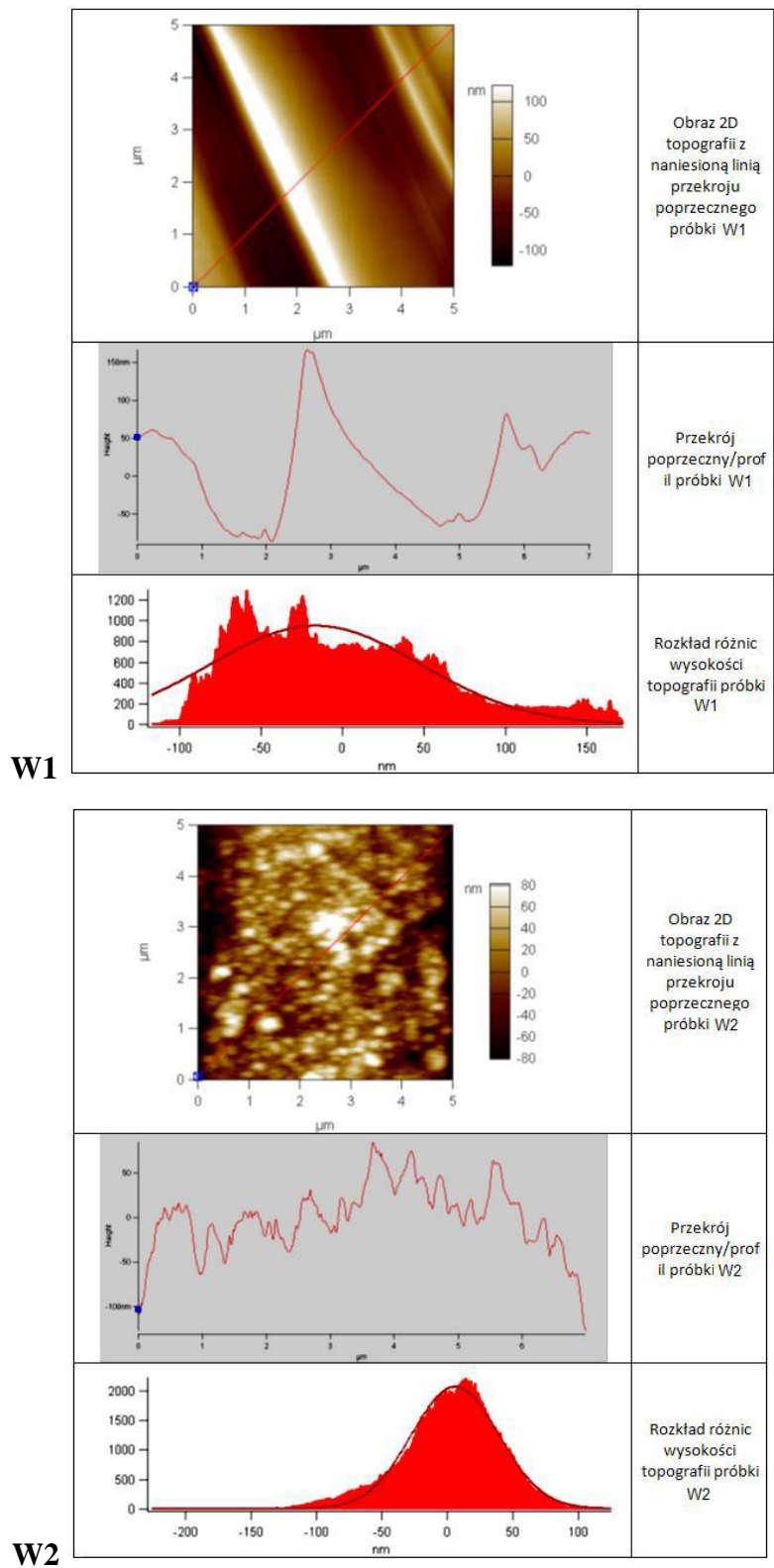


Rys. 2.62. Zeskanowana za pomocą profilometru Talysurf powierzchnia tkaniny satynowej z symbolem pisma Braille'a [99]



Rys. 2.63. Przykład analizy chropowatości w oparciu o wyniki z profilometru Talysurf [99]

Małek i inni [100] zastosowali mikroskop sił atomowych MFP 3D Bio do pomiaru topografii powierzchni tkanin auksetycznych.



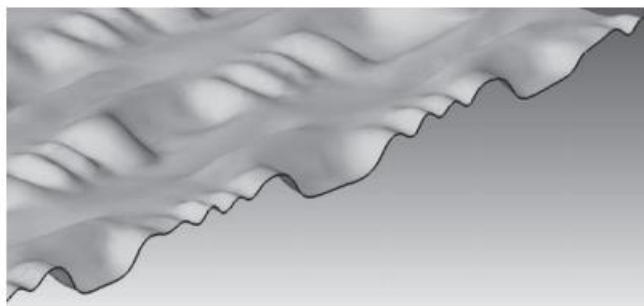
Rys. 2.64. Analiza chropowatości powierzchni próbki za pomocą AFM: W1 – tkanina bez warstwy, W2 – tkanina z warstwą tytanu [100]

Analizy danych dokonano z użyciem dedykowanego programu IgorPro. Uzyskane w ramach badań obrazy (rys. 2.64) pozwoliły na ocenę procesu napyłania warstwy tytanu na powierzchnię badanej tkaniny. Zastosowanie mikroskopii sił atomowych do badań struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych jest ograniczone z uwagi na bardzo małą powierzchnię, która może być poddana badaniu.

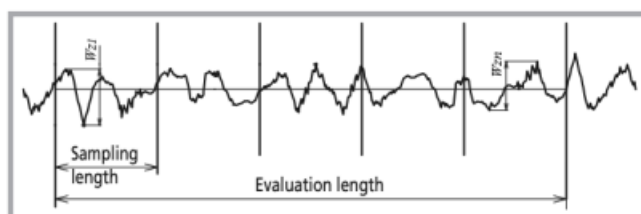
Trójwymiarowe skanowanie powierzchni tkanin za pomocą lasera 3D zastosowali Matusiak i Frączzak [102]. Badali oni tkaniny gofrowane w celu opracowania metody skwantyfikowania efektu gofrowania. W swoich badaniach wykorzystali ramię pomiarowe „CimCore Infinity 2.0” firmy ROMER, wyposażone w głowicę laserową V4 i firmy Perceptron (rys. 2.64). Wyniki skanowania poddali dalszej obróbce z celu uzyskania obrazów powierzchni skanowanych tkanin (rys. 2.65). Następnie, na uzyskanych powierzchniach utworzyli profile. Jako miarę efektu gofrowania zaproponowali wskaźnik W_z – całkowita wysokość profilu (rys. 2.66).



Rys. 2.64. *Ramię pomiarowe CimeCore Infinity 2.0 [101]*

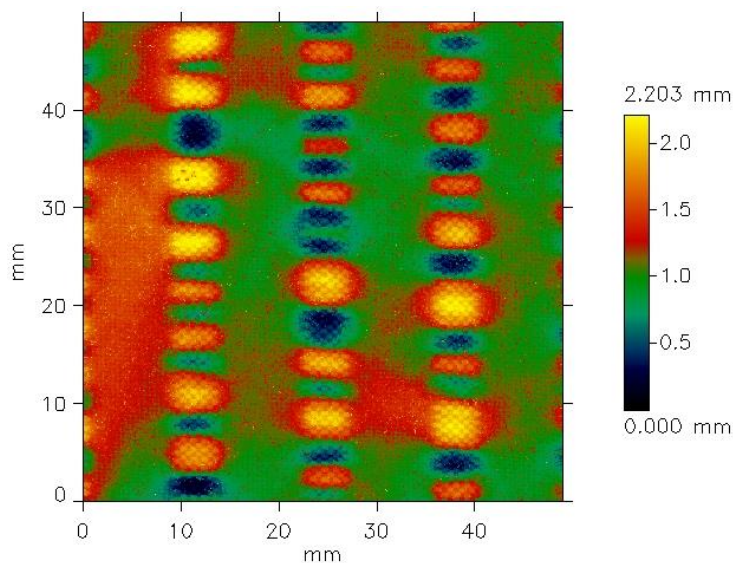


Rys. 2.65. Profil wzdłuż paska gofrowanego tkani gofrowanych poddany analizie przez Matusiak i Frączzaka [101]



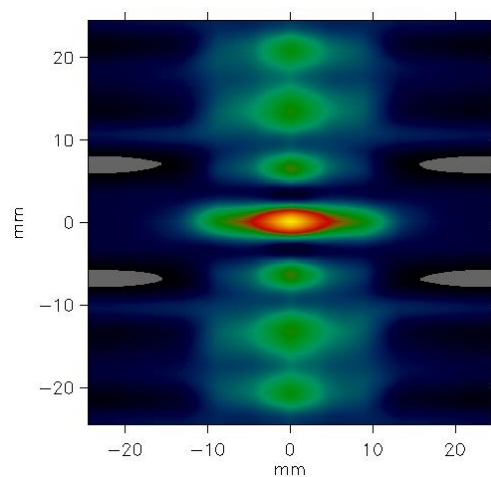
Rys. 2.66. Interpretacja parametru W_z [101]

W celu oceny efektu gofrowania tkanin gofrowanych Matusiak wykorzystwała również profilometr FRT MicroSpy® Profile firmy FRT the art of metrology™ [102, 103]. Za pomocą profilometru uzyskała obrazy powierzchni badanych tkanin (rys. 2.67).



Rys. 2.67. Przykładowy obraz tkaniny gofrowanej uzyskany za pomocą profilometru MicroSpy® Profile [102]

Dane uzyskane z profilometru przetworzone zostały w specjalistycznym programie Mark III również firmy FRT the art of metrology™. W ocenie topografii powierzchni badanych tkanin gofrowanych Matusiak wykorzystała m.in. funkcję autokorelacji (rys. 2.68), histogram wysokości punktów na powierzchni badanych tkanin oraz szereg innych opcji dostępnych w zastosowanym oprogramowaniu.



Rys. 2.68. Przykładowy wykres funkcji autokorelacji dla raportu tkaniny gofrowanej [102]

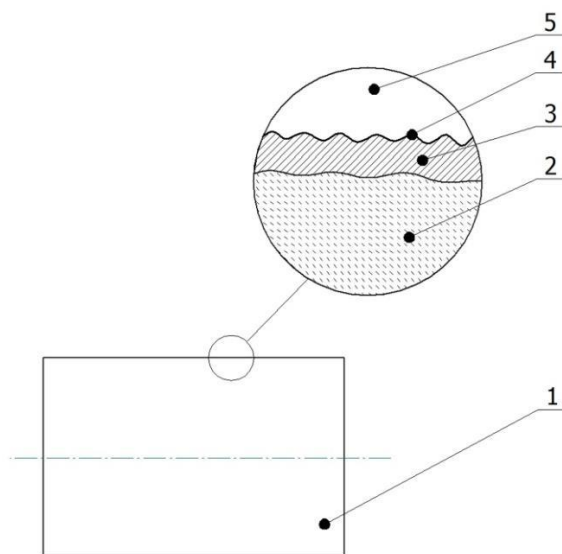
2.6. Podsumowanie przeglądu literatury

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury w zakresie struktury geometrycznej powierzchni i jej pomiaru można stwierdzić, co następuje:

- struktura geometryczna powierzchni jest bardzo ważną cechą obiektów, gdyż wpływa na szereg istotnych cech użytkowych, takich jak zwilżalność, odbicie światła, odporność na tarcie, izolacyjność cieplna,
- pomiary struktury geometrycznej powierzchni mogą być wykonywane metodami stykowymi i bezstykowymi, przy czym metody bezstykowe znacznie precyzyjniej odzwierciedlają rzeczywistą geometrię powierzchni mierzonych obiektów niż metody stykowe, ponadto dostarczają znacznie więcej informacji na temat mierzonej powierzchni,
- do pomiarów chropowatości powierzchni materiałów włókienniczych najczęściej stosowany jest przyrząd KES-FB4. Przyrząd ten dokonuje pomiaru chropowatości powierzchni metodą stykową i dostarcza informacji na temat wartości jednego wskaźnika – *SMD* - odchylenie przeciętne grubości próbki od średniej grubości,
- metody bezkontaktowe również są stosowane w pomiarach topografii powierzchni materiałów włókienniczych, nie są to jednak metody rozpowszechnione; stosuje się różne przyrządy, brak jest opracowanych i uznanych procedur przygotowania prób do badań i wykonania badań struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych za pomocą metod bezstykowych,
- brak jest również wytycznych odnośnie wielkości filtrów stosowanych w metodach optycznych do oddzielenia składowych krótko- i długofalowych,
- wskazane jest podjęcie usystematyzowanych badań w zakresie wykorzystania metod bezstykowych do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych, w tym analizy przydatności poszczególnych wskaźników i funkcji uzyskiwanych w badaniach bezstykowych struktury geometrycznej powierzchni do oceny przydatności użytkowej materiałów włókienniczych.

3. Rozważania teoretyczne

Materiały włókiennicze różnią się pod wieloma względami od innych materiałów i elementów poddawanych standardowo badaniom w zakresie geometrycznej struktury powierzchni za pomocą metod bezkontaktowych. Wykorzystanie metod bezkontaktowych optycznych jest rozpowszechnione w badaniu elementów maszyn, zwłaszcza elementów łożysk, materiałów ceramicznych, w przemyśle motoryzacyjnym w badaniach powierzchni lakierowanych itp. We wszystkich wymienionych obszarach badaniom poddawane są elementy (obiekty) lite, o odpowiednim i stabilnym kształcie, wykonane ze stali, metali nieżelaznych czy tworzyw sztucznych. W elementach tych wyodrębnia się rdzeń, warstwę powierzchniową i powierzchnię (rys. 3.1).

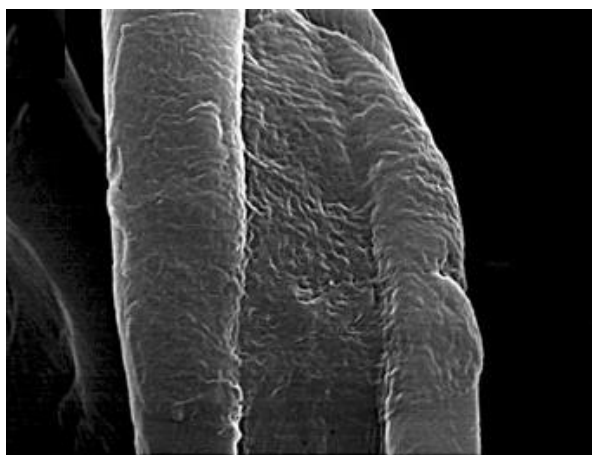


Rys 3.1. Określenie warstwy wierzchniej: 1 – przedmiot, 2 – rdzeń, 3 – warstwa wierzchnia, 4 – powierzchnia rzeczywista, 5 – otaczający ośrodek [19, s.10]

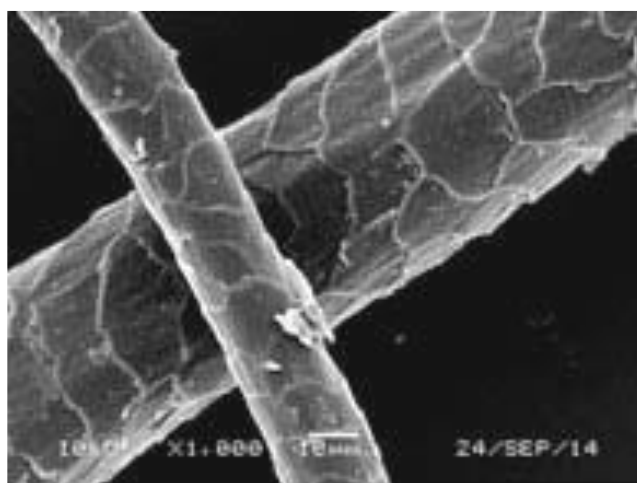
Natomiast materiały włókiennicze, takie jak tkaniny, dzianiny czy włókniny są materiałami porowatymi, wiotkimi i giętkimi, czyli o niestabilnym kształcie. Ponadto nie można w nich wyróżnić rdzenia, raczej stanowią układ złożony z warstwy powierzchniowej oraz powierzchni: górnej i dolnej. Również skala chropowatości jest inna, istotnie większa od skali chropowatości powierzchni metalowych poddanych obróbce np. szlifowania czy lakierowania, jak też powierzchni z litych tworzyw sztucznych. Wynika to z natury

materiałów włókienniczych, które wytwarzane są z włókien, w przypadku dzianin i tkanin skręconych w przędze, które następnie odpowiednio się przeplatają zgodnie ze splotem.

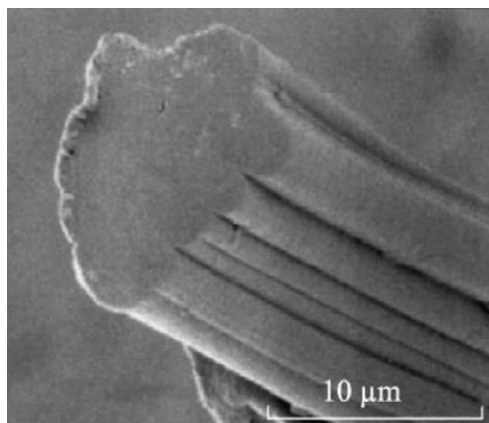
Już powierzchnia włókien jest chropowata, zwłaszcza włókien naturalnych (rys. 3.2), o chropowatość przewyższającą chropowatość elementów szlifowanych czy polerowanych. Podobnie włókna wełny (rys. 3.3.) czy włókna wiskozowe (rys. 3.4).



Rys. 3.2. Typowa morfologia powierzchni włókien bawełny [104]

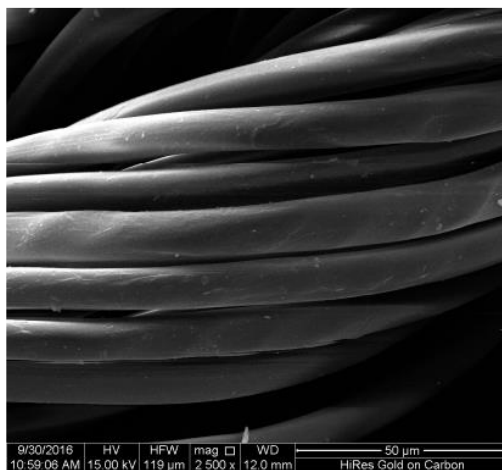


Rys. 3.3. Typowa morfologia powierzchni włókien wełny [105]



Rys. 3.4. Typowa morfologia powierzchni włókien weny [106]

Włókna syntetyczne o okrągłym kształcie przekroju poprzecznego charakteryzują się gładszą powierzchnią niż włókna naturalne. Niemniej jednak tworząc przędzę, stanowiącą strumień skręconych włókien, również są źródłem chropowatości materiałów włókienniczych (rys. 3.5).

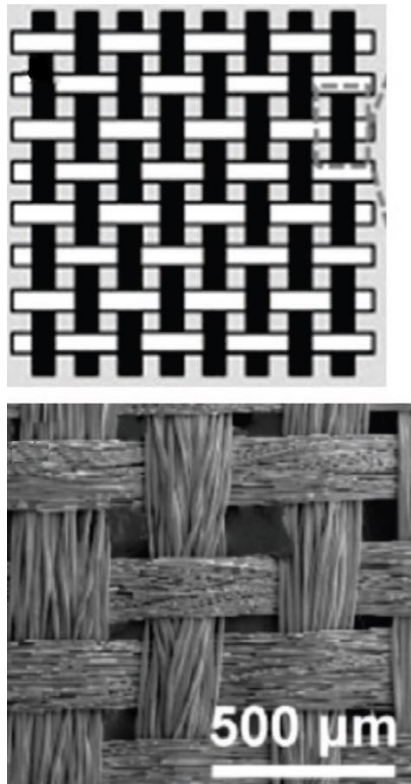


Rys. 3.5. Obraz mikroskopowy przędzy z włókien poliestrowych [107]

Również struktura materiałów włókienniczych, np. tkanin, które są obiektem badań w niniejszej pracy doktorskiej, ze swej natury jest źródłem chropowatości powierzchni. Tkaniny stanowią układ wzajemnie przeplatających się, zazwyczaj prostopadłych układów przędz: osnowy i wątku [41 – 44, 108 – 110]. Przeplatanie się przędz polega na tym, że przędze jednego układu przechodzą naprzemiennie, zgodnie ze splotem, nad, a następnie pod przędzą czy przędzami drugiego układu (rys. 3.6). To jest źródłem wgłębień i wzniesień na powierzchni tkanin.

Wszystkie te czynniki sprawiają, że struktura geometryczna powierzchni tkanina jest wielopoziomowa, a nierówności powierzchni pochodzą z różnych źródeł: nierówności powierzchni włókien, struktury powierzchni przędz oraz systematycznych nierówności wynikających z raportu splotu tkaniny.

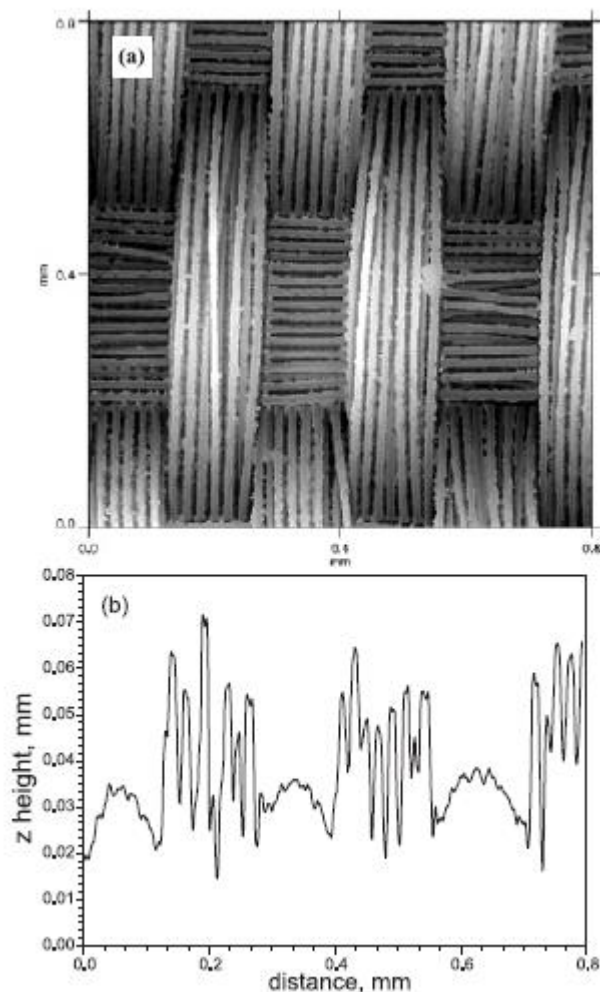
Trudno jest zatem modelować geometrycznej strukturę powierzchni tkanin ze względu na jej złożoność oraz wieloźródłowość.



Rys. 3.6. Przykład przeplatania się przędz w tkaninie: zdjęcie górne – schemat, zdjęcie dolne – obraz mikroskopowy [108]

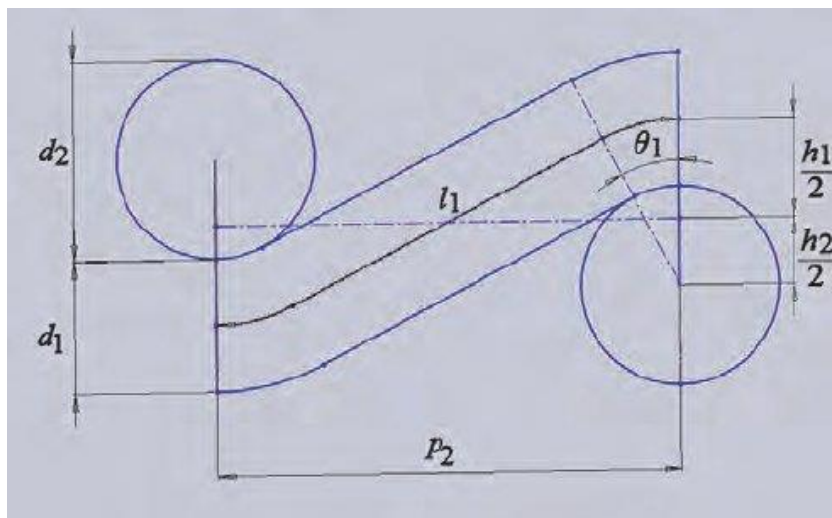
W pracach ukierunkowanych na modelowanie właściwości tkanin dokonuje się szeregu uproszczeń. Przykładowo, w modelowaniu właściwości termoizolacyjnych tkanin i układów tkanin, przędzę przyjmuje się jako zhomogenizowany monofilament o przekroju kołowym. Takie założenia eliminują część rzeczywistej chropowatości zarówno pochodzącej od włókien, jak też od struktury przędzy. Zatem nie są do przyjęcia w modelowaniu geometrycznej struktury powierzchni tkanin. Każde z wymienionych uproszczeń eliminuje elementy geometrycznej struktury powierzchni, czyli to, co jest obiektem badań w niniejszej

rozprawie. Hassan i in. [2] wykazali w swoich badaniach, że są te elementy znaczące w kształtowaniu się struktury geometrycznej powierzchni tkanin (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Obraz tkaniny oraz profil chropowatości po eliminowaniu falistości [2]

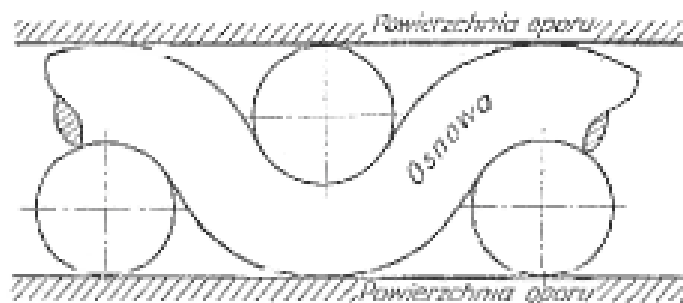
Uproszczony model przeplatania się przędz w tkaninie o splocie płóciennym przedstawił Pierce (rys. 3.8) [111]. Schemat przedstawia przekrój tkaniny płóciennej wzdłuż osi jednego układu przędz.



Rys. 3.8. Model sploty płóciennego wg Peirce'a [111]

W modelu przędze przedstawione są jako monofilamenty o przekroju kołowym. Jest on wykorzystywany do wielu obliczeń w inżynierii tkanin.

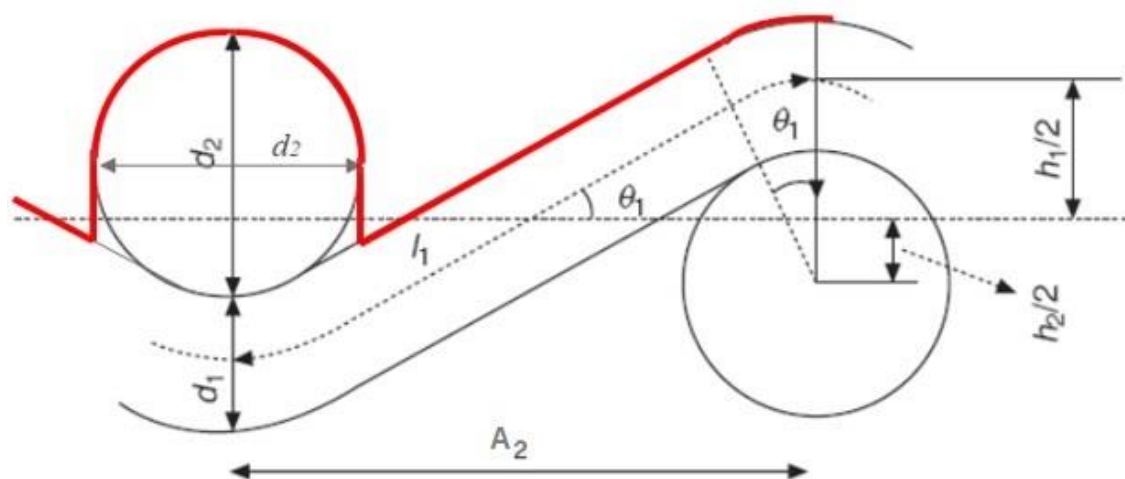
W modelu założono, że powierzchnia oporu tkaniny jest dwuukładowa, tzn., że zarówno przędze osnowy jak i wątku stawiają opór płaszczyznom równoległym do tkaniny, zgodnie z rysunkiem (rys. 3.9).



Rys. 3.9. Powierzchnie oporu tkaniny o splocie płóciennym [41]

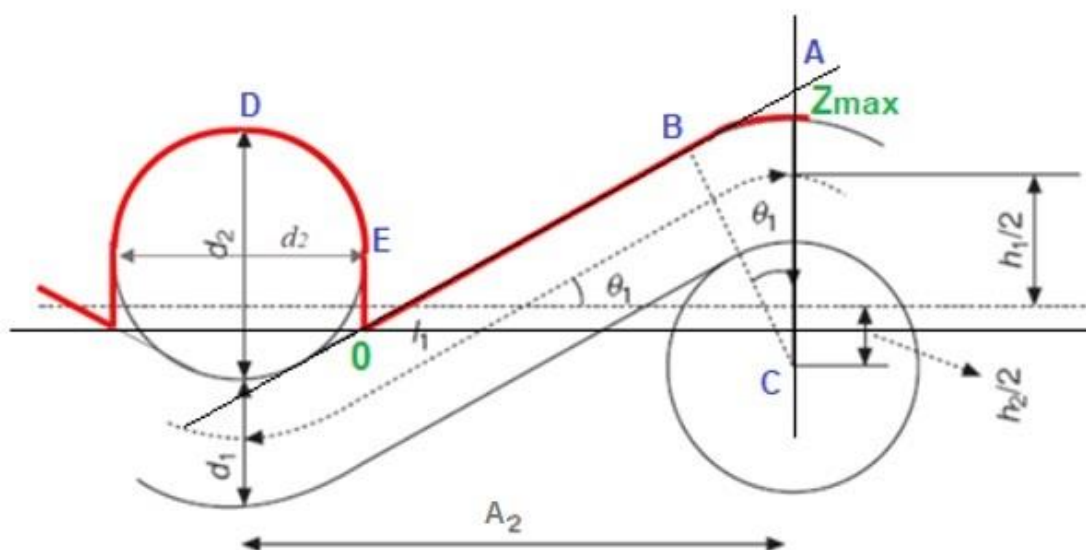
Powierzchnie oporu stanowią wyidealizowane (umowne) powierzchnie tkaniny, z których wyeliminowano wszelkie nierówności. W rzeczywistości powierzchnia tkaniny, która jest rejestrowana w pomiarze za pomocą metod optycznych, jest ukształtowana przez powierzchnię przędz i włókien wzajemnie się przeplatających. Schematycznie profil powierzchni tkaniny wzdłuż osi jednego układu przędz przedstawić można tak, jak na rysunku poniżej (rys. 3.10)

Z punktu widzenia geometrycznej struktury powierzchni tkaniny, powierzchnia tkaniny rejestrowana przez profilometr ma kształt, który na rysunku zaznaczono na czerwono (rys. 3.10). Na tym rysunku przedstawiono przekrój tkaniny o splocie najprostszym – płóciennym, gdzie przędza jednego układu przechodzi kolejno nad, a następnie pod przędzą drugiego układu. Przekrój ten jest przeprowadzony wzdłuż osi jednego układu przędz, przyjmijmy, że osnowy.



Rys. 3.10. Schematyczne przedstawienie powierzchni tkaniny na rysunku struktury tkaniny płóciennej

Punkty na powierzchni oznaczonej kolorem czerwonym, leżą na różnych wysokościach, przy czym wysokością odniesienia (wysokością zerową) jest punkt położony najniżej na zaprezentowanym przekroju. Punkt ten oznaczono symbolem 0 (rys. 3.11).



Rys. 3.11. Schematyczne przedstawienie powierzchni tkaniny na rysunku struktury tkaniny płóciennej zaznaczonymi punktami ekstremalnymi (kolorem zielonym)

Rozpatrujemy tylko połowę raportu, gdyż druga połowa stanowi odbicie lustrzane rozpatrywanego fragmentu. Po przeprowadzeniu linii pomocniczych oraz wprowadzeniu dodatkowych oznaczeń linię profilu powierzchni tkaniny w ramach połowy raportu splotu można zdefiniować jako sumę:

- łuku DE,
- odcinka prostego OB,
- łuku BZ_{max}.

Chropowość R_a , jak wcześniej wspomniano, jest definiowana jako średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowości. Średnia ta obliczana jest wzdłuż odcinka elementarnego. W analizowanym przypadku długość odcinka elementarnego odpowiada podziałce splotu A_2 , czyli odległości między osiami dwóch sąsiednich przędz. Przy przyjętym założeniu, że przekrój wykonano wzdłuż osi osnowy, podziałka A_2 odpowiada odległości między sąsiednimi nitkami wątku. Przy profilu wykonanym wzdłuż osi wątku, długość odcinka elementarnego będzie odpowiadała podziałce nitek osnowy A_1 .

Punkt 0 na rys. 3.11 odpowiada początkowi układu współrzędnych. Wartość rzędnych w punktach leżących na linii profilu chropowatości (linia czerwona) wzdłuż odcinka elementarnego zależy od średnicy wątku oznaczonej jako d_2 oraz od średnicy osnowy d_1 . Zależy również od podziałki, gdyż odległość między osiami przędz determinuje kąt opasania przędzy osnowowej wokół przędzy wątkowej – kąt Θ_1 .

Rozważając tylko profil tkaniny, powstający w miejscu przecięcia tkaniny płaszczyzną do niej prostopadłą wzdłuż osnowy, przechodzący wzdłuż osi symetrii przędzy osnowowej tkaniny o splocie płóciennym – linia czerwona – (rys. 3.10) można wstępnie zapisać zależność:

$$R_a = f(d_1, d_2, A_2) \quad (3.1)$$

gdzie:

R_a – średnie odchylenie rzędnych profilu chropowatości,

d_1 – średnica przędzy osnowowej,

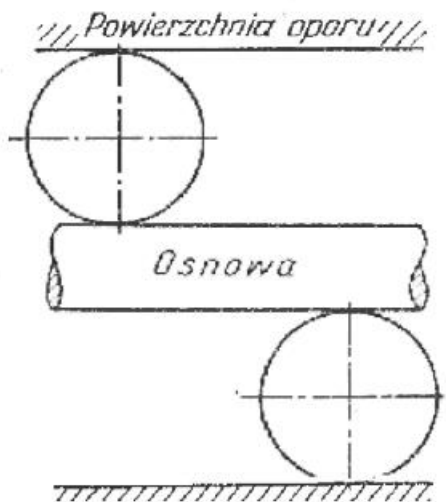
d_2 – średnica przędzy wątkowej,

A_2 – podziałka przędzy wątkowej:

$$A_2 = \frac{100}{g_2} \quad (3.2)$$

g_2 – liczność przędzy wątkowej.

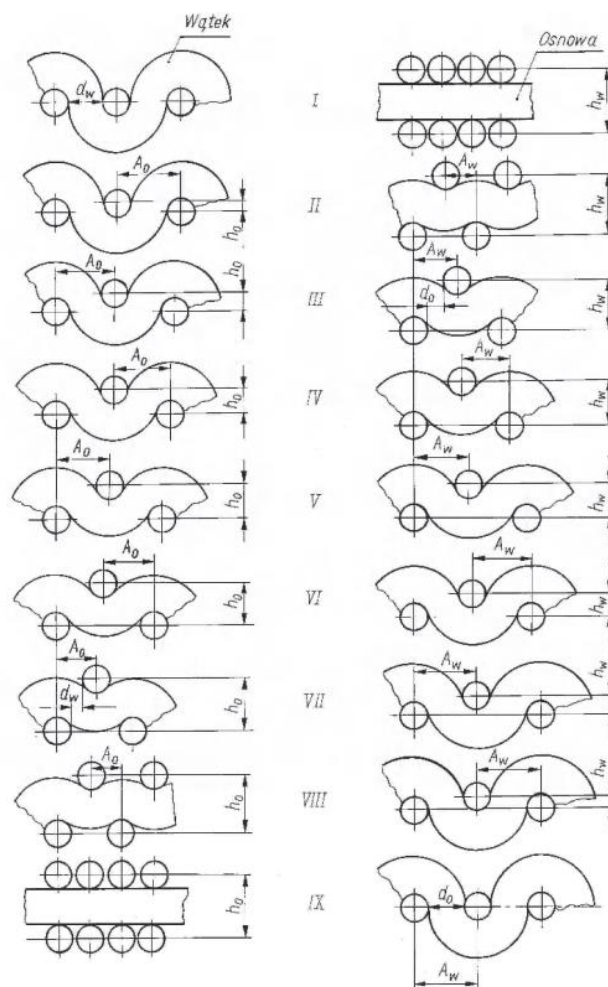
Przedstawiona geometria splotu dotyczy tkaniny o powierzchni oporu zbliżonej do powierzchni dwuukładowej, czyli opartej o oba układy przędz (rys. 3.9). W rzeczywistości mogą zachodzić różne przypadki, od powierzchni oporu dwuukładowej do jednoukładowej wątkowej, opartej o przędze wątkowe. Skrajną postać powierzchni oporu jednoukładowej wątkowej przedstawiono na rys. 3.12.



Rys. 3.12. Powierzchnia oporu jednokładowa wątkowa [41]

W rzeczywistości mogą wystąpić sytuacje pośrednie między powierzchnią oporu dwuukładową i skrajną powierzchnią jednokładową wątkową. Zależy to od relacji wzajemnych naprężeń obu układów przędz i jest kształtowane w procesie wytwarzania tkaniny na krośnie oraz wykończenia. Zależy to również od właściwości sprężystych przędz osnowy i wątku. Należy też nadmienić, że identyczne rozważania dotyczą profilu powierzchni wykonanego wzdłuż przędzy wątkowej.

W literaturze do określenia wzajemnego ułożenia przędz osnowy i wątku w kontekście powierzchni oporu używa się pojęcia fazy struktury (rys. 3.13) [41, 42]. Faza pierwsza i ostatnia są graniczne, to znaczy, że jeden z układów nitek ma wrobienie, strzałkę ugięcia i kąt opasania równe zeru, a drugi przybiera maksymalne wartości tych parametrów. Między fazami granicznymi są fazy pośrednie.

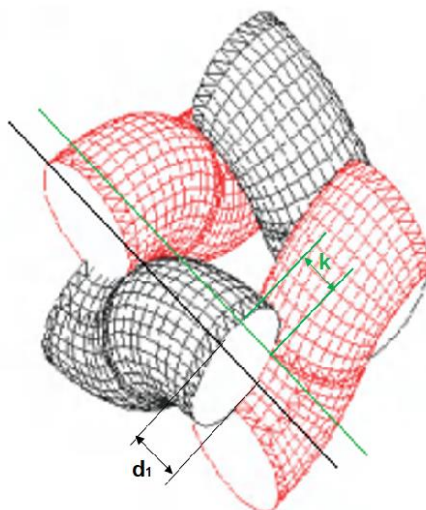


Rys. 3.13. Przypadki (fazy) struktury tkaniny o splotie płóciennym wg Nowikowa: h_o , h_w - strzałki ugięcia nitek osnowy i wątków, A_o , A_w - podziałki nitek osnowy i wątków [41]

W rzeczywistości przed wytworzeniem tkaniny na krośnie i przed jej wykończeniem, trudno jest przewidzieć fazę tkaniny. Dlatego też nie można jednoznacznie opisać za pomocą zależności matematycznej średniego odchylenia rzędnych profilu chropowatości tkaniny, nawet w sytuacji skrajnie wyidealizowanej, w której założono najprostszy splot – płócienny, kształt przekroju poprzecznego przędz w postaci koła oraz umiejscowienie profilu chropowatości wzdłuż osi symetrii przędzy jednego układu.

Na chropowatość całej powierzchni tkaniny składa się średnie odchylenie rzędnych profilu chropowatości wszystkich punktów na całej analizowanej powierzchni, nie tylko wzdłuż linii profilu tkaniny utworzonego w kierunku osnowy czy wątku. Tym samym

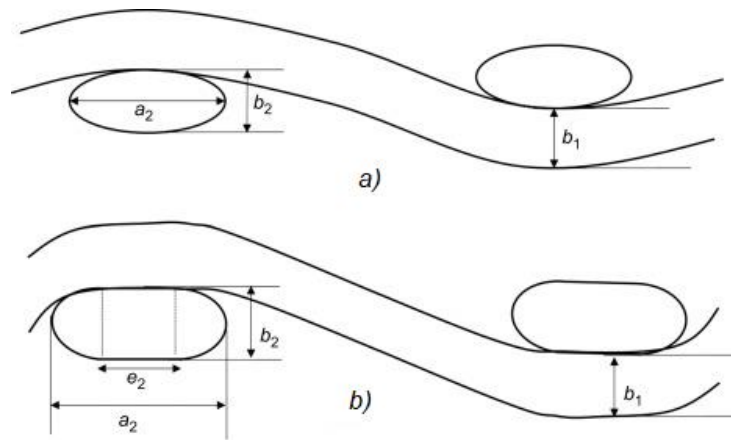
kolejne punkty powierzchni nie będą leżały na profilu tkaniny wzdłuż osi symetrii przędzy jednego lub drugiego układu, lecz będą w stosunku do osi przesunięte (rys. 3.14).



Rys. 3.14. Przykładowe rozmieszczenie przecięcia tkaniny w różnych miejscach raportu splotu płóciennego

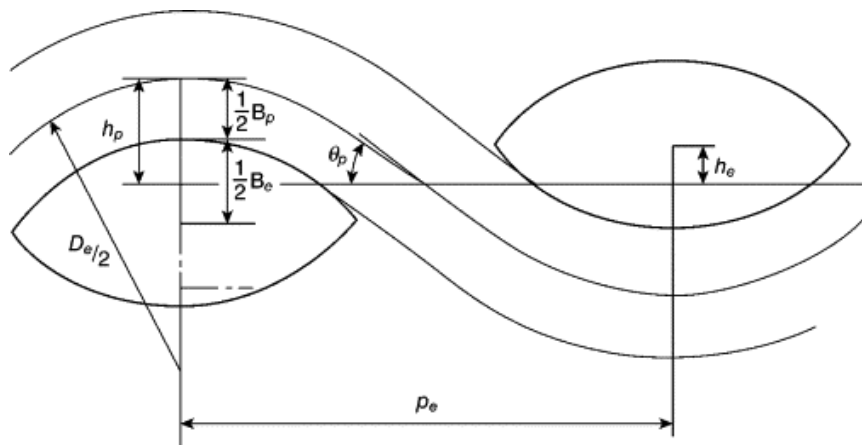
Szerokość przędzy osnowowej k w miejscu przecięcia oznaczonego kolorem zielonym jest mniejsza od szerokości przędzy przeciętej wzdłuż osi symetrii przędzy, odpowiadającej średnicy przędzy d_1 . W podobny sposób zmieniać się będzie szerokość przędzy w kolejnej płaszczyźnie, wzdłuż której wirtualnie przecina się tkaninę. W zależności od grubości przędz obu układów, podziałki przędz oraz także naprężenia przędz, wartości rzędnych punktów w kolejnych przekrojach będą się systematycznie zmieniały.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na kształtowanie się geometrii powierzchni tkaniny jest kształt przędzy oraz struktura powierzchni przędzy. W przyjętym modelu założono okrągły kształt przekroju poprzecznego przędz. W literaturze fachowej funkcjonują także inne przybliżenia przekroju poprzecznego przędz: w kształcie elipsy, czy spłaszczony w kształcie toru wyścigowego – model Kempa (rys. 3.14, 3.15) [41, 42, 112, 113]. To zmienia geometrię powierzchni tkaniny.



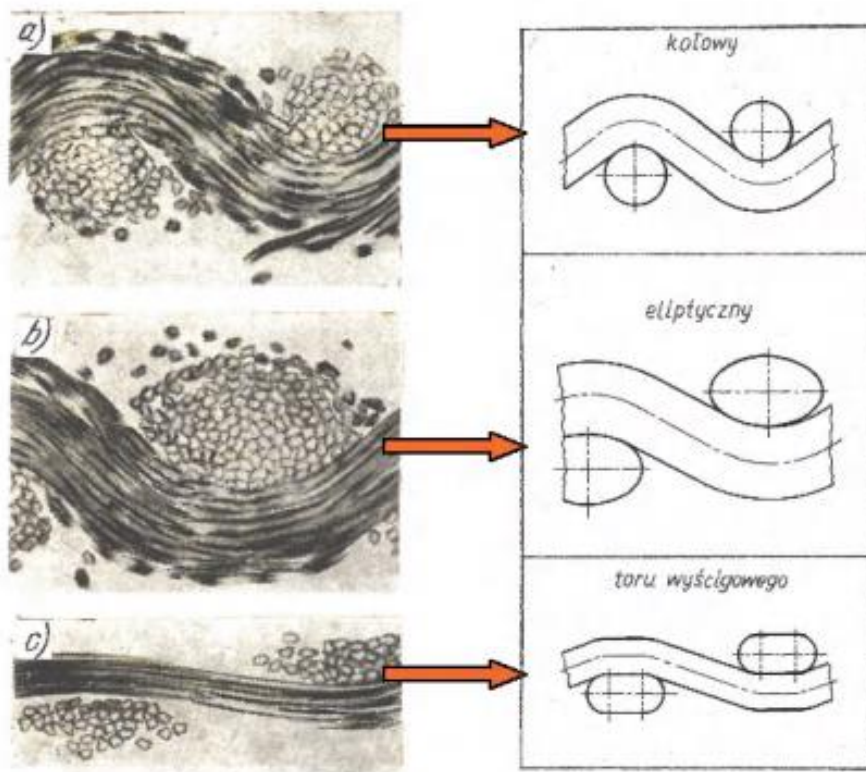
Rys. 3.14. Model kształtu przekroju przędzy w tkaninie: a) eliptyczny, b) model Kempa

[112]



Rys. 3.15. Model kształtu przekroju przędzy w tkaninie [114]

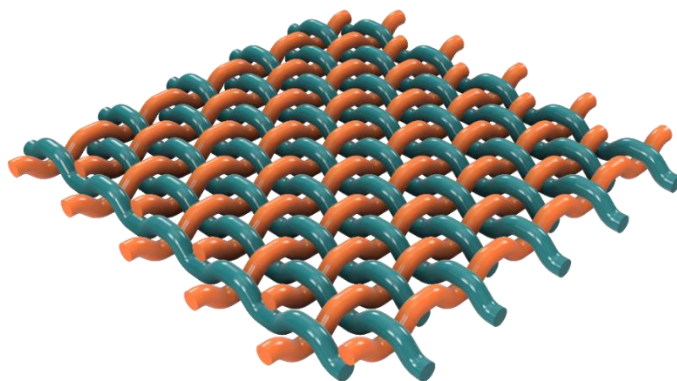
Dla kształtowania się chropowatości powierzchni tkaniny ważny jest także kształt powierzchni przędz, z których wykonana jest tkanina. Model wyidealizowany, w którym przekrój przędzy przyjmuje się jako kołowy, praktycznie nie występuje. Może wystąpić tylko w tkaninach wykonanych z przędz syntetycznych ciągłych jednofilamentowych. W przeważającej większości przędze zbudowane są z pojedynczych włókien, odcinkowych lub ciągłych (rys. 3.16).



Rys. 3.16. Widoki rzeczywistych struktur i ich modeli geometrycznych tkanin o splocie płóciennym [41]

Włókna syntetyczne mogą mieć przekrój kołowy, chociaż nie zawsze, natomiast włókna naturalne charakteryzują się nieregularnym kształtem przekroju poprzecznego, zależnie od rodzaju włókien. Do tego dochodzi skręt przędzy, efekt włochatości, który też oddziałuje na geometrię powierzchni, a także technologia wykonania przędzy.

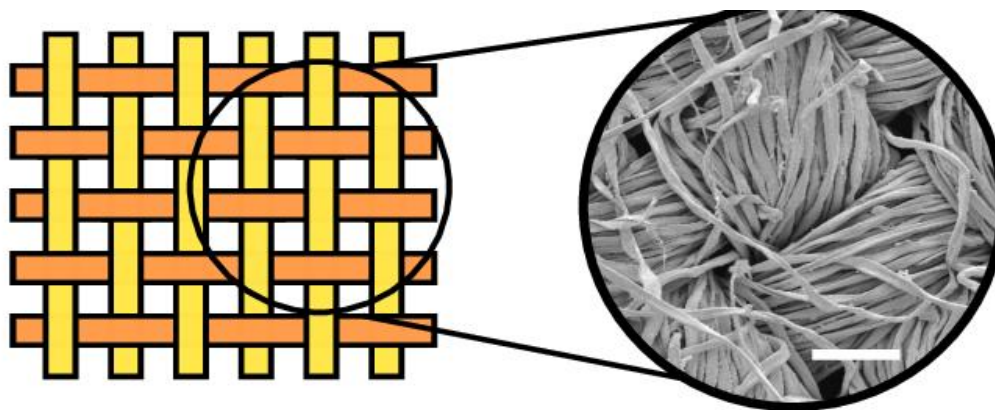
Wszystkie te czynniki sprawiają, że wszelkie modelowanie matematyczne/geometryczne struktury geometrycznej powierzchni tkanin jest bardzo skomplikowane. Specjalistyczne oprogramowania komputerowe do projektowania i modelowania tkanin umożliwiają modelowanie określonej struktury tkaniny (rys. 3.17), co może być również wykorzystane do modelowania powierzchni. Wymaga to jednak opracowania odpowiednich algorytmów. Jednakże zawsze stosuje się duży poziom uproszczeń, zwłaszcza na poziomie modelowania kształtu przekroju poprzecznego i struktury przędz tworzących tkaninę.



Rys. 3.17. Komputerowa symulacja struktury tkaniny o splocie płóciennym;

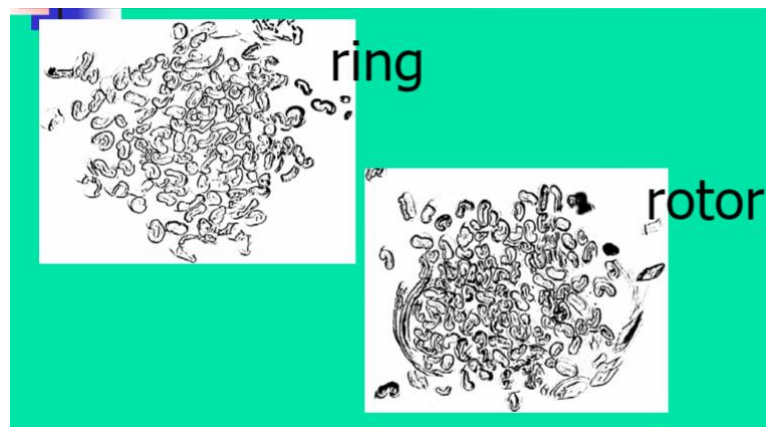
<https://grabcad.com/library/fabric-weave-mesh-1>

Relację pomiędzy strukturą wirtualną – modelem tkaniny, a rzeczywistą tkaniną, wyraźnie odzwierciedla rysunek poniżej (rys. 3.18).



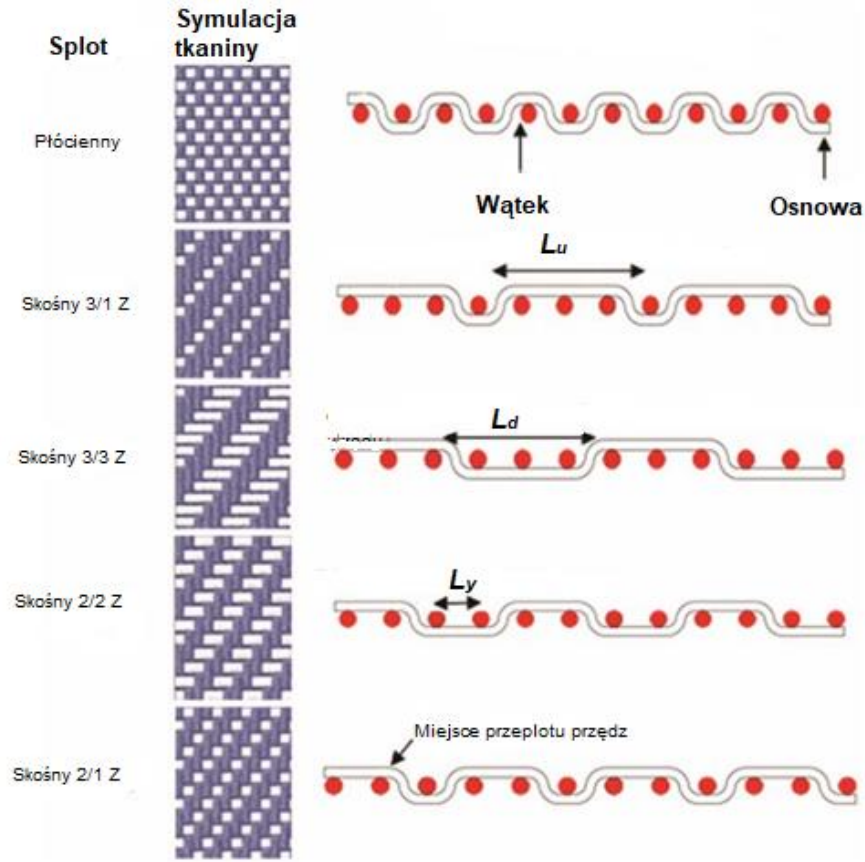
Rys. 3.18. Model vs. rzeczywista struktura tkaniny [115]

Kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na strukturę i właściwości tkaniny oraz na geometryczną strukturę jej powierzchni jest liczba włókien w przekroju poprzecznym przędzy obu układów oraz gęstość upakowania włókien w przędzy [116, 117]. Z kolei gęstość upakowania zależy od kształtu przekroju poprzecznego przędzy, technologii przędzenia oraz skrętu przędzy (rys. 3.19).



Rys. 3.19. *Mikroskopowe obraz gęstości upakowania włókien w przędzy obręczkowej i rotorowej [116]*

Wracając do struktury tkaniny, nie sposób nie uwzględnić jej splotu. Splot tkacki, to sposób wzajemnego przeplatania się przędz osnowy i wątku. Na rys. 3.10 przedstawiono schemat struktury splotu płóciennego, najprostszego ze splotów. W splotcie tym przędza jednego układu przechodzi nad przędzą drugiego układu, a następnie pod przędzą drugiego układu. Taka struktura sprawia, że obie przędze układają się wzdłuż linii falistej. We wszystkich innych splotach występują odcinki przędz, które przechodzą nad dwoma lub większą liczbą przędz drugiego układu. To zdecydowanie wpływa na geometrię struktury tkanin, a jednocześnie także na geometrię powierzchni tkanin. Uwzględnił to Nazanin i in. [118] w swoich badaniach nad modelowaniem chropowatości tkanin na podstawie ich struktury (rys. 3.20).



Rys. 3.20. Przebieg przędz w tkaninach o splocie płóciennym i skośnym [118]

Zaproponowali model średniego odchylenia rzędnych profilu chropowatości w postaci:

$$R_a = A_0 + A_1 \cdot N + A_2 \cdot L_d + A_3 \cdot K + A_4 \cdot L_y + A_5 \cdot \frac{L_u}{L_d} \quad (3.3)$$

gdzie:

R_a – średnie odchylenie rzędnych profilu chropowatości (potocznie zwana chropowatość),

N – liczba przeplotów osnowy i wątku w raporcie splotu,

L_d – długość odcinka przędzy przechodzącego pod przędzami drugiego układu przędz w raporcie,

K – liczba przędz w obszarze, w którym przędze przechodzą pod nitkami drugiego układu,

L_y – odległość między przędzami w regionie, gdzie przędze przechodzą pod przędzami drugiego układu,

L_u – długość odcinka przędzy, w regionie, w którym przechodzi nad przędzami drugiego układu,

$A_0 - A_5$ – współczynniki wyznaczone eksperymentalnie [118].

Biorąc pod uwagę złożoność zagadnienia i dużą liczbę czynników wpływających na kształtowanie się powierzchni tkaniny, można sformułować uogólnione równanie uwzględniające wszystkie wymienione czynniki mogące mieć wpływ na geometryczną strukturę powierzchni tkanin:

$$R_a = f(d_1, d_2, A_1, A_2, f, T_{tex1}, T_{tex2}, T_{texf1}, T_{texf2}, T_1, T_2, TP, SP) \quad (3.4)$$

gdzie:

R_a – średnie odchylenie rzędnych profilu chropowatości,

d_1 – średnica osnowy,

d_2 – średnica wątku,

A_1 – podziałka osnowy,

A_2 – podziałka wątku,

T_{tex1} – masa liniowa osnowy,

T_{tex2} – masa liniowa wątku,

T_{texf1} – masa liniowa włókien w przędzy osnowowej,

T_{texf2} – masa liniowa włókien w przędzy wątkowej,

T_1 – skręt przędzy osnowowej,

T_2 – skręt przędzy wątkowej,

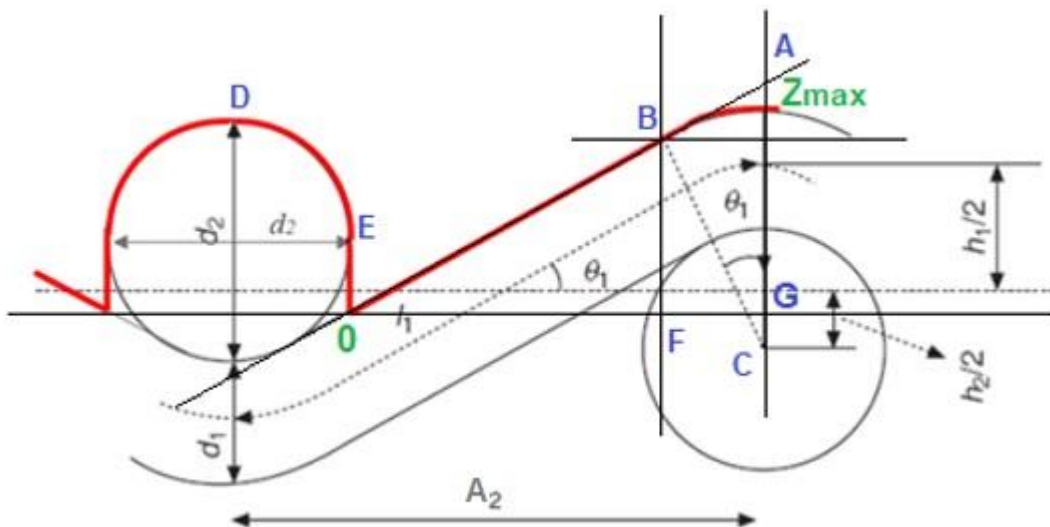
TP – technologia przędzenia,

SP – splot tkaniny.

Dwa ostatnie czynniki są jakościowe. Splot przędzy *SP* można wyrazić w sposób liczbowy, np. poprzez liczbę przegieć osnowy i wątku w raporcie splotu albo za pomocą wskaźnika Milasiusa [119 - 123].

Technologia przędzenia jest trudna do wyrażenia w formie liczbowej, ale można przyjąć współczynnik proporcjonalności i w drodze badań eksperymentalnych zaproponować wartość współczynnika proporcjonalności dla typowych technologii przędzenia: obrączkowej, bezwrzecionowej czy Sirospun [124], podobnie jak przyjęto stały współczynnik w równaniu Ashenhurst'a na obliczanie średnicy przędzy [41, 42].

Na podstawie parametrów konstrukcyjnych tkanin można spróbować zdefiniować jeden z parametrów geometrycznej struktury powierzchni tkanin – R_z . Jest to największa wysokość profilu, będąca sumą wysokości największego wzniesienia profilu i głębokości najniższego wgłębienia profilu. Na podstawie geometrii struktury splotu płóciennego można wyznaczyć oba punkty: największe wzniesienie profilu tkaniny i najniższe wgłębienie (rys. 3.21).



Rys. 3.21. Schemat struktury splotu płóciennego z zaznaczonymi punktami krytycznymi geometrii profilu powierzchni tkaniny

Największe wgłębienie odpowiada punktowi 0, tj. początkowi układu współrzędnych. Jest to najniższy punkt na powierzchni tkaniny, który jest rejestrowany przez sensor optyczny. Najwyższe wzniesienie oznaczono symbolem Z_{max} . Największa wysokość profilu odpowiada długości odcinka GZ_{max} (rys. 3.21). Długość odcinka GZ_{max} można opisać wzorem:

$$R_z = \overline{GZ_{max}} = \overline{GA} - \overline{Z_{max}A} \quad (3.5)$$

Analizując utworzone na bazie struktury splotu trójkąty prostokątne można wyliczyć oba odcinki, tj. GA i $Z_{max}A$:

$$\overline{GA} = \overline{OG} \cdot tg\theta_1 = \left(A_2 - \frac{d_2}{2}\right) \cdot tg\theta_1 \quad (3.6)$$

$$\overline{Z_{max}A} = \overline{CA} - \overline{CB} \quad (3.7)$$

$$\overline{CA} = \frac{\overline{CB}}{\cos\theta_1} \quad (3.8)$$

$$\overline{Z_{max}A} = \frac{\overline{CB}}{\cos\theta_1} - \overline{CB} = \overline{CB} \left(\frac{1}{\cos\theta_1} - 1\right) \quad (3.9)$$

$$\overline{CB} = \frac{d_2}{2} + d_1 \quad (3.10)$$

$$\overline{Z_{max}A} = \left(\frac{d_2}{2} + d_1\right) \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta_1} - 1\right) \quad (3.11)$$

$$R_z = \left(A_2 - \frac{d_2}{2}\right) \cdot tg\theta_1 - \left(\frac{d_2}{2} + d_1\right) \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta_1} - 1\right) \quad (3.12)$$

gdzie:

R_z – największa wysokość profilu,

θ_1 – połowa kąta opasania osnową,

A_2 – podziałka wątku,

d_1 – średnica osnowy,

d_2 – średnica wątku.

Powyższe rozważania wykazały, że jest możliwe powiązanie parametrów struktury tkanin z geometryczną strukturą ich powierzchni. To jednak wymaga znajomości parametrów strukturalnych tkanin, w tym także średnicy przędz czy kątów opasania osnowy i wątku. Średnice przędz można obliczyć za pomocą równań opisanych w literaturze, chociaż nie uwzględniają one nowoczesnych technologii przędzenia oraz nowych rodzajów włókien. Można również te średnice wyznaczyć w drodze pomiaru za pomocą obserwacji mikroskopowych i odpowiednich narzędzi komputerowych.

Należy też uwzględnić odpowiednie współczynniki proporcjonalności. Wyznaczając przewidywaną wartość parametru R_z należy mieć na uwadze, że wartości przewidywane na podstawie modelu będą silnie skorelowane z wartościami rzeczywistymi, jednakże nie będą im równe. Wynika to z faktu, że wartości parametrów geometrycznej struktury profilu chropowatości powierzchni tkanin zależą od wielkości filtra przyjętego do oddzielenia profilu chropowatości od profilu falistości. Wartości współczynników proporcjonalności mogą być wyznaczone na drodze eksperymentalnej.

4. Materiał i metody badawcze

Poniżej opisano materiał badawczy poddany badaniom w ramach realizacji pracy doktorskiej, tj. tkaniny bawełniane o zróżnicowanej strukturze. Opisano również oraz metody badawcze oraz metody analizy danych.

4.1. Materiał badawczy

Tak, jak wcześniej wspomniano, w niniejszej pracy badaniom poddano tkaniny bawełniane o programowo zróżnicowanej strukturze. Zróżnicowanie struktury tkanin uzyskano poprzez zastosowanie różnych splotów oraz przędz wątkowych o różnej grubości. Tkaniny będące obiektem analizy wytworzono w 6 splotach. Tkaniny zostały wykonane na bazie jednej osnowy z przędzy bawełnianej 50 tex OE (rotorowej, *OE – Open End*). Jako wątek zastosowano 5 asortymentów przędz:

- 100 tex OE,
- 60 tex OE.
- 50 tex OE,
- 40 tex OE,
- 30 tex OE.

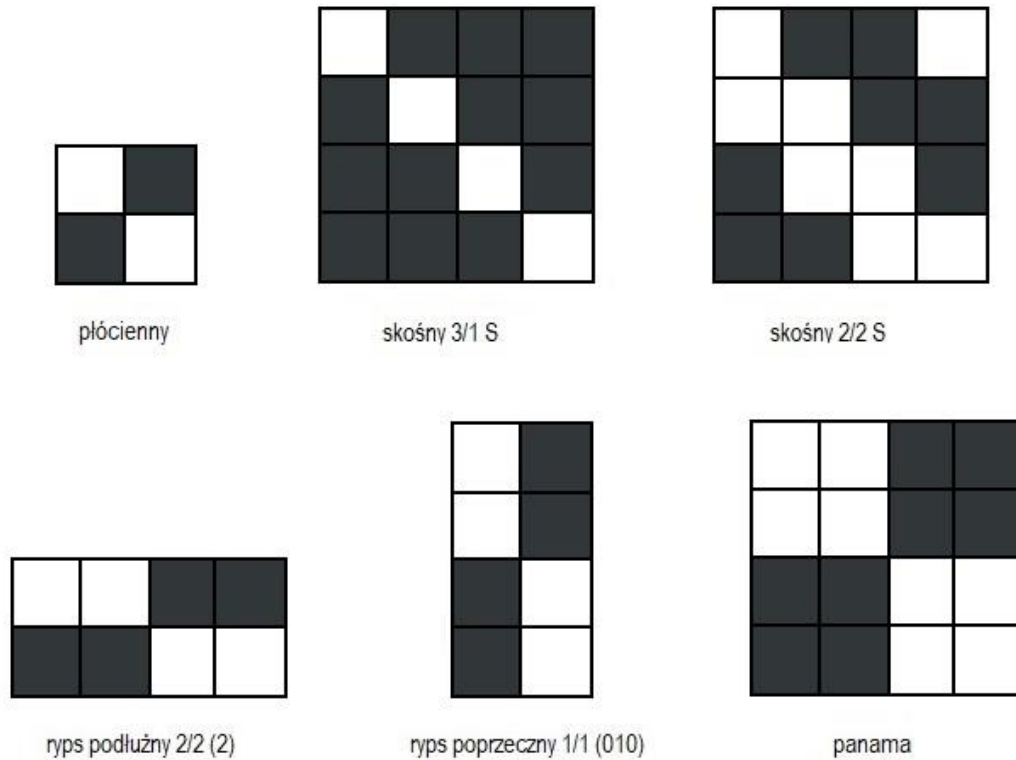
W badanych tkaninach zastosowano 6 splotów tkackich:

- płócienny,
- skośny 3/1 S,
- skośny 2/2 S,
- ryps 1/1 (010),
- ryps 2/2 (2),
- panama 2/2 (020).

W wybranych asortymentach zastosowano również różną licznosc wątku:

- 11/cm,
- 9/cm,
- 7/cm.

Raporty powyższych splotów przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Raporty splotów zastosowanych w badanych tkaninach [opracowanie własne]

Istnieje wiele rodzajów splotów, z których każdy ma swoje unikalne właściwości i cechy. Rodzaj splotu zastosowanego w tkaninie ma znaczący wpływ na jej teksturę, wygląd i właściwości, co czyni go ważnym czynnikiem w produkcji tekstyliów.

Sploty tkackie dzieli się na 4 zasadnicze grupy [41, 42]:

- zasadnicze,
- pochodne zasadniczych,
- modyfikowane i zestawne,
- złożone.

Rodzaj użytego splotu ma wpływ na właściwości tkaniny, takie jak: właściwości biofizyczne, czyli związane z komfortem termo-fizjologicznym [50, 53, 62, 125 - 128], układalność [129 - 131], czy właściwości mechaniczne – wytrzymałościowe [132 -134].

Ogółem badaniom topografii powierzchni poddano 21 wariantów tkanin bawełnianych wykończonych. Wykończenie obejmowało procesy odklejania, barwienia, prania i suszenia. Zestawienie wariantów tkanin poddanych badaniom podano w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Zestawienie wariantów tkanin poddanych badaniom w zakresie geometrycznej struktury powierzchni [opracowanie własne]

Nr wariantu	Splot	Masa liniowa osnowy [tex]	Masa liniowa wątku [tex]	Liczność wątku [szt/cm]
1.	plócienny	50	100	11
2.	plócienny	50	60	11
3.	plócienny	50	100	9
4.	plócienny	50	100	7
5.	skośny 3/1 S	50	100	7
6.	skośny 3/1 S	50	100	9
7.	skośny 3/1 S	50	100	11
8.	skośny 3/1 S	50	60	11
9.	skośny 3/1 S	50	50	11
10.	skośny 3/1 S	50	50	11
11.	skośny 3/1 S	50	40	11
12.	skośny 3/1 S	50	30	11
13.	skośny 3/1 S	50	30	11
14.	skośny 2/2 S	50	100	11
15.	skośny 2/2 S	50	60	11
16.	ryps poprzeczny 1/1 (010)	50	100	11
17.	ryps poprzeczny 1/1 (010)	50	60	11
18.	ryps podłużny 2/2 (2)	50	100	11
19.	ryps podłużny 2/2 (2)	50	60	11
20.	panama 2/2 (020)	50	100	11
21.	panama 2/2 (020)	50	60	11

Wszystkie tkaniny zostały przebadane pod względem podstawowych parametrów struktury takich jak: masa powierzchniowa, liczność osnowy i wątku, wrobienie osnowy i wątku, grubość. Badania wykonano zgodnie z odpowiednimi normami. Zestawienie podstawowych parametrów tkanin podano w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Zestawienie podstawowych parametrów tkanin [opracowanie własne]

Numer wariantu	Masa pow. [g/m ²]	Liczność osnowy [szt./cm]	Liczność wątku [szt./cm]	Wrobienie osnowy [%]	Wrobienie wątku [%]	Grubość [mm]
1.	292	31,2	11,5	14,2	2,9	0,67
2.	240	31,6	11,7	8,8	3,7	0,59
3.	269	31,4	9,36	9,6	2,7	0,69
4.	242	31,4	7,32	7,0	2,4	0,71
5.	241	31,5	7,36	4,7	2,8	0,80
6.	266	31,8	9,4	6,2	2,9	0,79
7.	292	31,7	11,6	7,9	3,3	0,78
8.	238	31,7	11,7	5,5	3,8	0,74
9.	225	31,7	11,6	5,0	3,6	0,67
10.	228	32	11,8	6,1	1,8	0,71
11.	215	32	11,8	4,5	3,2	0,65
12.	198	31,8	11,8	4,1	4,3	0,61
13.	187	31,6	11,6	3,0	3,4	0,57
14.	287	31,9	11,6	7,0	2,7	0,79
15.	238	31,9	11,8	5,9	3,9	0,76
16.	284	31,1	11,5	7,3	1,2	0,83
17.	237	31,7	11,8	6,1	2,4	0,78
18.	293	31,7	11,9	9,8	3,9	0,65
19.	242	32,0	11,8	6,8	5,4	0,60
20.	287	31,6	11,7	6,4	2,3	0,79
21.	234	31,6	11,7	5,3	3,2	0,76

Podstawowe parametry tkanin to ich cechy fizyczne i geometryczne, które wpływają na wygląd, wytrzymałość, elastyczność i inne właściwości tkanin. Struktura tkaniny jest określana przez kilka parametrów. Bardzo ważnym parametrem konstrukcji tkaniny jest wrobienie przędz. Wynika to z falistego ułożenia przędz w tkaninie, co sprawia, że długość nitki: osnowy i wątku w danym odcinku tkaniny jest zawsze większa od wymiarów tego odcinka odpowiednio długości i szerokości. Wrobienie wyrażone jest wzorem:

$$W = \frac{l_{rz} - l_p}{l_p} \times 100 \% \quad (4.1)$$

gdzie:

W – wrobienie przędzy,

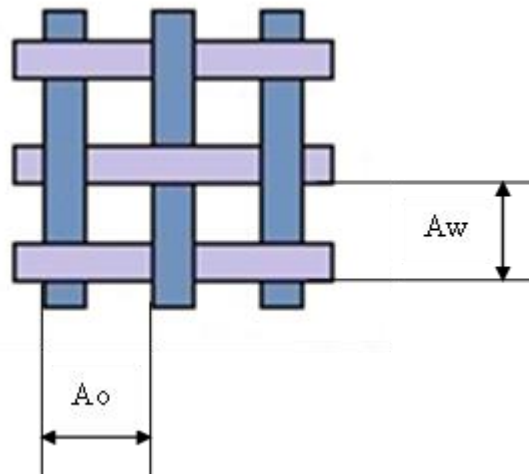
l_{rz} – odcinek długości rzeczywistej wyprostowanej przędzy,

l_p – odcinek długości tkaniny, z którego wypruto mierzony odcinek przędzy.

Wrobienie liczy się osobno dla osnowy i wątku. Pomiar wrobienia osnowy i wątku w tkaninie jest znormalizowany [135, 136].

Innym bardzo istotnym parametrem, który charakteryzuje strukturę tkaniny, jest liczność nitek (przędz), definiowana jako liczba nitek w jednostce długości tkaniny. Odpowiada ona zagęszczeniu tkaniny. Liczność nitek jest parametrem mierzonym, szczególnie podczas technologicznej kontroli prawidłowości budowy tkaniny. Rozróżnia się liczność osnowy i liczność wątku, zgodnie z normą [137]. Liczność osnowy i wątku podaje się w liczbie nitek na centymetr.

Z licznością przędz w tkaninie związany jest parametr zwany podziałką i oznaczony symbolem A . Jest to odcinek długości pomiędzy sąsiednimi nitkami danego układu osnowy lub układu wątku. Przedstawia to rysunek znajdujący się poniżej (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Podziałka osnowy i wątku [opracowanie własne]

Zależność między licznością, a podziałką jest następująca:

$$g_o = \frac{100}{A_o} \text{ nitek /10mm} \quad (4.2)$$

$$g_w = \frac{100}{A_w} \text{ nitek /10mm} \quad (4.3)$$

gdzie:

g_o – liczność osnowy,
 A_o – podziałka osnowy,
 g_w – liczność wątku,
 A_w – podziałka wątku.

Dla badanych tkanin wyznaczono również pochodne parametry struktury, czyli takie, które można obliczyć na podstawie podstawowych parametrów struktury tkanin. Obliczono wypełnienie i wypełnienie tkanin [41, 42]. To jednak wymagało wyznaczenia grubości przędz osnowy i wątku. Grubość przędz dobierana jest w zależności od przeznaczenia wyrobu oraz właściwości, które chce się uzyskać.

Grubość nitek osnowy i wątku wraz z ich licznością decydują o wypełnieniu powierzchniowym tkaniny. Jest to parametr, który wyraża procentowy udział powierzchni pokrytej przez przędze na całej powierzchni tkaniny. Definicją współczynnika wypełnienia powierzchniowego tkaniny jest stosunek powierzchni pokrytej rzutem przędzy na płaszczyznę tkaniny do całkowitej powierzchni tkaniny. Wyróżnia się wypełnienie tkaniny osnową, wątkiem oraz obu układami nitek zgodnie z poniższymi wzorami:

$$Z_o = g_o \cdot d_o \quad (4.4)$$

$$Z_w = g_w \cdot d_w \quad (4.5)$$

$$Z_{ow} = Z_o + Z_w - \frac{Z_o \cdot Z_w}{100} \quad (4.6)$$

gdzie:

Z_{ow} – wypełnienie powierzchniowe osnową i wątkiem,

Z_o – wypełnienie powierzchniowe osnową,

g_o – liczność osnowy,

d_o – średnica osnowy,

Z_w – wypełnienie powierzchniowe wątkiem,

g_w – liczność wątku,

d_w – średnica wątku.

We wzorach służących do obliczenia wypełnienia powierzchniowego osnową i wypełnienia powierzchniowego wątkiem występuje średnica osnowy i wątku. Może być ona obliczana np. za pomocą wzoru Ashenhursta [42].

$$d = \frac{c}{\sqrt{1000}} \cdot \sqrt{Tt} \quad (4.7)$$

gdzie:

d – średnica przędzy [mm],

c – współczynnik stały dla określonych przędz (dla bawełnianych przędz przyjęto $c = 1,25$),

Tt – masa liniowa przędzy [tex].

Zapełnienie powierzchniowe jest istotne z punktu widzenia właściwości tkaniny np. przepuszczalność powietrza, opór pary wodnej, barierowość wobec promieniowanie UV, właściwości filtracyjne [138 -140]. Ten parametr charakteryzuje względną wartość prześwitów w tkaninie, nie oddaje jednak do końca specyfiki struktury tkaniny, ponieważ nie uwzględnia splotu.

Innym istotnym parametrem opisującym strukturę tkaniny jest jej wypełnienie. Obejmuje ono wiadomości o tym jaka część objętości tkaniny wypełniona jest przędzą. Ten parametr jest wskaźnikiem, który uwzględnia wynikającą ze splotu liczbę przegień osnowy i wątku w tkaninie. Wypełnienie tkaniny osnową, wątkiem oraz średnie wypełnienie tkaniny oblicza się za pomocą poniższych równań [41, 42]:

$$E_w = \frac{d_w \cdot R_w + d_o \cdot p_o}{R_w} g_w \quad (4.8)$$

$$E_o = \frac{d_o \cdot R_o + d_w \cdot p_w}{R_o} g_o \quad (4.9)$$

$$E_{\text{śred}} = \frac{E_o Tt_o + E_w Tt_w}{Tt_o + Tt_w} \quad (4.10)$$

gdzie:

E_o – wypełnienie osnową,

R_o – raport osnowy,

p_o – liczba przegień osnowy,

Tt_o – masa liniowa osnowy,

E_w – wypełnienie wątkiem,

R_w – raport wątku,

p_w – liczba przegień wątku,

Tt_w – masa liniowa wątku,

$E_{\text{śred}}$ – średnie wypełnienie osnową i wątkiem.

Powyżej opisane wskaźniki są wykorzystywane do opisu struktury tkanin. Te pochodne parametry struktury tkanin są ważne, ponieważ pozwalają na dokładniejsze określenie właściwości tkanin i ich zastosowań. Na przykład, wytrzymałość na rozrywanie jest ważnym parametrem dla tkanin stosowanych w produkcji odzieży roboczej, podczas gdy przepuszczalność powietrza jest ważna dla tkanin stosowanych w produkcji ubrań sportowych i innych wyrobów przemysłowych.

4.2. Metody badawcze

W ramach realizacji rozprawy doktorskiej podstawowym i kluczowym badaniem był pomiar geometrycznej struktury powierzchni tkanin. Badania te wykonano metodą bezkontaktową, optyczną, z zastosowaniem profilometru MicroSpy® Profile firmy FRT. Dodatkowo wykonano badania porównawcze za pomocą przyrządu KES – FB4. Wykonano również badania zmian struktury geometrycznej powierzchni tkanin na skutek procesu ścierania. Ścieranie przeprowadzono przy użyciu przyrządu Martindale. Wykonano również badania porównawcze chropowatości za pomocą przyrządu KES-FB4.

Do analizy danych pomiarowych z profilometru wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie Mark III również firmy FRT. Statystyczną analizę danych pomiarowych przeprowadzono za pomocą narzędzi statystycznych dostępnych w programie TIBC Statistica, wersja 13.3: analiza korelacji, analiza wariancji jedno- i wieloczynnikowej (ANOVA).

4.2.1. Pomiar geometrycznej struktury powierzchni tkanin

W badaniach geometrycznej struktury powierzchni tkanin zastosowano profilometr MicroSpy® Profile firmy FRT the art. of metrology™ (rys. 4.3.) Profilometr ten jest bardzo precyzyjnym urządzeniem przeznaczonym do pomiaru i analizy topografii powierzchni [102, 141, 142]. Jest szeroko stosowany w badaniach, rozwoju i kontroli jakości w różnych branżach, w tym w badaniach metali, stopów metali nieżelaznych, materiałów ceramicznych, półprzewodników, elementów maszyn i urządzeń w motoryzacji, przemyśle maszynowym, w produkcji urządzeń medycznych i wielu innych.



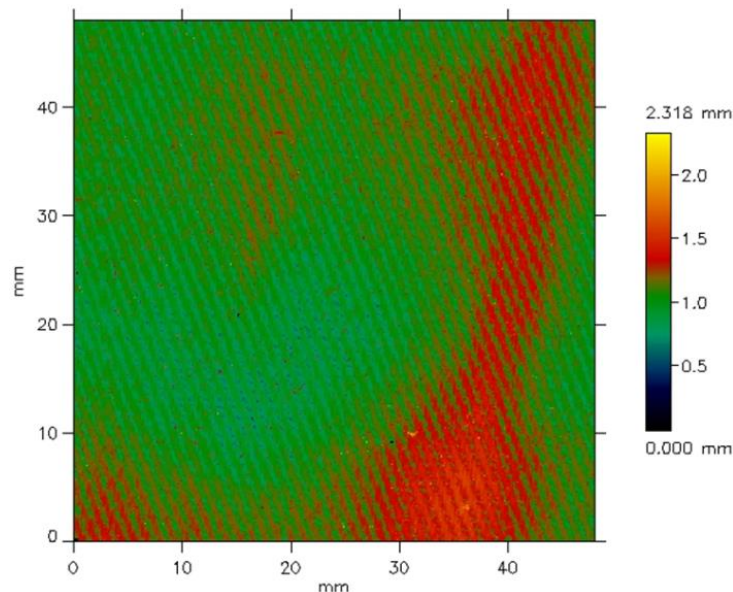
Rys. 4.3. Profilometr MicroSpy® Profile Profilometer firmy FRT [opracowanie własne]

Przyrząd wykorzystuje bezkontaktową metodę skanowania optycznego do generowania obrazów 3D topografii powierzchni z rozdzielczością submikronową. Przyrząd jest wyposażony w mikroskop konfokalny, który skupia wiązkę światła białego na powierzchni próbki i mierzy światło odbite w celu określenia wysokości i kształtu cech powierzchni. Profilometr wyposażony jest w czujnik CWL, który opiera się na opatentowanej metodzie wykorzystującej aberrację chromatyczną soczewek optycznych. Profilometr może skanować obszary do 100 x 100 mm z rozdzielczością pionową 0,1 nm i rozdzielczością boczną 0,04 μm . Oprócz standardowych funkcji profilometr MicroSpy® Profile firmy FRT można dostosować za pomocą szeregu akcesoriów i modułów, takich jak zmotoryzowany stół, interferometr światła białego i mikroskop sił atomowych do innych rodzajów i zakresów badań. Akcesoria te mogą rozszerzyć możliwości przyrządu i umożliwić użytkownikom wykonywanie bardziej kompleksowych i specjalistycznych pomiarów na swoich próbkach.

Profilometr MicroSpy® Profile firmy FRT ma kilka funkcji, które czynią go potężnym narzędziem do analizy topografii powierzchni. Oprócz tego, że uzyskujemy obrazy badanych próbek za pomocą profilometru, to urządzenie współpracuje z programem

MARK III, które może przetwarzać duże ilości danych i generować szczegółowe mapy powierzchni, parametry chropowatości i inne analizy statystyczne. [37].

Przedstawiony poniżej obraz odzwierciedla zmiany wysokości poszczególnych punktów na powierzchni badanej tkaniny (rys. 4.4). Na obrazie w skali barwnej widoczne są wyraźne zafalowania powierzchni. Wynika to z faktu, że tkaniny są materiałami wiotkimi. Poza tym wykazują pewną pamięć kształtu, co powoduje występowanie zjawiska falistości. Dlatego też niemożliwe jest ułożenie próbek tkanin w taki sposób, żeby idealnie przylegały do stolika pomiarowego profilometru. Nie wynikało ono z falistości powierzchni jako cechy tkanin, ale z niedokładnego przylegania próbek do stolika, a tym samym położenia próbek w pewnym niewielkim stopniu odbiegającego od położenia poziomego.



Rys. 4.4. Obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S uzyskany za pomocą profilometru MicroSpy® firmy FRT [opracowanie własne]

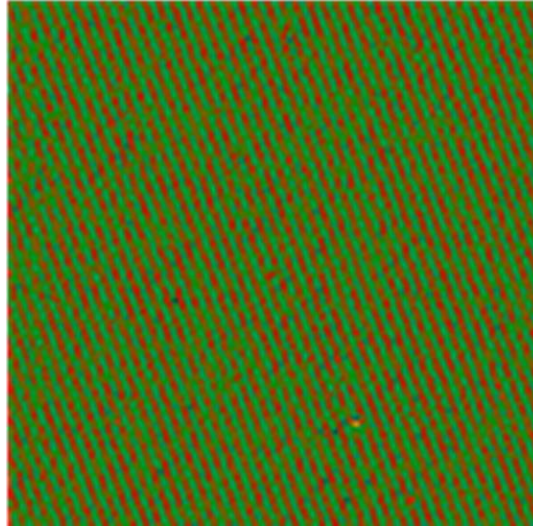
Oprogramowanie MARK III [37] to zaawansowane narzędzie do analizy danych pozyskanych z profilometru. Oprogramowanie MARK III umożliwia analizę i modyfikację już istniejących obrazów (danych z pomiarów optycznych) oraz pozwala wyznaczać dane charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni, zgodnie z obowiązującymi w tym zakresie normami [16, 17].

Rysunek 4.5 przedstawia przykładowe wyniki badań dla splotu skośnego przed filtrowaniem falistości.

BR7e		sPp:	1.436 mm
Primary parameters (unfiltered):		sPv:	0.967 mm
x = [0.000 mm, 49.000 mm]		sPt:	2.404 mm
y = [0.000 mm, 49.000 mm]		sPsk:	0.099
Average: 0.972 mm		sPku:	4.039
Minimum: -0.000 mm at (x: 2.456 mm, y: 19.158 mm)		sPk:	0.354 mm
Maximum: 2.327 mm at (x: 16.211 mm, y: 41.877 mm)		sPpk:	0.154 mm
		sPvk:	0.150 mm
sPa:	0.116 mm	sPMr1:	10.872 %
sPq:	0.148 mm	sPMr2:	88.470 %
sPz(DIN):	2.098 mm	sPV0:	0.009 mm ³ /mm ²
sPmax:	2.347 mm	sPmt(c):	*** (with c = 1.600 μm)
sPz25:	1.543 mm	sPmr:	5.012 % (with c0 = 5 %, c0-c1 = 0.2 μm)
sPmax25:	2.293 mm		

Rys. 4.5. Oprogramowanie MARK III – Przykładowe wyniki badań dla splotu skośnego przed filtrowaniem falistości [opracowanie własne]

W celu wyeliminowania zjawiska falistości, które w tym przypadku nie jest cechą struktury powierzchni, a wynika z niewłaściwego ułożenia próbek podczas pomiaru, przy wyznaczaniu parametrów chropowatości zastosowano odpowiednie filtry umożliwiające wyeliminowanie zjawiska falistości. Obraz powierzchni badanej tkaniny po wyeliminowaniu zjawiska falistości przedstawia tkaninę wyprostowaną wirtualnie na stoliku, z widocznymi nierównościami, które wynikają tylko i wyłącznie z chropowatości. Po odrzuceniu falistości widać dokładnie elementy splotu skośnego – skośne prążki w kierunku S (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Obraz powierzchni tkanin o splotie skośnym 3/1 S uzyskany za pomocą profilometru MicroSpy® firmy FRT po wyeliminowaniu efektu falistości [opracowanie własne]

Rysunek 4.7 przedstawia przykładowe wyniki badań dla splotu skośnego po wyeliminowaniu falistości.

Parametry struktury powierzchni wg DIN EN ISO 4287:

$L_s = 245.000 \mu\text{m}$, $L_c = 1.400 \text{ mm}$
 $x = [0.000 \text{ mm}, 49.000 \text{ mm}]$
 $y = [0.000 \text{ mm}, 49.000 \text{ mm}]$
sRa: 0.054 mm
sRq: 0.070 mm
sRz(DIN): 1.341 mm
sRmax: 1.511 mm
sRz25: 0.968 mm
sRmax25: 1.511 mm
sRp: 0.972 mm
sRv: 0.639 mm

sRt: 1.611 mm
sRsk: -0.364
sRku: 6.684
sRk: 0.116 mm
sRpk: 0.070 mm
sRvk: 0.115 mm
sMr1: 6.335 %
sMr2: 75.145 %
sV0: 0.014 mm³/mm²
sRmr(c): *** (with $c = 1.600 \mu\text{m}$)
sRmr: 5.043 % (with $c_0 = 5 \%$, $c_0-c_1 = 0.2 \mu\text{m}$)

Rys. 4.7. Oprogramowanie MARK III – Przykładowe wyniki badań dla splotu skośnego po wyeliminowaniu efektu falistości [opracowanie własne]

Ogólnie rzecz biorąc, profilometr MicroSpy® Profile firmy FRT to potężne i wszechstronne narzędzie, które może pomóc naukowcom, inżynierom i specjalistom ds. kontroli jakości, w analizie i optymalizacji właściwości powierzchni ich materiałów i produktów.

W niniejszej pracy dla każdego wariantu tkanin wykonano skanowanie próbek na prawej stronie tkaniny. Powierzchnia skanowania wynosiła 49 mm x 49 mm. Dla każdego wariantu tkanin wykonano badania pięciu próbek. Uzyskane skany tkanin przetwarzano w specjalistycznym oprogramowaniu Mark III również firmy FRT the art of metrology™ [37].

W pierwszej kolejności uzyskane obrazy poddano modyfikacji w celu usunięcia danych wadliwych i brakujących. Do tego celu zastosowano funkcję: Interpolacja powierzchni (*Area interpolation*).

W oparciu o uzyskane wyniki skanowania przeanalizowano topografię powierzchni badanych tkanin. Parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tkanin wyznaczano w oparciu o normę PN EN ISO 4287: 1993 [16].

W celu zapewnienia dokładnych i prawidłowych pomiarów stosuje się różne filtry, m.in. w celu wyeliminowania zakłóceń i szumów wynikających z różnych czynników, takich jak szum elektryczny, ruch urządzenia, a także odchylenia optyczne.

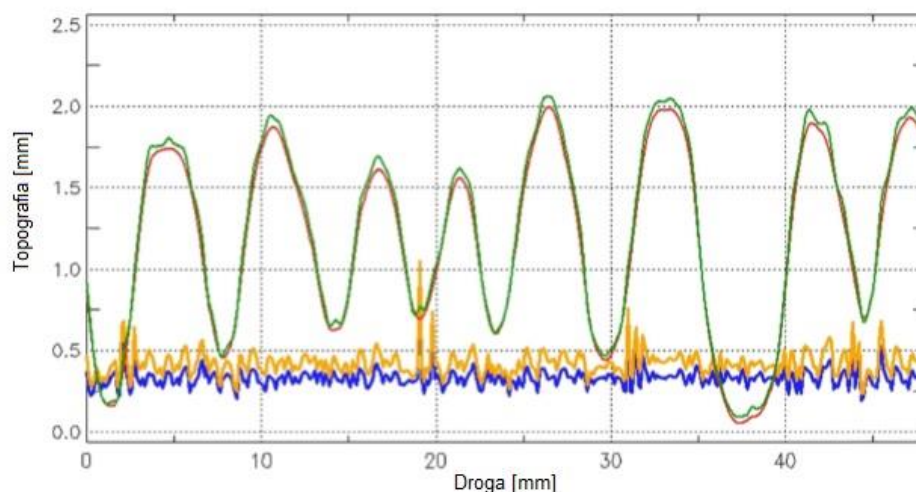
Najczęściej stosowanymi filtrami w profilometrach są filtry:

- górnoprzepustowe (*HPF* z ang. *high-pass filter*)
- dolnoprzepustowe (*LPF* z ang. *low-pass filter*)
- środkowoprzepustowe (*BPF* z ang. *band-pass filter*).

Filtry górnoprzepustowe eliminują niskoczęstotliwościowe zakłócenia, takie jak szумы związane z ruchem lub drganiami urządzenia, a filtry dolnoprzepustowe usuwają wysokoczęstotliwościowe zakłócenia, takie jak szумы elektryczne. W profilometrach stosuje się również filtry środkowoprzepustowe (*BPF*), które pozwalają na wyeliminowanie szumów o częstotliwościach niskich i wysokich, a pozostawienie tylko sygnału o określonej średniej częstotliwości. Filtry w profilometrach są bardzo ważne, ponieważ pozwalają na uzyskanie dokładnych i powtarzalnych pomiarów powierzchni, co jest niezwykle istotne w wielu dziedzinach, takich jak przemysł, medycyna czy nauki techniczne.

W literaturze nie ma informacji o wielkości filtrów, które należy zastosować przy pomiarze materiałów włókienniczych. Skala nierównomierności powierzchni materiałów włókienniczych jest inna niż materiałów litych – wykonanych ze stali, innych metali, materiałów ceramicznych czy polimerowych. Dlatego też nie można było zastosować filtrów stosowanych przy pomiarze ww. materiałów. Przeprowadzono badania wstępne, których wyniki okazały się zgodne, z wcześniejszymi wynikami opublikowanymi przez Matusiak

[102]. Rysunek 4.8 przedstawia przekroje tkaniny wzdłuż paska gofrowanej tkaniny gofrowanej, utworzone po wyeliminowaniu składowej falistości za pomocą filtra Lc 0,8 mm (niebieska linia) i filtra Lc 1,4 mm (żółta linia) oraz po wyeliminowaniu składowej chropowatości, również przy użyciu dwóch wartości filtra Lc: 0,8 mm (zielona linia) i 1,4 mm (czerwona linia). Widać, że kształt profili jest bardzo podobny. W przypadku składowej chropowatości wartości z (wysokość punktów na powierzchni) są wyższe przy filtrze Lc 1,4 mm (linia żółta) niż przy filtrze Lc 0,8 mm. W przypadku składowej falistości oba profile: przy filtrze Lc 1,4 mm i przy filtrze 0,8 mm są bardzo podobne. Różnice obserwuje się w zakresie tzw. najwyższych szczytów i najgłębszych dolin.



Rys.4.8. Profile wzdłuż paska gofrowanej tkaniny gofrowanej reprezentujące chropowatość i falistość przy różnych wartościach filtra Lc: żółty – chropowatość przy Lc 1,4 mm, niebieski – chropowatość przy Lc 0,8 mm, czerwony – falistość przy Lc 1,4 mm i zielony – falistość przy Lc 0,8 mm. [9]

Z tego powodu w przedstawionych badaniach [102] przyjęto, że filtr Lc 1,4 mm w lepszy sposób oddziela profil chropowatości od profilu falistości w pomiarach powierzchni tkanin. Idąc w ślad ww. badań, również w niniejszej pracy zastosowano filtr Lc = 1,4 mm. Filtr szumów został ustanowiony na poziomie 245 μm (minimalna wartość dostępna w zastosowanym oprogramowaniu).

4.2.2. Wyznaczanie chropowatości tkanin za pomocą przyrządu KES-FB 4

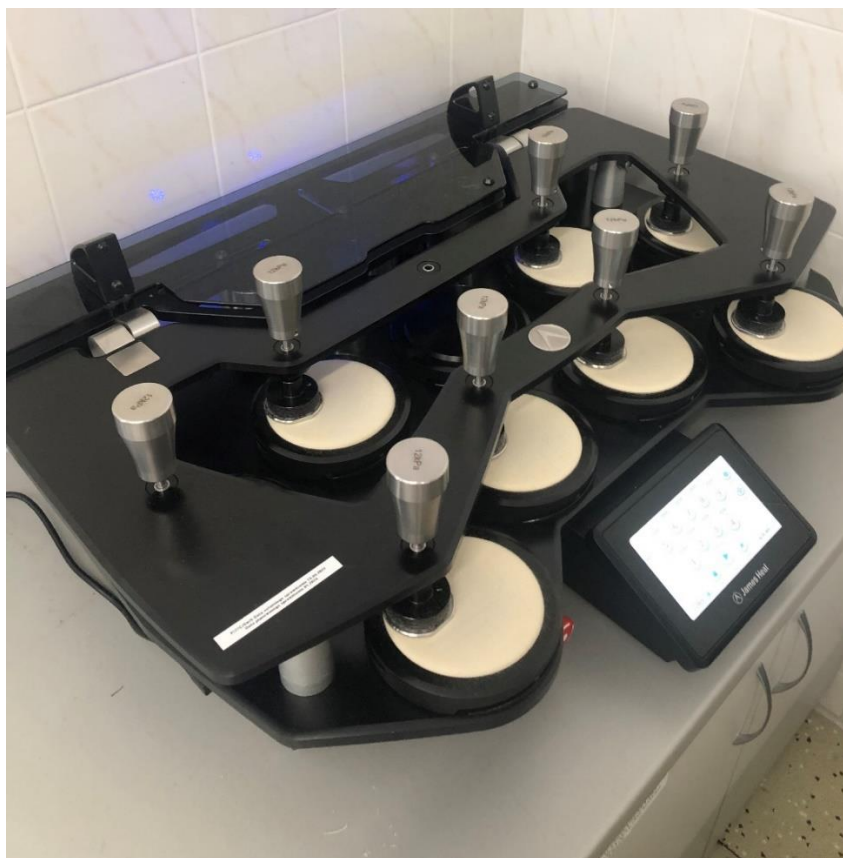
Badania chropowatości powierzchni tkanin za pomocą przyrządu KES-FB4 wykonano w Uniwersytecie Technicznym w Libercu (Czechy). Przyrząd ten został opisany w Rozdziale 2.5. Jest to metoda kontaktowa pomiaru chropowatości powierzchni.

Badania wykonano dla 11 wariantów tkanin. Wyznaczono parametr *SMD* (*Surface Mean Deviation*), który jest odpowiednikiem parametru *Ra* – średnia arytmetyczna profilu chropowatości. Pomiar wykonano w kierunku osnowy i wątku. Następnie obliczono średnią wartość chropowatości *SMD*, jako średnią arytmetyczną z wartości wyznaczonych w obu kierunkach.

4.2.3. Wyznaczanie odporności płaskich wyrobów na ścieranie metodą Martindale’a

Metoda Martindale'a jest jedną z metod wyznaczania odporności płaskich wyrobów na ścieranie w oparciu o normę PN EN ISO 12947-2:2017 i jest szeroko stosowany w przemyśle tekstylnym [143]. Przyrząd Martindale (rys. 4.9) służy do oceny odporności płaskich wyrobów na ścieranie za pomocą dwóch metod:

- wyznaczanie zniszczenia próbki,
- wyznaczanie ubytku masy.



Rys. 4.9. Przyrząd Martindale [opracowanie własne]

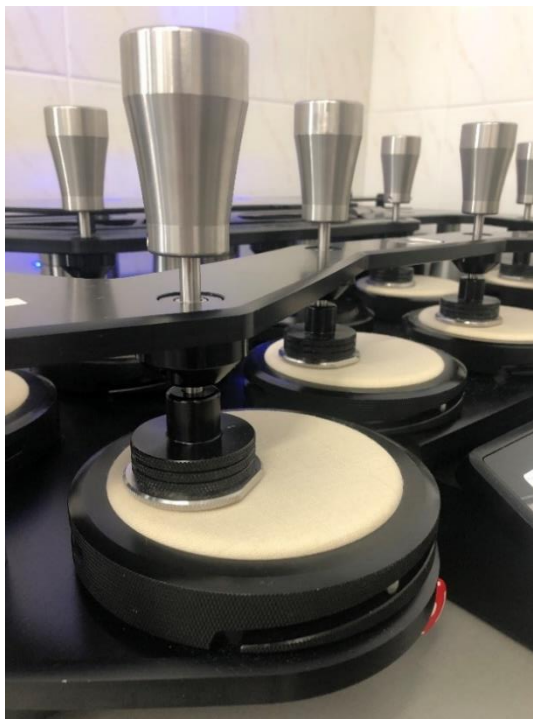
Wyznaczanie zniszczenia próbki

Metoda ta polega na narażeniu próbki materiału na cykliczne tarcie za pomocą koła ściernego, którego ruch jest napędzany elektrycznie. W trakcie testu próbka jest narażana na tarcie z tkaniną wzorcową lub szorstką tkaniną standardową, przy użyciu określonej siły nacisku. Test trwa przez określony czas lub do osiągnięcia określonego poziomu uszkodzenia próbki. Wynik testu wyraża się w postaci liczby cykli tarcia, jakie próbka wytrzymała lub jako stopień zużycia powierzchni. Metoda Martindale'a jest wykorzystywana do testowania odporności na ścieranie tkanin, dywanów, wykładzin, skóry i innych materiałów miękkich.

Jednym z największych zalet tej metody jest jej szybkość i łatwość przeprowadzenia pomiaru, co pozwala na szybkie porównanie różnych materiałów pod względem ich

odporności na ścieranie. Warto jednak zauważyć, że wyniki testu Martindale'a mogą nie odzwierciedlać faktycznej odporności materiału na ścieranie w warunkach rzeczywistych, ponieważ nie uwzględniają czynników zewnętrznych, takich jak wilgotność, temperatury czy obciążenie punktowe. Dlatego też, w celu uzyskania dokładniejszych wyników, testy powinny być przeprowadzane w różnych warunkach i przy użyciu różnych metod, w zależności od specyfiki materiału i zastosowania.

Zasada badania jest bardzo prosta. Okrągła próbka zamocowana w uchwycie próbek pod określonym obciążeniem, wykonuje ruch translacyjny po torach figury Lissajous. Figura Lissajous to krzywa matematyczna, która opisuje ruch harmoniczny dwóch oscylujących ciał, takich jak np. dwa wahadła. Następnie próbka ścierana jest przez medium ścierające. Uchwyt próbki dodatkowo obraca się swobodnie wokół własnej osi, prostopadle do płaszczyzny próbki. Odporność na ścieranie płaskiego wyrobu włókienniczego jest wyznaczana na podstawie przedziału kontrolnego, w którym wystąpiło zniszczenie próbki. Rysunek 4.10 przedstawia elementy składowe przyrządu, tj. obciążnik, elementy składowe mocowania próbki, ścieracz, stół ścierania i pierścień ściskający.



Rys. 4.10. Elementy składowe Martindale'a [opracowanie własne]

Przed pobraniem próbki roboczej, próbki laboratoryjne powinny się aklimatyzować co najmniej 18 h w stanie beznapięciowym, rozłożone na gładkiej i poziomej powierzchni ze swobodnym dostępem powietrza o parametrach klimatu normalnego tj. temperatury (20 ± 2) °C i wilgotności względnej (65 ± 5) %. Następnie z próbki laboratoryjnej wycina się próbki robocze o średnicy 38 mm (rys. 4.11).



Rys. 4.11. Próbką roboczą przed ścieraniem [opracowanie własne]

Następnie nakrętkę uchwyty próbki (2) umieszcza się w urządzeniu do mocowania próbek (1). Próbkę roboczą (5) umieszcza się delikatnie i centralnie w nakrętce uchwyty próbki, prawą stroną do dołu. Na próbce roboczej kładzie się podkładkę z pianki (6) o wymiarach średnicy 38 mm. Rysunek 4.12 przedstawia elementy składowe mocowania próbki.



Rys. 4.12. Elementy składowe mocowania próbek: 1 – urządzenie do mocowania próbek, 2 – nakrętka uchwyty próbki, 3 – wkładka uchwyty próbki, 4 – oprawa uchwyty, 5 – próbka robocza, 6 – podkładka z pianki [opracowanie własne]

Wkładkę uchwyty próbki (3) umieszcza się w nakrętce (2), następnie nakłada oprawę uchwyty (4) i wszystkie elementy mocno ze sobą skręca (rys. 4.13).



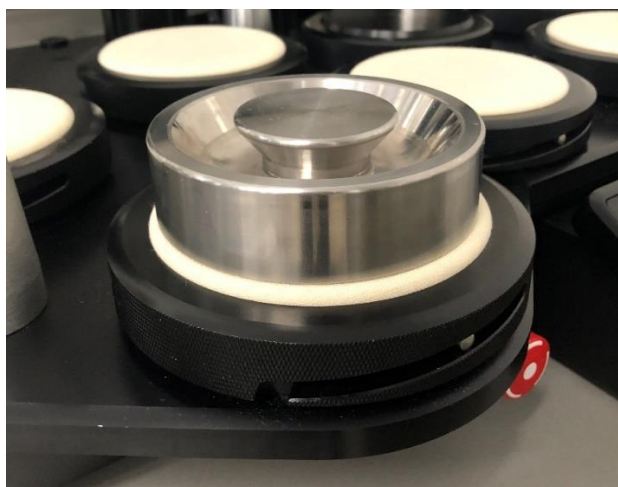
Rys. 4.13. Elementy składowe mocowania próbek: 1 – obciążenie, 2 – nakrętka uchwyty próbki, 3 – wkładka uchwyty próbki, 4 – oprawa uchwyty [opracowanie własne]

Następnie kładzie się wełnianą podkładkę filcową o wymiarach średnicy 140 mm, na niej umieszcza się ścieracz również o takich samych wymiarach. Centralnie na stolik

ścierania kładzie się obciążnik o masie $(2,5 \pm 0,5)$ kg i średnicy (120 ± 10) mm, aby ścisnąć leżący filc i ścieracz. Zakłada się pierścień ściskający i dokładnie mocuje ścieracz.



Rys 4.14. Filc, ścieracz oraz pierścień ściskający [opracowanie własne]



Rys. 4.15. Obciążnik [opracowanie własne]

Wyznaczenie ubytku masy

Pobranie próbek i przygotowanie próbek roboczych odbywają się analogicznie jak jest to opisane we wcześniejszej metodzie. Różni się tylko zasada badania. Ubytek masy próbki roboczej jest wyznaczany dla każdej z wymienionych liczb suwów ścierania [144]. Rysunek 4.16. przedstawia próbkę roboczą po ścieraniu.



Rys. 4.16. *Próbka robocza po 10 000 cyklach ścierania [opracowanie własne]*

Tabela. 4.3. *Przedziały kontrolne przy wyznaczaniu ubytku masy*

Serie pomiarowe	Liczba suwów do zniszczenia próbki	Liczby suwów dla wyznaczenia ubytku masy
a	$\leq 1\ 000$	100, 250, 500, 750, 1 000
b	$> 1\ 000 \leq 5\ 000$	500, 750, 1 000, 2 500, 5 000
c	$> 5\ 000 \leq 10\ 000$	1 000, 2 500, 5 000, 7 500, 10 000
d	$> 10\ 000 \leq 25\ 000$	5 000, 7 500, 10 000, 15 000, 25 000
e	$> 25\ 000 \leq 50\ 000$	10 000, 15 000, 25 000, 40 000, 50 000
f	$> 50\ 000 \leq 100\ 000$	10 000, 25 000, 50 000, 75 000, 100 000
g	$> 100\ 000$	25 000, 50 000, 75 000, 100 000, 100 000

4.3. Plan eksperymentu

I. Analiza wpływu splotu na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin

Cel eksperymentu: Zbadanie wpływu splotu na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin.

Hipoteza: Tkaniny o różnych splotach charakteryzują się różnymi parametrami geometrycznej struktury powierzchni.

Zmienne niezależne: Splot tkaniny, masa liniowa przędzy wątkowej.

Zmienne zależne: Parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin.

W celu przeanalizowania wpływu splotu na właściwości powierzchniowe tkanin wytworzono 12 wariantów tkanin bawełnianych. Do produkcji tkanin użyto przędz bawełnianych o różnej masie liniowej:

- 50 tex jako osnowa,
- 60 tex i 100 tex jako wątek.

Zastosowano 6 wariantów splotów tkackich. Zestawienie wariantów tkanin poddanych badaniom w ramach I części badań eksperymentalnych podano w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Zestawienie wariantów tkanin poddanych badaniom w ramach pierwszej części badań eksperymentalnych

Numer wariantu	Splot	Oznaczenie splotu	Masa liniowa przędzy wątkowej [tex]	Liczność wątku [tex]
1.	Płócienny	1/1	100	110
2.			60	110
7.	Skośny	3/1 S	100	110
8.			60	110
14.	Skośny	2/2 S	100	110
15.			60	110
16.	Ryps poprzeczny	1/1 (010)	100	110
17.			60	110
18.	Ryps podłużny	2/2 (2)	100	110
19.			60	110
20.	Panama	2/2 (020)	100	110
21.			60	110

II. Analiza wpływu liczności wątku na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin

Cel eksperymentu: Celem eksperymentu jest zbadanie wpływu liczności wątku na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin.

Hipoteza: Tkaniny z różną licznoscią wątku będą miały różne parametry charakteryzujące strukturę geometryczną ich powierzchni.

Zmienne niezależne: licznosc wątku, splot.

Zmienne zależne: Parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tkanin.

W celu przeanalizowania wpływu splotu na właściwości powierzchniowe tkanin wytworzono 6 wariantów tkanin bawełnianych. Do produkcji tkanin użyto przędz bawełnianych o różnej masie liniowej:

- 50 tex jako osnowa,
- 100 tex jako wątek.

Zastosowano dwa warianty splotowe: płócienny i skośny 3/1 S oraz 3 warianty licznosci wątku: 11/cm, 9/cm, 7/cm (Tabela 4.5).

Tabela 4.5. Zestawienie wariantów tkanin poddanych badaniom w ramach drugiej części badań eksperymentalnych

Numer wariantu	Splot	Oznaczenie splotu	Masa liniowa przędzy wątkowej [tex]	Licznosc wątku [cm ⁻¹]
1.	Płócienny	1/1	100	11
3.			100	9
4.			100	7
5.	Skośny	3/1 S	100	11
6.			100	9
7.			100	7

III. Analiza wpływu masy liniowej przędzy wątkowej na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin

Cel eksperymentu: Badanie wpływu masy liniowej przędzy wątkowej na parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tkanin.

Hipoteza: Tkaniny o z przędzą wątkową o różnej masie liniowej mają różne parametry charakteryzujące geometryczną strukturę ich powierzchni.

Zmienne niezależne: Splot tkaniny, masa liniowa wątku.

Zmienne zależne: Parametry charakteryzujące strukturę geometryczną tkaniny.

W celu przeanalizowania wpływu masy liniowej wątku na właściwości powierzchniowe tkanin wytworzono 5 wariantów tkanin bawełnianych. Do produkcji tkanin użyto przędz bawełnianych o różnej gęstości liniowej:

- 50 tex jako osnowa,
- 110 tex jako wątek.

Tkaniny wykonano w splocie skośnym 3/1 S. Zastosowano 5 wariantów przędzy wątkowej, o masie liniowej: 100 tex, 60 tex, 50 tex, 40 tex i 30 tex (Tabela 4.6).

Tabela 4.6. Zestawienie wariantów tkanin poddanych badaniom w ramach trzeciej części badań eksperymentalnych

Numer wariantu	Splot	Oznaczenie splotu	Masa liniowa wątku [tex]	Liczność wątku [cm ⁻¹]
7.	Skośny	3/1 S	100	110
8.			60	110
9.			50	110
11.			40	110
12.			30	110

IV. Analiza zależności pomiędzy podstawowymi i pochodnymi parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin

Cel eksperymentu: Analiza korelacji pomiędzy podstawowymi i pochodnymi parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin.

Hipoteza: Istnieje statystycznie istotna zależność korelacyjna pomiędzy podstawowymi i pochodnymi parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin.

Zmienne niezależne: Pochodne i podstawowe parametry struktury tkanin

Zmienne zależne: Parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkaniny.

W tym etapie obiektem badań były wszystkie tkaniny wytworzone dla celów eksperymentu. Badaniom poddano 21 wariantów tkanin wyspecyfikowanych w tabeli 4.1.

V. Analiza zmian geometrycznej struktury powierzchni tkanin poddanych procesowi ścierania za pomocą przyrządu Martindale'a

Cel eksperymentu: Analiza możliwości wykorzystania pomiarów powierzchni za pomocą profilometru do oceny zmian powierzchni tkanin na skutek ścierania.

Hipoteza: W wyniku ścierania powierzchnia tkanin ulega zmianie, co odzwierciedla się w zmianie wartości parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin.

W tym etapie obiektem badań było 5 wariantów tkanin, o symbolach: 1 (splot płócienny), 7 (splot skośny 3/1S), 16 (splot rypсовy 1/1 (010)), 18 (splot rypсовy (2/2 (2)) i 20 (splot panama 2/2 (020)).

VI. Analiza porównawcza wyników uzyskanych za pomocą profilometru i system KES-FB4

Cel eksperymentu: Analiza zgodności wyników uzyskiwanych za pomocą metody kontaktowej (KES-FB4) i metody bezkontaktowej z użyciem profilometru optycznego.

Hipoteza: Wyniki pomiaru chropowatości powierzchni tkanin za pomocą metody kontaktowej i bezkontaktowej różnią się istotnie pod względem wartości bezwzględnej, jednak istnieją między nimi korelacja liniowa.

W tym etapie obiektem badań było 11 wariantów tkanin, o symbolach: 1 i 2 (splot płócienny), 7 i 8 (splot skośny 3/1S), 15 (splot skośny 2/2 S), 16 i 17 (splot rypсовy 1/1 (010)), 18 i 19 (splot rypсовy (2/2 (2))) oraz 20 i 21 (splot panama 2/2 (020)).

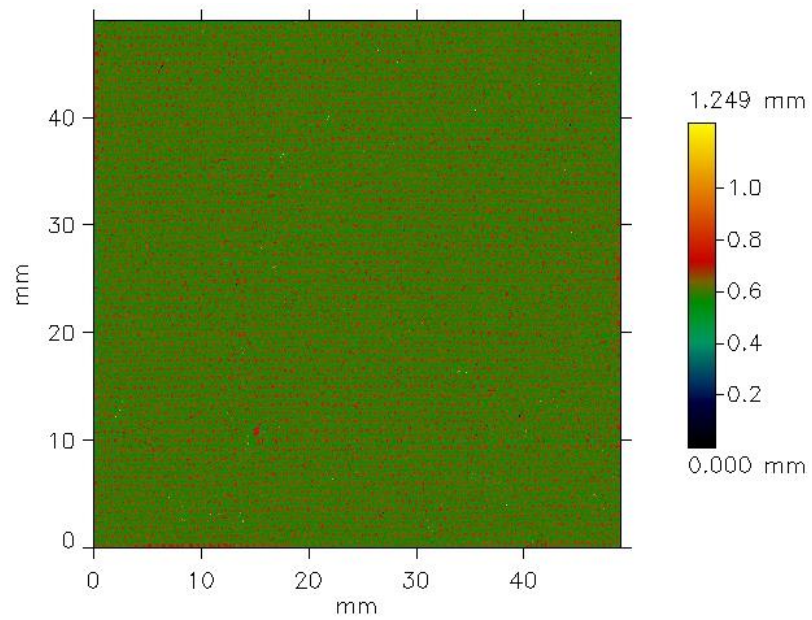
5. Wpływ struktury tkanin na geometryczną strukturę ich powierzchni

W ramach części eksperymentalnej wykonano pomiary geometrycznej struktury powierzchni tkanin o programowo zróżnicowanej strukturze. Badania wykonano zgodnie z planem eksperymentu przedstawionym w Rozdziale 4. Poniżej podano i przedyskutowano wyniki uzyskane w ramach poszczególnych etapów eksperymentu.

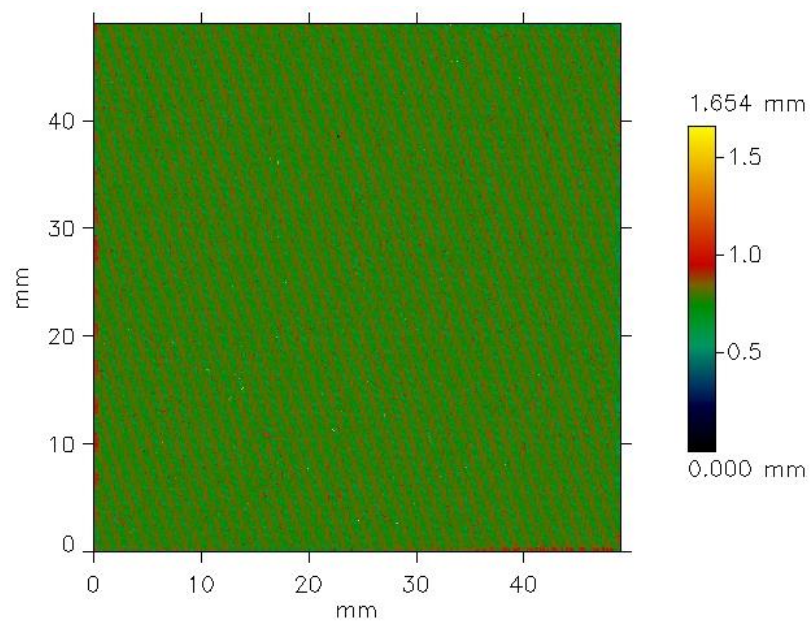
5.1. Analiza wpływu splotu na parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tkanin

Analizę wpływu splotu na parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tkanin wykonano w oparciu o wyniki pomiaru 12 wariantów tkanin. Tkaniny zostały wykonane w 6 splotach. Wytworzono dwa zestawy wariantów splotowych, na bazie dwóch asortymentów przędz wątkowych: 100 tex OE i 60 tex OE.

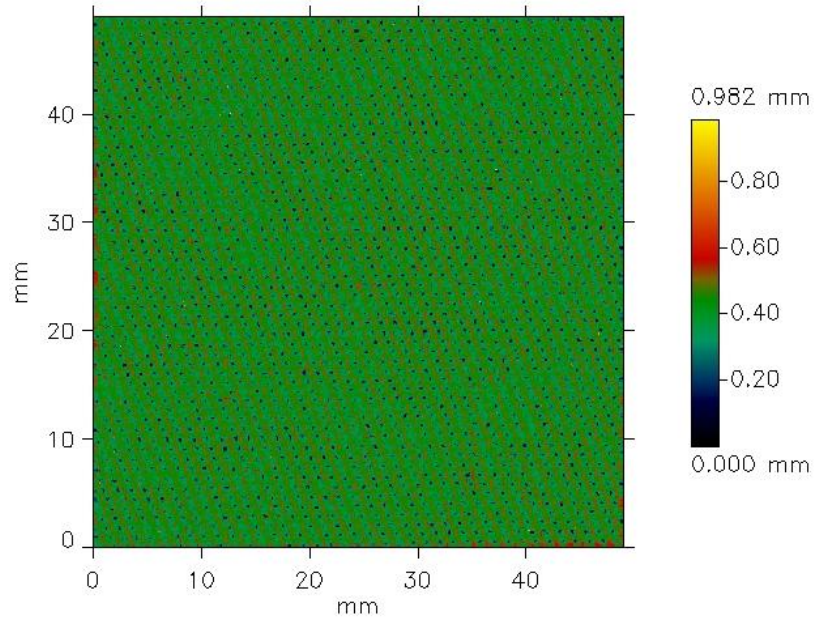
Poniżej, na rys. 5.1 – 5.6 przedstawiono przykładowe obrazy powierzchni tkanin o zróżnicowanych splotach, z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex. Po prawej stronie każdego obrazu przedstawiono skalę barwną, na której odpowiednimi kolorami oznaczono wysokość – wartości zmiennej z poszczególnych punktów na powierzchni tkaniny.



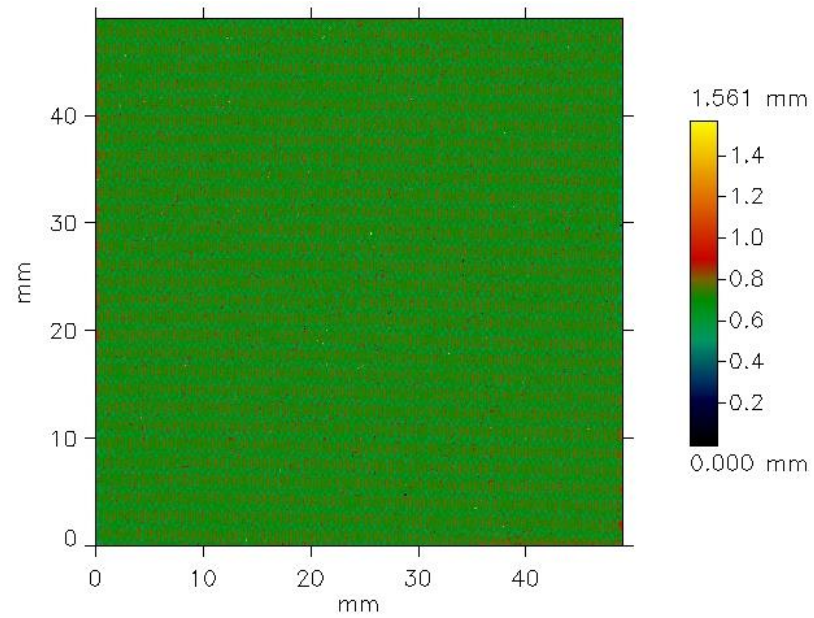
Rys. 5.1. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splotcie płóciennym po wyeliminowaniu komponentu falistości



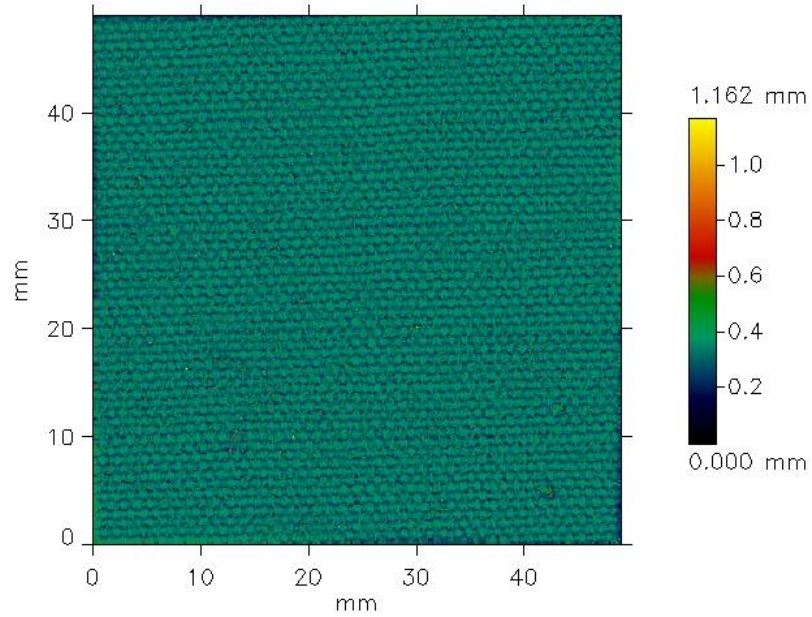
Rys. 5.2. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splotcie skośnym 3/1 S po wyeliminowaniu komponentu falistości



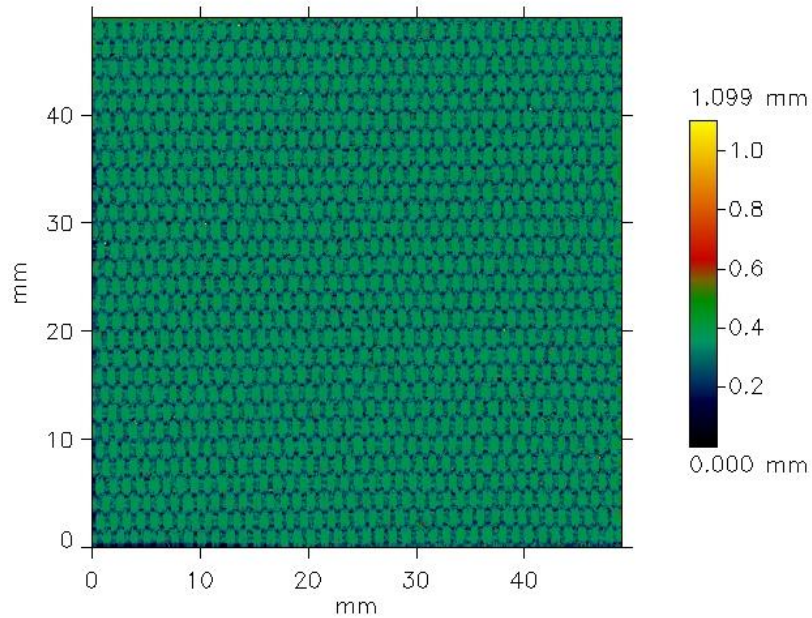
Rys. 5.3. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 2/2 S
po wyeliminowaniu komponentu falistości



Rys. 5.4. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie rypсовym 1/1 (010)
po wyeliminowaniu komponentu falistości



Rys. 5.5. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie rypsowym 2/2 (2)
po wyeliminowaniu komponentu falistości



Rys. 5.6. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie panama 2/23 (020)
po wyeliminowaniu komponentu falistości

Na obrazach uzyskanych z profilometru wyraźnie zarysowuje się splot tkanin. Jaśniejsze i ciemniejsze miejsca, wynikają ze zróżnicowanej wysokości poszczególnych

punktów na powierzchni. Zróżnicowanie to wynika z przeplatania się nitek osnowy i wątku zgodnie z raportem splotu. Na obrazach przedstawiających tkaniny o splocie skośnym (rys. 5.2 i 5.3) wyraźnie zarysowana jest też kierunkowość powierzchni, wynikające z obecności skośnych prążków o kierunku S na powierzchni tkanin o splocie skośnym.

Dla wszystkich analizowanych tkanin wyznaczono parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni, zgodnie z normą PN-EN ISO 4287:1999 [13]. W zastosowanej metodzie parametry charakteryzujące profil chropowatości wyznacza się w oparciu o pomiary 2D i 3D. Wyniki obliczone dla całej powierzchni (pomiar 3D) oznacza się poprzez dodanie przedrostka „s” [37].

Dla analizowanych tkanin wyznaczono wszystkie możliwe parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni. Analizie poddano wytypowane parametry:

- sRa – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
- sRq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości,
- sRz – największa wysokość profilu chropowatości,
- sRt – głębokość całkowita wysokości profilu chropowatości,
- $sRsk$ – skośność – parametr, który reprezentuje stopień odchylenia kształtu chropowatości; parametr $sRsk$ służy do oceny odchyżeń w rozkładzie wysokości.

Interpretacja jest następująca:

$sRsk = 0$: rozkład wysokości symetryczny względem linii średniej,

$sRsk > 0$: odchylenie poniżej linii średniej,

$sRsk < 0$: odchylenie powyżej linii średniej,

- $sRku$ – kurtoza, jej wartość jest miarą ostrości profilu chropowatości. Interpretacja jest następująca:

$sRku = 3$: wykres rozkładu wartości z (wysokości punktów) jest normalny

$sRku > 3$: wykres rozkładu wartości z (wysokości punktów) jest ostry

$sRku < 3$: wykres rozkładu wartości z (wysokości punktów) jest spłaszczony.

Średnie wartości wytypowanych parametrów przedstawiono w tabeli 5.1. Średnie obliczono w oparciu o wyniki 5 powtórzeń pomiaru dla każdego wariantu tkanin.

Tabela. 5.1. Parametry charakteryzujące topografię powierzchni badanych tkanin

Splot	Masa liniowa przędzy wątkowej [tex]	sRa [mm]	sRq [mm]	sRz [mm]	sRt [mm]	sRsk [-]	sRku [-]
Płócienny	100	0,044	0,056	1,191	1,399	0,202	7,087
	60	0,039	0,048	0,958	0,338	0,149	6,284
Skośny 3/1 S	100	0,053	0,068	1,273	1,524	-0,388	6,338
	60	0,054	0,069	1,251	1,410	-0,769	6,781
Skośny 2/2 S	100	0,058	0,077	1,050	1,231	-0,965	5,888
	60	0,062	0,080	1,102	1,387	-0,924	4,530
Ryps poprzeczny	100	0,060	0,075	1,275	1,515	0,094	5,721
	60	0,062	0,075	1,120	1,357	-0,207	3,883
Ryps podłużny	100	0,036	0,047	1,002	1,259	0,790	12,117
	60	0,035	0,046	1,290	1,574	-0,228	17,554
Panama	100	0,050	0,063	0,948	1,326	-0,123	5,521
	60	0,047	0,059	0,777	1,174	-0,203	5,326

W celu oceny wpływu splotu na geometryczną strukturę powierzchni tkanin uzyskane wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej z zastosowaniem wieloczynnikowej analizie wariancji. Jako zmienne zależne zastosowano poszczególne parametry geometrycznej struktury powierzchni tkanin, natomiast jako zmienne niezależne – czynniki główne: splot i masę liniową przędzy wątkowej. Przeanalizowano również interakcję między czynnikami głównymi.

Wyniki analizy wariancji dla parametru sRa – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości, przedstawiono w tabeli 5.2 Kolorem czerwonym zaznaczono przypadki statystycznie istotne przy poziomie istotności 0.05.

Tabela 5.2. Wyniki analizy wariancji dla parametru *sRa*

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	0,1490	1	0,1490	23011,84	0,0000
Masa liniowa wątku	0,0000	1	0,0000	0,66	0,4209
Splot	0,0052	5	0,0010	160,42	0,0000
Splot x masa liniowa wątku	0,0001	5	0,0000	4,19	0,0031
Błąd	0,0003	48	0,0000		

Legenda:

SS – suma kwadratów,

df – liczba stopni swobody,

MS – średnie kwadratów,

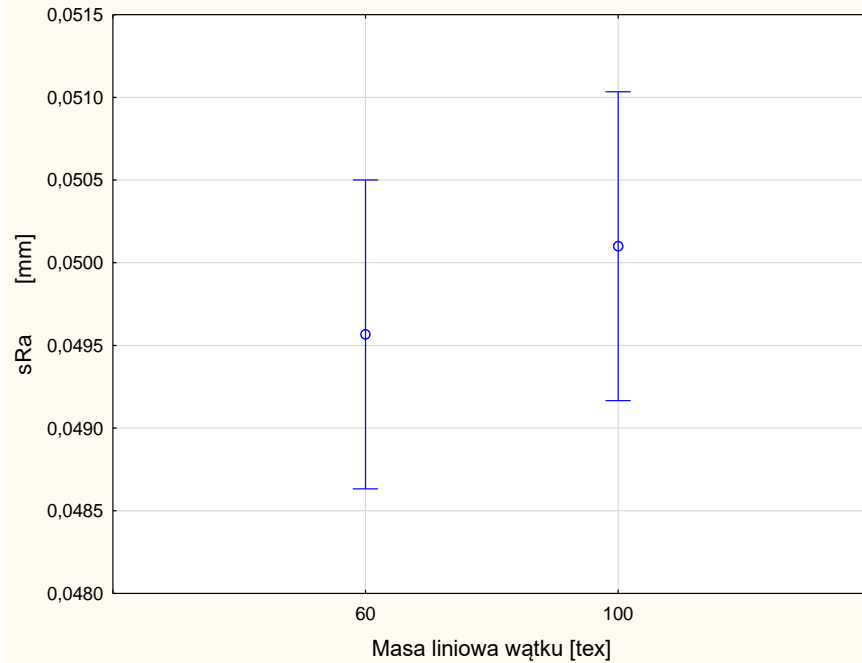
F – zmienna o rozkładzie *F*,

p – poziom istotności.

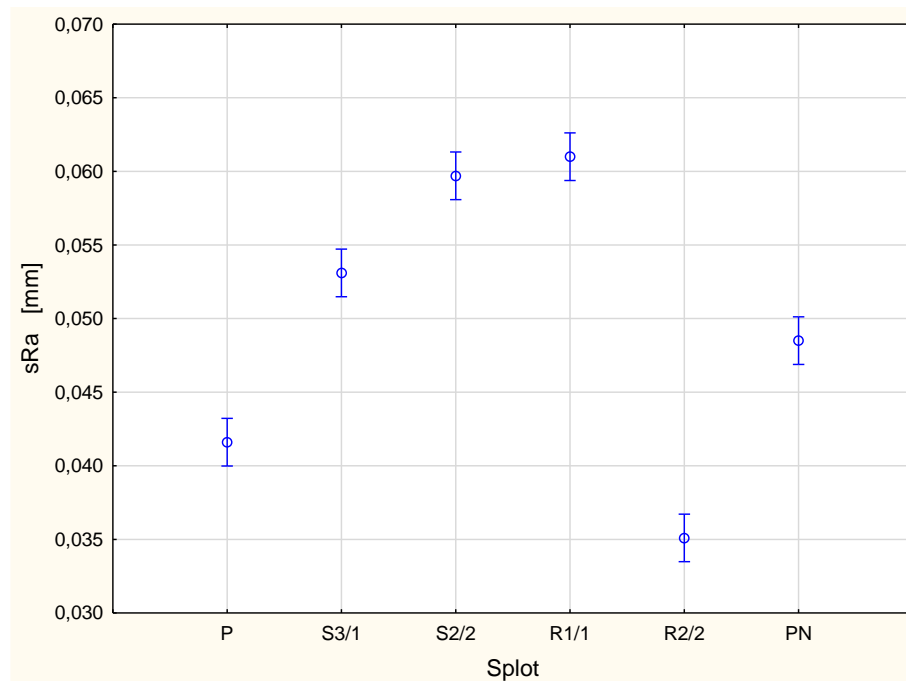
Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono, że splot ma istotny wpływ na wartość parametru *sRa* (w tabeli kolor czerwony). Natomiast wpływ masy liniowej jest statystycznie nieistotny przy poziomie istotności 0,05.

Rys. 5.7 i 5.8 przedstawiają zależność parametru *sRa* od czynników głównych: masy liniowej wątku (rys. 5.7) oraz splotu (rys. 5.8). Przy zastosowaniu przędzy wątkowej o masie liniowej 100 tex odnotowano średnio w grupie analizowanych tkanin, wyższą wartość parametru *sRa* niż w grupie tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex (rys. 5.7). Duży rozrzut wartości parametr *sRa* wynika z tego, że w grupie tkanin z tą samą przędzą wątkową znajdują się warianty o 6 różnych splotach. A jak pokazują wyniki analizy statystycznej (Tabela 5.2) oraz następny wykres (rys. 5.8) splot w sposób istotny wpływa na wartość parametru *sRa*.

Wpływ splotu na parametr *sRa* jest istotny statystycznie przy poziomie istotności 0,05. Najwyższą wartość średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości odnotowano dla tkanin o splocie rypsowym 1/1 (010) oraz skośnym 2/2 S (rys. 5.8). Najniższa wartość parametru *sRa* wystąpiła dla tkanin o splocie rypsowym 2/2 (2) i płóciennym.

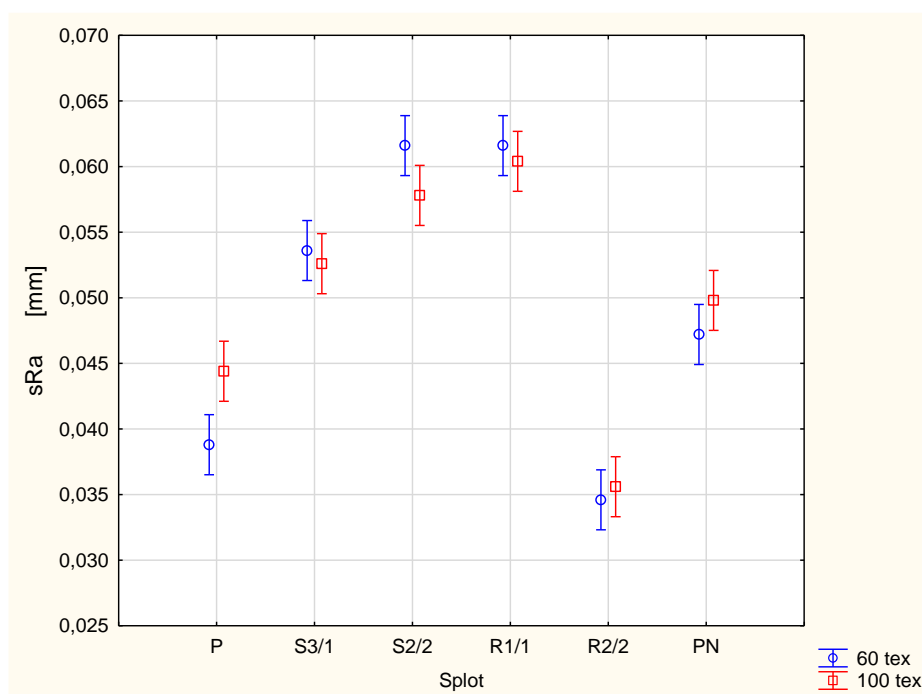


Rys. 5.7. Wpływ masy liniowej przędzy wstkowej na wartość średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości sRa



Rys. 5.8. Wpływ splotu tkaniny na wartość średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości sRa

Odnotowano również statystycznie istotną interakcję pomiędzy czynnikami głównymi. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość parametru sRa modyfikuje wpływ splotu na wartość tego parametru (rys. 5.9). W trzech przypadkach: tkaniny o splotcie płóciennym, rypsowym 2/2 (2) oraz panama 2/2 (020) wartość średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości sRa jest wyższa dla wariantów z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex, natomiast w pozostałych przypadkach splotowych – jest niższa od wartości tego parametru dla wariantów z przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex.



Rys. 5.9. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej i splotu tkaniny na wartość średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości sRa

Wyniki analizy statystycznej dla parametry sRq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości, przedstawiono w tabeli 5.3. Wyniki analizy statystycznej są bardzo podobne do wyników analizy dla parametru sRa . Statystycznie istotną zależność odnotowano pomiędzy splotem tkanin, a wartością parametru sRq , natomiast wpływ masy liniowej wątku został oceniony jak nieistotny przy poziomie istotności 0,05. Jest to zgodne z oczekiwaniami, gdyż wartości parametrów sRa i sRq są ze sobą skorelowane (rys. 5.13).

Tabela 5.3. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRq

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	0,2429	1	0,2429	23633,76	0,0000
Masa liniowa wątku	0,0000	1	0,0000	3,72	0,0597
Splot	0,0080	5	0,0016	156,20	0,0000
Splot x masa liniowa wątku	0,0002	5	0,0000	3,28	0,0125
Błąd	0,0005	48	0,0000		

Legenda:

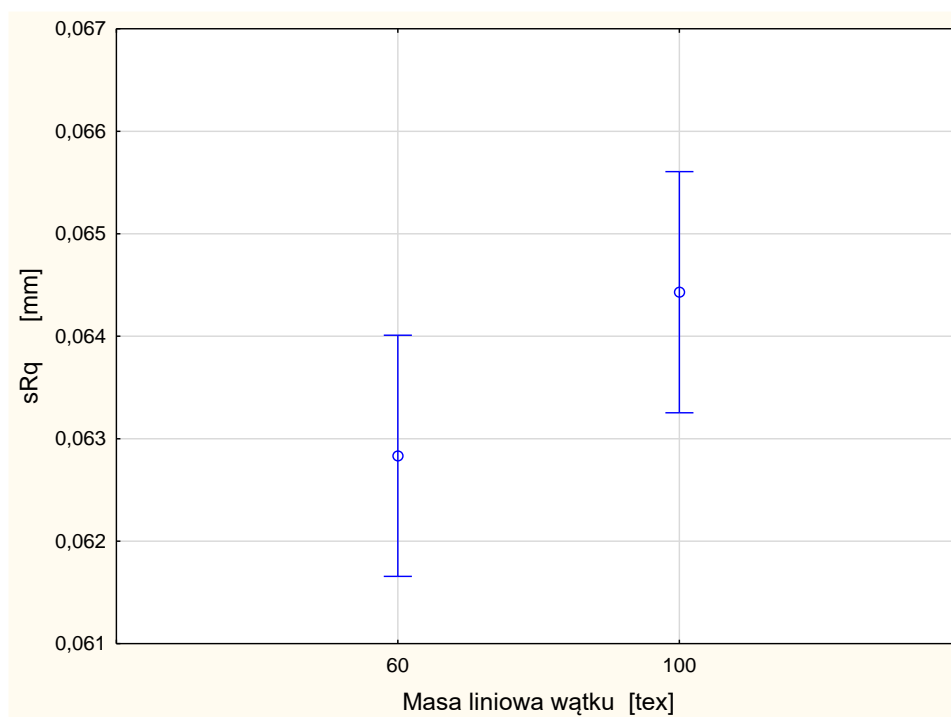
SS – suma kwadratów,

df – liczba stopni swobody,

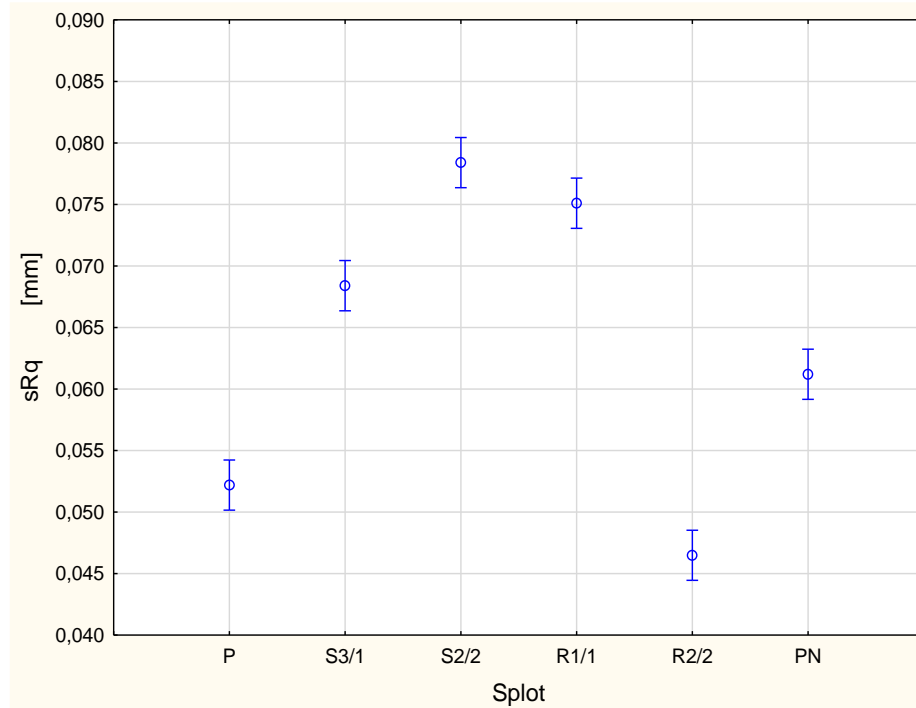
MS – średnie kwadratów,

F – zmienna o rozkładzie *F*,

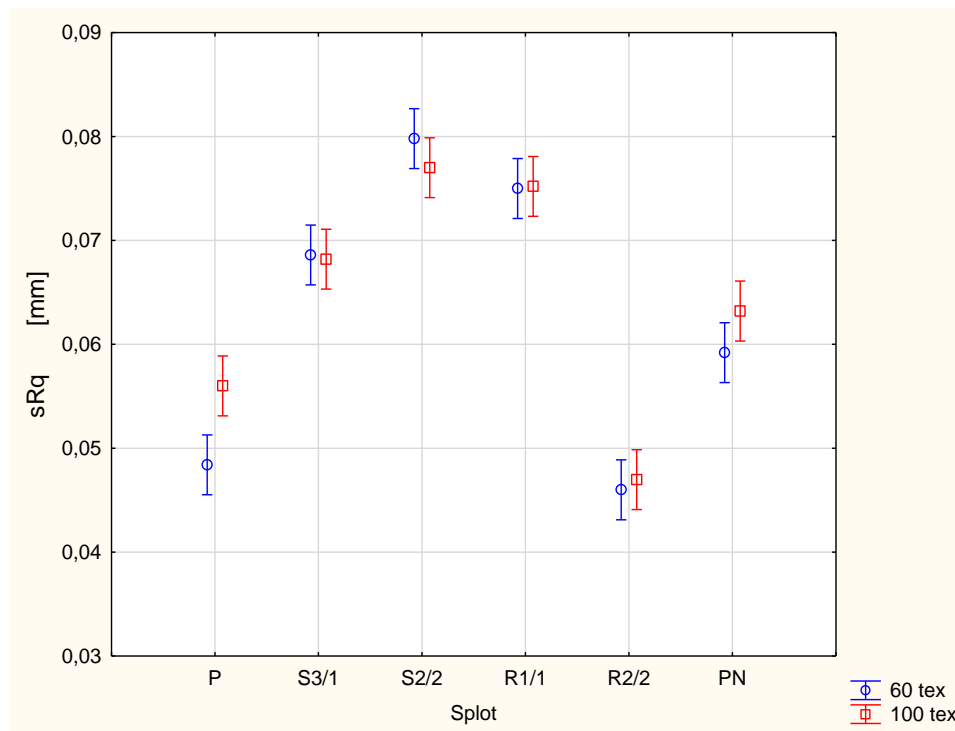
p – poziom istotności.



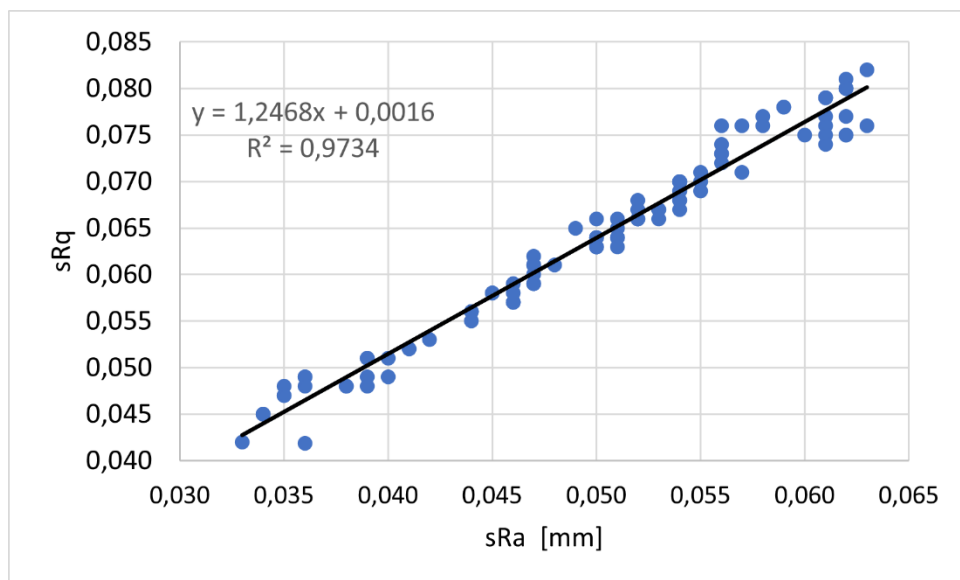
Rys. 5.10. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości sRq



Rys. 5.11. Wpływ splotu tkaniny na wartość średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości sRq



Rys. 5.12. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej i splotu tkaniny na wartość średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości sRq



Rys. 5.13. Zależność pomiędzy parametrami sRa i sRq

W przypadku parametrów sRz i sRt odnotowano istotny wpływ splotu na wartość tych parametrów. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej jest statystycznie nieistotny. Odnotowano statystycznie istotną interakcję pomiędzy czynnikami głównymi splotem i masą liniową przędzy wątkowej (Tabele 5.4. i 5.5). Masa liniowa przędzy wątkowej w statystycznie istotny sposób zmienia wpływ splotu na wartość parametrów sRz i sRt (rys. 5.16, 5.19)

Tabela 5.4. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRz

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	73,4300	1	73,4300	3192,86	0,0000
Masa liniowa wątku	0,0319	1	0,0319	1,39	0,2446
Splot	0,8713	5	0,1742	7,58	0,0000
Splot x masa liniowa wątku	0,4862	5	0,0972	4,23	0,0029
Błąd	73,4300	1	73,4300	3192,86	0,0000

Legenda:

SS – suma kwadratów,

df – liczba stopni swobody,

MS – średnie kwadratów,

F – zmienna o rozkładzie F,

p – poziom istotności.

Tabela 5.5. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRt

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	113.3743	1	113.3743	5006.05	0.0000
Masa liniowa wątku	0.0001	1	0.0001	0.00	0.9558
Splot	0.3397	5	0.0679	3.00	0.0195
Splot x masa liniowa wątku	0.4711	5	0.0942	4.160	0.0032
Błąd					

Legenda:

SS – suma kwadratów,

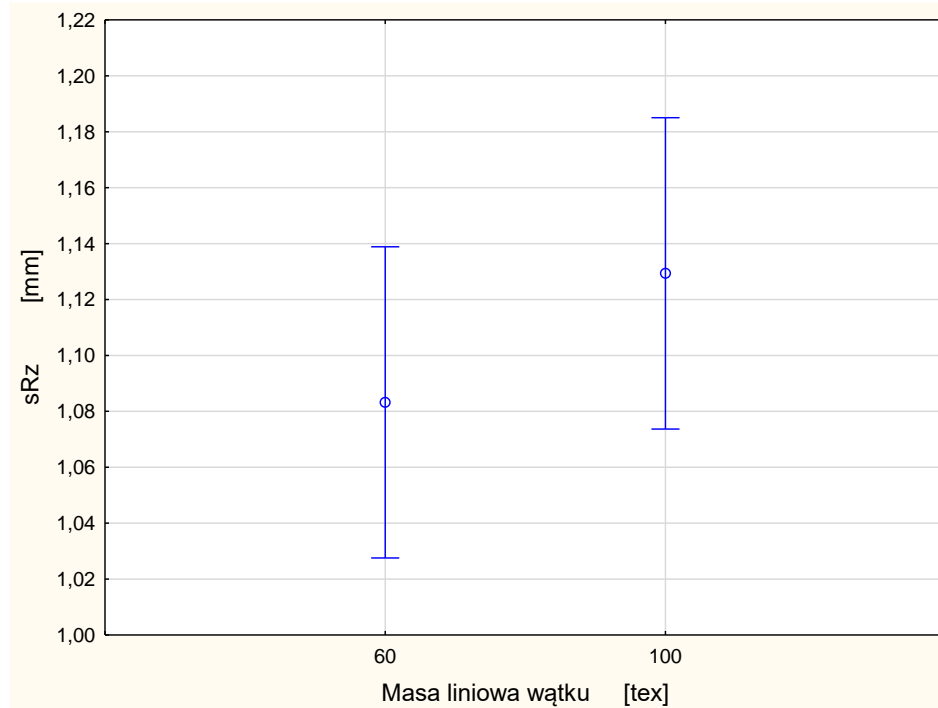
df – liczba stopni swobody,

MS – średnie kwadratów,

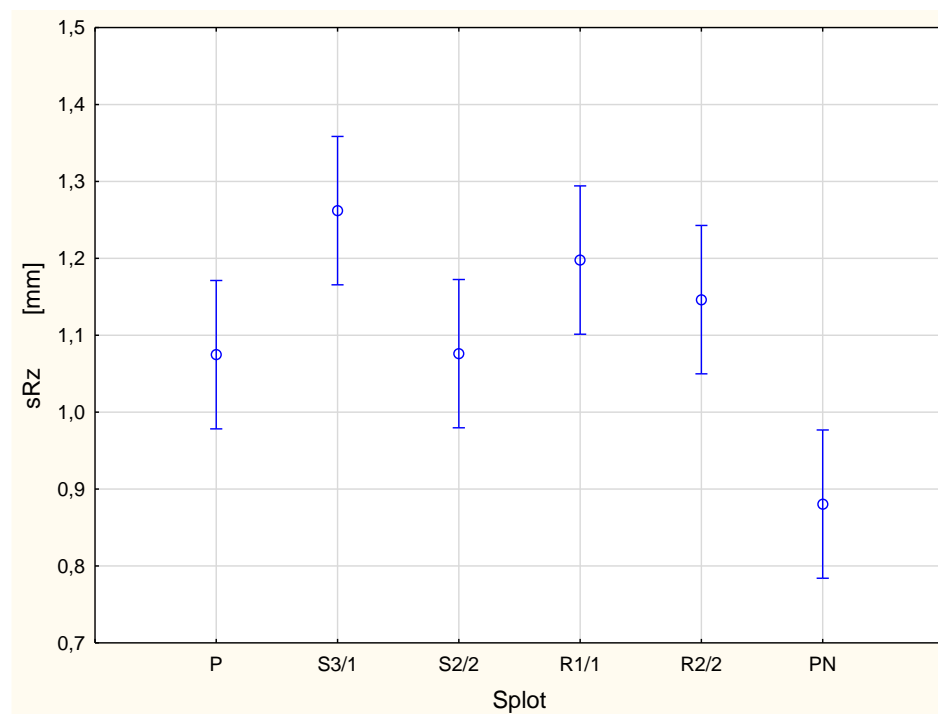
F – zmienna o rozkładzie *F*,

p – poziom istotności.

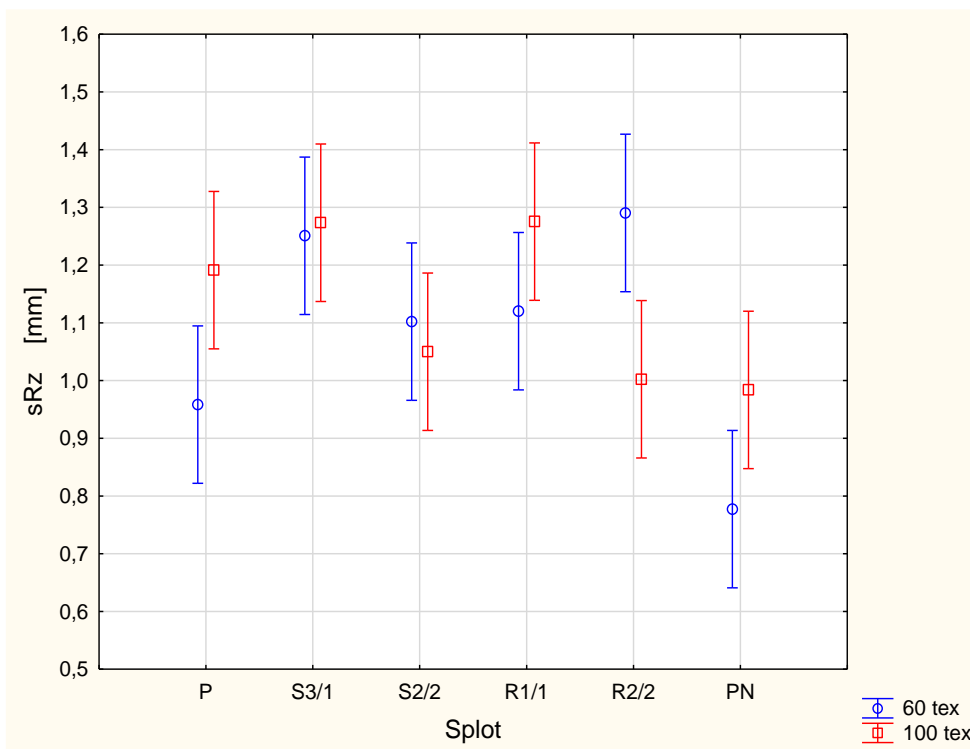
Parametr sRz jest to największa wysokość profilu. Stanowi on sumę wysokości największego wzniesienia profilu sRp i głębokości najniższego wgłębienia profilu sRv (rys. 2.21). Wartość parametru sRz dla tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex jest wyższa od średniej wartości tego parametru dla grupy tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex (rys. 5.14). Jednakże stwierdzono tu znaczny rozrzut wyników w obu grupach. Wynika to z wpływu splotu na wartość parametru sRz (rys. 5.15). Najwyższą wartość parametru sRz odnotowano dla tkanin o splocie skośnym 3/1 S oraz o splocie rypsowym 1/1 (010). Najniższa wartość wystąpiła dla tkanin o splocie panamowym 2/2 (020). Stwierdzono również interakcję pomiędzy splotem i masą liniową przędzy wątkowej (rys. 5.16). W przypadku tkanin o splocie skośnym 2/2 S oraz rypsowym 2/2 (2) wartość parametru sRz dla tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex jest niższa niż dla tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex. Dla pozostałych splotów relacja ta jest przeciwna (rys. 5,16).



Rys. 5.14. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość największej wysokości profilu chropowatości sRz



Rys. 5.15. Wpływ splotu tkaniny na wartość największej wysokości profilu chropowatości sRz



Rys. 5.16. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej i splotu tkaniny na wartość największej wysokości profilu chropowatości sRz

Tabela 5.5. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRt

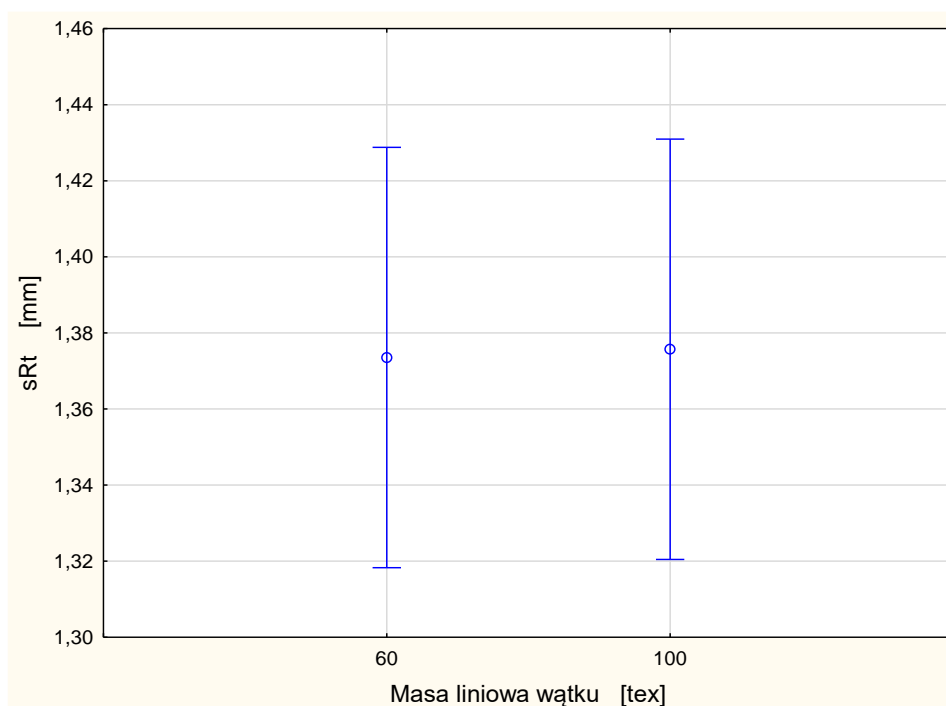
Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	113,3743	1	113,3743	5006,05	0,0000
Masa liniowa wątku	0,0001	1	0,0001	0,00	0,9558
Splot	0,3397	5	0,0679	3,00	0,0195
Splot x masa liniowa wątku	0,4711	5	0,0942	4,160	0,0032
Błąd	1,0871	48	0,0226		

Legenda:

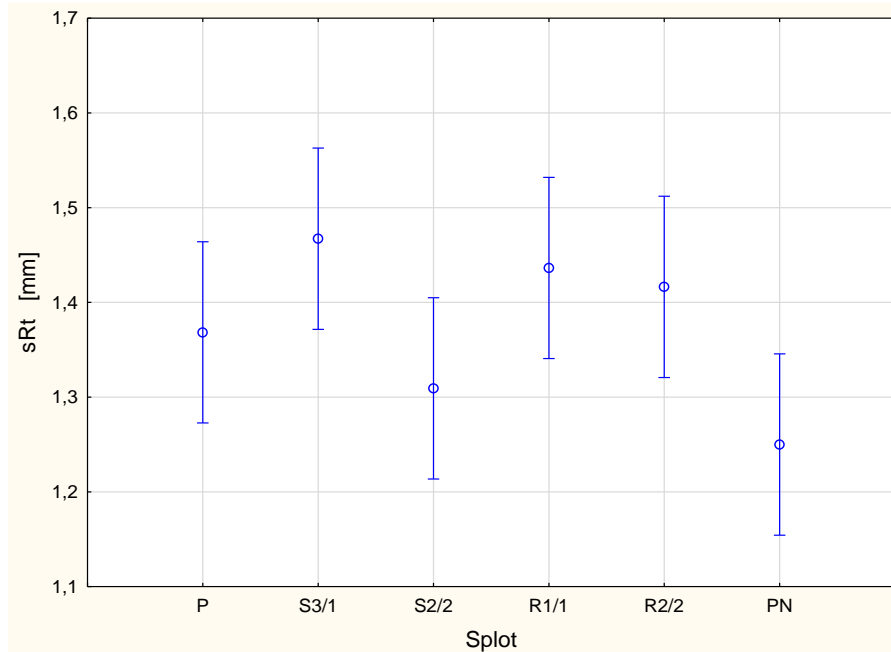
SS – suma kwadratów,
df – liczba stopni swobody,
MS – średnie kwadratów,
F – zmienna o rozkładzie F,
p – poziom istotności.

Parametr sRt jest to całkowita wysokość profilu. Stanowi ona odległość w pionie między maksymalną wysokością szczytu profilu, a maksymalną głębokością doliny profilu na długości odcinka elementarnego (rys. 2.23).

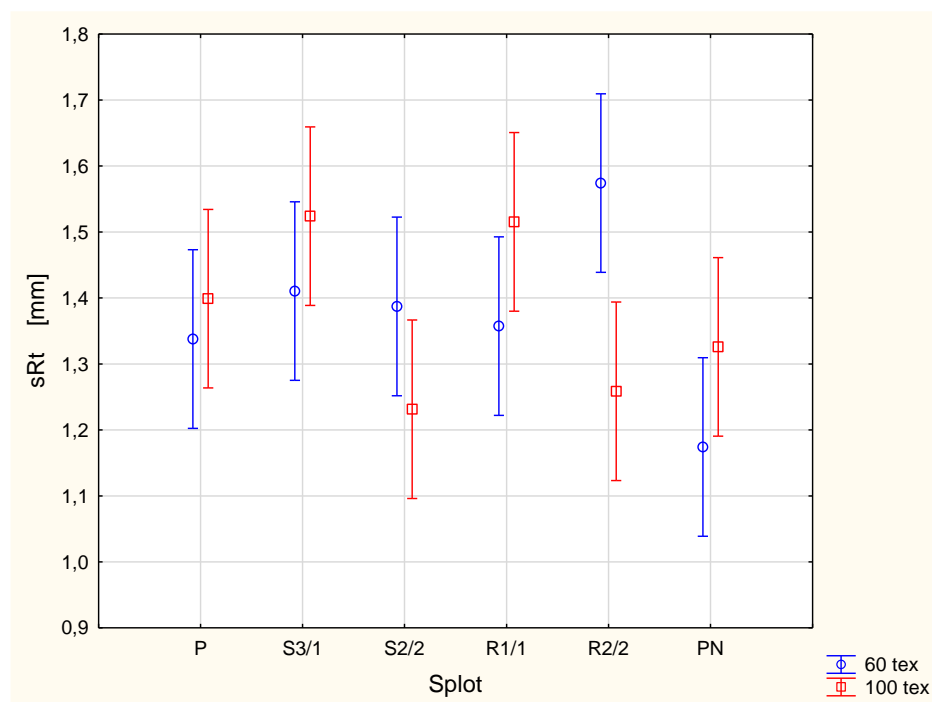
W przypadku analizowanej grupy tkanin średnia wartość parametru sRt jest niemal taka sama. Rozrzut wartości parametru sRt jest również duży i zbliżony w obu grupach. Podobnie, jak w przypadku parametru sRz , najwyższą wartość parametru sRt odnotowano dla tkaniny o splocie skośnym 3/1 S, a najniższą – dla tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (rys. 5.18).



Rys. 5.17. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość całkowitej wysokości chropowatości sRt



Rys. 5.18. Wpływ splotu tkaniny na wartość całkowitej wysokości profilu chropowatości sRt



Rys. 5.19. Wpływ masy liniowej przędzy włókowej i splotu tkaniny na wartość całkowitej wysokości profilu chropowatości sRt

Analiza statystyczna wykazała, że w przypadku skośności $sRsk$ zarówno wpływ czynników głównych, tj. splotu i masy liniowej przędzy wątkowej na wartość skośności $sRsk$, jak również interakcja pomiędzy splotem i masą liniową przędzy wątkowej są statystycznie istotne przy poziomie istotności 0,05 (Tabela 5.6).

Tabela 5.6. Wyniki analizy wariancji dla parametru $sRsk$

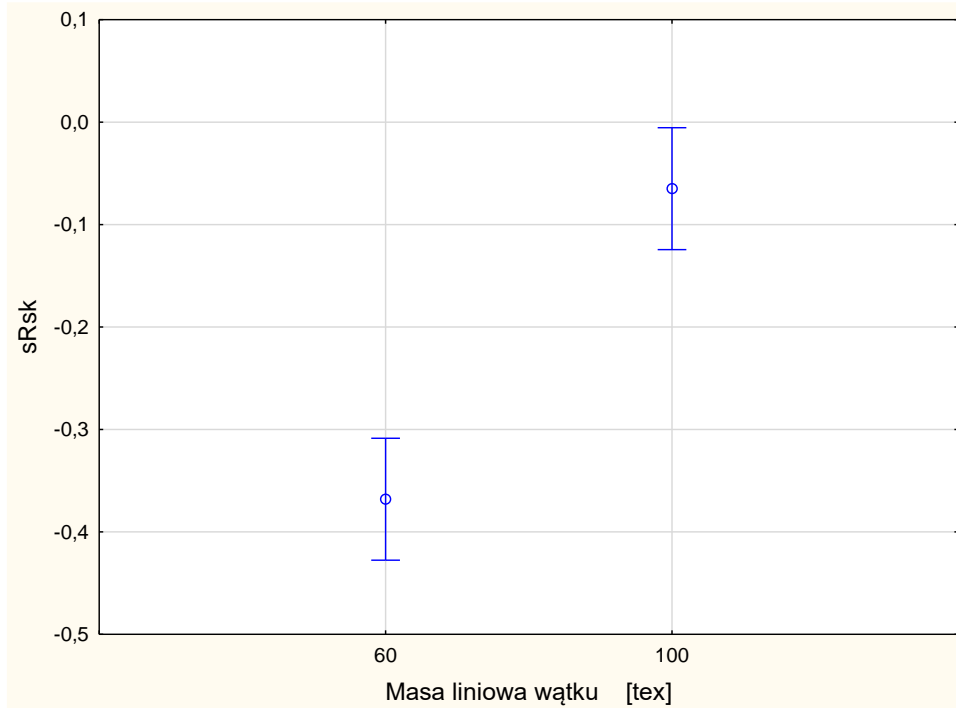
Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	2,8119	1	2,8119	106,9670	0,0000
Masa liniowa wątku	1,3786	1	1,3786	52,4449	0,0000
Splot	11,0079	5	2,2016	83,7496	0,0000
Splot x masa liniowa wątku	1,8845	5	0,3769	14,3374	0,0000
Błąd	1,2618	48	0,0263		

Legenda:

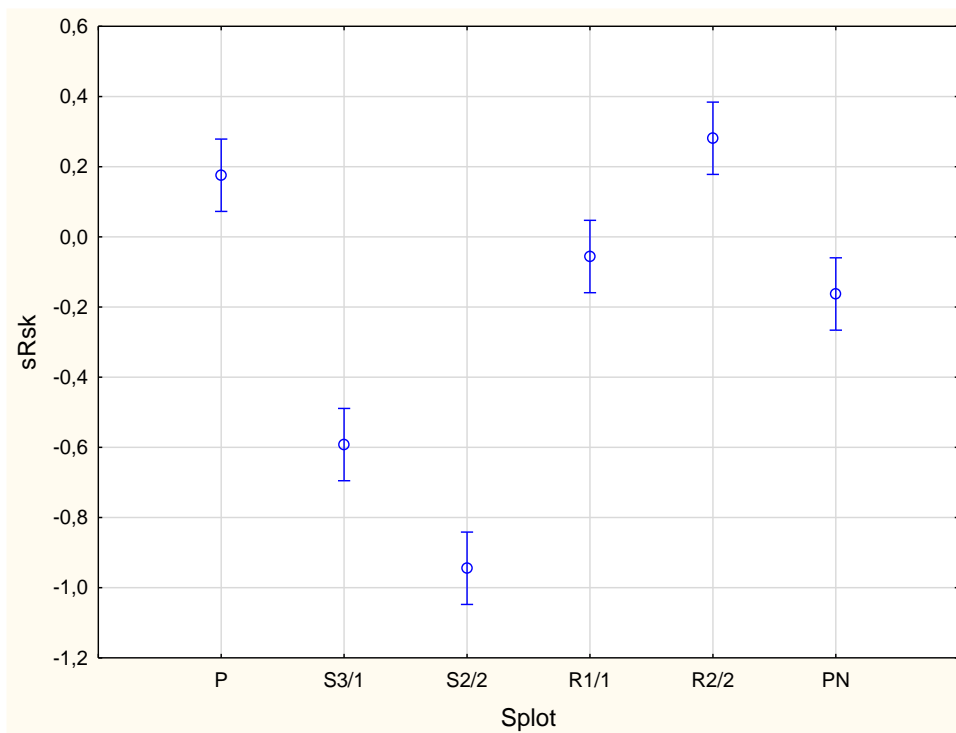
SS – suma kwadratów,
df – liczba stopni swobody,
MS – średnie kwadratów,
F – zmienna o rozkładzie *F*,
p – poziom istotności.

Średnia wartość skośności jest ujemna zarówno dla tkanin z przędzą wątkową masy liniowej 60 tex, jak i 100 tex (rys. 5.20). Niemniej jednak wyższą wartość, zbliżoną do zera, odnotowano dla grupy tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex. Oznacza to, że dla grupy tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex rozkład wartości z (wysokości punktów na powierzchni) jest zbliżony do symetrycznego względem wartości średniej, natomiast w przypadku tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex rozkład ten wykazuje odchylenie powyżej wartości średniej.

Wartości skośności są również zróżnicowane w zależności od splotu tkaniny (rys. 5.21). Dla tkanin o splocie płóciennym i rypsowym 2/2(2) odnotowano niewielkie dodatnie wartości skośności, co oznacza niewielkie odchylenie rozkładu wysokości punktów na powierzchni poniżej wartości średniej. Dla tkanin o splocie skośnym zarówno 3/1 S jak i 2/2 S oraz o splocie panama 2/2 (020) odnotowano wartości dodatnie skośności, czyli odchylenie rozkładu wysokości powyżej wartości średniej. W przypadku tkanin o splocie rypsowym 1/1 (010) wartość skośności $sRsk$ jest zbliżona do zera, a zatem rozkład wysokości punktów na powierzchni jest zbliżony do symetrycznego względem wartości średniej.

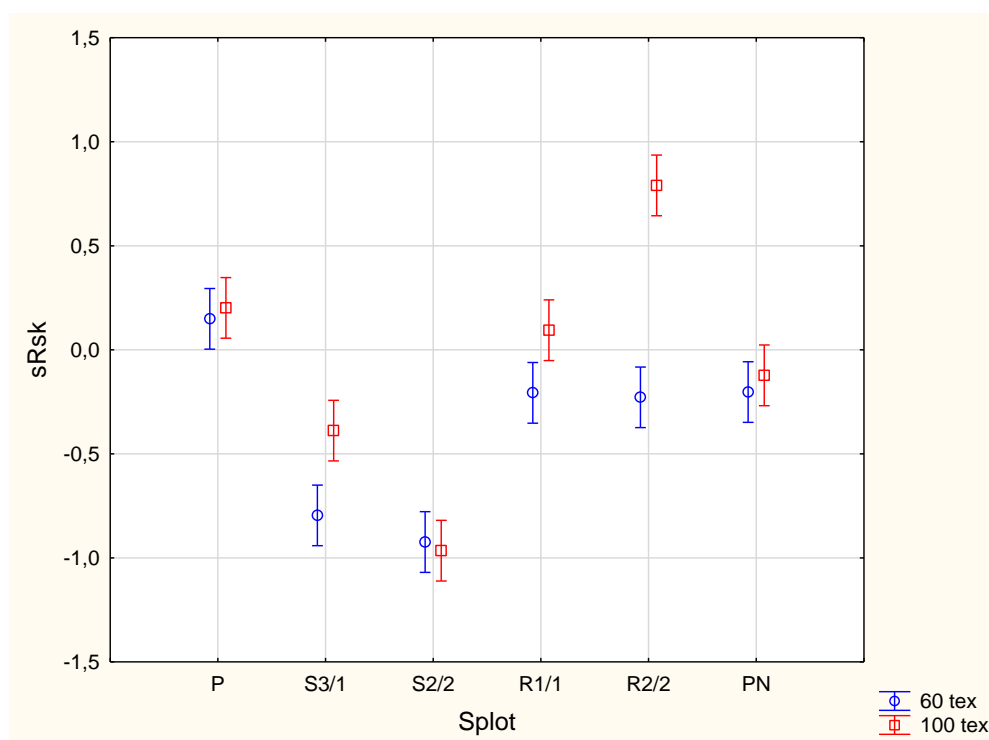


Rys. 5.20. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość skośności profilu chropowatości sRsk



Rys. 5.21. Wpływ splotu tkaniny na wartość skośności profilu chropowatości sRsk

W dwóch przypadkach, tj. tkanin o splocie skośnym 3/1 S oraz o splocie rypsowym 2/2 (2) wartość skośności $sRsk$ dla tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex jest znacznie wyższa, niż wartość tego parametru dla tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex (rys. 5.22). W pozostałych przypadkach różnica między tkaninami z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex i 60 tex zakresie wartości parametru $sRsk$ nie jest tak wyraźna.



Rys. 5.22. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej i splotu tkaniny na wartość skośności profilu chropowatości $sRsk$

Wyniki analizy statystycznej dla kurtozy $sRku$ są zbliżone do wyników dla największej wysokości profilu chropowatości sRz oraz całkowitej wysokości profilu chropowatości sRt . Tu również wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość parametru $sRku$ jest statystycznie nieistotny, natomiast wpływ splotu na wartość kurtozy $sRku$ oraz interakcja pomiędzy splotem i masą liniową przędzy wątkowej są statystycznie istotne przy poziomie istotności 0,05. (Tabela 5.7).

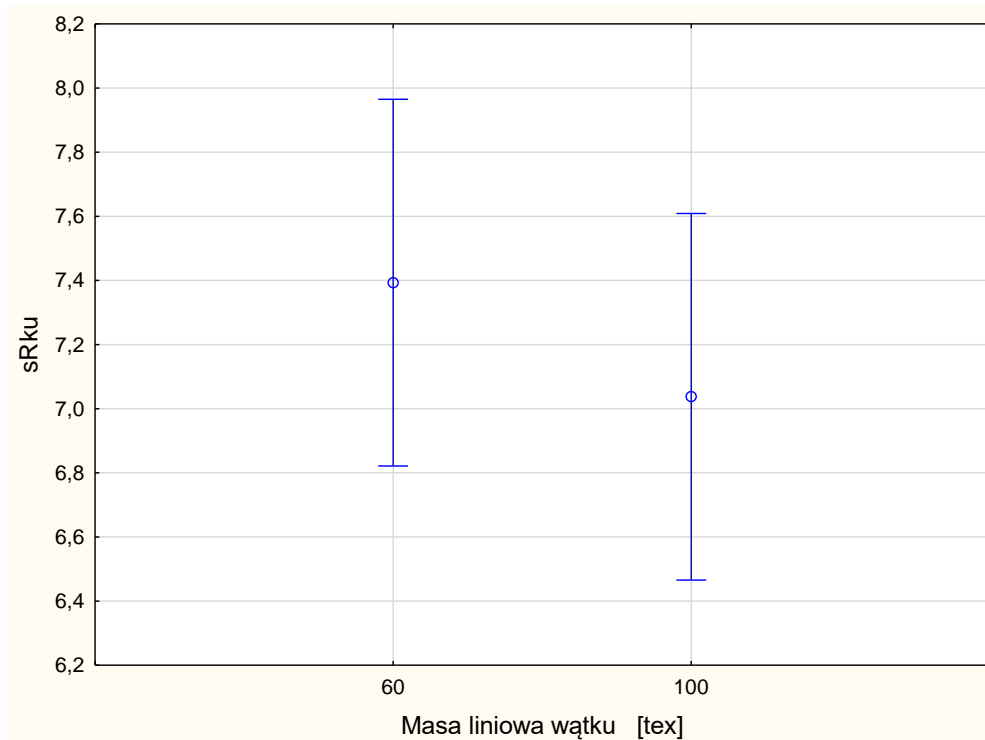
Tabela 5.7. Wyniki analizy wariancji dla parametru *sRku*

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	3123,4889	1	3123,4889	1287,3836	0,00000
Masa liniowa wątku	1,9003	1	1,9003	0,7832	0,38056
Splot	729,7636	5	145,9527	60,1562	0,00000
Splot x masa liniowa wątku	83,6219	5	16,7244	6,8932	0,00006
Błąd	116,4591	48	2,4262		

Legenda:

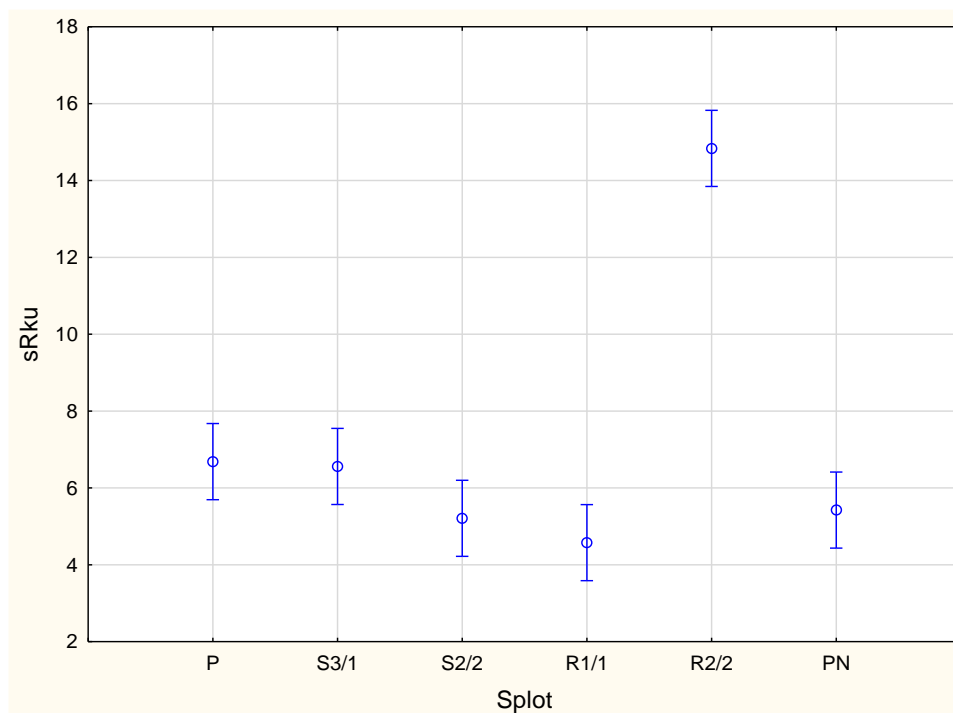
SS – suma kwadratów,
df – liczba stopni swobody,
MS – średnie kwadratów,
F – zmienna o rozkładzie *F*,
p – poziom istotności.

Średnia wartość kurtozy *sRku* jest niższa dla grupy tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex w porównaniu z grupą tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex (rys. 5.23). Odnotowano duży rozrzut wartości kurtozy w obu grupach tkanin różniących się masą liniową przędzy wątkowej. Niemniej jednak wartość kurtozy *sRku* jest znacznie wyższa od 3, co oznacza, że wykres rozkładu wartości *z* (wysokości punktów) jest ostry.



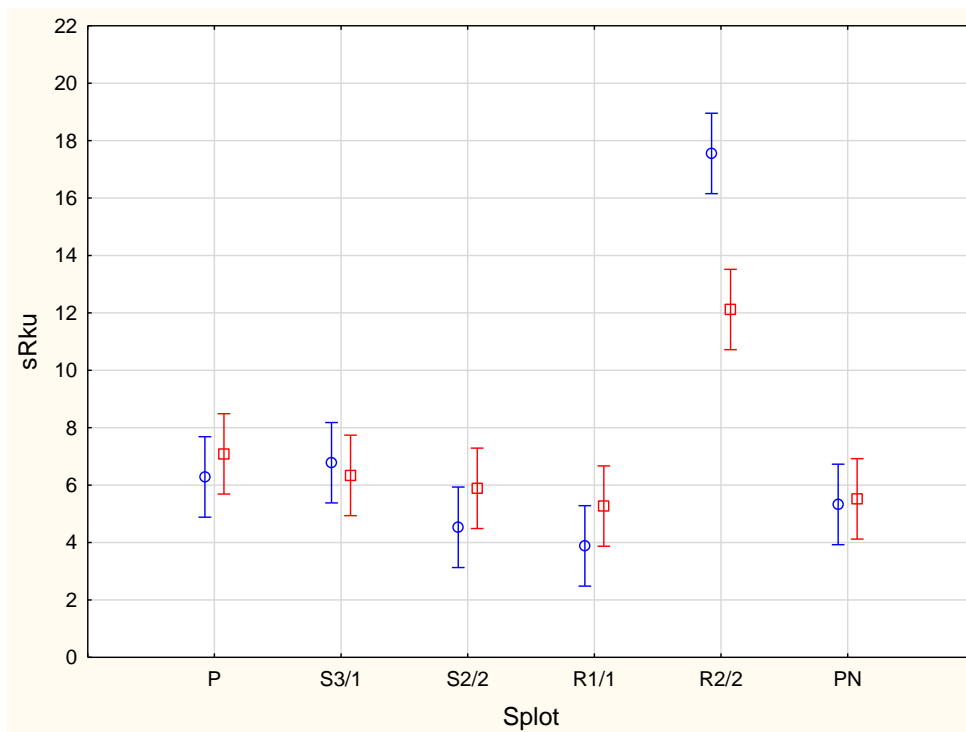
Rys. 5.23. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość kurtozy profilu chropowatości *sRku*

Odnotowano zróżnicowanie wartości parametru $sRku$ w zależności od splotu, jednakże dla wszystkich wariantów splotowych wartość kurtozy jest wyższa od 3 (rys. 5.24).



Rys. 5.24. Wpływ splotu tkaniny na wartość kurtozy profilu chropowatości $sRku$

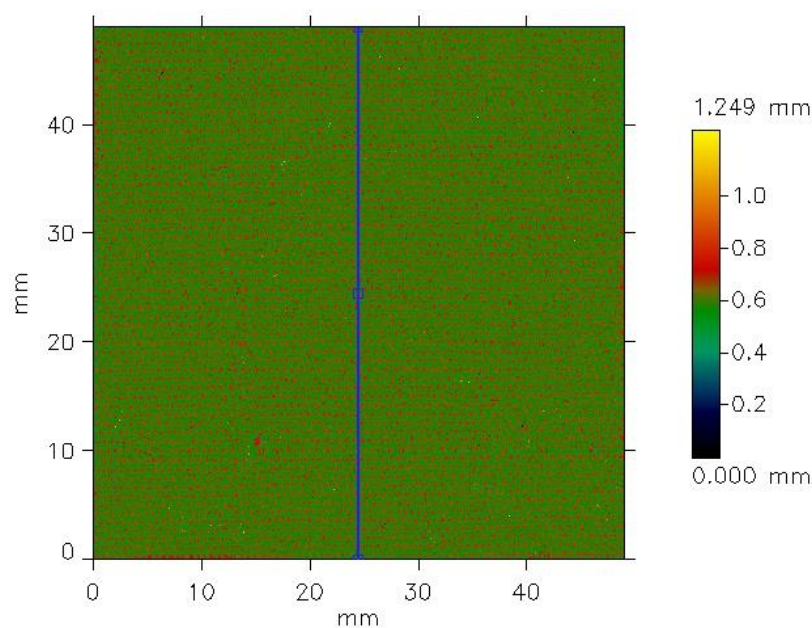
Szczególnie wysokie wartości kurtozy $sRku$ odnotowano dla tkanin o splocie rypsowym 2/2(2). W przypadku obu wariantów, tj. tkaniny z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex i przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex wartość kurtozy jest co najmniej dwukrotnie wyższa, niż wartość kurtozy dla pozostałych wariantów tkanin. Przy czym kurtoza profilu chropowatości dla tkaniny o splocie rypsowym 2/2(2) z przędzą wątkową o masie liniowej 60 tex jest znacznie wyższa od tkaniny o tym samym splocie z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex (rys. 5.25).



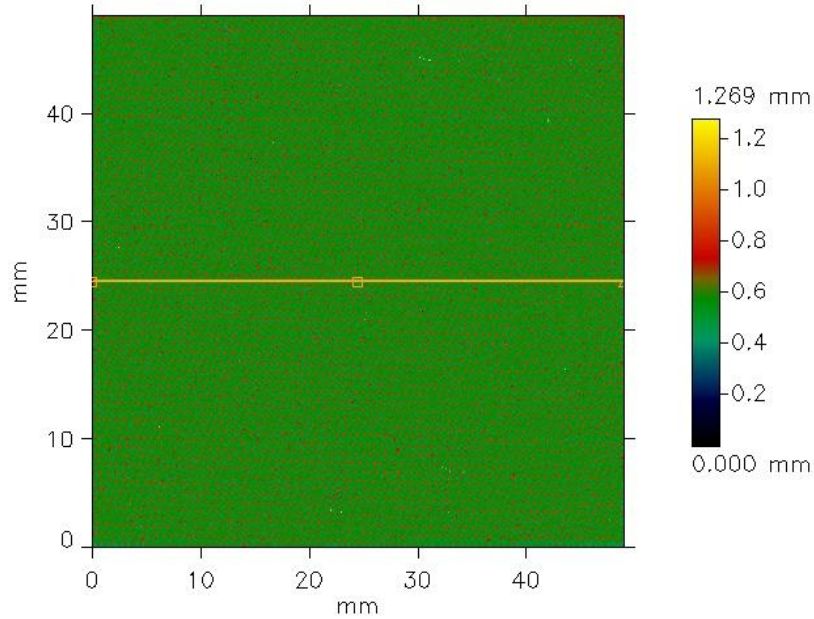
Rys. 5.25. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej i splotu tkaniny na wartość kurtozy profilu chropowatości sRku

Uzyskane wyniki potwierdzają rozważania teoretyczne, gdyż wskazują na zależność wybranych parametrów geometrycznej struktury powierzchni tkanin od ich parametrów konstrukcyjnych. W tej części eksperymentu rozpatrywano dwa czynniki konstrukcyjne tkanin: masę liniową przędzy wątkowej, która jest w bezpośredni sposób związana ze średnicą przędzy oraz splot, który wpływa na kąt opasania obu przędzami: osnowową i wątkową. Analiza statystyczne nie zawsze wykazały zależność istotną statystycznie przy poziomie istotności $p = 0,05$. Wynika to z faktu, że na wartość poszczególnych parametrów wpływają też inne czynniki, np. podziałka osnowy A_1 lub wątku A_2 . Wartości podziałki i liczności przędz zostały założone przy projektowaniu eksperymentalnego wariantu tkanin. Jednakże po zdjęciu z krosna i po procesie wykończenia tkanin wartości wymienionych parametrów różnią się od wartości nominalnych – założonych w fazie projektowania. To również wpływa na kształtowanie się parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni tkanin.

Wpływ splotu na strukturę geometryczną powierzchni tkanin można również zaobserwować analizując kształt profili tkanin wyznaczonych w kierunku osnowy i wątku. Na rysunkach poniżej (rys. 5.26 i 5.27) przedstawiono miejsca na powierzchni próbek, w których wyznaczono profile w obu kierunkach. Dla wszystkich analizowanych wariantów tkanin i próbek wyznaczono profile w tych samych miejscach. W zastosowanym programie nie ma możliwości utworzenia uśrednionego profilu. Dlatego poniżej (rys. 5.28 – 5.33) przedstawiono przykładowe profile utworzone dla pojedynczych próbek danego wariantu splotowego. Profile pionowe (wzdłuż osnowy) oznaczono kolorem niebieskim, profile poziome (wzdłuż wątku) – kolorem żółtym.

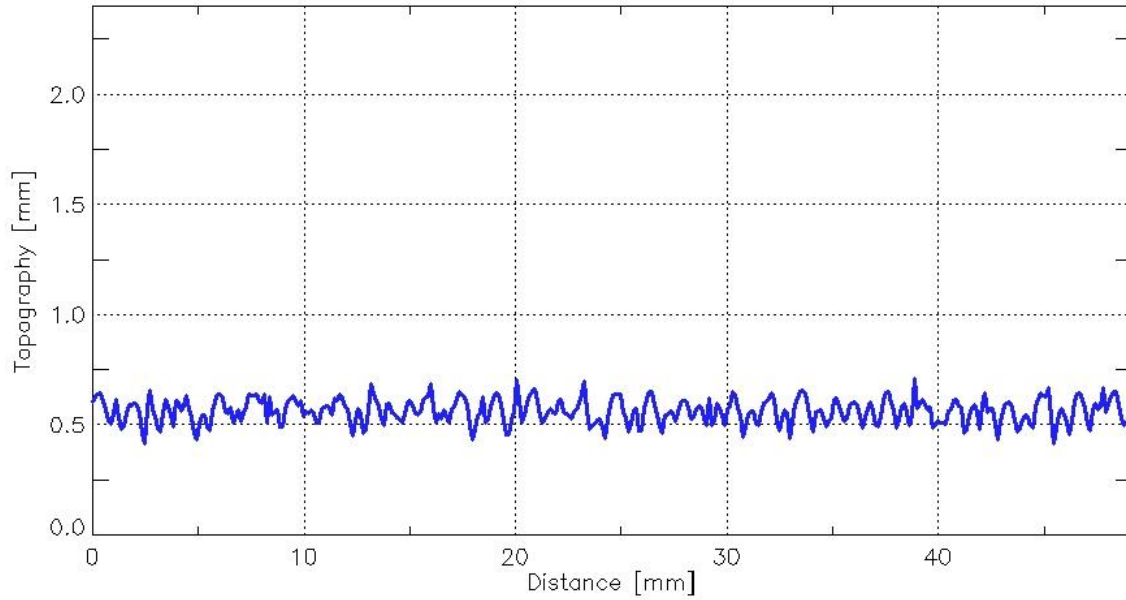


Rys. 5.26. *Miejsce wyznaczenia profilu powierzchni tkaniny o splotie płóciennym z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex, w kierunku osnowy*

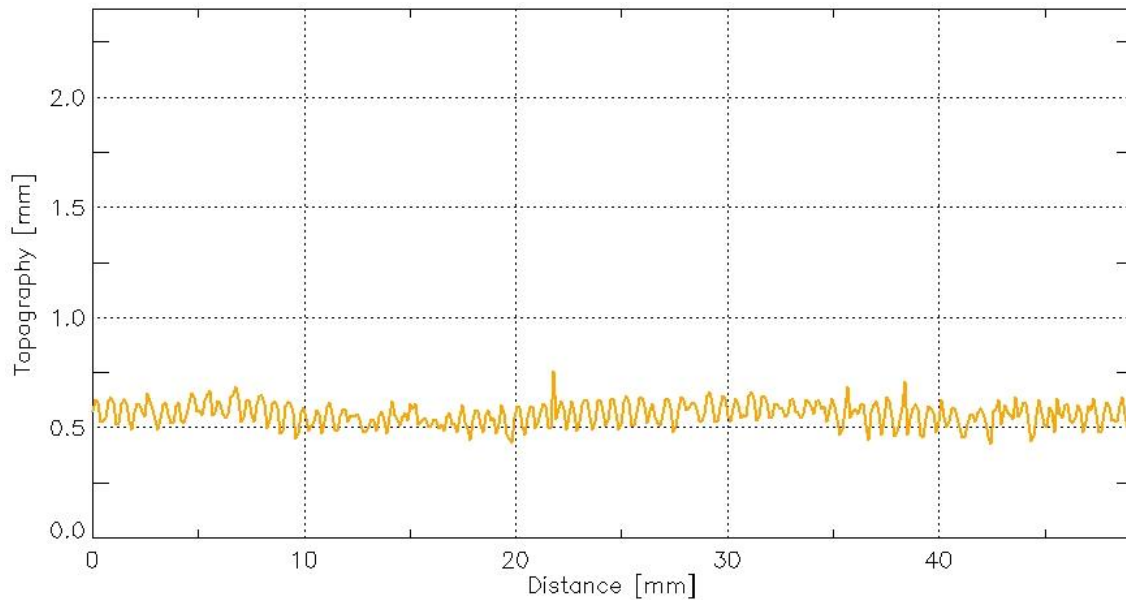


Rys. 5.27. *Miejsce wyznaczenia profilu powierzchni tkaniny o splocie płóciennym z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex, w kierunku wątku*

Przyglądając się wyznaczonym profilom wyraźnie widać zróżnicowanie w zależności od splotu. W przypadku tkaniny płóciennej wątek i osnową przeplatają się w raporcie co każdą nitkę. To znaczy, że przędza osnowowa przechodzi najpierw nad jedną, a potem pod drugą nitką wątku. I taka sekwencja powtarza się na całej szerokości i długości tkaniny. Na profilu wzdłuż osnowy (rys. 5.28) wyraźnie widać gęsto i równomiernie rozłożone miejsca wzniesień na przemian z miejscami wgłębień. Kształt profilu wzdłuż osnowy i wątku jest zbliżony (rys. 5.28 i 5.29). Jednakże na profilu wzdłuż wątku przejścia od wzniesienia do wgłębienia są znacznie gęściej upakowane. Wynika to z faktu, że liczność osnowy jest niemal trzykrotnie większą od liczności wątku. To oznacza, że liczba przejść wątku znad osnowy pod kolejną nitkę osnowy w raporcie tkaniny w jednostce długości jest niemal trzykrotnie większa niż liczba przejść osnowy znad przędzy wątkowej pod kolejną przędzą wątkową w raporcie tkaniny. To pokazuje wpływ liczności przędz na ukształtowanie geometrii powierzchni tkanin.



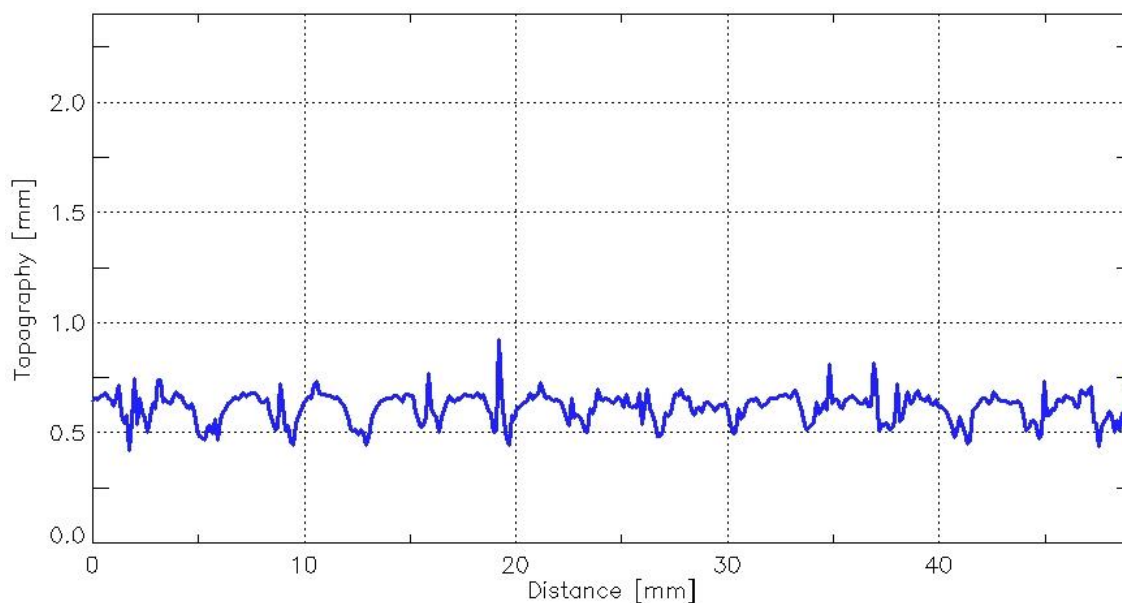
Rys. 5.28. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splocie płóciennym z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex



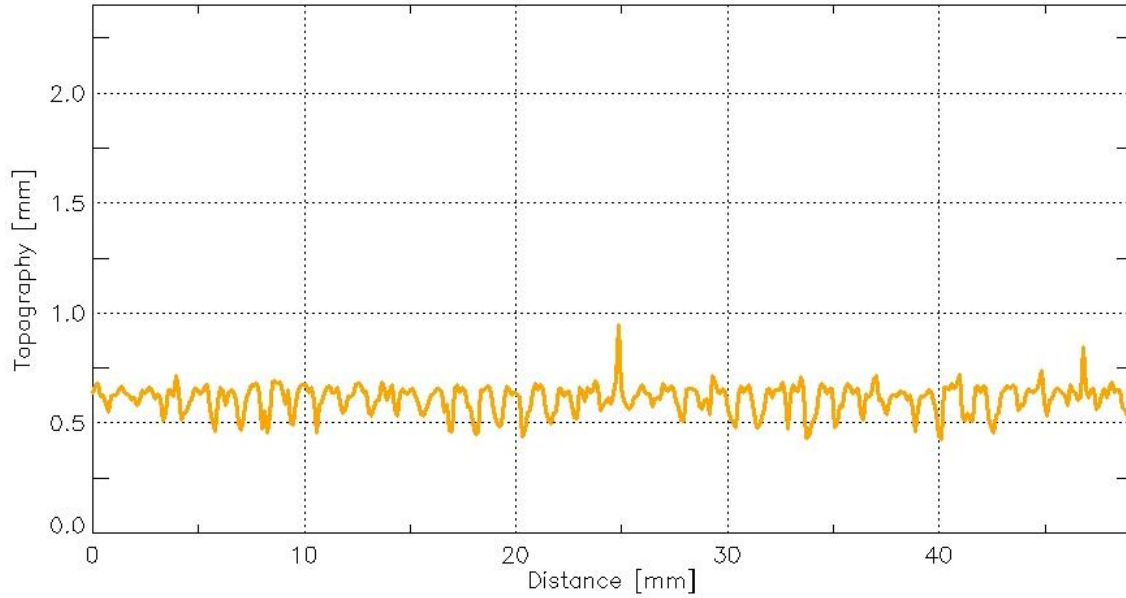
Rys. 5.29. Profil poziomy (wzdłuż wątku) tkaniny o splocie płóciennym z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex

Zupełnie inaczej prezentuje się kształt profilu tkaniny o splocie skośnym 3/1 S (rys. 5.30, 5.31). W tym wypadku, w kierunku osnowy występują łagodne wzniesienia o większej szerokości na przemian z wąskimi ostrymi wzniesieniami. Kształt profilu jest związany ze

sposobem przeplatania się nitek osnowy i wątku. W splotcie skośnym 3/1 S przędza osnowowa przechodzi nad trzema kolejnymi nitkami wątku, a następnie pod jedną nitką wątku. Taka sekwencja powtarza się na całej długości tkaniny. Odcinkom osnowy przechodzącym nad trzema kolejnymi nitkami wątku odpowiada na profilu długie, łagodne wzniesienie o stosunkowo dużej szerokości. Natomiast ostre krótkie wzniesienia na profilu wzdłuż osnowy odpowiadają miejscom, gdzie nitka wątku przechodzi nad pojedynczą nitkę osnowy, a następnie przechodzi pod trzy nitki osnowy.



Rys. 5.30. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splotcie skośnym 3/1 S z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex

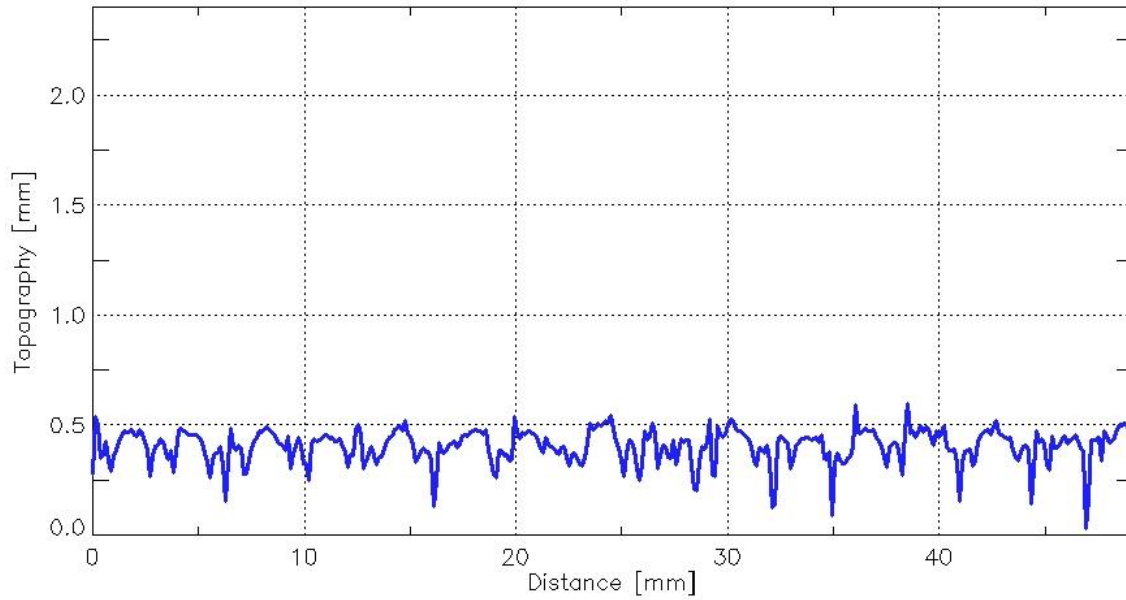


Rys. 5.31. Profil poziomy (wzdłuż wątku) tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex

Należy również zauważyć, że średnia wysokość profilu dla tkaniny o splocie płóciennym (0,566 mm) jest mniejsza od średniej wysokości profilu tkaniny o splocie skośnym 3/1 S (0,611 mm).

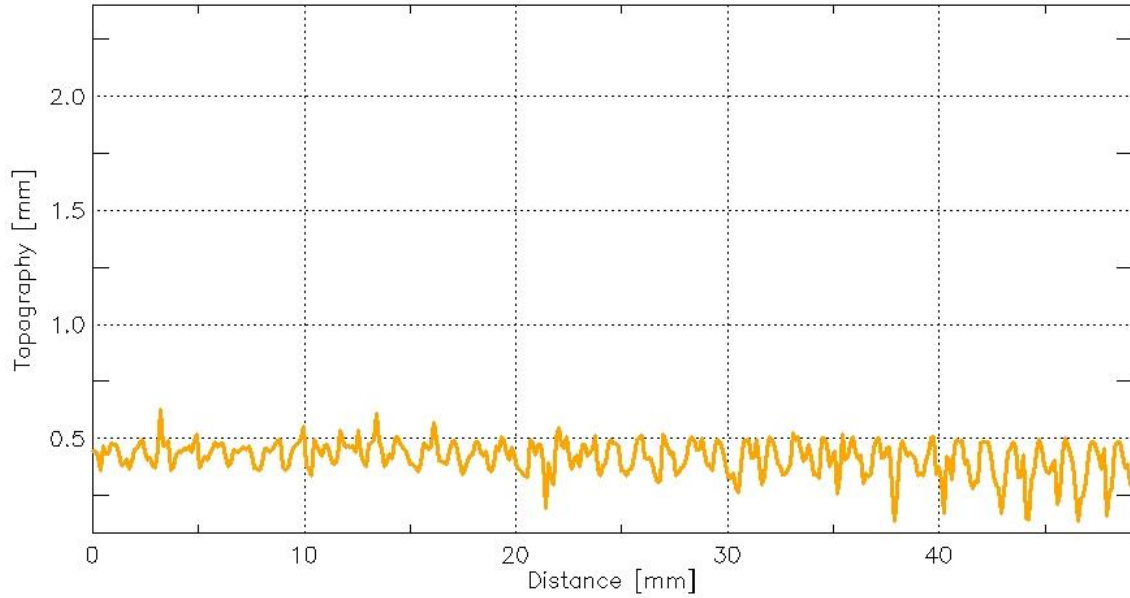
Kształt profilu wyznaczony wzdłuż wątku tkaniny o splocie skośnym (rys. 5.31) jest podobny do kształtu profilu wzdłuż osnowy (rys. 5.30). Jednakże, tak jak miało to miejsc w przypadku tkaniny płóciennej, zagęszczenie wzniesień i wgłębień jest większe. Wynika to z większej liczności przędzy osnowowej w porównaniu do liczności przędzy wątkowej.

W przypadku tkaniny o splocie skośnym 2/2 S, kształt profilu wzdłuż osnowy jest zbliżony do kształtu profilu wzdłuż osnowy tkaniny o splocie skośnym 3/1 S (rys. 5.30). Natomiast średnia wysokość punktów wzdłuż wyznaczonego profilu (0,405 mm) jest zdecydowanie mniejsza, zarówno od średniej wysokości profilu tkaniny o splocie skośnym 3/1 S, jak i płóciennym.

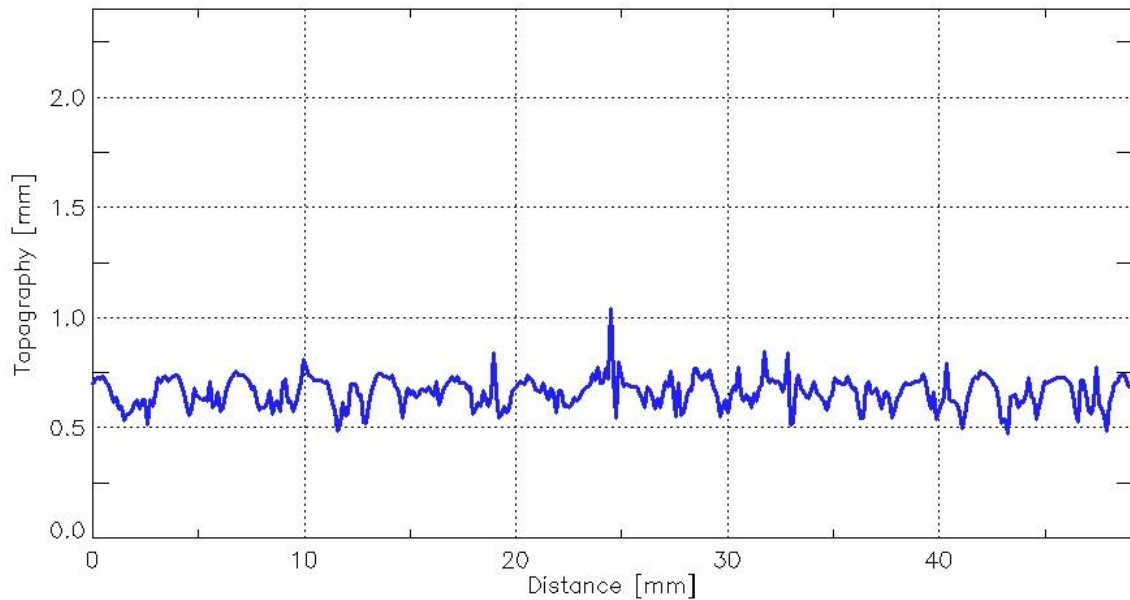


Rys. 5.32. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splotcie skośnym 2/2 S z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex

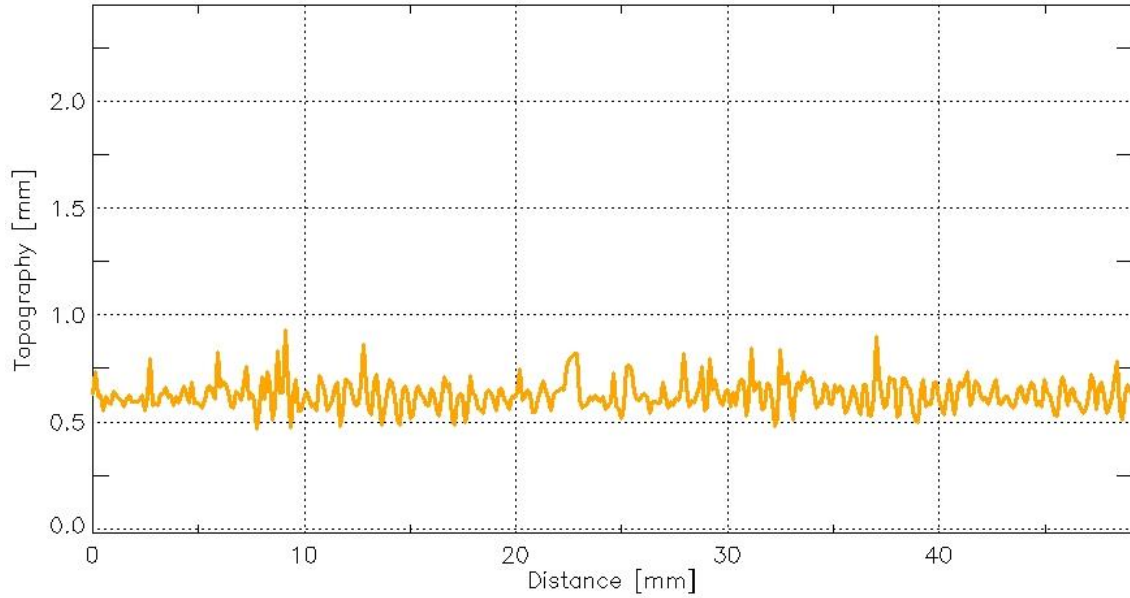
Kształt kolejnych profili, jak również średnia wysokość punktów wzdłuż profilu jest zróżnicowana, w zależności od splotu tkaniny i kierunku wyznaczenia profili (rys. 5.33 – 5.39). Występują też pewne podobieństwa wynikające z podobieństw przeplotów nitki w raportach określonych splotów. Przykładowo, w raporcie splotów: skośnego 2/2S, rypsowego 1/1/ (010) i panama 2/2 (020) pojedyncza przędza osnowowa przechodzi nad dwiema nitkami wątku, a następnie pod kolejnymi dwiema nitkami wątku (rys. 4.1). Zatem profil wzdłuż osnowy dla tych wariantów tkanin powinien być podobny. I rzeczywiście takie podobieństwo zaobserwowano (rys. 5.32, 5.34, 5.38). Różnice mogą wynikać z faktu, że umiejscowienie linii profilu względem osi przędzy osnowowej może być różne. Profil może przebiegać dokładnie wzdłuż osi przędzy osnowowej, lecz może być utworzony w pewnej odległości od osi przędzy.



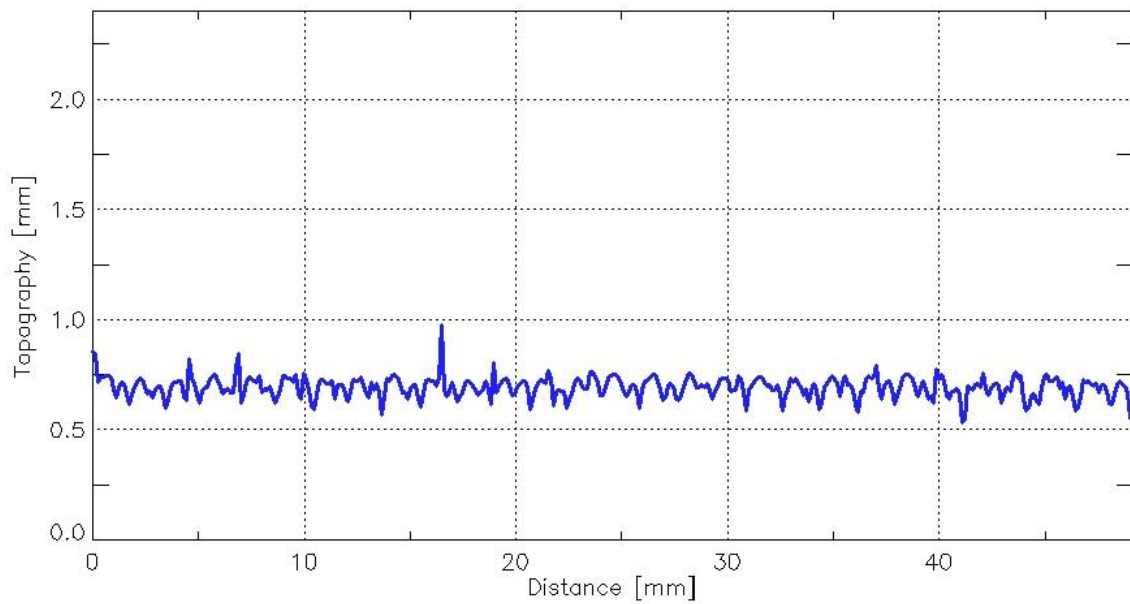
Rys. 5.33. Profil poziomy (wzdłuż wątku) tkaniny o splocie skośnym 2/2 S z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex



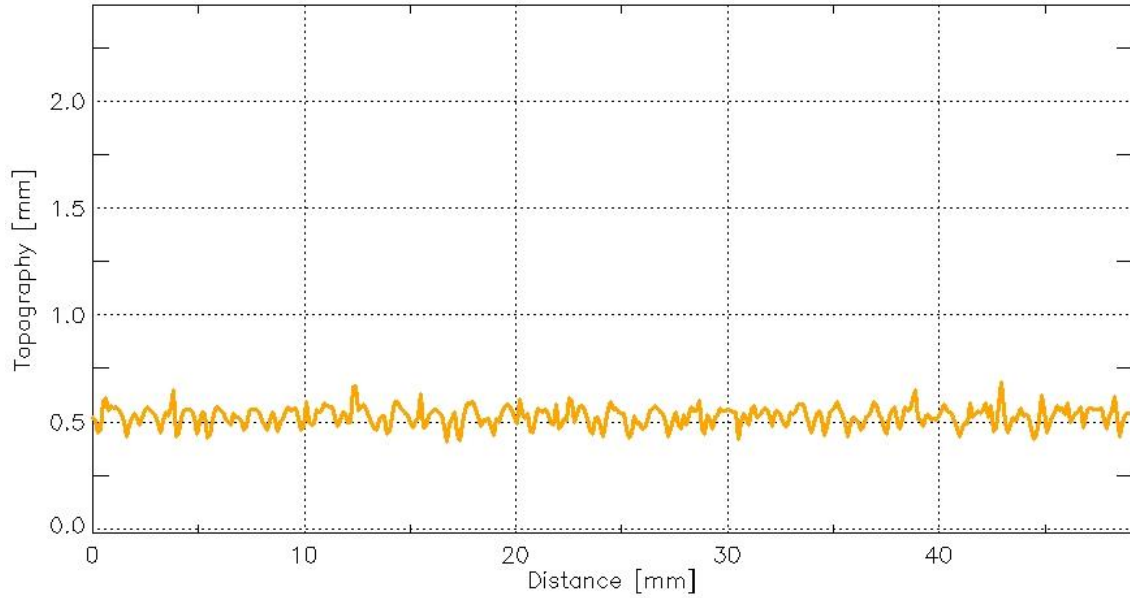
Rys. 5.34. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splocie rypсовym 1/1 (010) z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex



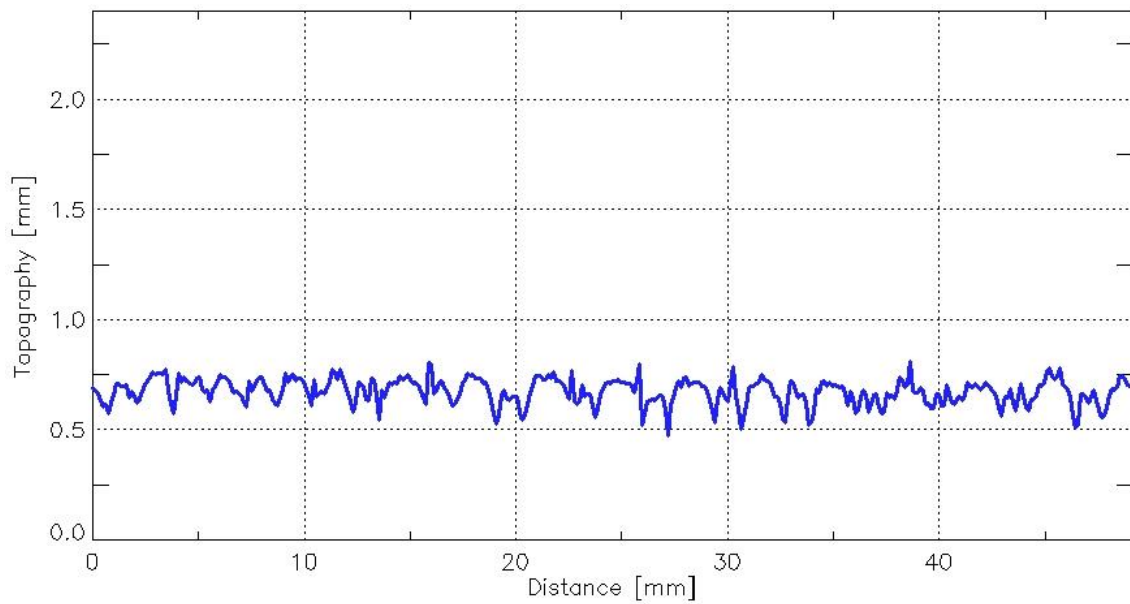
Rys. 5.35. Profil poziomy (wzdłuż wątku) tkaniny o splocie rypsowym 1/1 (010)
z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex



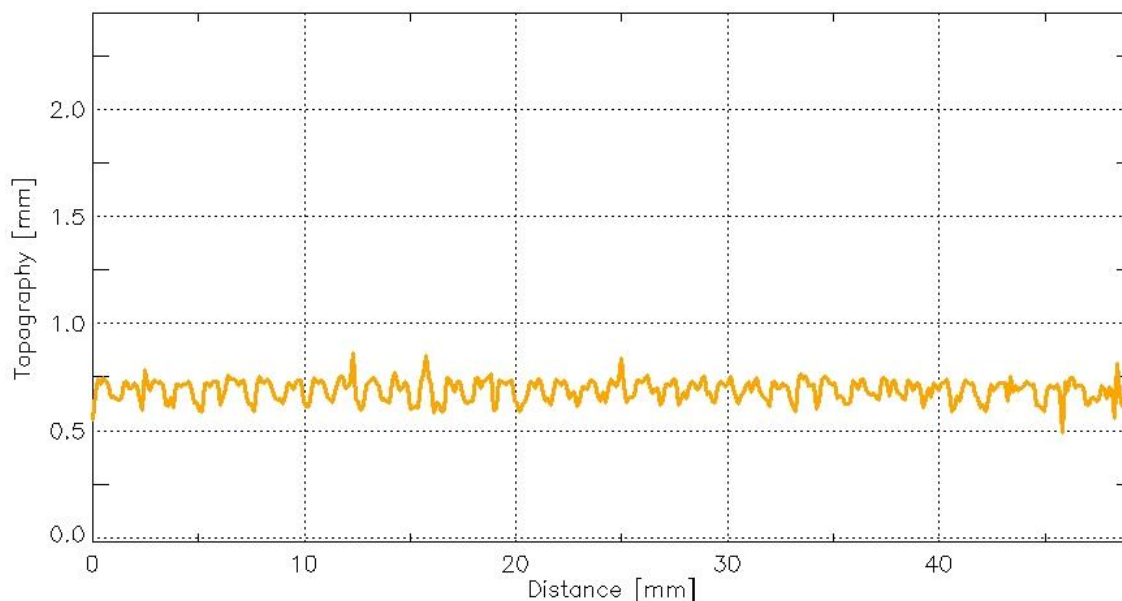
Rys. 5.36. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splocie rypsowym 2/2 (2)
z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex



Rys. 5.37. Profil poziomy (wzdłuż wątku) tkaniny o splotie rypsowym 2/2 (2)
z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex



Rys. 5.38. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splotie panama 2/2 (020)
z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex



Rys. 5.38. Profil poziomy (wzdłuż wątku) tkaniny o splocie panama 2/2 (020)
z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex

Podsumowując przeprowadzoną analizę należy stwierdzić, że uzyskane wyniki potwierdziły wpływ splotu na geometryczną strukturę powierzchni tkanin. Splot ma statystycznie istotny wpływ na wartość parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin, przy poziomie istotności 0,05. Statystycznie istotna jest również interakcja pomiędzy splotem, a masą liniową przędzy wątkowej.

Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin okazał się istotny, przy poziomie istotności 0,05 tylko w przypadku skośności $sRsk$. Wynika to z faktu, że odnotowano duży rozrzut wyników pomiędzy wartościami parametrów chropowatości dla grupy tkanin z tą samą przędzą wątkową. Jest to zrozumiałe, gdyż rozrzut ten spowodowany jest zróżnicowaniem splotów. W grupie tkanin z danym rodzajem przędzy wątkowej (100 tex lub 60 tex) występuje 6 wariantów splotowych, a badania potwierdziły statystycznie istotny wpływ splotu na wartości parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin.

Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość parametrów charakteryzujących geometrię powierzchni tkanin jest przedmiotem analizy w dalszym etapie badań.

5.2. Analiza wpływu liczności wątku na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin

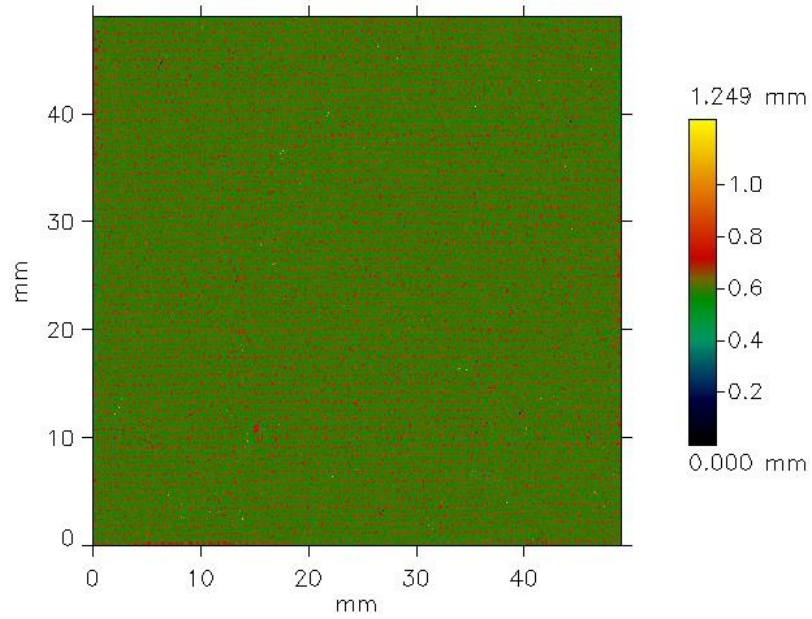
Analizę wpływu liczności wątku na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin wykonano w oparciu o wyniki pomiaru 6 wariantów tkanin. Wykonano dwa warianty splotowych, na bazie jednego asortymentu przędzy wątkowej: 100 tex OE. Zastosowano 3 warianty liczności wątku: 11/cm, 9/cm, 7/cm.

Średnie wartości wytypowanych parametrów przedstawiono w tabeli 5.8. Średnie obliczono w oparciu o wyniki 5 powtórzeń pomiaru dla każdego wariantu tkanin.

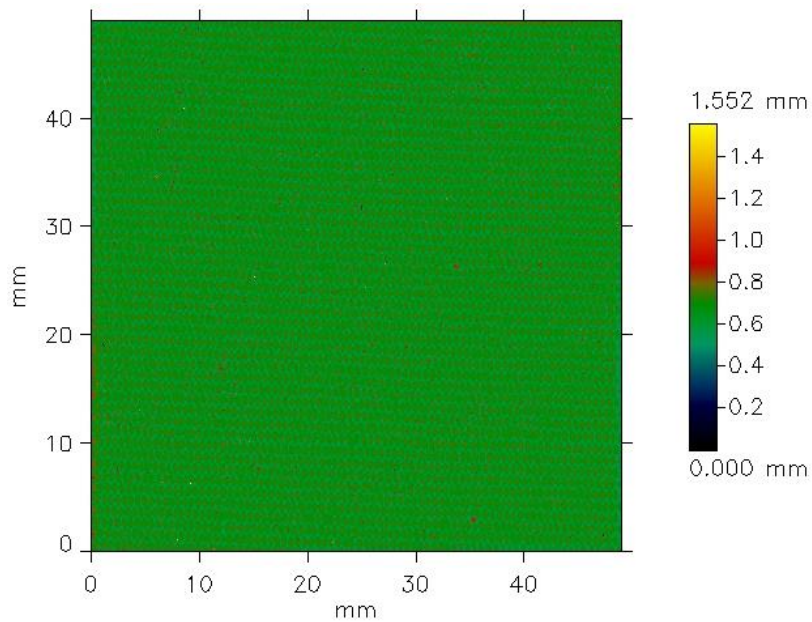
Tabela. 5.8. Parametry charakteryzujące topografię powierzchni badanych tkanin

Splot	Liczność wątku [cm ⁻¹]	sRa [mm]	sRq [mm]	sRz [mm]	sRt [mm]	sRsk [-]	sRku [-]
Płócienny	11	0,044	0,056	1,191	1,399	0,202	7,087
	9	0,047	0,058	1,153	1,466	0,123	6,271
	7	0,054	0,068	1,113	1,433	-0,049	4,943
Skośny 3/1 S	11	0,053	0,068	1,273	1,524	-0,388	6,338
	9	0,056	0,072	1,349	1,579	-0,662	6,331
	7	0,061	0,079	1,387	1,592	-0,887	5,672

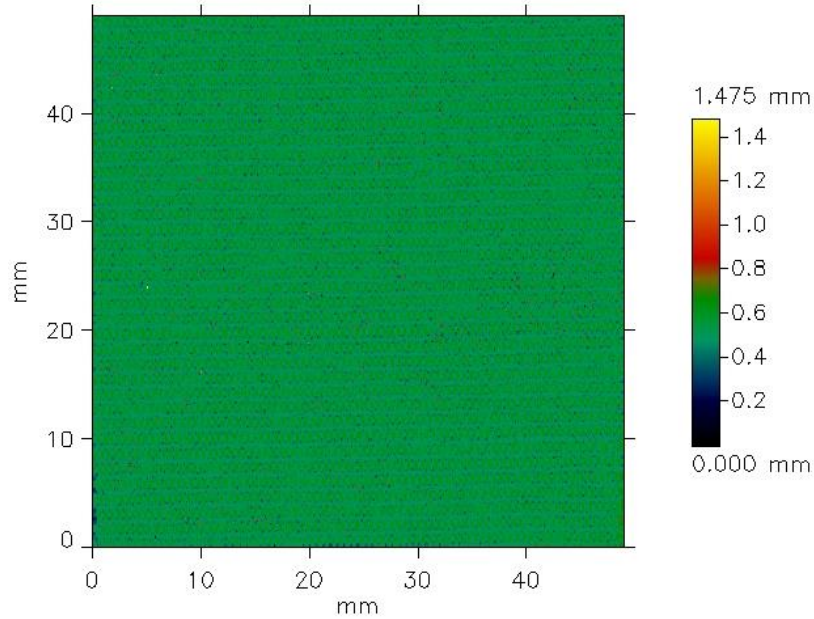
Poniżej, na rys. 5.40 – 5.42 przedstawiono przykładowe obrazy powierzchni tkanin o splotie płóciennym, w których zastosowano różne liczności wątku. Różnice w wyglądzie wykresów są nieznaczne. W programie Mark III różnice te są bardziej wyraźne. Niemniej jednak trudno znaleźć jednoznaczną tendencję zmian w wyglądzie obrazów geometrycznej struktury powierzchni tkanin w zależności od liczności wątku.



Rys. 5.40. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie płóciennym z licznością wątku 11/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości

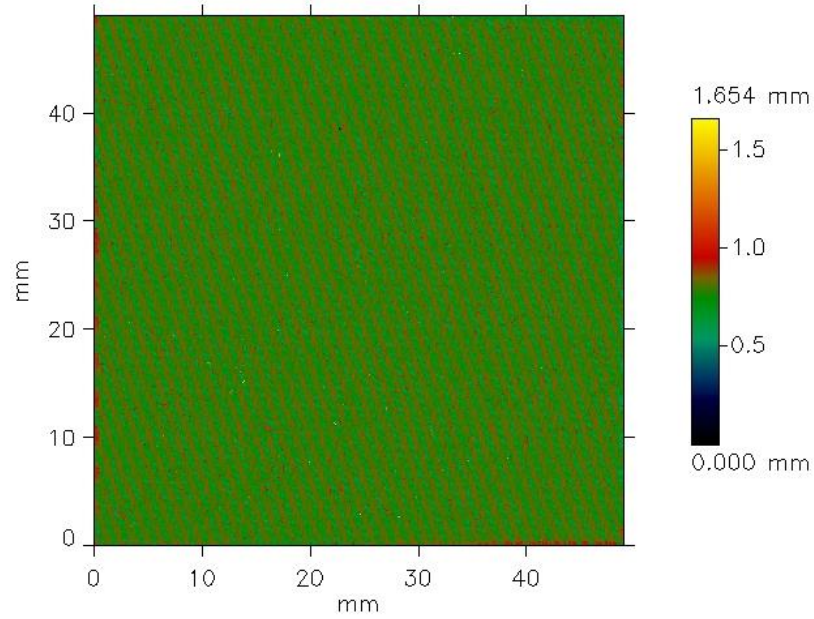


Rys. 5.41. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie płóciennym z licznością wątku 9/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości

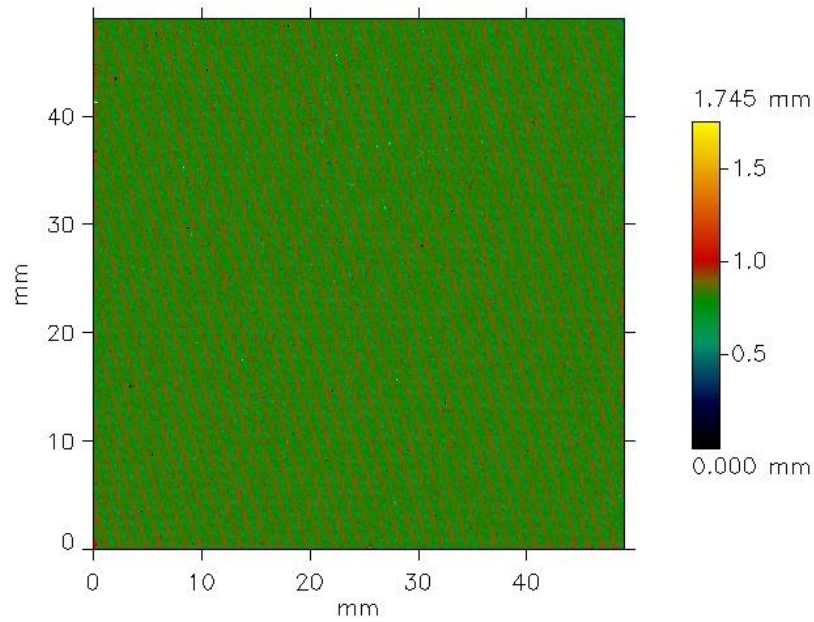


Rys. 5.42. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie płóciennym z licznością wątku 7/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości

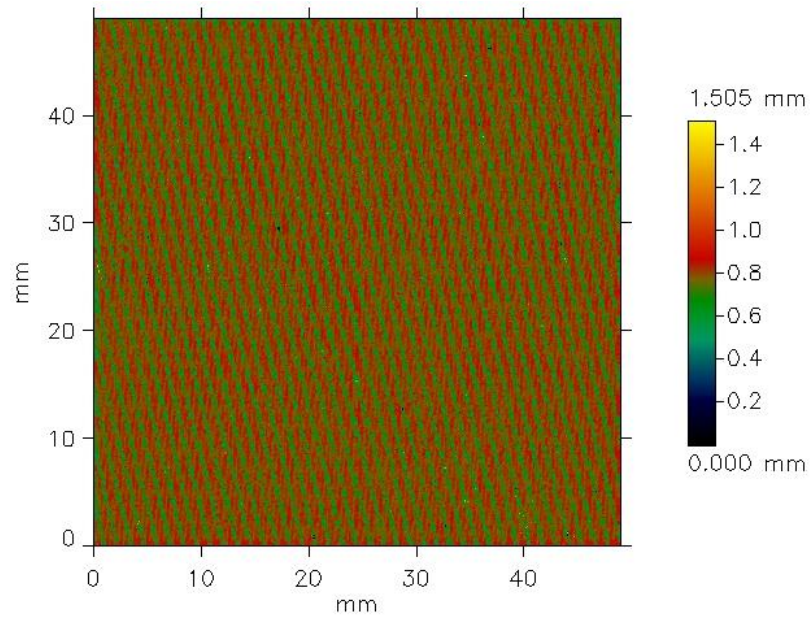
W przypadku tkanin o splocie skośnym (rys. 5.43 – 5.45) również nie odnotowano wyraźnych różnic. Na każdym obrazie widoczne są skośne prążki, jedynie zakres wysokości punktów na powierzchni dla każdego wariantu jest inny. Należy nadmienić, że są to przykładowe obrazy. Dla każdego wariantu wykonano po 5 powtórzeń pomiarów dla 5 próbek wyciętych z różnych miejsc tkaniny. Dla każdej próbki obraz powierzchni po wyeliminowaniu falistości jest bardzo zbliżony, z wyraźnie widocznymi skośnymi prążkami, jednak z różną wartością maksymalnej wysokości punktów na powierzchni (barwna skala po prawej stronie wykresów).



Rys. 5.43. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z licznością wątku 11/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości



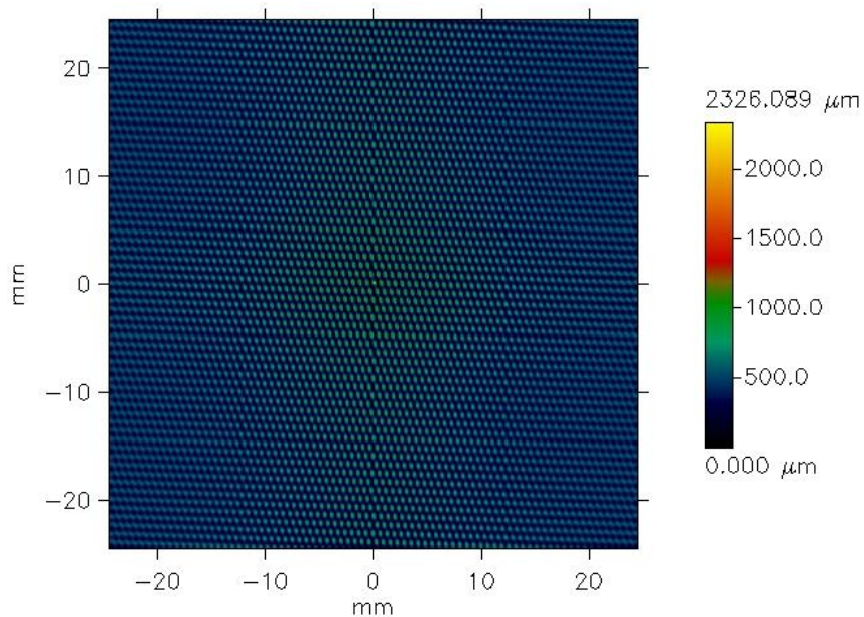
Rys. 5.44. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z licznością wątku 9/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości



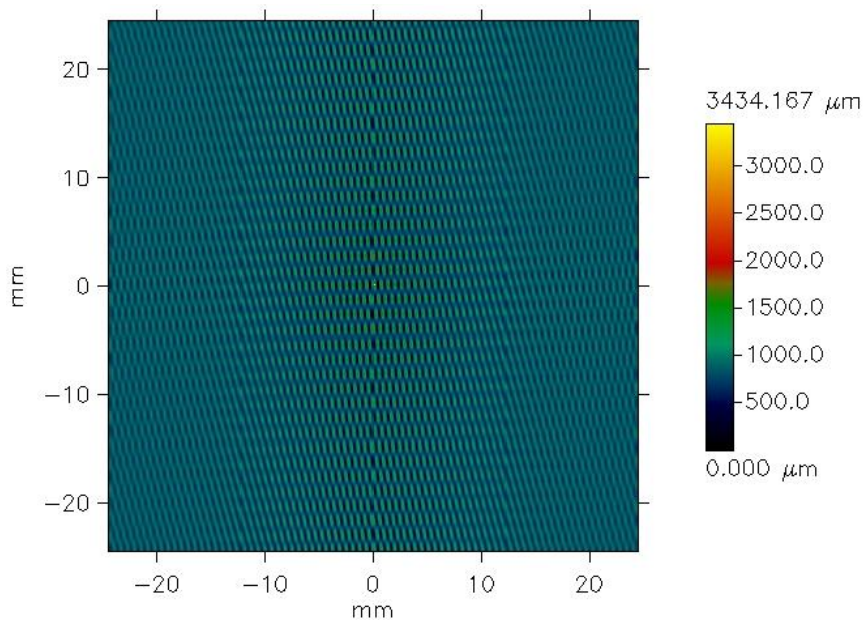
Rys. 5.45. *Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z licznością wątku 7/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości*

Wystąpiły natomiast pewne różnice w wyglądzie funkcji autokorelacji, zarówno dla tkanin o splocie płóciennym (rys. 5.46 – 5.48), jak również dla tkanin o splocie skośnym (rys. 5.49 – 5.51).

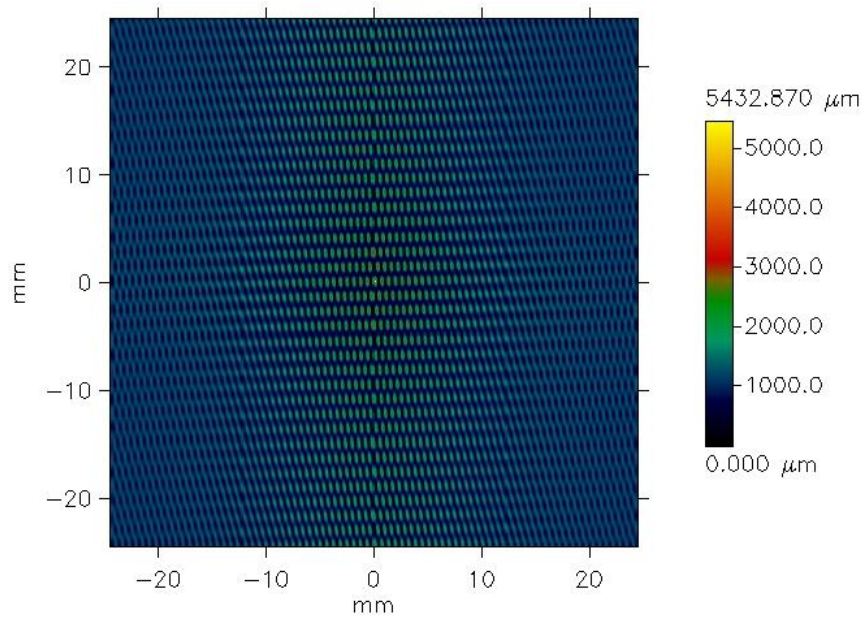
W przypadku tkanin o splocie płóciennym, mimo pewnych różnic w wyglądzie, funkcja autokorelacji wskazuje na anizotropowy charakter powierzchni (rys. 5.46).



Rys. 5.46. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie płóciennym z licznością wątku 11/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości

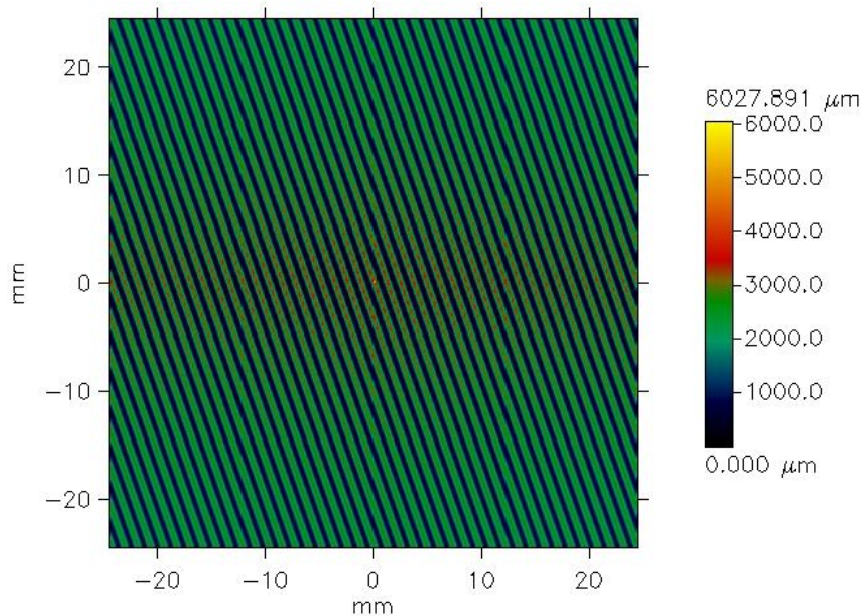


Rys. 5.47. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie płóciennym z licznością wątku 9/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości

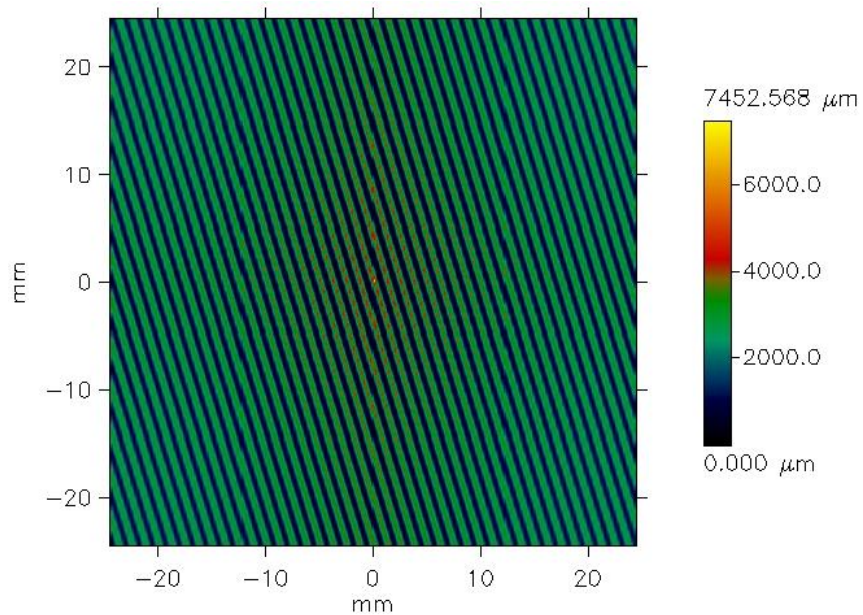


Rys. 5.48. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splotcie płóciennym z licznoscią wątku 7/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości

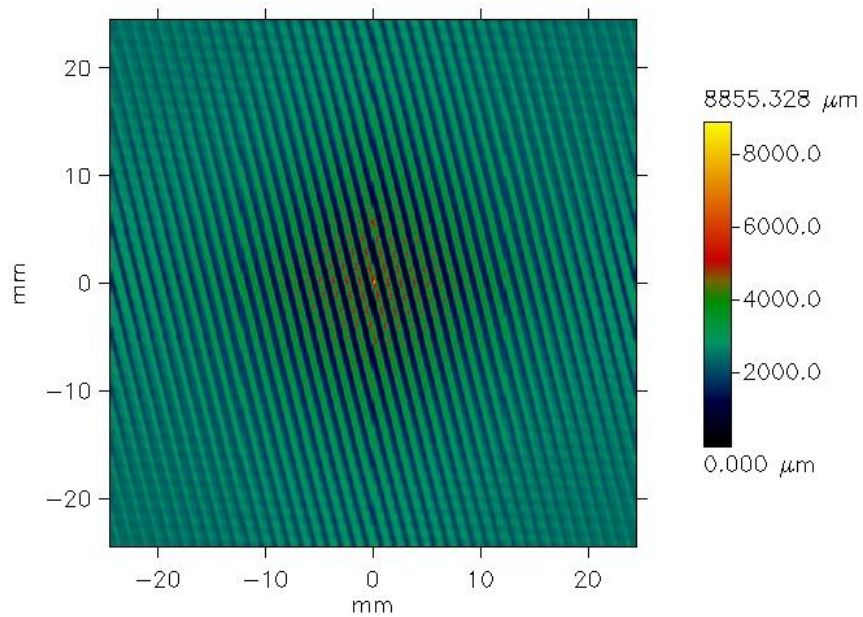
Natomiast w przypadku tkanin o splotcie skośnym 3/1 S wyraźnie uwidacznia się kierunkowość powierzchni, zgodna ze splotem tkaniny. Można jednak zaobserwować zmianę kąta nachylenia prążków wraz ze zmianą licznosci wątku (rys. 5.49 – 5.51). Potwierdzają to wyniki pomiaru rozkładu kątów na powierzchni (rys. 5.52 – 5.54).



Rys. 5.49. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splotcie skośnym 3/1 S z licznoscią wątku 11/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości



Rys. 5.50. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splotie skośnym 3/1 S z licznością wątku 9/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości



Rys. 5.51. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splotie skośnym 3/1 S z licznością wątku 9/cm, po wyeliminowaniu komponentu falistości

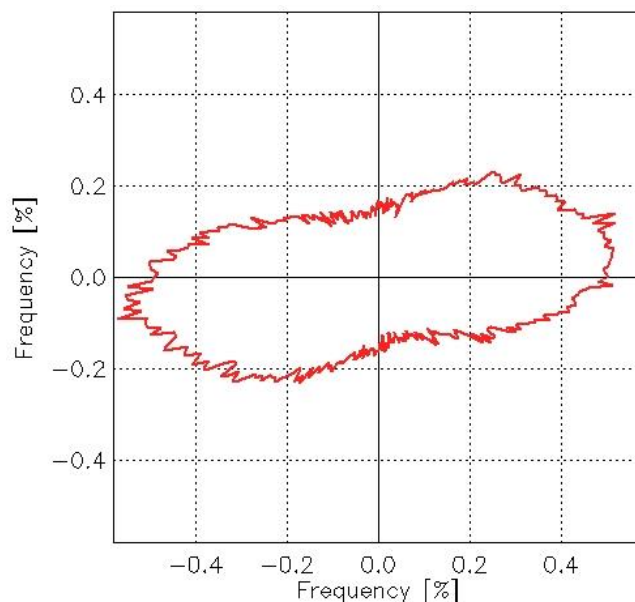
Wykresy rozkładu kątów na powierzchni ilustrują rozkład kątów nachylenia linii stycznej do powierzchni w poszczególnych punktach tej powierzchni. Wykresy rozkładu kątów dla wariantów tkaniny o splotie skośnym 3/1 S z różną licznością wątku różnią się

pod względem kształtu (rys. 5.52 – 5.54), a zwłaszcza kątów, dla których odnotowano maksymalną częstotliwość występowania w pierwszym i trzecim kwadracie, tj. w zakresie kątów $0 - 90^\circ$ oraz $180 - 270^\circ$.

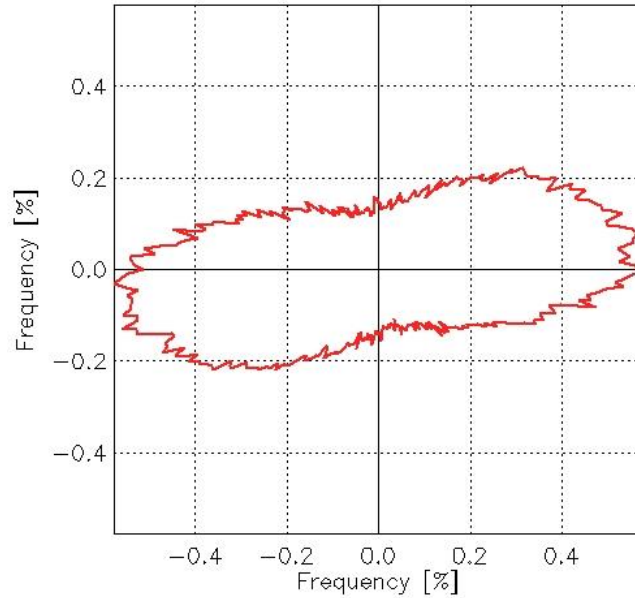
Wartości kątów, dla których odnotowano największą częstotliwość, podano w tabeli poniżej (Tabela 5. 9).

Tabela 5.9. Wartości najliczniej występujących kątów stycznej do powierzchni tkaniny w zakresie pierwszego i trzeciego kwadratu

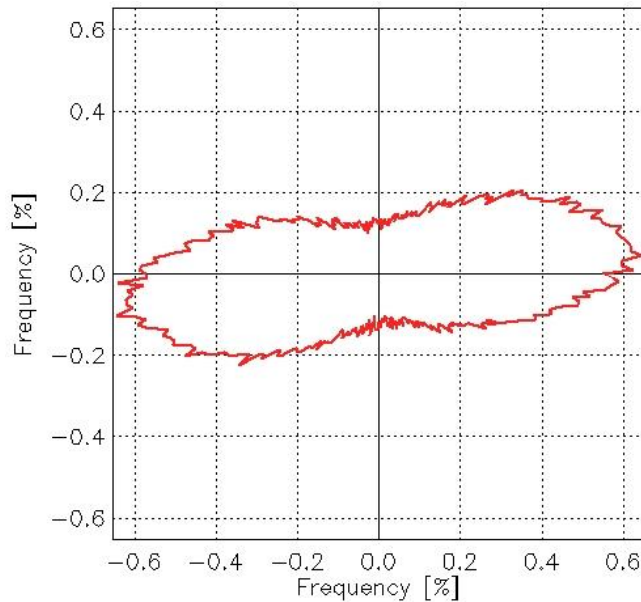
Liczność wątku	Pierwszy kwadrat		Trzeci kwadrat	
	Kąt [°]	Częstotliwość [%]	Kąt [°]	Częstotliwość [%]
11/cm	15	0,537	189	0,581
9/cm	8	0,571	183	0,577
7/cm	4	0,648	189	0,653



Rys. 5.52. Rozkład kątów stycznej do powierzchni tkaniny o splotie skośnym 3/1 S z licznością wątków 11/cm



Rys. 5.53. Rozkład kątów stycznej do powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z licznością wątków 9/cm



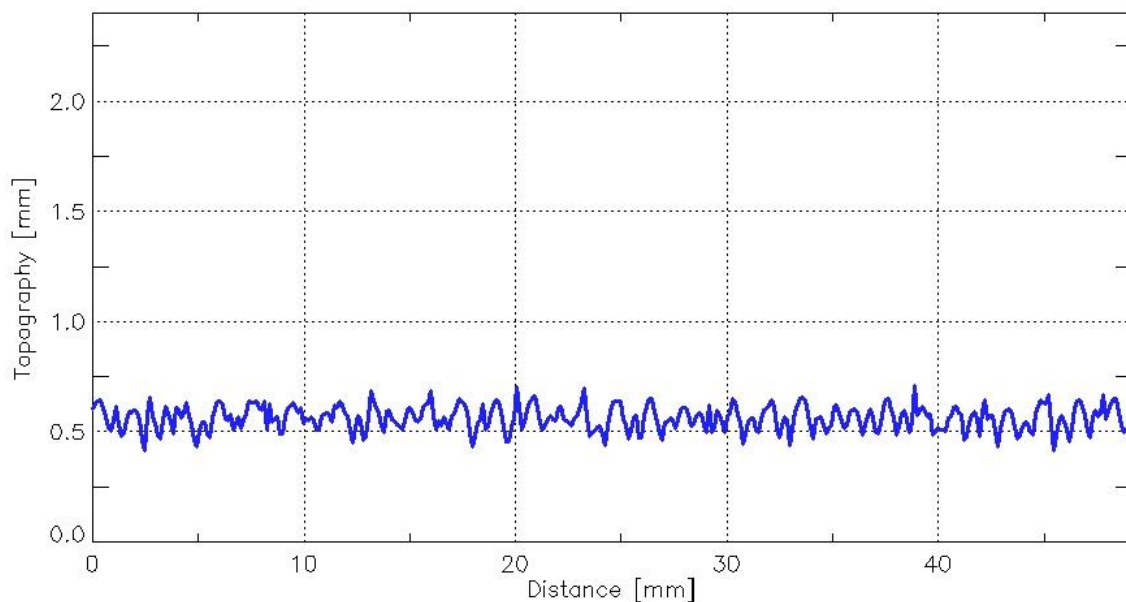
Rys. 5.54. Rozkład kątów stycznej do powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z licznością wątków 7/cm

Zwłaszcza w pierwszym kwadracie, w zakresie kątów $0 - 90^\circ$ stwierdzono, że kąt dla którego odnotowano największą licznosc, jest mniejszy przy mniejszej licznosci wątku.

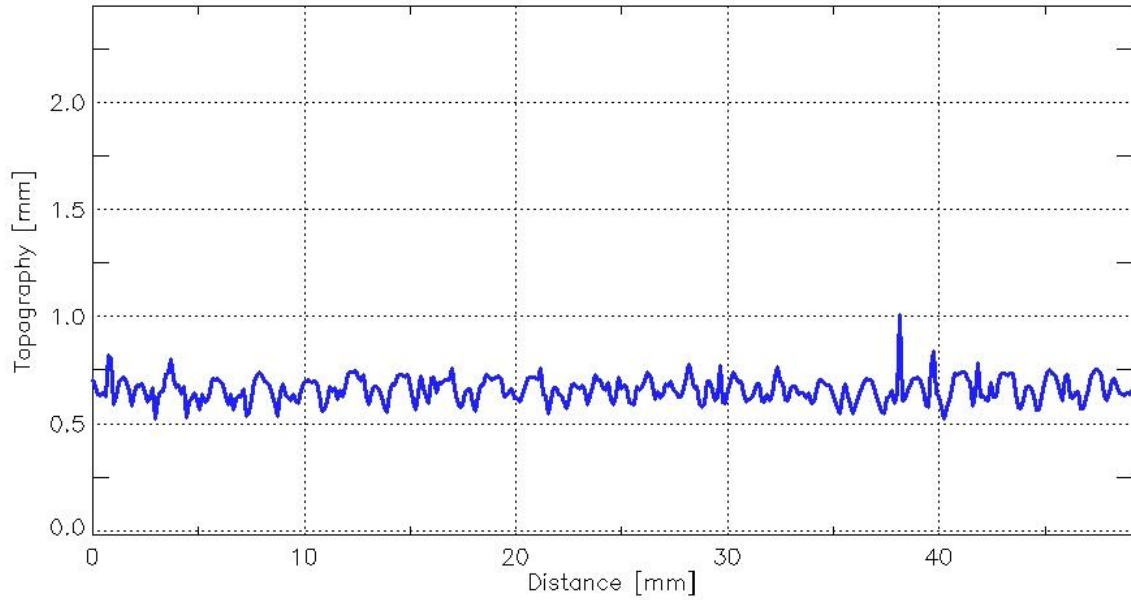
Ponadto stwierdzono, że dla tkaniny z najmniejszą licznością wątku wystąpiły największe licznosci najliczniej występujących kątów (Tabela 5.9).

Wpływ licznosci wątku na geometryczną strukturę powierzchni tkanin uwidocznił się również w kształcie profili tkanin wykonanych wzdłuż osnowy. Dla splotu płóciennego różnica ta polega na tym, że odstępy między kolejnymi wzniesieniami profilu są większe dla tkaniny o mniejszej licznosci wątku (rys. 5.55 – 5.57). Wynika to z faktu, że w jednostce długości występuje mniejsza liczba nitk wątku, a tym samym mniejsza liczba miejsc, w których osnowa przechodzi nad nitką wątku, tworząc wzniesienie na powierzchni tkaniny.

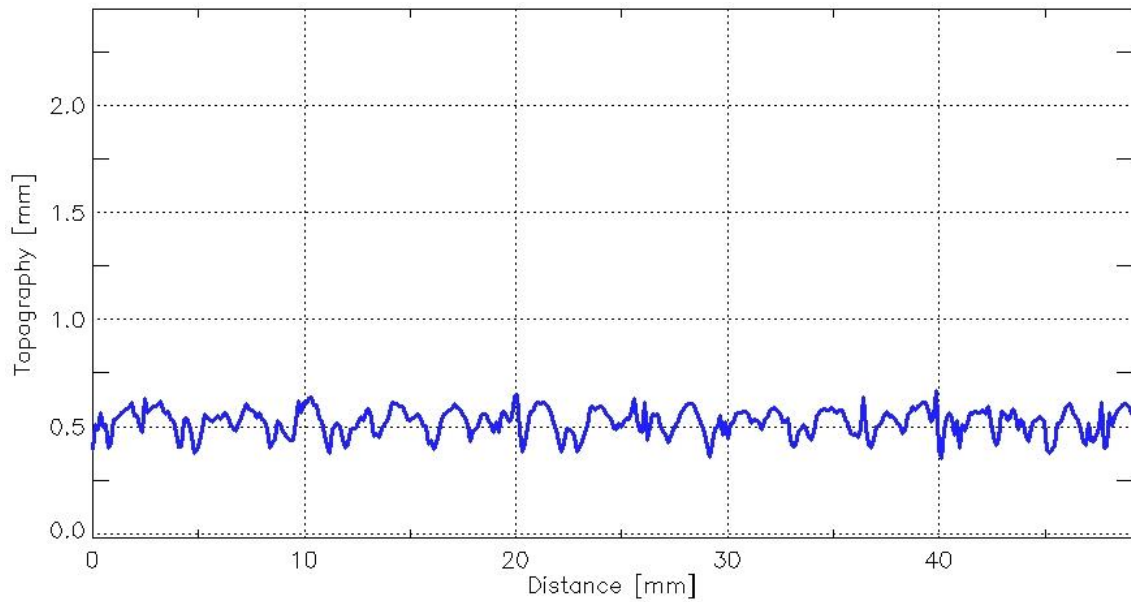
To zróżnicowanie odległości między wzniesieniami w zależności od licznosci wątku jeszcze wyraźniej uwidocznia się w tkaninach o splotcie skośnym 3/1 S (rys. 5.58 – 5.60). W przypadku tego splotu długość odcinków osnowy przechodzących nad trzema kolejnymi nitkami wątku jest znacznie większa w przypadku mniejszej licznosci wątku, gdyż odstęp między nitkami wątku jest większy.



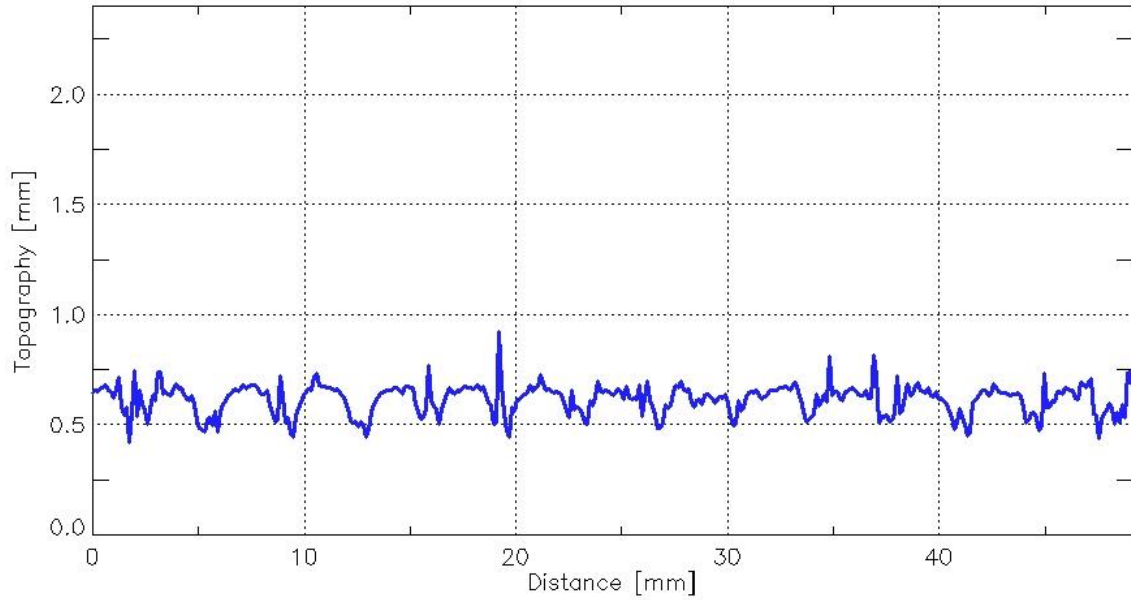
Rys. 5.55. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splotcie płóciennym z licznością wątku 11/cm



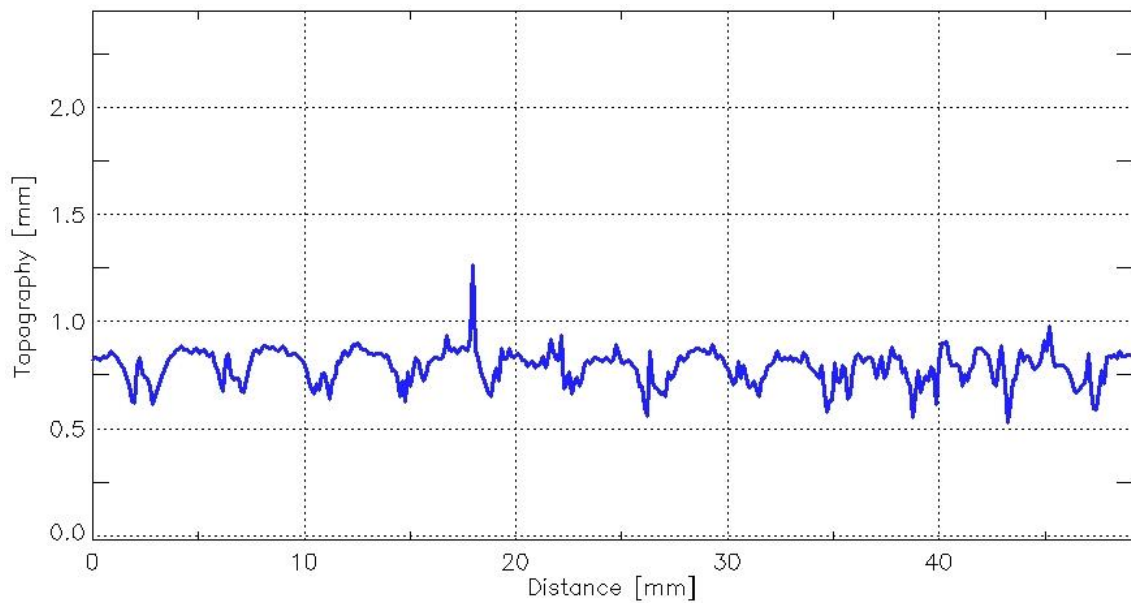
Rys. 5.56. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splocie płóciennym z licznością wątku 9/cm



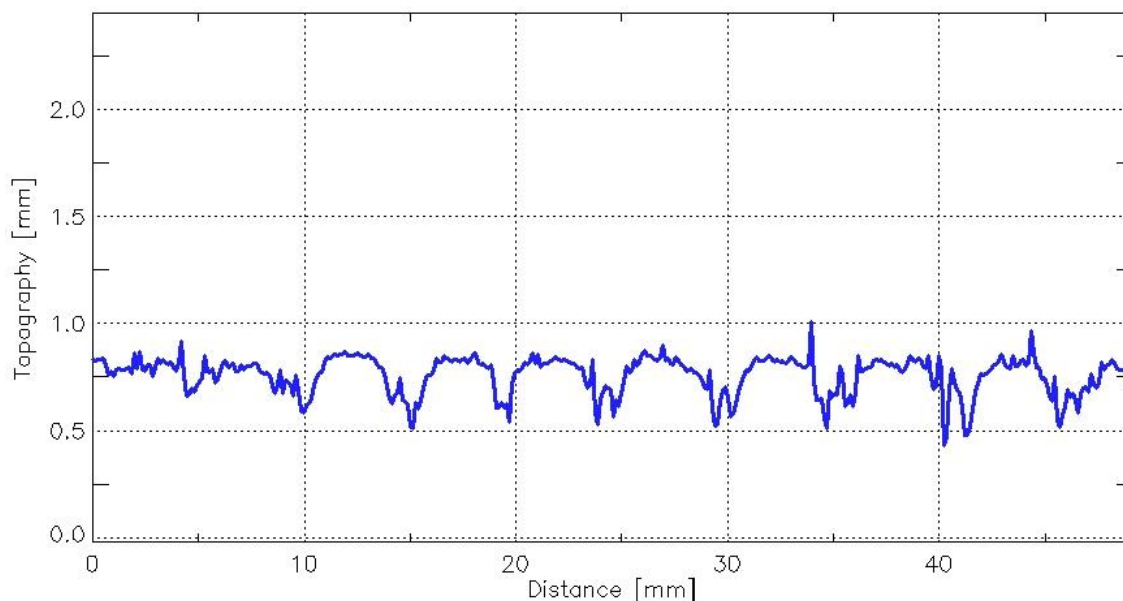
Rys. 5.57. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splocie płóciennym z licznością wątku 7/cm



Rys. 5.58. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z licznością wątku 11/cm



Rys. 5.59. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z licznością wątku 9/cm



Rys. 5.60. Profil pionowy (wzdłuż osnowy) tkaniny o splotcie skośnym 3/1 S z licznością wątku 7/cm

W celu oceny wpływu liczności wątku na wartość parametrów geometrycznej struktury powierzchni tkanin wykonano analizę statystyczną z zastosowaniem dwuczynnikowej analizy wariancji (ANOVA). Jako czynniki główne przyjęto liczność wątku i splot, jako zmienne zależne – poszczególne parametry profilu chropowatości powierzchni tkanin.

Wyniki analizy statystycznej podano w tabelach 5.10 – 5.15. Kolorem czerwonym oznaczono zależności statystycznie istotne przy poziomie istotności 0,05.

Tabela 5.10. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRa

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	0,1437	1	0,1437	16,9305	0,0004
Splot	0,0131	1	0,0131	1,5394	0,2267
Liczność wątku	0,0161	2	0,0080	0,9466	0,4021
Splot x liczność wątku	0,0174	2	0,0087	1,0238	0,3744
Błąd	0,2037	24	0,0085		

Legenda:

SS – suma kwadratów,

df – liczba stopni swobody,

MS – średnie kwadratów,,

F – zmienna o rozkładzie F,

p – poziom istotności.

Tabela 5.11. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRq

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	0,1345	1	0,1345	65627,33	0,0000
Splot	0,0012	1	0,0012	593,19	0,0000
Liczność wątku	0,0007	2	0,0003	168,65	0,0000
Splot x liczność wątku	0,0000	2	0,0000	2,02	0,1551
Błąd	0,0000	24	0,0000		

Legenda:

SS – suma kwadratów,

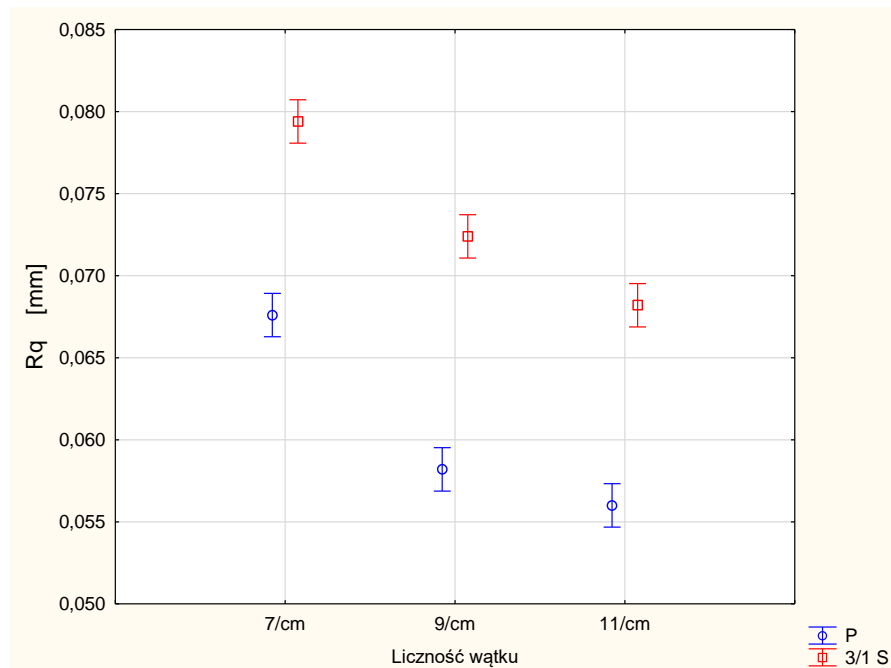
df – liczba stopni swobody,

MS – średnie kwadratów,,

F – zmienna o rozkładzie *F*,

p – poziom istotności.

Analiza statystyczna wykazała, że liczność wątku nie ma statystycznie istotnego wpływu na wartość parametru sRa – średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości. Natomiast w przypadku parametru sRq – średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości, wpływ zarówno liczności wątku jak i splotu jest statystycznie istotny przy poziomie istotności 0,05 (rys. 5.61). Wartość parametru sRq maleje w kierunku mniejszej liczności wątku. Zależność ta występuje w obu grupach splotowych tkanin. Jednocześnie wyraźnie widać, że wartość parametry sRq dla tkanin o płocie skośnym 3/1 S jest znacznie wyższa niż wartość tego parametru dla tkanin o płocie płóciennym.



Rys. 5.61. Wpływ liczności wątku i splotu tkaniny na wartość średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości sRq

Wartość parametru sRz w statystycznie istotny sposób zależy od splotu tkanin (Tabela 5.12), natomiast wpływ liczności wątku oraz interakcja pomiędzy czynnikami głównymi jest statystycznie nieistotna przy poziomie istotności 0,05.

Tabela 5.12. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRz

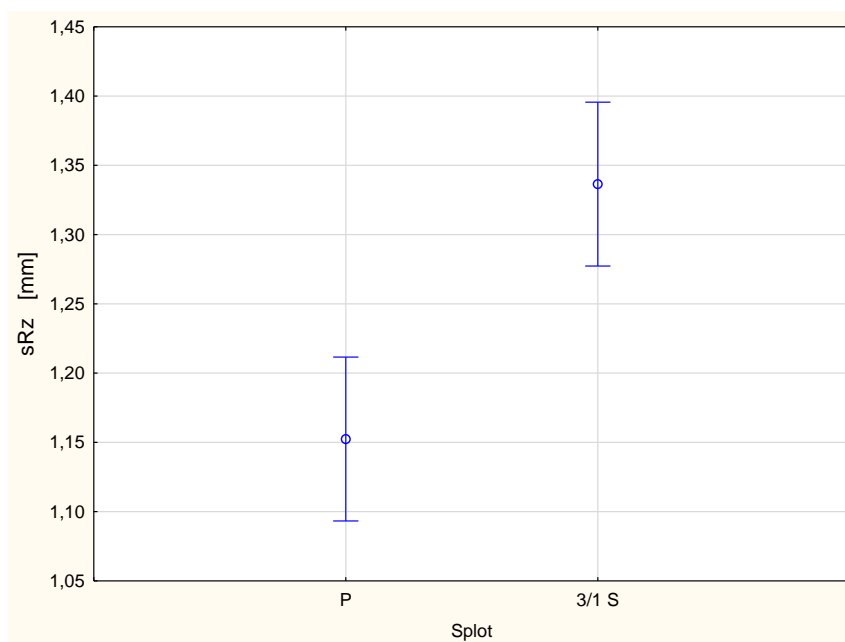
Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	46,4609	1	46,4609	3771,31	0,0000
Splot	0,2539	1	0,2539	20,61	0,0001
Liczność wątku	0,0022	2	0,0011	0,09	0,9140
Splot x liczność wątku	0,0463	2	0,0231	1,88	0,1747
Błąd	0,2957	24	0,0123		

Legenda:

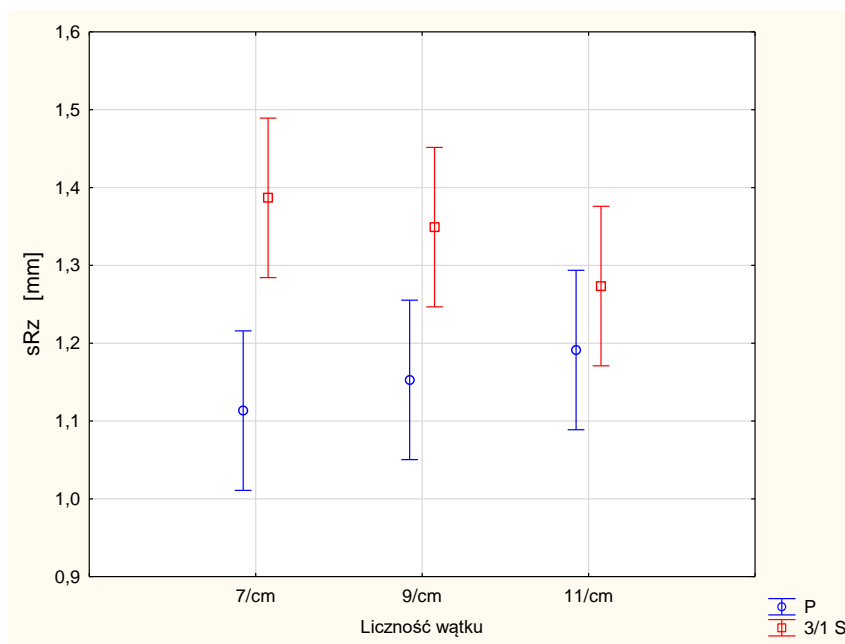
SS – suma kwadratów,
df – liczba stopni swobody,
MS – średnie kwadratów,,
F – zmienna o rozkładzie F,
p – poziom istotności.

Wyższą wartość największej wysokości profilu chropowatości odnotowano dla tkanin o splotie skośnym 3/1 S niż dla tkanin o splotie płóciennym (rys. 5.62). Stwierdzono ciekawe zjawisko: dla tkanin o splotie płóciennym wartość parametru sRz rośnie wraz ze

wzrostem liczności wątku, natomiast maleje dla tkanin o splocie skośnym 3/1 S (Rys. 5.63). Jednocześnie odnotowano duży rozrzut wyników.



Rys. 5.62. Wpływ splotu tkaniny na wartość największej wysokości profilu chropowatości sRz



Rys. 5.63. Wpływ liczności wątku i splotu tkaniny na wartość największej wysokości profilu chropowatości sRz

W analizowanej grupie tkanin splot ma statystycznie istotny wpływ na wartość całkowitej wysokości chropowatości sRt (Tabela 5.13). Istotnie wyższa wartość całkowitej wysokości profilu chropowatości występuje dla tkanin o splocie skośnym 3/1 S niż dla tkanin o splocie płóciennym (rys. 5.64). Natomiast wpływ licznosci wątku oraz interakcja między czynnikami głównymi są statystycznie nieistotne przy poziomie istotności 0,05.

Tabela 5.13. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRt

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	67,3890	1	67,3890	5406,68	0,0000
Splot	0,1313	1	0,1313	10,54	0,0034
Liczność wątku	0,0213	2	0,0106	0,85	0,4382
Splot x licznosc wątku	0,0029	2	0,0014	0,12	0,8909
Bład	0,2991	24	0,0125		

Legenda:

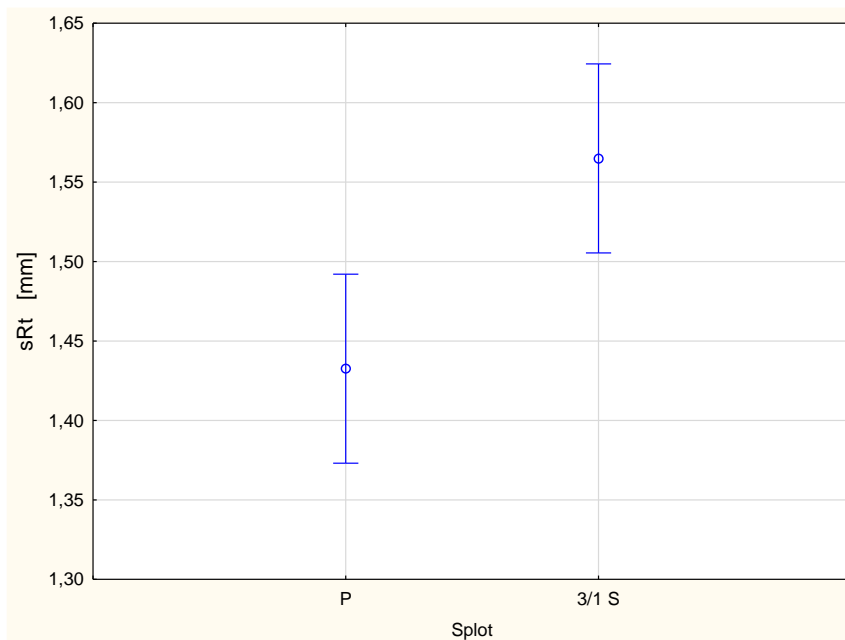
SS – suma kwadratów,

df – liczba stopni swobody,

MS – średnie kwadratów,,

F – zmienna o rozkładzie F ,

p – poziom istotności.



Rys. 5.64. Wpływ splotu na wartość całkowitej wysokości profilu chropowatości sRt

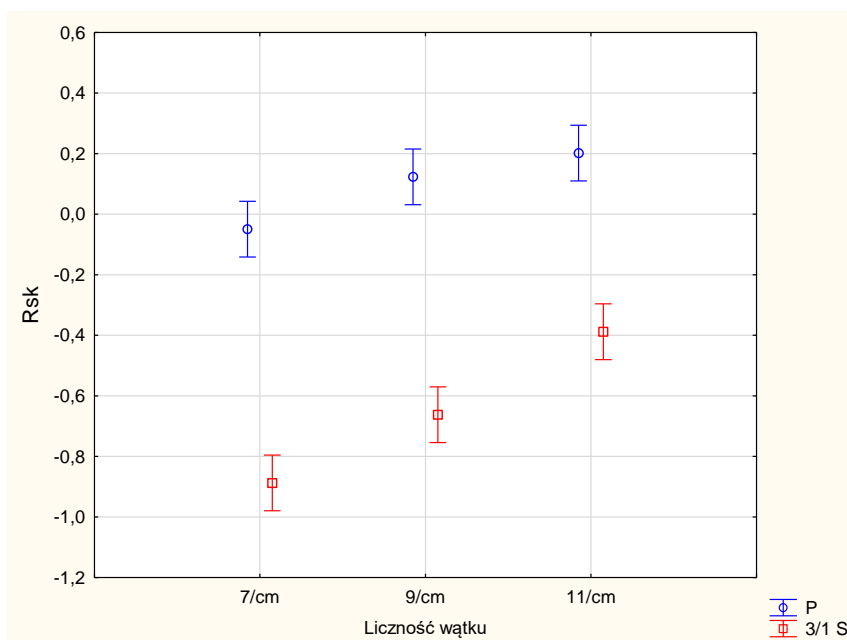
Skośność $sRsk$ w statystycznie istotny sposób zależy zarówno od licznosci wątku jak i od splotu tkanin. Interakcja między czynnikami głównymi jest również statystycznie istotna (Tabela 5.14). Wraz ze wzrostem licznosci wątku rośnie wartość skośności $sRsk$ (rys. 5.65).

Tabela 5.14. Wyniki analizy wariancji dla parametru $sRsk$

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	2,3024	1	2,3024	231,49	0,0000
Splot	4,0841	1	4,0841	410,62	0,0000
Licznosc wątku	0,7047	2	0,3524	35,43	0,0000
Splot x licznosc wątku	0,0855	2	0,0427	4,30	0,0254
Bład	0,2387	24	0,0099		

Legenda:

SS – suma kwadratów,
 df – liczba stopni swobody,
 MS – średnie kwadratów,,
 F – zmienna o rozkładzie F ,
 p – poziom istotności.



Rys. 5.65. Wpływ licznosci wątku i splotu tkaniny na skośność profilu chropowatości $sRsk$

Znacznie wyższe wartości skośności występują dla tkanin o splotie płóciennym w porównaniu do wartości $sRsk$ dla tkanin o splotie skośnym 3/1 S. Dla tkanin o splotie skośnym wartości te są zbliżone lub nieco wyższe od zera, natomiast dla tkanin o splotie

skośnym 3/1 S są to wartości ujemne. Oznacza to, że rozkład wysokości punktów na powierzchni tkanin o splocie skośnym wykazuje odchylenie powyżej wartości średniej.

W przypadku kurtozy $sRku$ odnotowano tylko statystycznie istotny wpływ liczności wątku na wartość tego parametru (Tabela 5.15). Kurtoza rośnie wraz ze wzrostem liczności wątku (rys. 5.66).

Tabela 5.15. Wyniki analizy wariancji dla parametru $sRku$

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	1118,8513	1	1118,8513	1149,20	0,0000
Splot	0,0013	1	0,0013	0,00	0,9712
Liczność wątku	10,4306	2	5,2153	5,36	0,0119
Splot x liczność wątku	2,7393	2	1,3697	1,41	0,2644
Błąd	23,3662	24	0,9736		

Legenda:

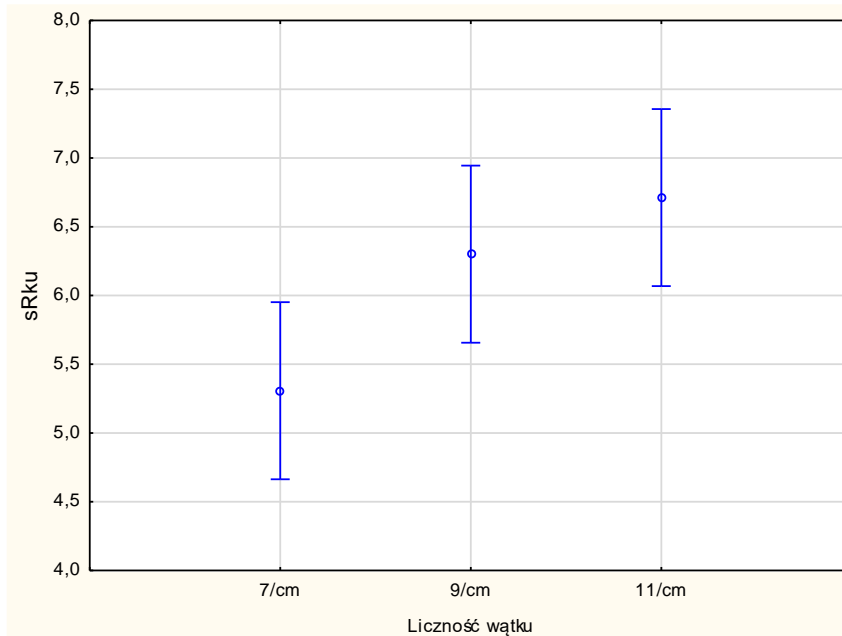
SS – suma kwadratów,

df – liczba stopni swobody,

MS – średnie kwadratów,,

F – zmienna o rozkładzie *F*,

p – poziom istotności.



Rys. 5.66. Wpływ liczności wątku na wartość kurtozy $sRku$

Dla wszystkich wariantów tkanin analizowanych w ramach tej części eksperymentu wartość kurtozy $sRku$ przyjmuje wartości wyższe od 3. Oznacza to, że rozkład wysokości punktów na powierzchni tkanin jest ostry.

Podsumowując przeprowadzoną analizę należy stwierdzić, że licznosc wтку wpływa na kształtowanie się geometrycznej struktury powierzchni tkanin. Badaniom poddano tkanino o dwóch splotach: płóciennym i skośnym 3/1 S. Odnotowano statystycznie istotny wpływ, przy poziomie istotności 0,05, licznosci wtku na średnią kwadratową rzędnych profilu chropowatości sRq , skośność profilu chropowatości $sRsk$ oraz kurtozę $sRku$. Natomiast wpływ licznosci wtku na średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości sRa , największą wysokość profilu chropowatości sRz oraz wartość całkowitej wysokości profilu chropowatości sRt był statystycznie nieistotny. W przypadku skośności $sRsk$ wystąpiła statystycznie istotna interakcja pomiędzy czynnikami głównymi: licznoscią wtku i splotem tkanin.

Inne narzędzia dostępne w specjalistycznym programie Mark III pozwoliły również zaobserwować wpływ licznosci wtku na kształtowanie się geometrycznej struktury powierzchni tkanin. Do takich narzędzi należą: funkcja autokorelacji, analiza rozkładu kątów stycznych do powierzchni w każdym punkcie analizowanej powierzchni oraz kształt i charakterystyka profili powierzchni tkaniny. Profile takie mogą być wygenerowane w dowolnym kierunku, w każdym miejscu obrazu powierzchni tkaniny uzyskanego z profilometru.

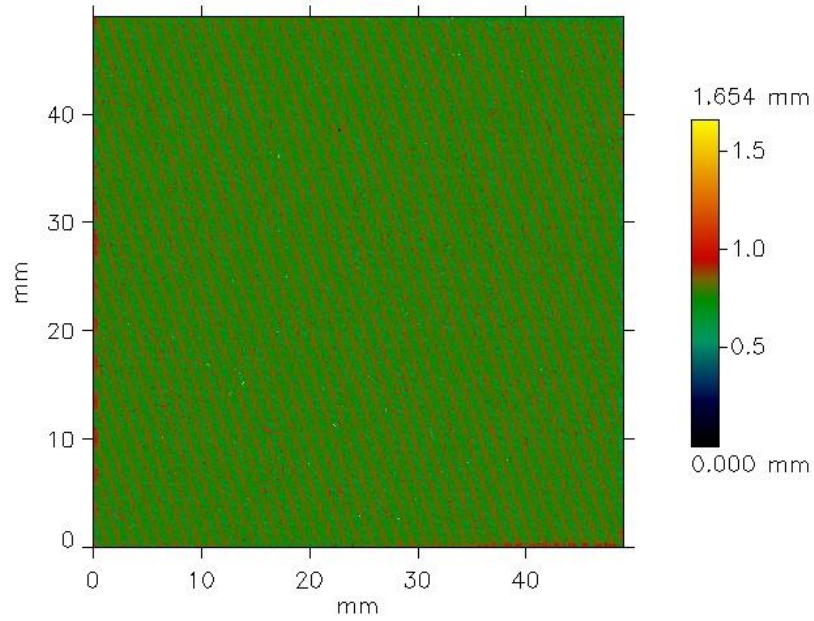
5.3. Analiza wpływu masy liniowej przędzy wątkowej na parametry charakteryzujące geometryczną strukturę powierzchni tkanin

W tym etapie badań analizie poddano tkaniny o splotcie skośnym 3/1 S. W tkaninach zastosowano 5 wariantów przędzy wątkowej:

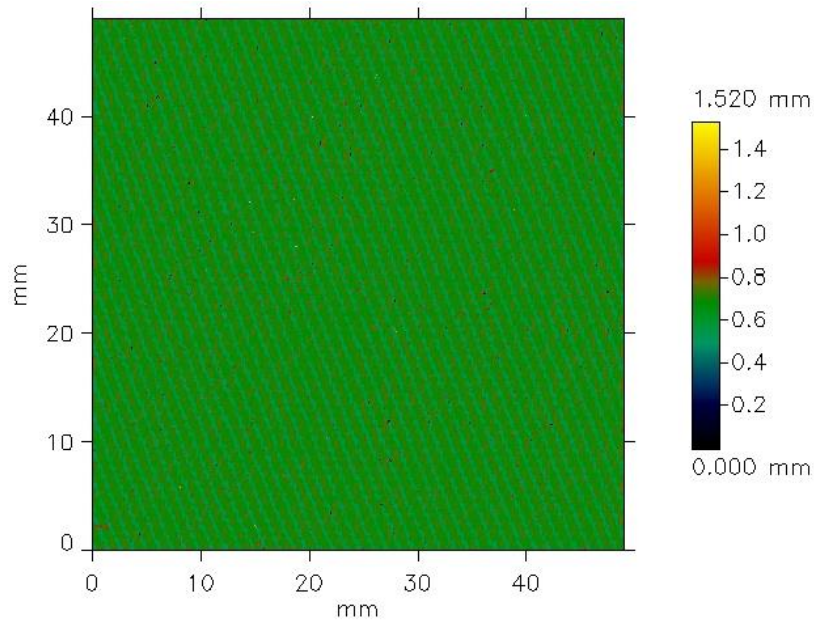
- 100 tex OE,
- 60 tex OE,
- 50 tex OE,
- 40 tex OE,
- 30 tex OE.

Poniżej, na rys. 5.67 – 5.71 przedstawiono przykładowe obrazy powierzchni tkanin o splotcie skośnym 3/1 S z przędzami wątkowymi o różnej masie liniowej, zgodnie z planem eksperymentu. Różnice w wyglądzie wykresów są nieznaczne. We wszystkich przypadkach widoczne są skośne prążki w kierunku S, odpowiadające prążkom na powierzchni tkaniny, wynikającym z zastosowanego splotu.

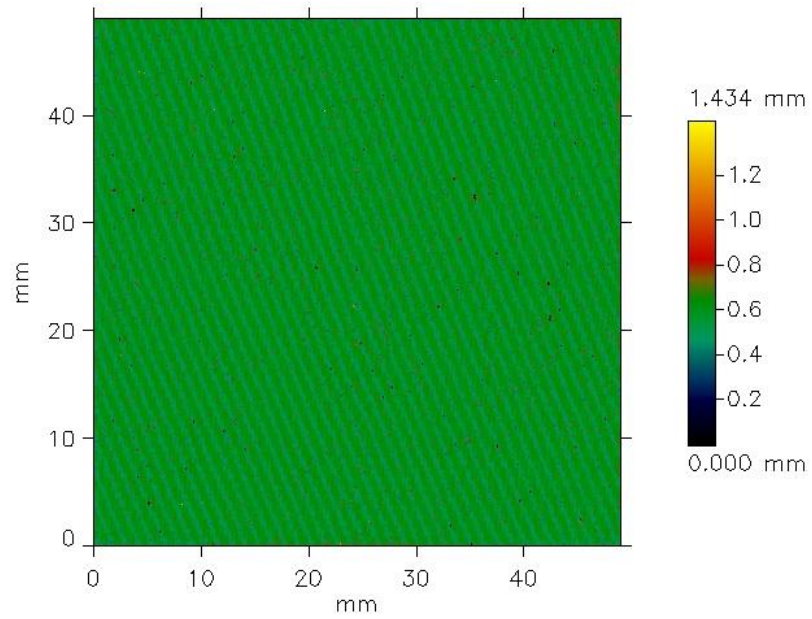
Istotną różnicą jest zakres wysokości na skali barwnej generowanej automatycznie przez program Mark III. Wraz ze zmniejszaniem się masy liniowej przędzy wątkowej zaobserwowano mniejszą maksymalną wysokość na skali barwnej wysokości punktów na powierzchni. To wynika z faktu, że większa masa liniowa przędzy wątkowej oznacza jej większą grubość, m.in., średnicę, co powoduje, że wzniesienia w miejscach przepłotów przędz są wyższe. Najwyraźniejsza różnica występuje pomiędzy wariantem z przędzą wątkową 100 tex (rys. 5.67) i pozostałymi wariantami. Wynika to z faktu, że zastosowana w tym wariantcie przędza wątkowa jest znacznie grubsza od przędz wątkowych zastosowanych w pozostałych wariantach.



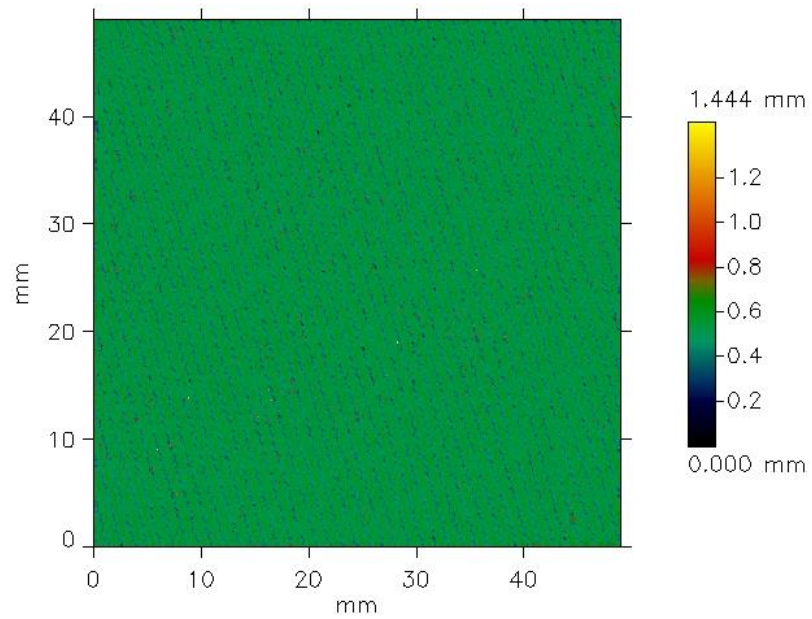
Rys. 5.67. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z przędzą wątkową o masie linowej 100 tex po wyeliminowaniu komponentu falistości



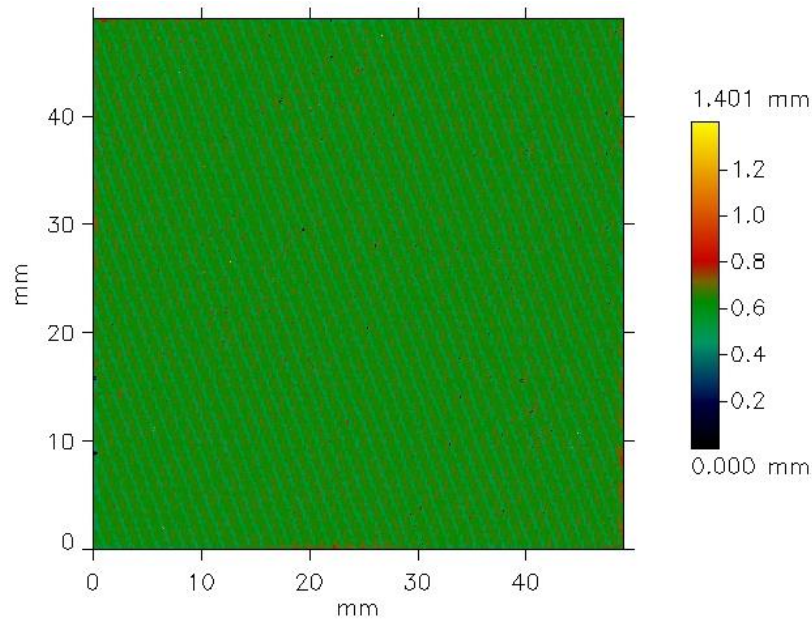
Rys. 5.68. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z przędzą wątkową o masie linowej 60 tex po wyeliminowaniu komponentu falistości



Rys. 5.69. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z przędzą wątkową o masie linowej 50 tex po wyeliminowaniu komponentu falistości



Rys. 5.70. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z przędzą wątkową o masie linowej 40 tex po wyeliminowaniu komponentu falistości



Rys. 5.71. Przykładowy obraz powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S z przędzą wątkową o masie liniowej 30 tex po wyeliminowaniu komponentu falistości

Dla analizowanych tkanin wyznaczono wszystkie możliwe parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni. Analizie poddano wytypowane parametry, które zostały omówione w części 5.1. Średnie wartości wytypowanych parametrów przedstawiono w tabeli 5.16. Średnie obliczono w oparciu o wyniki 5 powtórzeń pomiaru dla każdego wariantu tkanin.

Tabela. 5.16. Parametry charakteryzujące topografię powierzchni badanych tkanin

Splot	Masa liniowa wątku [tex]	sR _a [mm]	sR _q [mm]	sR _z [mm]	sR _t [mm]	sR _{sk} [-]	sR _{ku} [-]
Skośny 3/1 S	100	0,053	0,068	1,273	1,524	-0,388	6,338
	60	0,054	0,069	1,251	1,410	-0,796	6,781
	50	0,051	0,064	1,219	1,429	-0,717	6,262
	40	0,048	0,063	1,251	1,430	0,026	7,671
	30	0,046	0,059	1,145	1,340	-0,709	6,749

W celu oceny wpływu masy liniowej przędzy wątkowej na strukturę geometryczną powierzchni tkanin uzyskane wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej z zastosowaniem jednoczynnikowej analizie wariancji. Jako zmienne zależne zastosowano

poszczególne parametry struktury geometrycznej powierzchni tkanin, natomiast jako zmienną niezależną – masę liniową przędzy wątkowej.

Poniżej przedstawiono wyniki analizy statystycznej z zastosowaniem jednoczynnikowej analizy wariancji. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRa – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości, przedstawiono w tabeli. Kolorem czerwonym zaznaczono przypadki statystycznie istotne przy poziomie istotności 0.05.

Tabela 5.17. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRa

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	0,062800	1	0,062800	47576,03	0,000000
Masa liniowa wątku	0,000208	4	0,000052	39,44	0,000000
Błąd	0,000026	20	0,000001		

Legenda:

SS – suma kwadratów,

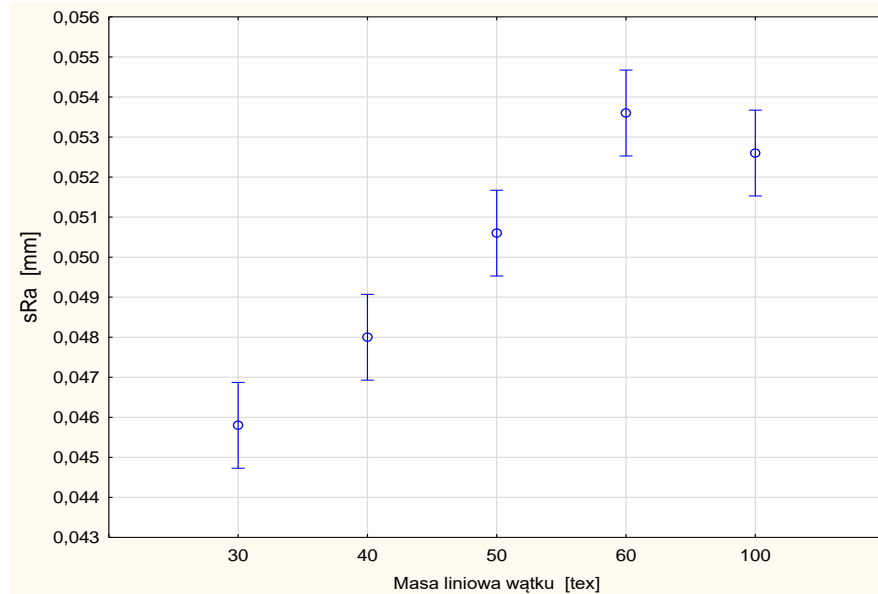
df – liczba stopni swobody,

MS – średnie kwadratów,

F – zmienna o rozkładzie F,

p – poziom istotności.

Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono, że masa liniowa przędzy wątkowej ma istotny wpływ na wartość parametru sRa (w tabeli kolor czerwony). Rys. 5.72 przedstawia zależność parametru sRa od głównego czynnika: masy liniowej przędzy wątkowej. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na parametr sRa jest istotny statystycznie przy poziomie istotności 0,05. Najwyższą wartość średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości odnotowano dla masy liniowej 60 tex i 100 tex (rys.5.72). Najniższa wartość parametru sRa wystąpiła dla masy liniowej 30 tex i 40 tex.



Rys. 5.72. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości sRa

Wyniki analizy statystycznej dla parametru sRq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości, przedstawiono w tabeli. Wyniki analizy statystycznej są bardzo podobne do wyników analizy dla parametru sRa . Statystycznie istotną zależność odnotowano pomiędzy masą liniową przędzy wątkowej, a wartością parametru sRq .

Tabela 5.18. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRq

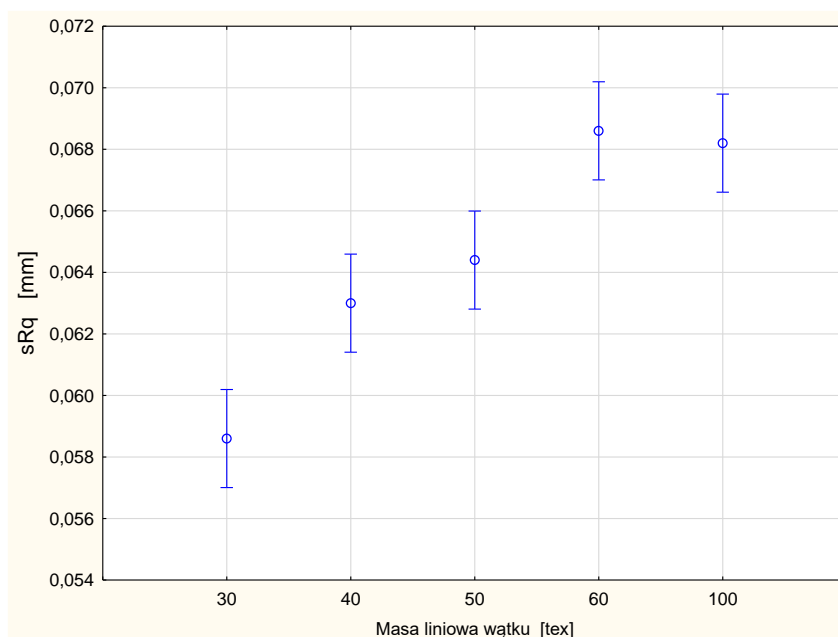
Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	0,104200	1	0,104200	35684,88	0,000000
Masa liniowa wątku	0,000338	4	0,000084	28,92	0,000000
Błąd	0,000058	20	0,000003		

Legenda:

SS – suma kwadratów,
df – liczba stopni swobody,
MS – średnie kwadratów,
F – zmienna o rozkładzie *F*,
p – poziom istotności.

Rys. 5.73 przedstawia zależność parametru sRa od głównego czynnika: masy liniowej przędzy wątkowej. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na parametr sRa jest istotny statystycznie przy poziomie istotności 0,05. Najwyższą wartość średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości odnotowano dla tkanin z przędzą wątkową o

masie liniowej 60 tex i 100 tex (rys. 5.73). Najniższa wartość parametru sRa wystąpiła dla tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 30 tex i 40 tex.



Rys. 5.73. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości sRq

W przypadku parametrów sRz i sRt nie odnotowano istotnego wpływu masy liniowej przędzy wątkowej na wartość tych parametrów. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej jest statystycznie nieistotny przy poziomie istotności 0,05.

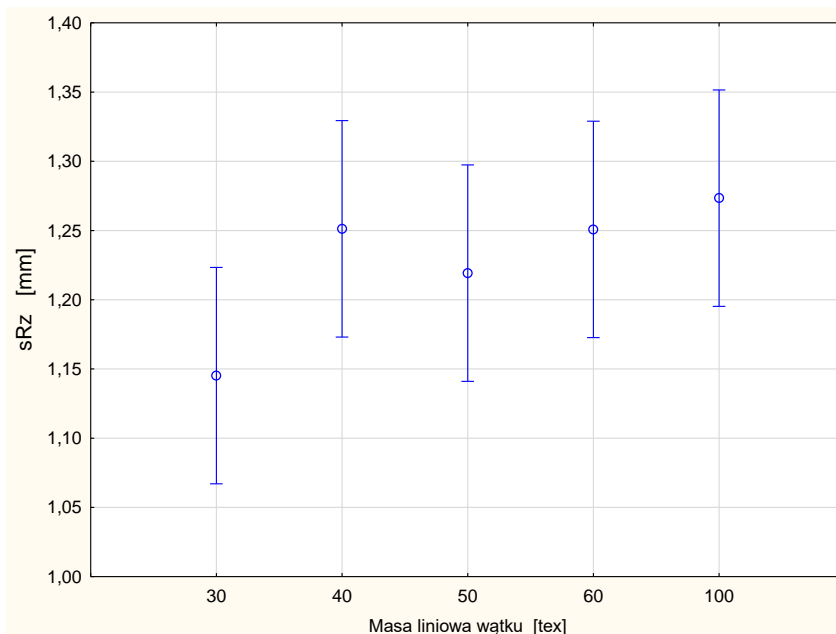
Tabela 5.19. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRz

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	37,69714	1	37,69714	5369,948	0,000000
Masa liniowa wątku	0,05026	4	0,01257	1,790	0,170478
Błąd	0,14040	20	0,00702		

Legenda:

SS – suma kwadratów,
 df – liczba stopni swobody,
 MS – średnie kwadratów,
 F – zmienna o rozkładzie F ,
 p – poziom istotności.

Wartość parametru sRz dla tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex, 60 tex i 40 tex jest wyrównana. Najniższą wartość parametru sRz odnotowano dla masy liniowej 100 tex (rys. 5.74).



Rys. 5.74. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość największej wysokości profilu chropowatości sRz

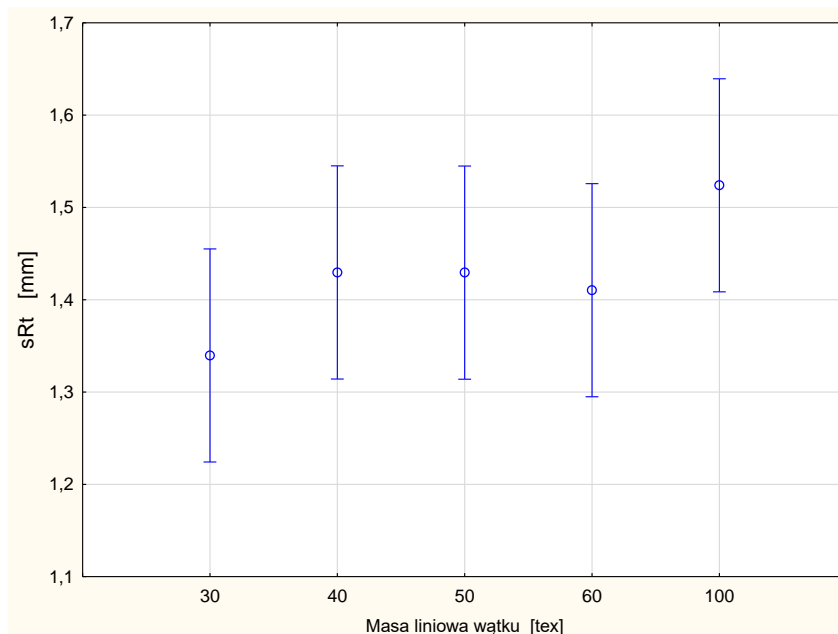
W przypadku analizowanej grupy tkanin z masą liniową 60 tex, 40 tex i 60 tex średnia wartość parametru sRt jest niemal taka sama. Podobnie, jak w przypadku parametru sRz , najwyższą wartość parametru sRt odnotowano dla masy liniowej z przędzą wątkową 100 tex, a najniższą – dla tkaniny z przędzą wątkową 30 tex (rys. 5.75).

Tabela 5.20. Wyniki analizy wariancji dla parametru sRt

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	50,87969	1	50,87969	3323,419	0,000000
Masa liniowa wątku	0,08668	4	0,02167	1,415	0,265135
Błąd	0,30619	20	0,01531		

Legenda:

SS – suma kwadratów,
 df – liczba stopni swobody,
 MS – średnie kwadratów,
 F – zmienna o rozkładzie F ,
 p – poziom istotności.



Rys. 5.75. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość całkowitej wysokości chropowatości sRt

Analiza statystyczna wykazała, że w przypadku skośności $sRsk$ wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość skośności $sRsk$ są statystycznie istotne przy poziomie istotności 0,05. (Tabela 5.21).

Tabela 5.21. Wyniki analizy wariancji dla parametru $sRsk$

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	6,947442	1	6,947442	260,2434	6,947442
Masa liniowa wątku	2,061121	4	0,515280	19,3018	2,061121
Błąd	0,533919	20	0,026696		

Legenda:

SS – suma kwadratów,

df – liczba stopni swobody,

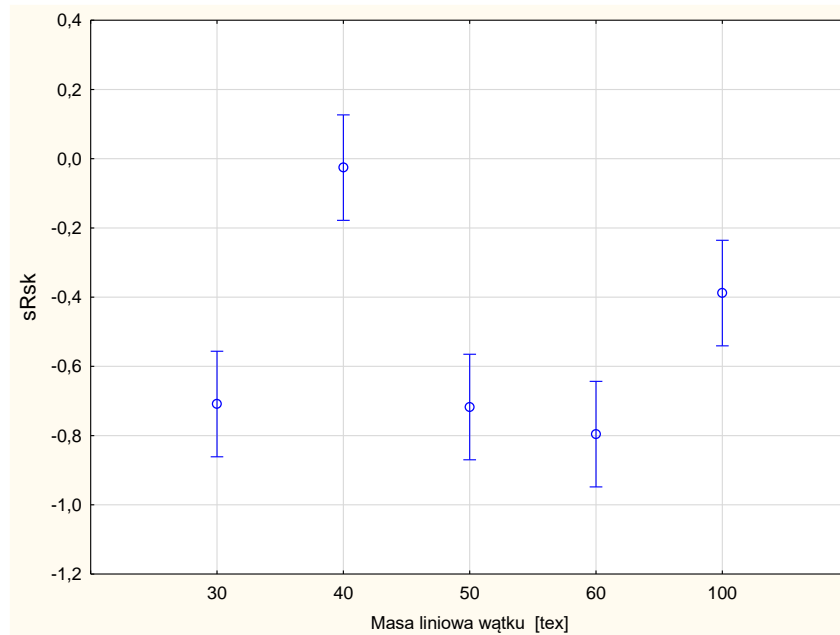
MS – średnie kwadratów,

F – zmienna o rozkładzie *F*,

p – poziom istotności.

Średnia wartość skośności jest ujemna dla tkanin z przędzą wątkową masy liniowej 30 tex, 40 tex, 50 tex, 60 tex, jak i 100 tex (rys. 5.76). Niemniej jednak wyższą wartość, zbliżoną do zera, odnotowano dla tkaniny z przędzą wątkową o masie liniowej 40 tex. Oznacza to, że dla tkaniny z przędzą wątkową o masie liniowej 40 tex rozkład wartości z (wysokości punktów na powierzchni) jest zbliżony do symetrycznego względem wartości

średniej, natomiast w przypadku tkanin z przędzą wątkową o masie liniowej 30 tex, 50 tex, 60 tex i 100 tex rozkład ten wykazuje odchylenie powyżej wartości średniej.



Rys. 5.76. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość skośności profilu chropowatości $sRsk$

Wyniki analizy statystycznej dla kurtozy $sRku$ są zbliżone do wyników dla największej wysokości profilu chropowatości sRz oraz całkowitej wysokości profilu chropowatości sRt . Tu również wpływ masy liniowej wątku na wartość parametru $sRku$ jest statystycznie nieistotny. (Tabela 5.22).

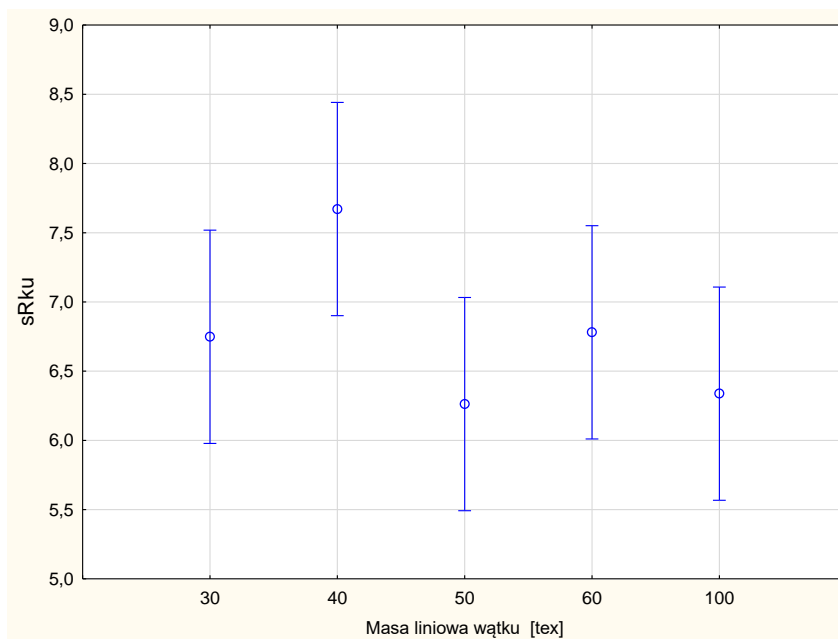
Tabela 5.22. Wyniki analizy wariancji dla parametru $sRku$

Czynnik główny	SS	df	MS	F	p
Wyraz wolny	1142,481	1	1142,481	1676,414	0,000000
Masa liniowa wątku	6,282	4	1,570	2,304	0,093848
Błąd	13,630	20	0,682		

Legenda:

SS – suma kwadratów,
df – liczba stopni swobody,
MS – średnie kwadratów,
F – zmienna o rozkładzie F,
p – poziom istotności.

Średnia wartość kurtozy $sRku$ jest niższa dla tkaniny z przędzą wątkową o masie liniowej 50 tex i 100 tex w porównaniu z tkaniną z przędzą wątkową o masie liniowej 30 tex, 40 tex i 60 tex (rys. 5.77). Odnotowano duży rozrzut wartości kurtozy dla wszystkich tkanin różniących się masą liniową przędzy wątkowej. We wszystkich przypadkach wartość kurtozy $sRku$ jest znacznie wyższa od 3, co oznacza, że wykres rozkładu wartości z (wysokości punktów) jest ostry.



Rys. 5.77. Wpływ masy liniowej przędzy wątkowej na wartość kurtozy profilu chropowatości $sRku$

Analiza innych wykresów, takich jak rozkład kątów czy funkcja autokorelacji nie wykazała wyraźnych różnic pomiędzy wariantami. W przypadku histogramów wystąpiły widoczne różnice w wysokości najliczniejszej klasy, ale nie stwierdzono jednoznacznych tendencji zależności od masy liniowej przędzy wątkowej.

Podsumowując przeprowadzoną analizę należy stwierdzić, że masa liniowa przędzy wątkowej wpływa na geometryczną strukturę powierzchni tkanin. Statystycznie istotny wpływ, przy poziomie istotności 0,05, odnotowano w przypadku średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości sRa , średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości sRq oraz skośności $sRsk$.

5.4. Analiza zależności pomiędzy podstawowymi i pochodnymi parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin

Analizę korelacji pomiędzy podstawowymi i pochodnymi parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin przeprowadzono w oparciu o wyniki badań wszystkich 21 wariantów tkanin wytworzonych dla celów eksperymentu (Tabela 4.1). Dla tkanin, oprócz podstawowych parametrów struktury, takich jak: masa powierzchniowa, licznosc osnowy i wątku, wrobienie osnowy i wątku, wyznaczono także parametry pochodne: zapełnienie powierzchniowe i wypełnienie. Ponadto, dla wszystkich wariantów tkanin obliczono wskaźnik splotu tkaniny P (*Fabric Weave Factor*) opracowany przez Prof. Milasiusa [119]. Wskaźnik ten może być obliczany bezpośrednio z matrycy splotu. W późniejszych pracach Prof. Mislasius zmodyfikował formułę wskaźnika splotu i oznaczył go symbolem P' [121]. Następnie zaproponował zintegrowany współczynnik struktury tkaniny ϕ (*integrated fabric structure factor*), uwzględniający wskaźnik P , zgodnie z poniższym równaniem:

$$\phi = \sqrt{\frac{12}{\pi}} \frac{1}{P} \sqrt{\frac{T_{sr}}{\rho}} g_w^{\frac{1+2/3\sqrt{T_o/T_w}}{1+2/3\sqrt{T_o/T_w}}} g_o^{\frac{2/3\sqrt{T_o/T_w}}{1+2/3\sqrt{T_o/T_w}}} \quad (5.1)$$

gdzie:

ϕ – zintegrowany współczynnik struktury tkaniny wg Milasiusa [119 - 123],

P – wskaźnik splotu tkaniny wg Milasiusa [119 - 123],

T_{sr} – średnia masa liniowa przędzy,

ρ – gęstość materiału w przędzy,

g_o, g_w – licznosc odpowiednio osnowy i wątku,

T_o, T_w – masa liniowa osnowy i wątku:

Obliczono wartości współczynnika struktury tkaniny ϕ w oparciu o wskaźnik splotu wg starej (P) [119] i nowej (P') [121] formuły, uzyskując wartości odpowiednio: ϕ_1 i ϕ_2 .

Wyniki analizy korelacyjnej przedstawiono w tabelach 5.23 i 5.24. Kolorem czerwonym oznaczono zależności statystycznie istotne przy poziomie istotności 0,05.

Tabela 5.23. Wartości współczynników korelacji liniowej pomiędzy podstawowymi parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin

	Wartość współczynników korelacji liniowej						
	m_p	g_o	g_w	W_o	W_w	h	d_w
Ra	-0,0919	-0,0842	-0,3053	-0,2530	-0,5930	0,7778	0,2577
Rq	-0,0759	0,0004	-0,3018	-0,2774	-0,5350	0,7804	0,2655
Rz	-0,1229	0,0893	-0,3047	-0,0459	-0,0874	0,1770	0,1217
Rmax	0,0171	-0,0663	-0,4024	0,1649	-0,0165	0,2250	0,3672
Rz25	-0,2107	0,2371	-0,2266	-0,3052	-0,0647	0,2095	-0,0085
R_{max25}	-0,2097	0,0939	-0,3484	-0,1294	-0,0975	0,2606	0,1588
Rp	0,1223	0,1074	-0,3107	-0,0001	-0,1152	0,2978	0,2744
Rv	-0,1891	-0,1439	-0,4101	-0,2166	-0,1193	0,1450	-0,0100
Rt	-0,1859	0,0068	-0,3855	0,1715	-0,1011	0,3275	0,3725
Rsk	0,4536	-0,3847	0,1286	0,2606	-0,0259	-0,4234	-0,0482
Rku	0,0326	0,3351	0,2085	0,1891	0,6467	-0,4821	-0,0361
Rk	0,1954	-0,5089	-0,2183	0,3360	-0,5744	0,5197	0,4661
Rpk	0,3982	-0,4022	-0,1418	0,1212	-0,6819	0,6490	0,5254
Rvk	-0,1741	0,0993	-0,4988	-0,3811	-0,1155	0,4336	0,1394
Mr1	-0,0359	0,2916	0,0245	-0,1563	0,3676	-0,3942	-0,2261
Mr2	0,3371	-0,4747	-0,0460	0,6673	-0,1050	-0,0287	0,4114
Rmr(c)	-0,0946	-0,1287	0,2693	0,0494	0,0586	-0,2650	0,2577
Rmr	-0,2888	0,1330	0,1921	-0,0017	0,3367	-0,3162	0,2655

Tabela 5.23. Wartości współczynników korelacji liniowej pomiędzy pochodnymi parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin

	Wartość współczynników korelacji liniowej							
	Z _o	Z _w	Z _{ow}	E _o	E _w	E _{śred}	φ ₁	φ ₂
Ra	-0,0842	0,0312	-0,0156	0,1433	-0,4489	-0,2632	-0,2859	-0,3001
Rq	0,0004	0,0422	0,0375	0,0509	-0,4514	-0,3589	-0,3532	-0,3648
Rz	0,0893	-0,1155	-0,0518	-0,0646	-0,2180	-0,2861	-0,2812	-0,2931
Rmax	-0,0663	0,0720	0,0422	-0,0175	0,0258	-0,3035	-0,2253	-0,2437
Rz25	0,2371	-0,1923	-0,0559	-0,3413	-0,4103	-0,5587	-0,5389	-0,5470
R_{max25}	0,0939	-0,1116	-0,0464	-0,0915	-0,2554	-0,3769	-0,4107	-0,4219
Rp	0,1074	0,0465	0,1006	0,0121	-0,0942	-0,2159	-0,2632	-0,2746
Rv	-0,1439	-0,3383	-0,3978	-0,0704	-0,4371	-0,3228	-0,3510	-0,3792
Rt	0,0068	0,0873	0,1024	0,1643	0,0260	-0,1164	-0,1520	-0,1590
Rsk	-0,3847	0,0557	-0,1398	0,2393	0,3424	0,4500	0,3999	0,3962
Rku	0,3351	0,1260	0,3029	-0,2272	0,4679	0,0362	0,0478	0,0754
Rk	-0,5089	0,3254	0,0551	0,8112	0,2009	0,5675	0,4545	0,4386
Rpk	-0,4022	0,4509	0,2513	0,2377	0,1161	-0,0678	0,0181	0,0049
Rvk	0,0993	-0,2495	-0,2087	-0,2735	-0,5256	-0,6295	-0,6969	-0,7011
Mr1	0,2916	-0,2223	-0,0645	-0,5854	-0,1042	-0,4637	-0,3810	-0,3733
Mr2	-0,4747	0,4055	0,1505	0,7906	0,6789	0,8265	0,7309	0,7278
Rmr(c)	-0,1287	-0,0164	-0,0808	0,0388	0,1219	0,2374	0,2773	0,2888
Rmr	0,1330	-0,2097	-0,1404	0,0976	0,0043	0,3090	0,2709	0,2764

Na podstawie przeprowadzonej analizy korelacyjnej stwierdzono, że występuje silna i statystycznie istotna zależność korelacyjna pomiędzy niektórymi podstawowymi i pochodnymi parametrami struktury tkanin, a parametrami chropowatości wyznaczonymi za pomocą profilometru. Jednakże, w przypadku parametrów *sRa* i *sRq* nie stwierdzono silnej zależności z żadnym z parametrów struktury. Co jest zaskakujące, a jednocześnie potwierdza wspomniana wcześniej niedoskonałość kontaktowych metod pomiaru chropowatości powierzchni. Parametr *sRa* jest parametrem tzw. uprzywilejowanym, który najczęściej wyznaczany jest przy ocenie jakości powierzchni materiałów. Jest on nazywany

chropowatością, chociaż jest z tylko jednym z wielu parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni. Jest to jedyny parametr charakteryzujący chropowatość wyznaczany za pomocą przyrządu KES-FB4. Przyrząd ten jest najbardziej rozpowszechniony w pomiarach chropowatości materiałów włókienniczych. Uzyskane wyniki potwierdziły, że nie można go powiązać ze strukturą tkanin. A przecież taka zależność istnieje, co wykazano w poprzednich rozdziałach.

Najsilniejszą zależność korelacyjną odnotowano pomiędzy wypełnieniem tkanin obu układami nitek (średnim wypełnieniem) $E_{\text{śred}}$, a parametrem $sRm2$ (najwyższy udział materiałowy), wyznaczanym z krzywej udziału materiałowego. Wysokie wartości współczynników korelacji uzyskano również pomiędzy zintegrowanymi współczynnikami struktury tkaniny φ_1 i φ_2 , a parametrami odczytywanymi z krzywej udziału materiałowego: $sRmr2$ oraz $sRvk$ – średnia głębokość głębokich wgłębień znajdujących się pod rdzeniem profilu chropowatości. Wypełnienie tkaniny osnową E_o jest natomiast skorelowane z parametrem sRk – głębokość części środkowej profilu, również odczytywanego z krzywej udziału materiałowego.

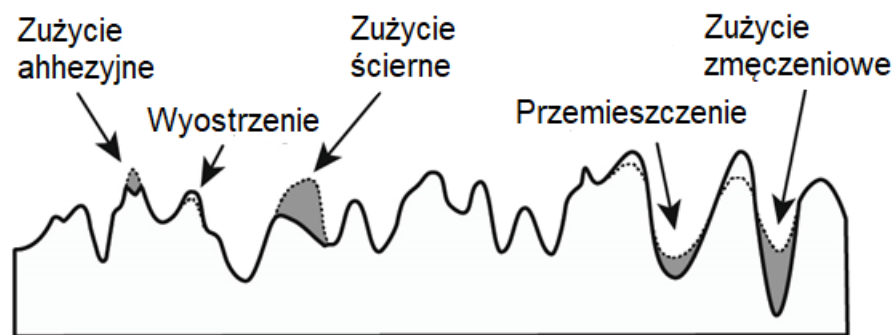
Wyniki te wskazują, że krzywa udziału materiałowego może mieć istotne znaczenie w analizie geometrycznej struktury powierzchni tkanin. Dalsze badania (Rozdział 7) wykazały, że parametry odczytywane z krzywej udziału materiałowego są też skorelowane z wynikami pomiaru chropowatości za pomocą przyrządu KES-FB4. Wobec powyższego, jednym z etapów przyszłych badań będzie analiza przydatności krzywej udziału materiałowego i parametrów z niej odczytywanych w analizie geometrii powierzchni tkanin i ocenie zależności pomiędzy geometrią powierzchni, a właściwościami tkanin.

Niskie wartości współczynników korelacji liniowej pomiędzy parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni tkanin wynikają z tego, że geometria powierzchni tkanin jest kształtowana przez wiele czynników konstrukcyjnych. Żaden z tych czynników nie jest dominujący. Występuje też interakcja pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi tkanin, co oddziałuje na ich wpływ na geometryczną strukturę powierzchni tkanin. Zostało to szczegółowo opisane w części teoretycznej (Rozdział 3). Uzyskane wyniki potwierdzają rozważania teoretyczne, wykazujące wpływ wielu czynników konstrukcyjnych tkanin na geometryczną strukturę ich

powierzchni. Ponadto badania opisane w poprzednich rozdziałach potwierdziły interakcje pomiędzy takimi parametrami struktury tkanin, jak: splot, masa liniowa przędzy wątkowej i liczność wątku. Każdy z tych czynników zmienia wpływ pozostałych czynników na kształtowanie się parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin.

6. Analiza zmian struktury geometrycznej powierzchni tkanin poddanych procesowi ścierania za pomocą przyrządu Martindale'a.

Ocena struktury geometrycznej powierzchni za pomocą metod bezkontaktowych optycznych wykorzystywana jest do analizy zużycia się elementów maszyn podczas ich interakcji [145]. W trakcie eksploatacji elementy metalowe i inne ulegają zużyciu powodującemu m.in. postępującą modyfikację powierzchni. Jednak niekoniecznie jest to proces usuwania, materiał może być również redystrybuowany, a nawet dodawany, w zależności od mechanizmu zużycia (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Przykłady zmian powierzchni na skutek zużycia;

Opracowanie własne na podstawie: When wear looks like filtering (and vice versa) - Michigan Metrology (michmet.com)

Za pomocą profilometru optycznego można uzyskać duże pole widzenia powierzchni elementu, a następnie zmierzyć i analizować głębokość, szerokość, objętość i teksturę rys po zużyciu powierzchni, a także zmiany chropowatości powierzchni lub inne cechy zużycia.

Biorąc powyższe pod uwagę w ramach niniejszej pracy podjęto badania nad wykorzystaniem pomiarów struktury geometrycznej powierzchni za pomocą profilometru do analizy zmian powierzchni tkanin spowodowanych cyklicznym ścieraniem. Ścieranie tkanin wykonano przy użyciu przyrządu Martindale'a w Instytucie Technologii Bezpieczeństwa „Moratex” w Łodzi. Przyrząd Martinadale służy do oceny odporności płaskich wyrobów na ścieranie. W ramach pomiaru okrągła próbka, zamocowana w uchwycie, wykonuje ruch translacyjny po torach figury Lissajous.

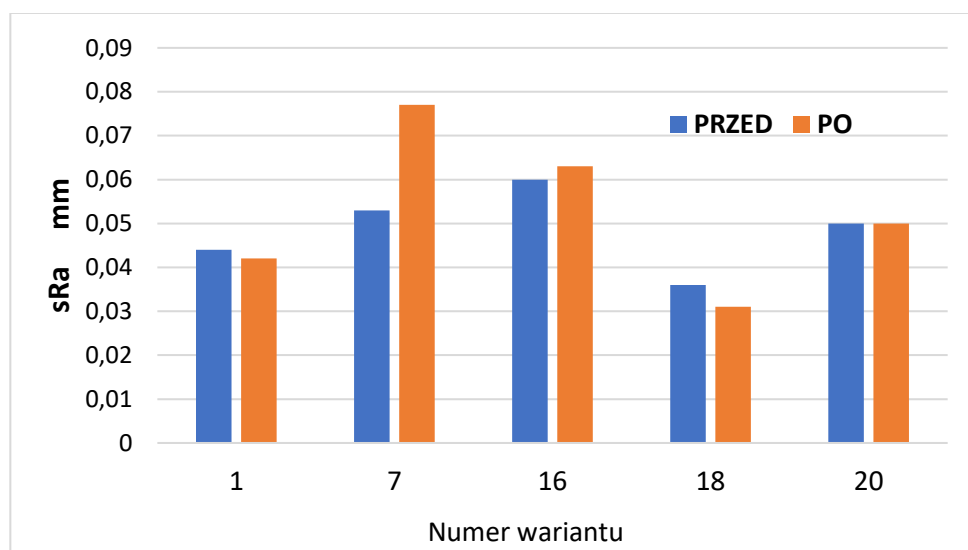
W trakcie ruchu jest ścierana przez medium ścierające. Uchwyt próbki dodatkowo obraca się swobodnie wokół swojej osi.

W niniejszej pracy badaniom poddano 5 wariantów tkanin, o symbolach: 1 (splot płócienny), 7 (splot skośny 3/1S), 16 (splot rypсовy 1/1 (010)), 18 (spot rypсовy (2/2 (2)) i 20 (splot panama 2/2 (020)). Próbkі tkanin poddano 10.000 cyklom ścierania. Dla każdego wariantu tkanin wykonano ścieranie 2 próbek roboczych. Po procesie ścierania próbki poddano pomiarom w zakresie struktury geometrycznej powierzchni.

6.1. Analiza zmian parametrów struktury geometrycznej powierzchni tkanin pod wpływem ścierania

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że w wyniku ścierania zmianom uległy wartości większości parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni tkanin.

Rys. 6.2 przedstawia porównanie średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości sRa tkanin przed i po ścieraniu.

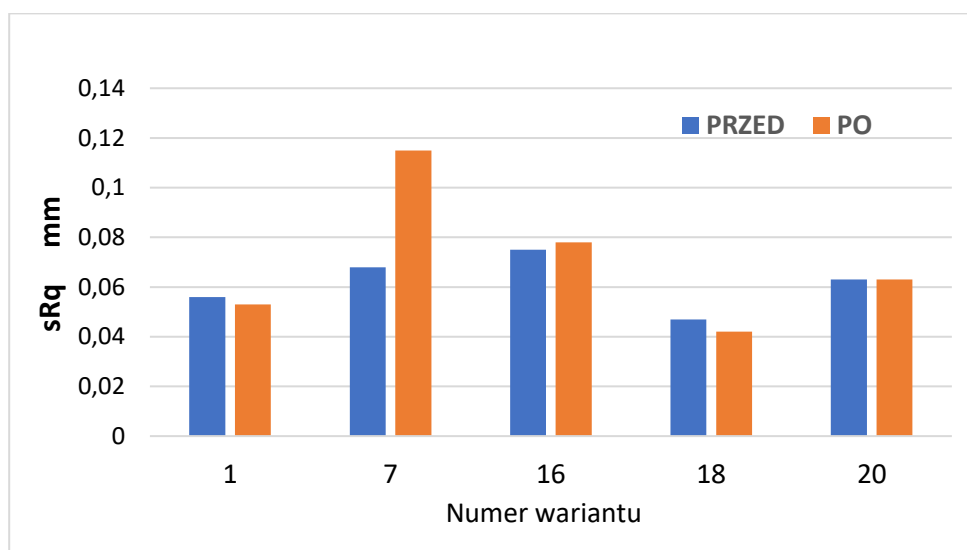


Rys. 6.2. Porównanie średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości sRa tkanin przed i po ścieraniu

Zaobserwowano zmiany wartości parametru sRa dla wszystkich analizowanych wariantów tkanin, jednakże zmiany te nie są duże, z wyjątkiem wariantu nr 7 – tkanina o splocie skośnym 3/1S. W dwóch przypadkach: tkanina o splocie skośnym i rypсовym 1/1 (010) po ścieraniu odnotowano wzrost parametru Ra w porównaniu do wartości tego

parametru przed ścieraniem. Dla tkaniny o splocie płóciennym i rypsowym 2/2/ (2) stwierdzono sytuację odwrotną. W przypadku tkaniny o splocie panama wartość parametru Ra przed i po ścieraniu jest taka sama.

Podobne zmiany odnotowano również dla parametru sRq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości (rys. 6.3). Jedynie w przypadku wariantu nr 7 (o splocie skośnym) wzrost wartości parametru sRq jest bardzo wyraźny, rzędu 30 % wartości sprzed ścierania.



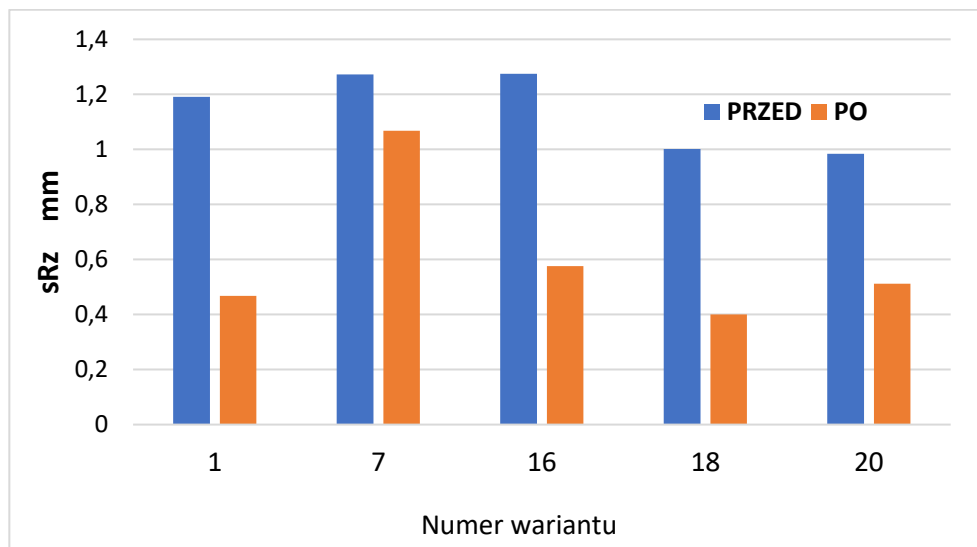
Rys.6.3. Porównanie średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości sRq tkanin przed i po ścieraniu

Jak wcześniej wspomniano w przeglądzie literatury, średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości sRa jest parametrem uprzywilejowanym, najczęściej wyznaczanym przy ocenie powierzchni różnych obiektów. W przypadku materiałów włókienniczych jest to parametr SMD , najczęściej wyznaczany za pomocą przyrządu KES-FB4. Parametr ten (SMD , Ra) nazywany jest powszechnie chropowatością. Gdyby analiza powierzchni tkanin przed i po ścieraniu ograniczyła się wyłącznie do tego parametru, uprawnione byłoby wnioskowanie, że powierzchnia tkanin nie uległa istotnym zmianom w wyniku ścierania, z wyjątkiem wariant nr 7 – tkanina o splocie skośnym 3/1 S. I byłoby to wnioskowanie niezgodne ze stanem faktycznym. Dopiero pogłębiona analiza, uwzględniająca inne parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tkanin, pozwala ocenić

zmiany powierzchni spowodowane procesem ścierania za pomocą przyrządu Martindale'a. Zostało to omówione poniżej.

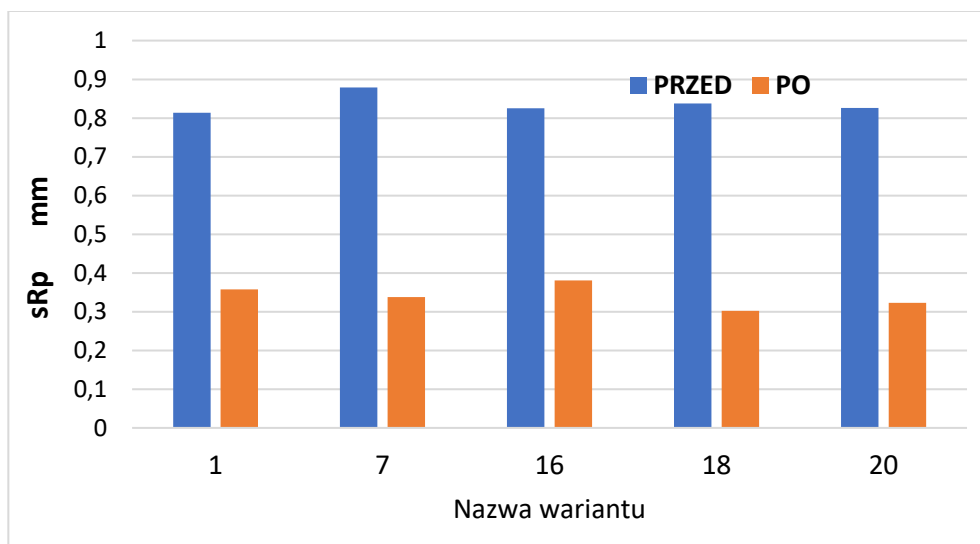
Największa wysokość profilu sRz w wyniku tarcia uległa zdecydowanemu zmniejszeniu (rys. 6.4). Jest to zgodne z oczekiwaniami, gdyż w wyniku ścierania w pierwszej kolejności ścieraniu ulegają najwyższe wzniesienia ścieranej powierzchni. Mamy w tym przypadku do czynienia ze zużyciem ściernym lub zmęczeniowym.

W przeciwieństwie do parametrów sRa i sRq , wartości parametru sRz bardzo wyraźnie pokazują zużycie powierzchni tkaniny na skutek ścierania. Największe zmiany (ok. 60 % wartości parametru sRz przed ścieraniem) odnotowano dla tkanin o splocie płóciennym oraz rypсовym 2/2 (2), czyli tych wariantów, dla których przed ścieraniem odnotowano najwyższą wartość kurtozy ($sRku$). Oznacza to, że przed ścieraniem warianty te charakteryzowały się najostrejszym rozkładem wysokości powierzchni (wartości z profilometru). Najmniejsza zmiana, ok. 16 % wystąpiła dla tkaniny o splocie skośnym 3/1S – wariant nr 7.



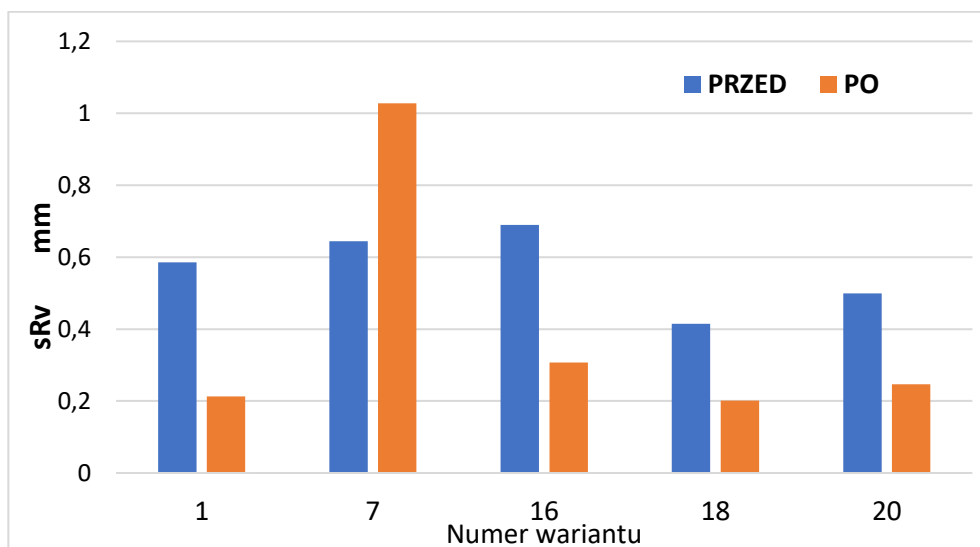
Rys. 6.4. Porównanie największej wysokości profilu chropowatości sRz tkanin przed i po ścieraniu

Zmiany struktury geometrycznej powierzchni tkanin w wyniku 10.000 cykli ścierania doskonale ilustruje również parametr sRp . Jest to wysokość najwyższego wzniesienia profilu. W każdym przypadku uległa ona istotnemu zmniejszeniu (rys. 6.5). Są to zmiany rzędu 54 – 64 % w stosunku do wartości początkowej, tj. przed ścieraniem.



Rys. 6.5. Porównanie wysokości największego wzniesienia profilu chropowatości sR_p tkanin przed i po ścieraniu

Ciekawe zjawisko zaobserwowano w przypadku parametru sR_v . Jest to głębokość najniższego wgłębienia profilu. Zgodnie z oczekiwaniem, w większości przypadku głębokość ta uległa istotnemu, ponad 50 % zmniejszeniu (rys. 6.6). Natomiast w przypadku wariantu o nr 7 – tkanina o splocie skośnym 3/1 S, nastąpił 60-procentowy wzrost głębokości najniższego wgłębienia profilu chropowatości.

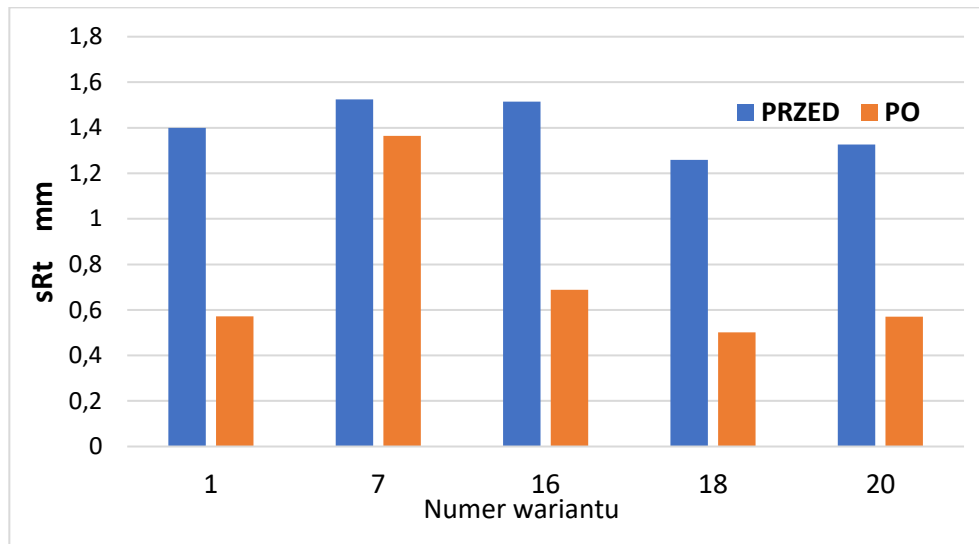


Rys. 6.6. Porównanie głębokości najniższego wgłębienia profilu chropowatości sR_v tkanin przed i po ścieraniu

Należy to interpretować w ten sposób, że w przypadku tej tkaniny w wyniku 10.000 cykli ścierania rozpoczął się proces destrukcji tkaniny i pojawiło się miejsce lub miejsca, w którym tkanina uległa uszkodzeniu.

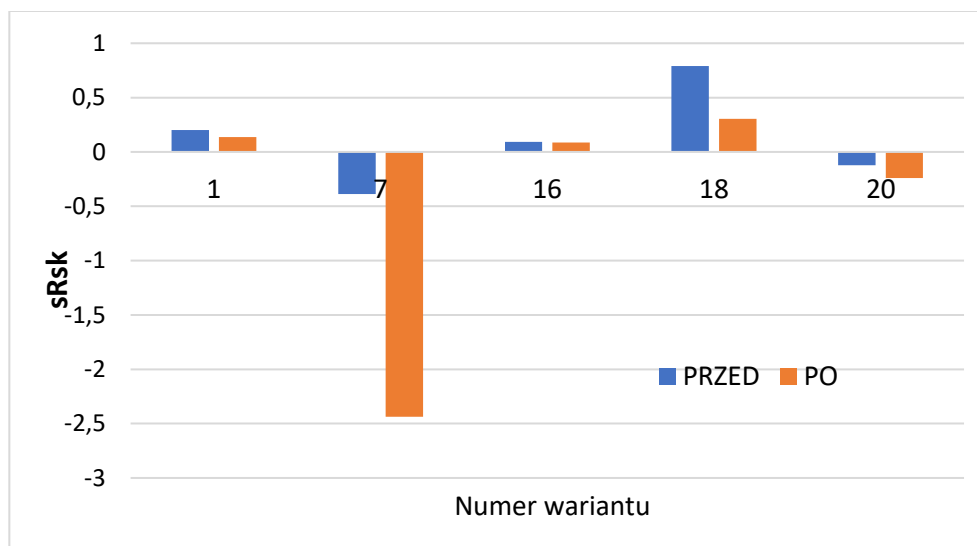
Wyniki zmian parametry sRz dla wariantu nr 7 tłumaczą odnotowane wcześniej (rys. 6.4) zmiany parametru sRz , który jest sumą dwóch wielkości: sRp i sRz .

Podobne tendencje odnotowano w przypadku parametru sRt . Jest to całkowita wysokość profilu (rys. 6.7).



Rys. 6.7. Porównanie głębokości całkowitej wysokości profilu chropowatości sRt tkanin przed i po ścieraniu

Rys. 6.8 przedstawia porównanie skośności powierzchni tkanin przed i po ścieraniu. W tym przypadku również zaobserwowano istotne zmiany. Współczynnik skośności przyjmuje wartość zero dla rozkładu symetrycznego (normalnego), wartości ujemne dla rozkładów o lewostronnej asymetrii (wydłużone lewe ramię rozkładu) i wartości dodatnie dla rozkładów o prawostronnej asymetrii (wydłużone prawe ramię rozkładu).



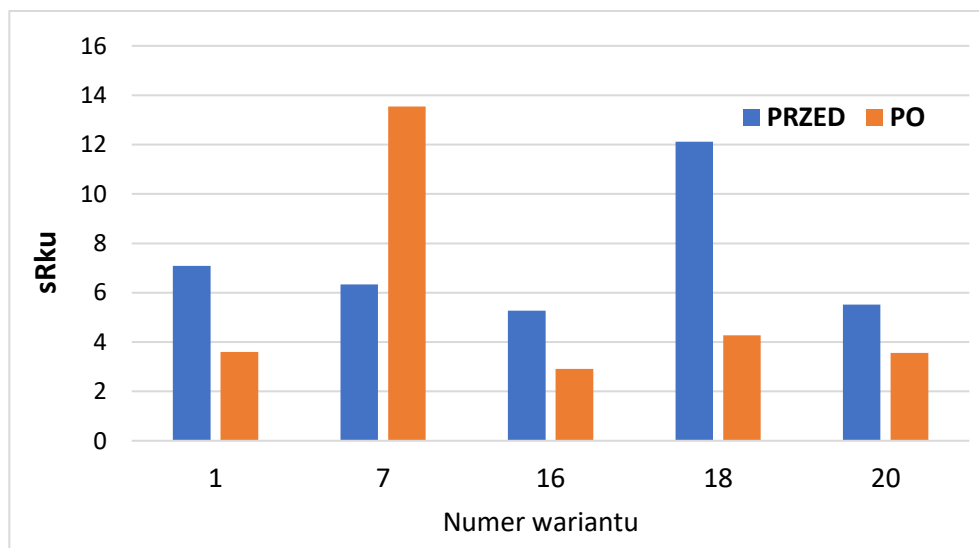
Rys. 6.8. Porównanie skośności profilu chropowatości $sRsk$ tkanin przed i po ścieraniu

Największa zmiana skośności wystąpiła dla wariantu nr 7 – tkanin o splocie skośnym 3/1 S. Przed procesem ścierania współczynnik $sRsk$ dla wariantu 7 miał niewielką wartość ujemną (-0,34). Oznaczało to odchylenie rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkaniny w lewo od rozkładu normalnego. Po ścieraniu wartość bezwzględna parametru $sRsk$ wzrosła wielokrotnie, pozostając nadal ujemną (-2,44). Oznacza to istotne zwiększenie lewostronnego odchylenia rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkaniny od rozkładu normalnego. Podobną sytuację, ale w znacznie mniejszej skali odnotowano dla wariantu nr 20 – tkaniny o splocie panama 2/2 (020). Przed ścieraniem rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny był zbliżony do normalnego z nieznacznym odchyleniem od rozkładu normalnego. Po ścieraniu odchylenie to uległo zwiększeniu.

W przypadku wariantu nr 18 – tkanina o splocie rypsowym 2/2 (0) nastąpił spadek wartości skośności. Przed i po ścieraniu wartość parametru $sRsk$ dla wariantu nr 18 była dodatnia. Zaobserwowany spadek wartości parametru $sRsk$ należy interpretować jako zmniejszenie prawostronnego odchylenia rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkaniny od rozkładu normalnego. Podobne zjawisko, ale w znacznie mniejszej skali, odnotowano dla tkaniny o splocie płóciennym (wariant nr 1) – spadek wartości $sRsk$ z 0,20 do 0,14. Praktycznie bez zmiany pozostał rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypsowym 1/1 (010), czyli wariantu nr 16. Przed i po ścieraniu rozkład ten jest bardzo zbliżony do rozkładu normalnego.

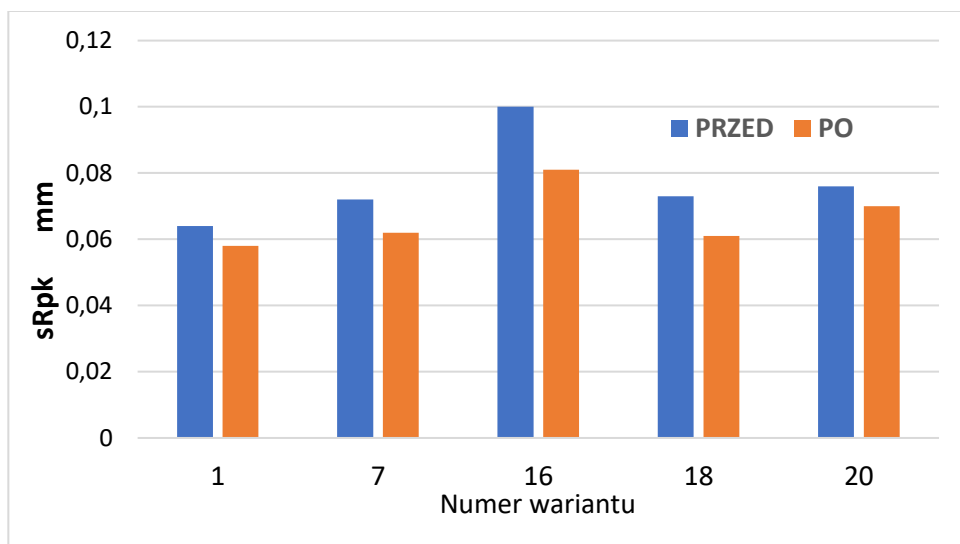
Kurtoza $sRku$ jest kolejnym parametrem struktury geometrycznej powierzchni, który uległ istotnej zmianie w wyniku procesu ścierania tkanin. Kurtoza jest miarą skoncentrowania wyników wokół wartości średniej. Jeżeli $sRku$ jest równa 3, oznacza to rozkład normalny. Wartość kurtozy wyższa od 3 oznacza rozkład ostry. Natomiast przy wartości kurtozy poniżej 3 wykres rozkładu wartości z (wysokości punktów) jest spłaszczony.

W przypadku analizowanych wariantów tkanin wartość kurtozy przed ścieraniem dla wszystkich wariantów była znacznie wyższa od 3. Oznacza to, że rozkład wysokości punktów na powierzchni tkanin był ostry (rys. 5.24). Po ścieraniu wartość kurtozy zmniejszyła się dla wszystkich wariantów z wyjątkiem wariantu nr 7 – tkaniny o splocie skośnym 3/1 S. Jednakże tylko dla wariantu nr 16 – tkanina o splocie rypsowym 1/1 (010) wartość kurtozy po ścieraniu jest mniejsza od 3 i wynosi 2,91, czyli wystąpiło niewielkie spłaszczenie rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkaniny. Z kolei dla wariantu nr 7 zaobserwowane dwukrotny wzrost wartości kurtozy z 6,34 do 13,54, co oznacza wyostrenie rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkaniny.



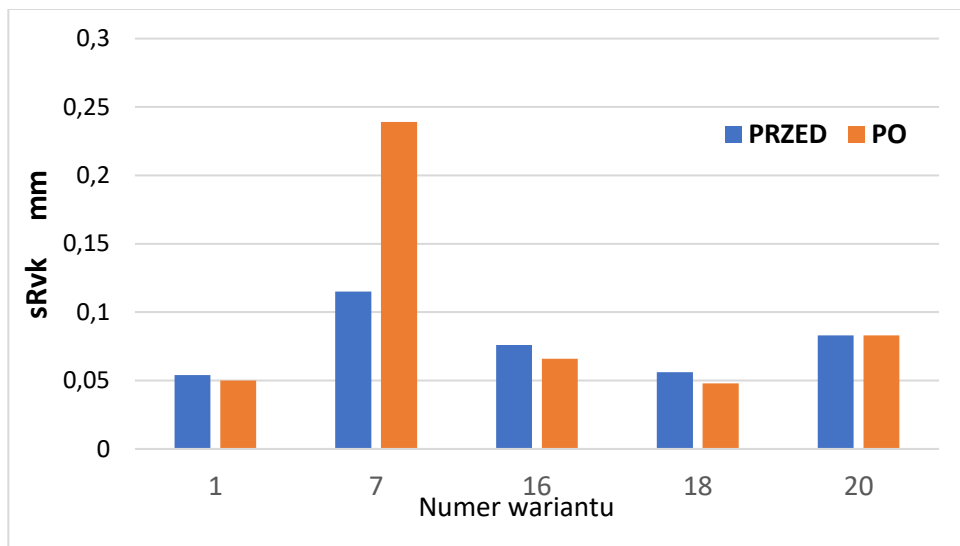
Rys. 6.9. Porównanie kurtozy profilu chropowatości $sRku$ tkanin przed i po ścieraniu

Zgodnie z oczekiwaniami dla wszystkich wariantów tkanin nastąpiła redukcja średniej wysokości wzniesień $sRpk$ położonych ponad rdzeniem profilu chropowatości (rys. 6.10).



Rys. 6.10. Porównanie średniej wysokości wzniesień położonych ponad rdzeniem profilu chropowatości $sRpK$ tkanin przed i po ścieraniu

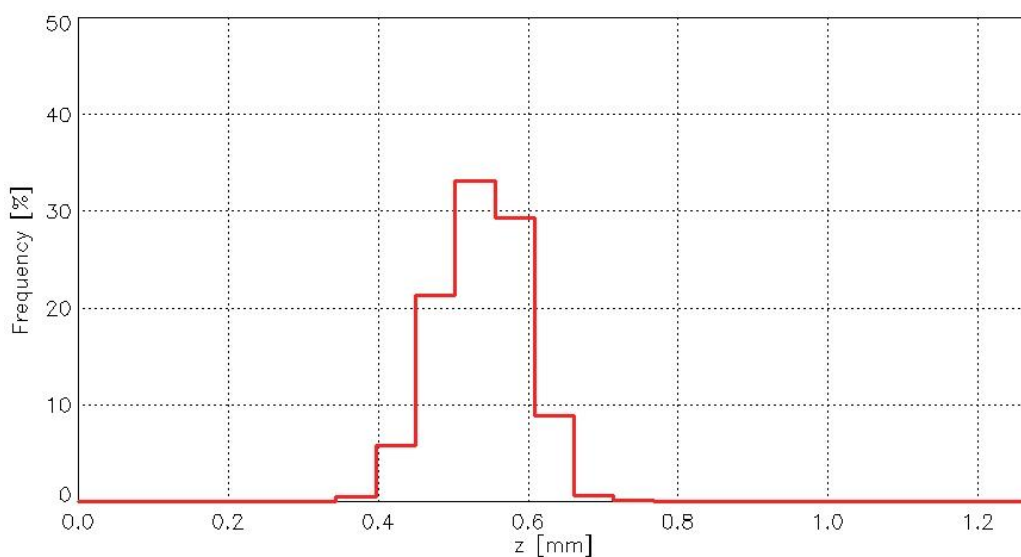
Natomiast zmiany średniej głębokości głębokich wgłębień znajdujących się pod rdzeniem profilu chropowatości $sRvk$ mają inny przebieg (rys. 6.11). Dla wariantu nr 21 wartość parametru $sRvk$ pozostała niezmienną po ścieraniu. W przypadku wariantów: 1, 16 i 18 odnotowana spadek średniej głębokości tzw. głębokich wgłębień, natomiast dla wariantu nr 7 odnotowano dwukrotny wzrost. Należy sądzić, że powiększenie się głębokości największych wgłębień spowodowane jest uszkodzeniami powierzchni tkaniny na skutek ścierania.



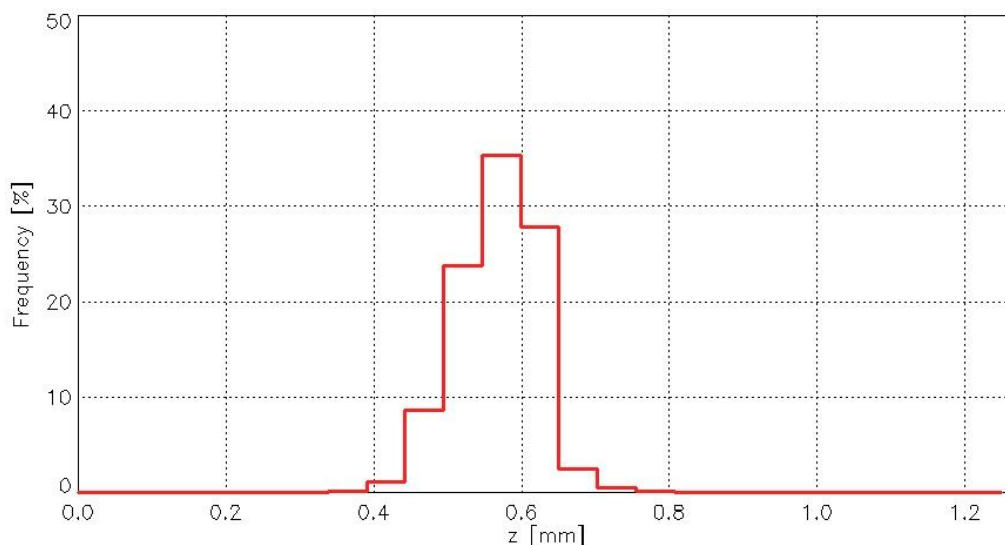
Rys. 6.11. Porównanie średniej głębokości głębokich wgłębień wzniesień położonych pod rdzeniem profilu chropowatości sRvk tkanin przed i po ścieraniu

6.2. Analiza zmian rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkanin

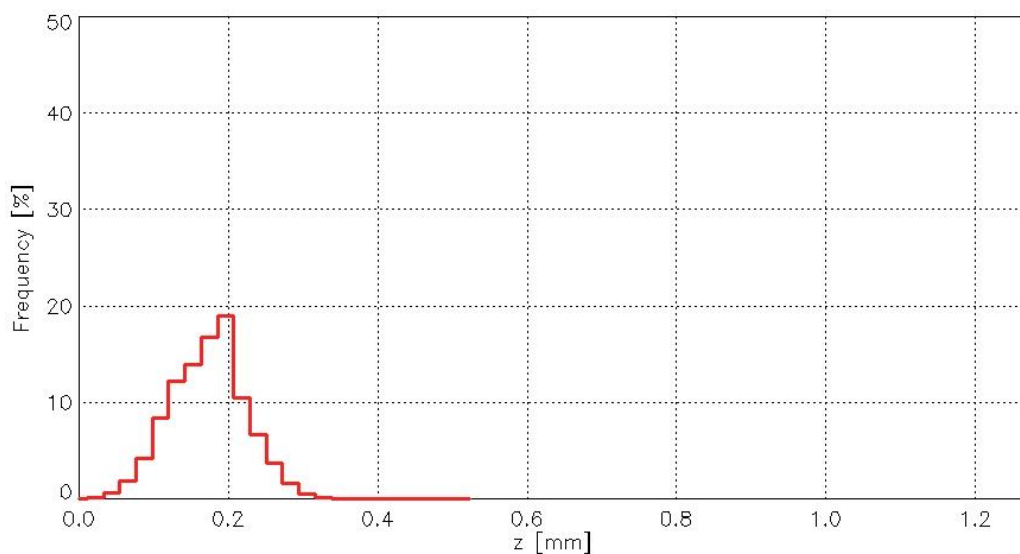
Analizę rozkładu zmian wysokości punktów na powierzchni badanych tkanin przeprowadzono w oparciu o histogramy wysokości punktów na powierzchni. Histogramy takie uzyskuje się za pomocą programu Mark III. Dla każdego wariantu tkanin wykonano próby ścierania dla dwóch próbek. Poniżej przedstawiono zatem dwa histogramy dla poszczególnych próbek badanych tkanin przed ścieraniem i – po ścieraniu (rys. 6.12 – 6.31).



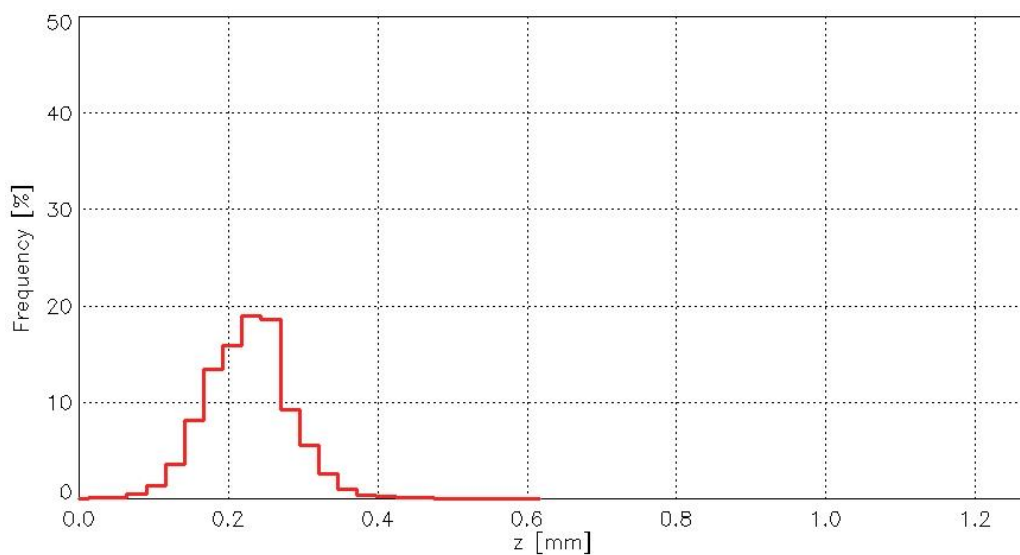
Rys. 6.12. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie płóciennym (wariant nr 1) przed ścieraniem – próbka 1



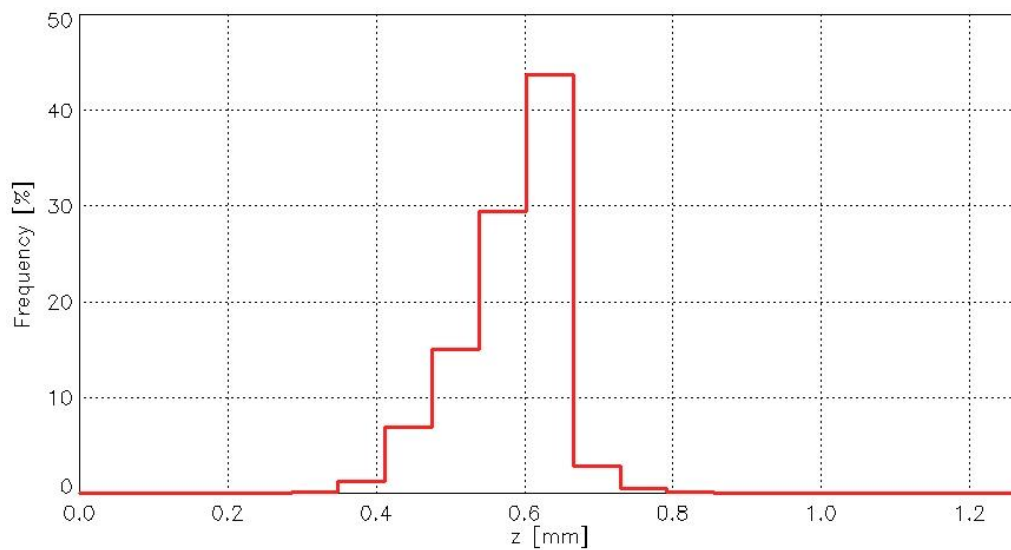
Rys. 6.13. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie płóciennym (wariant nr 1) przed ścieraniem - próbka 2



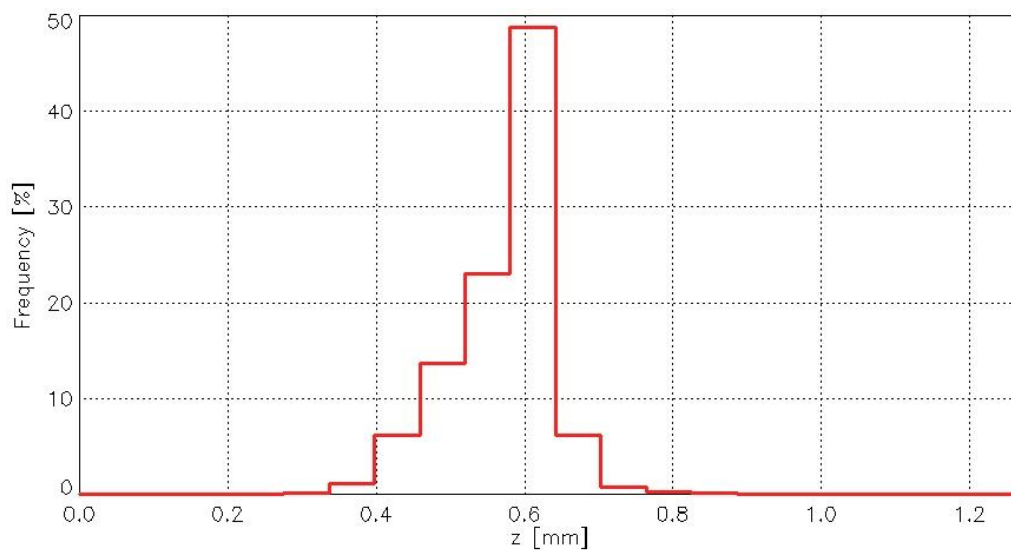
Rys. 6.14. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie płóciennym (wariant nr 1) po ścieraniu – próbka 1



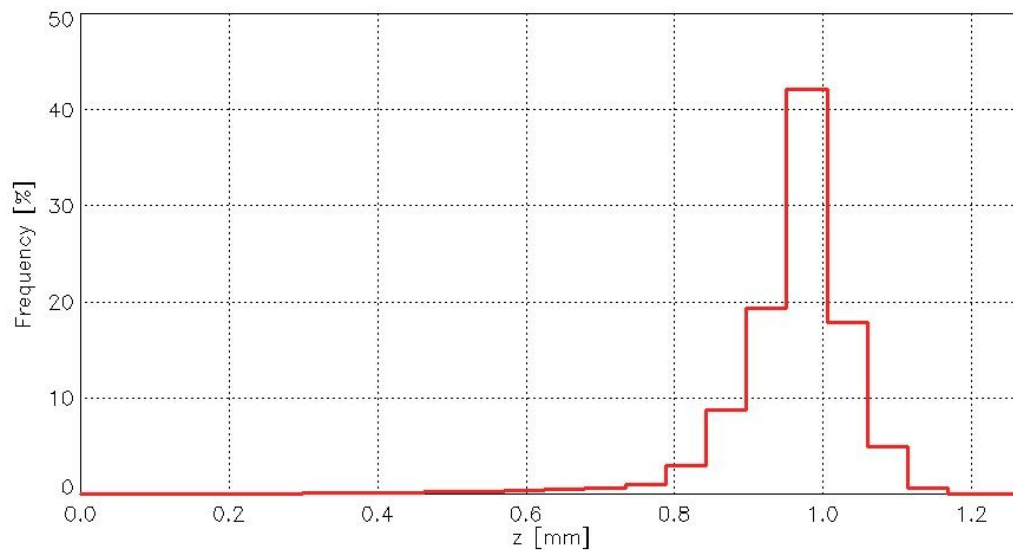
Rys. 6.15. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie płóciennym (wariant nr 1) po ścieraniu – próbka 2



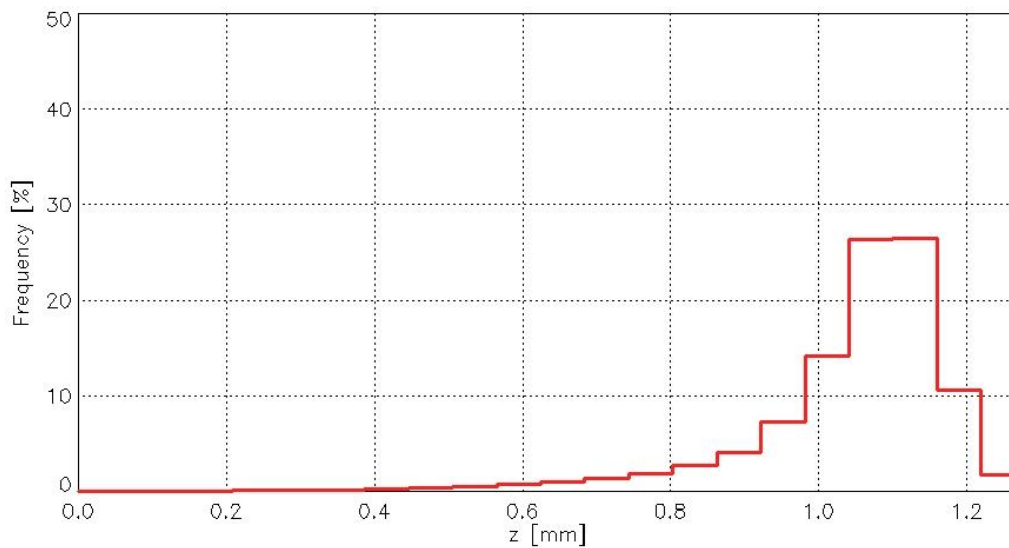
Rys. 6.16. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S (wariant nr 7) przed ścieraniem – próbka 1



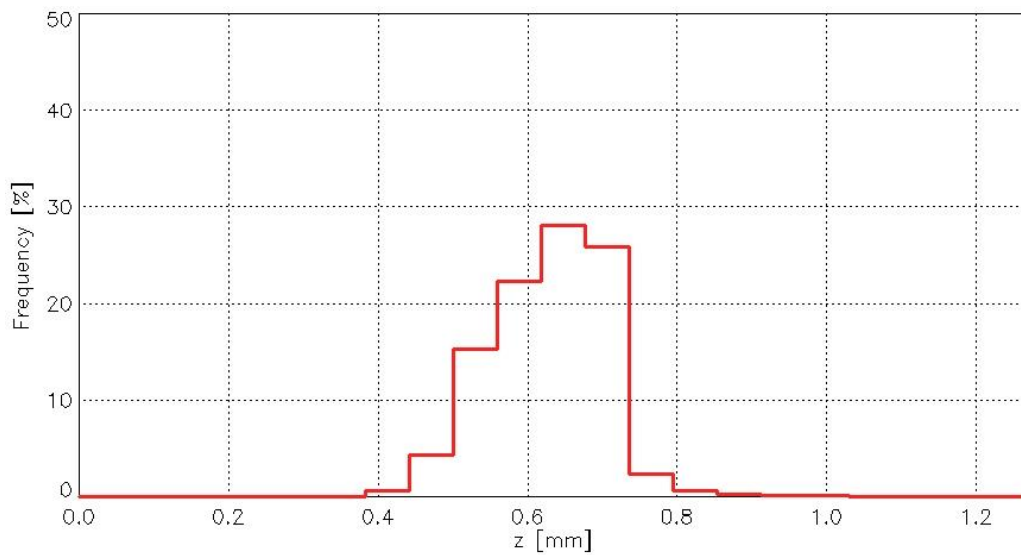
Rys. 6.17. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S (wariant nr 7) przed ścieraniem – próbka 2



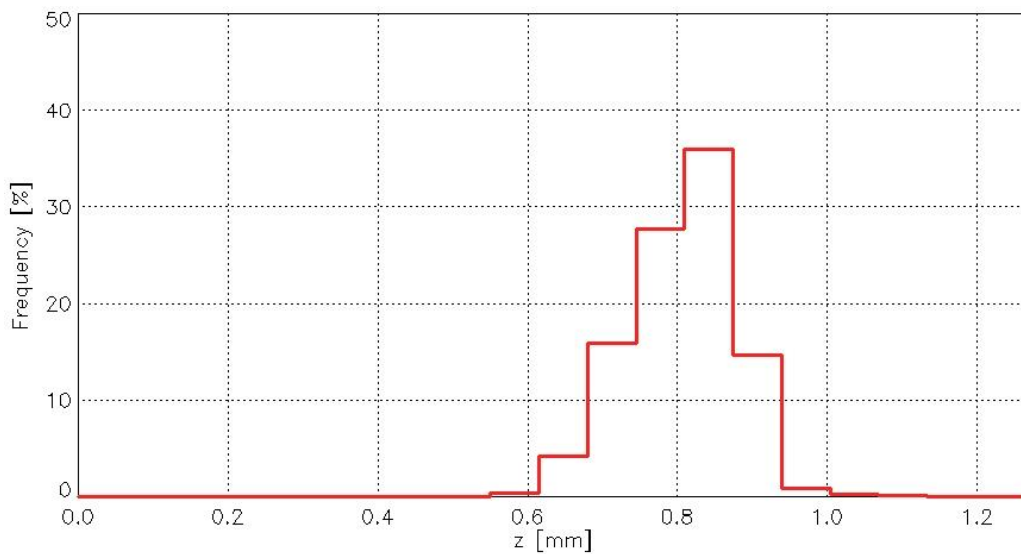
Rys. 6.18. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S (wariant nr 7) po ścieraniu – próbka 1



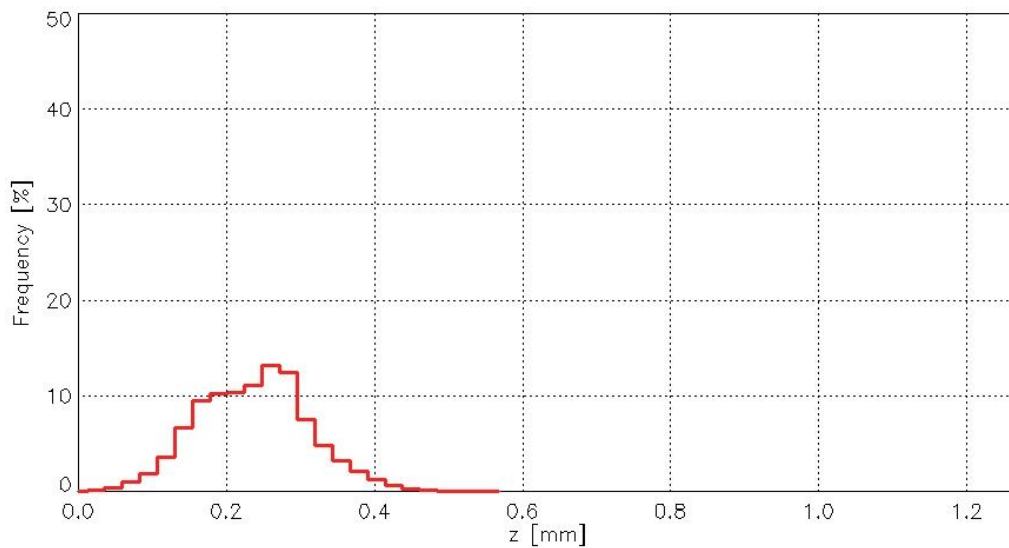
Rys. 6.19. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie skośnym 3/1 S (wariant nr 7) po ścieraniu – próbka 2



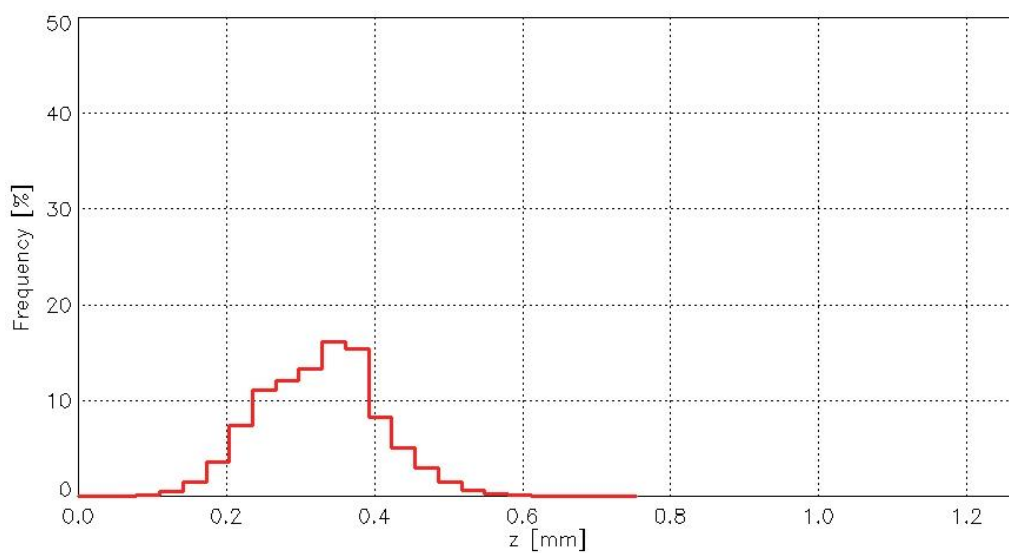
Rys. 6.20. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypsowym 1/1 (010) (wariant nr 16) przed ścieraniem – próbka 1



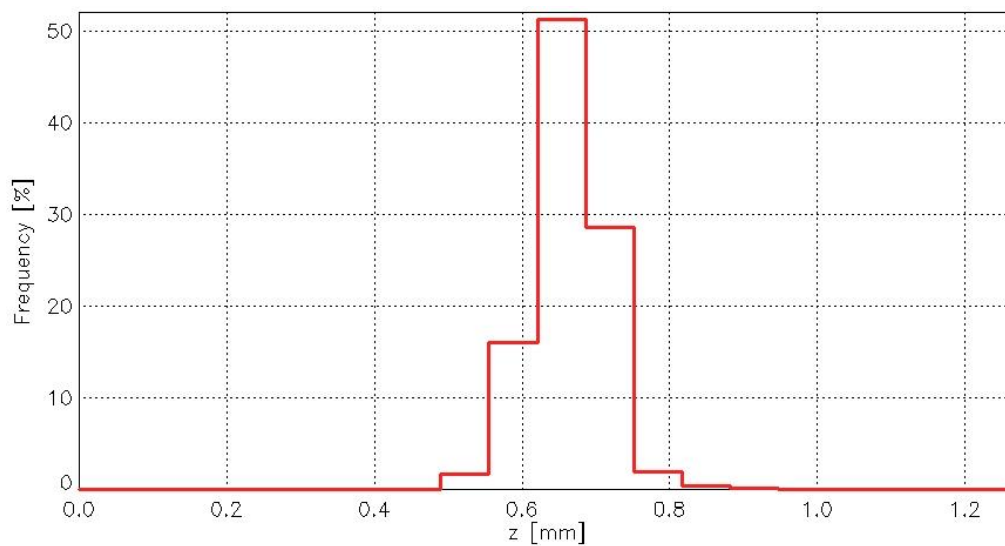
Rys. 6.21. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypsowym 1/1 (010) (wariant nr 16) przed ścieraniem – próbka 2



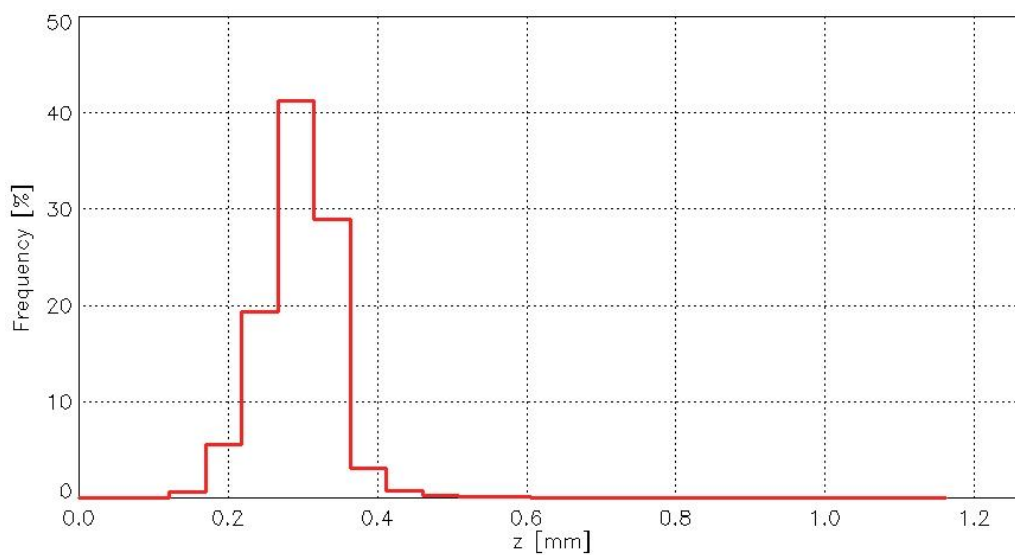
Rys. 6.22. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypsowym 1/1 (010) (wariant nr 16) po ścieraniu – próbka 1



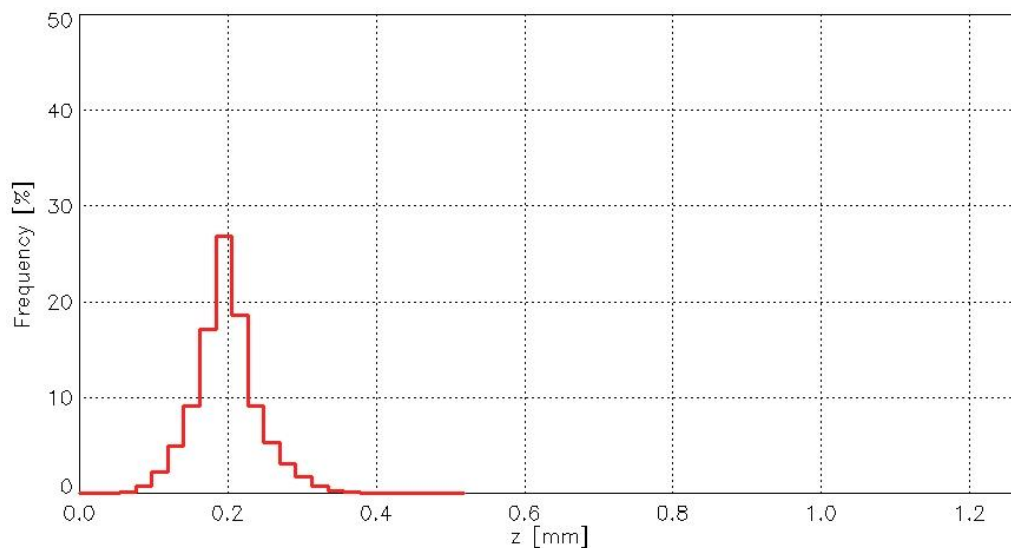
Rys. 6.23. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypsowym 1/1 (010) (wariant nr 16) po ścieraniu – próbka 2



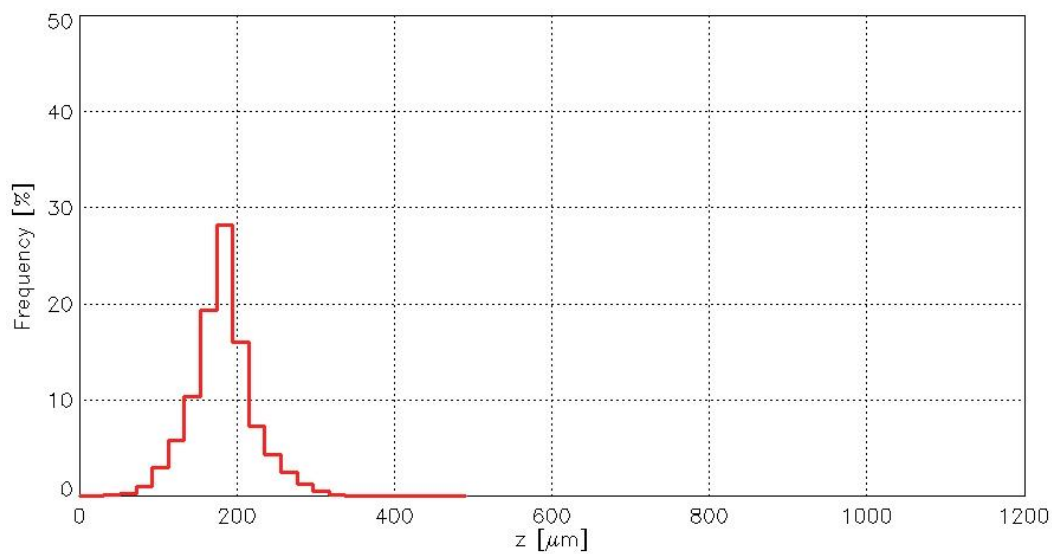
Rys. 6.24. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypowym 2/2 (2) (wariant nr 18) przed ścieraniem – próbka 1



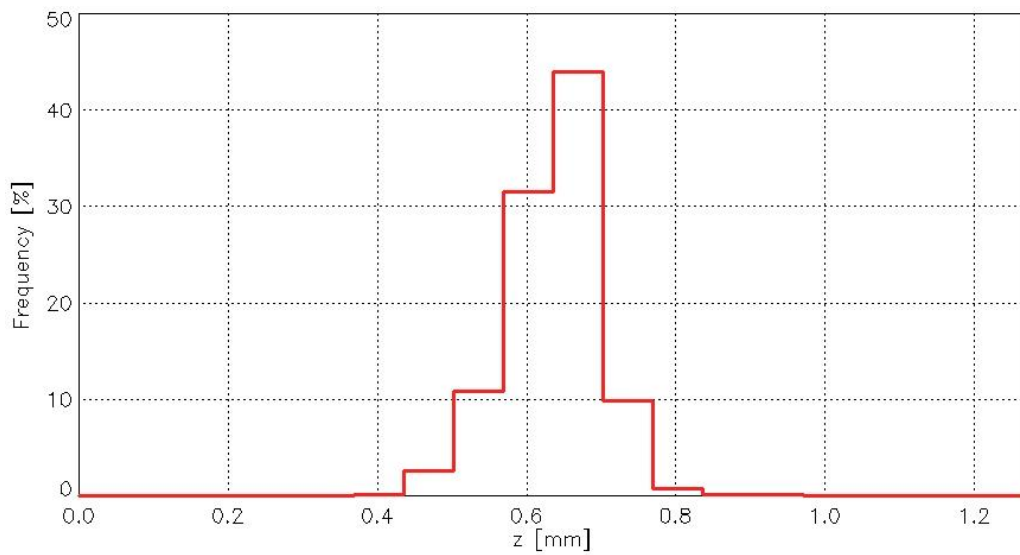
Rys. 6.25. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypowym 2/2 (2) (wariant nr 18) przed ścieraniem – próbka 2



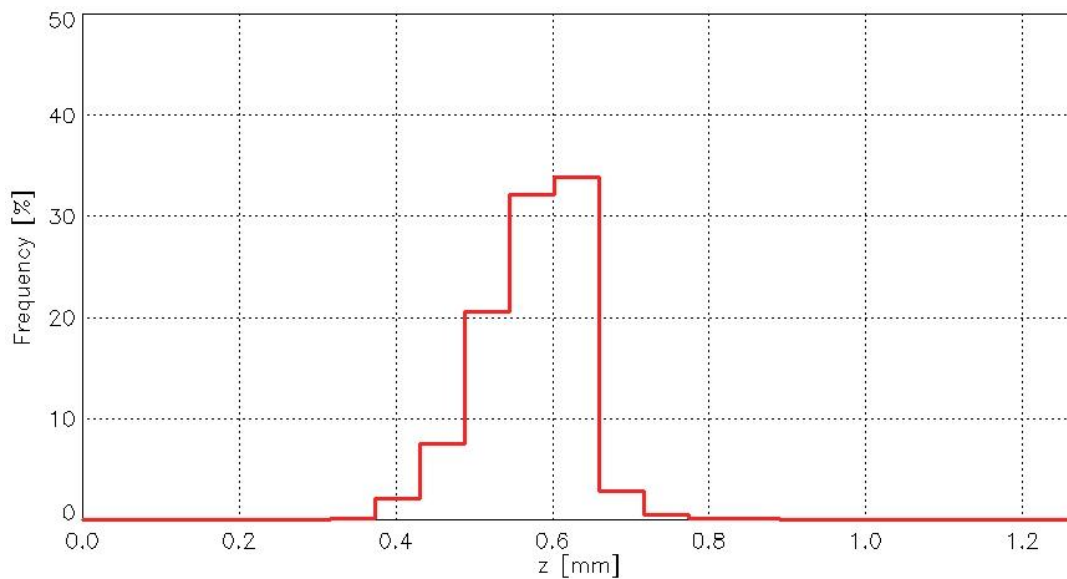
Rys. 6.26. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypsowym 2/2 (2) (wariant nr 18) po ścieraniu – próbka 1



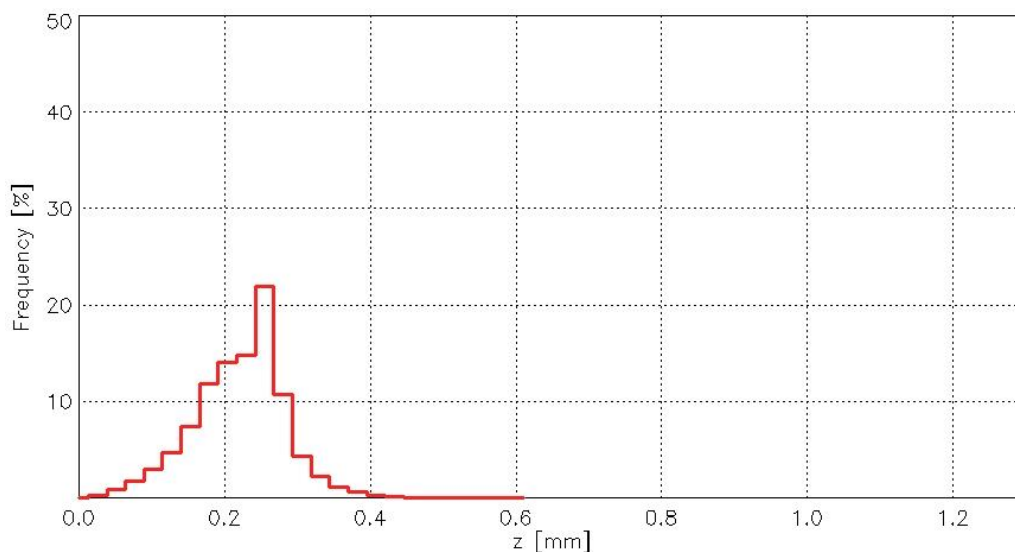
Rys. 6.27. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie rypsowym 2/2 (2) (wariant nr 18) po ścieraniu – próbka 2



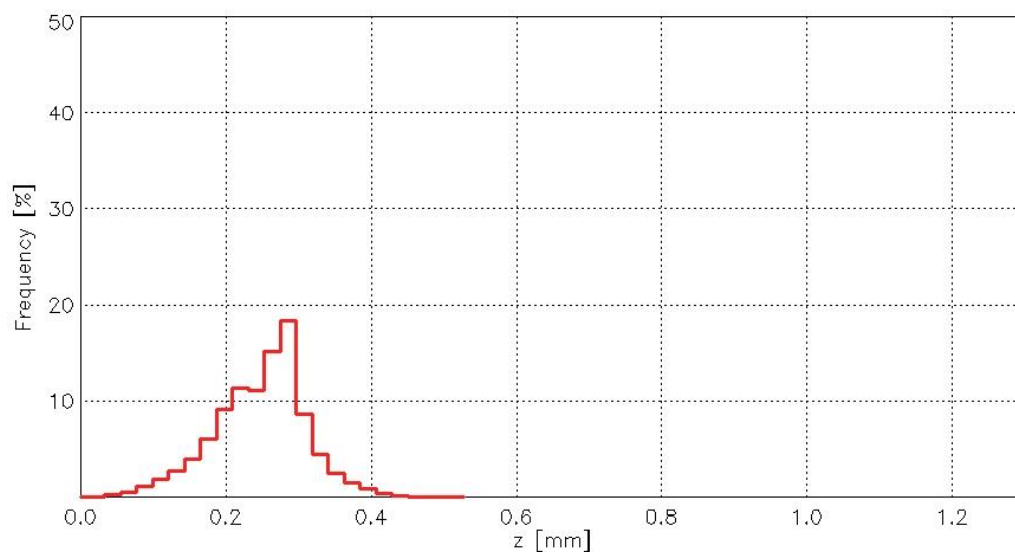
Rys. 6.28. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (wariant nr 20) przed ścieraniem – próbka 1



Rys. 6.29. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (wariant nr 20) przed ścieraniem – próbka 2



Rys. 6.30. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (wariant nr 20) po ścieraniu – próbka 1



Rys. 6.31. Rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (wariant nr 20) po ścieraniu – próbka 2

Histogramy rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkanin są zgodne z zaobserwowanymi zmianami parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin, spowodowane procesem ścierania.

W przypadku tkaniny o splocie płóciennym (rys. 6.12 – 6.15) nastąpiło przesunięcie histogramu w kierunku mniejszych wartości zmiennej z – wysokości punktów. Niewielka prawostronna asymetria obserwowana jest zarówno dla próbek przed jak i po ścieraniu. Histogram wysokości po ścieraniu nadal jest ostry, chociaż zmniejszeniu uległa liczność klasy najliczniejszej.

Tkanina o splocie skośnym 3/1 S (wariant nr 7) przed ścieraniem charakteryzowała się ostrym rozkładem wysokości na powierzchni, z maksimum dla klasy o wysokości 0,6 mm przy ok. 50 % liczności klasy najliczniejszej (rys. 6.16, 6.17). Po ścieraniu kształt histogramów uległ istotnej zmianie, przy czym zmiany są różne dla obu badanych próbek (rys. 6.18, 6.19). Dla obu próbek po ścieraniu nastąpiło przesunięcie histogramu w prawo, w kierunku większych wartości wysokości: 1 – 1,2 mm, ale tylko dla próbki 2 zaobserwowane znaczne zwiększenie asymetrii rozkładu i jego spłaszczenie.

Dla pozostałych wariantów tkanin: o splocie rypsowym 1/1 (010) – wariant 16 (rys. 6.20 – 6.23), rypsowym 2/2 (2) – wariant 18 (rys. 6.24 – 6.27) oraz panama 2/2 (020) – wariant 20 (rys. 6.28 – 6.31) zmiany rozkładu wysokości punktów na powierzchni mają zbliżony charakter. We wszystkich przypadkach nastąpiło zmniejszenie liczności najliczniejszej klasy z jednoczesnym przesunięciem rozkładu w lewo w kierunku mniejszych wysokości.

Na podstawie analizy histogramów rozkładu wysokości punktów na powierzchni tkanin można stwierdzić, że proces ścierania powoduje istotne zmiany struktury geometrycznej powierzchni. Ponadto uzyskane wyniki wykazały, że zmiany struktury geometrycznej powierzchni są różne dla tkanin o różnym splocie. Wystąpiły też różnice pomiędzy próbkami tego samego wariantu. To może oznaczać nierównomierność geometrycznej struktury powierzchni. Być może kierunek ułożenia próbek w przyrządzie Martindale'a również wpływa na efekty ścierania. To zagadnienie wymaga dalszych, pogłębionych badań.

6.3. Analiza zmian kierunkowości struktury powierzchni na skutek procesu ścierania

Badania geometrycznej struktury powierzchni tkanin pozwalają na ocenę anizotropii powierzchni, czyli zróżnicowania powierzchni w zależności od kierunku. Do analizy kierunkowości powierzchni wykorzystuje się funkcję autokorelacji oraz parametry wyznaczone na jej podstawie:

- *Sal* - długość autokorelacji,
- *Str* - współczynnik proporcji tekstury.

W analizie kierunkowości powierzchni można również wykorzystać rozkład kątów na powierzchni.

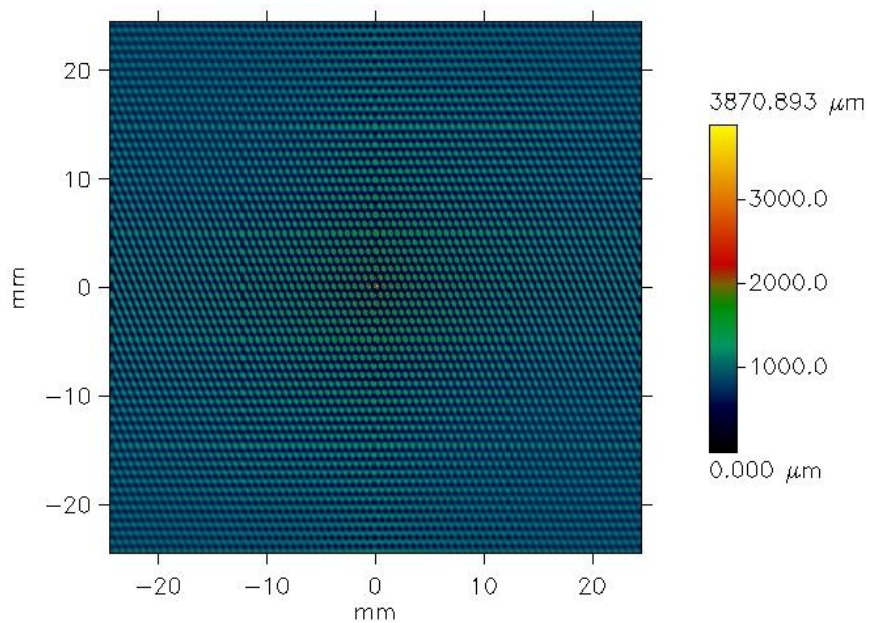
Zastosowane w badaniach oprogramowanie Mak III umożliwia obie te opcje. Za pomocą oprogramowania dla każdej próbki wyznaczono wykresy funkcji autokorelacji oraz funkcji rozkładu kątów. W obu przypadkach nie ma możliwości uśrednienia wyników dla danego wariantu. Dlatego też poniżej przedstawiono tylko przykładowe funkcje autokorelacji i rozkładu kątów na powierzchni dla każdego wariantu przed i po procesie ścierania. Wykresy funkcji dla poszczególnych próbek w danym wariantcie splotowym tkanin były bardzo zbliżone.

W przypadku rozkładu kątów zastosowane oprogramowanie tworzy wykres tzw., *Angle Distribution*. Przedstawia on rozkład kątów nachylenia stycznej do powierzchni w każdym punkcie badanej powierzchni [37].

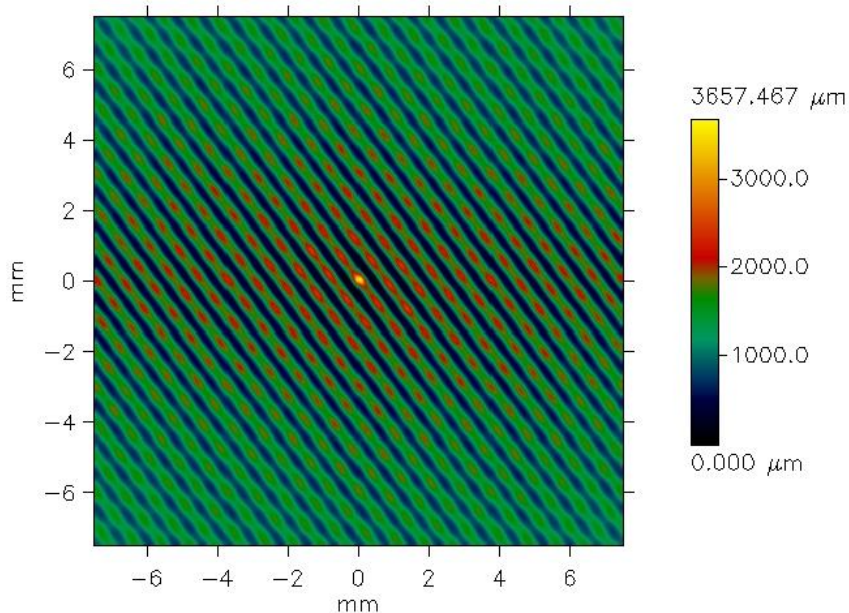
Tkanina o splocie płóciennym – wariant nr 1 przed ścieraniem charakteryzuje się powierzchnią izotropową. Jej struktura geometryczna nie wykazuje wyraźnej zależności od kierunku. Potwierdza to zarówno wykres funkcji autokorelacji (rys. 6.32), jak też wykres rozkładu kątów (rys. 6.33).

Po ścieraniu zarysowała się kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni. Na wykresie funkcji autokorelacji pojawiły się skośne prążki, o skosie w kierunku S (rys. 6.34). Również skośność, ale o kierunku Z występuje na wykresie rozkładu kątów na powierzchni. Prążki na wykresie funkcji autokorelacji są prostopadłe do nachylenia funkcji rozkładu kątów. Jest to prawidłowe, gdyż rozkład kątów ilustruje rozkład kątów nachylenia stycznej

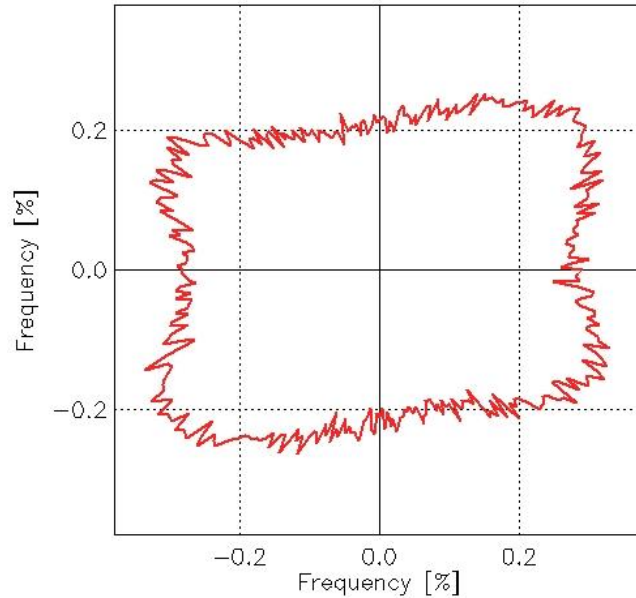
do krzywizny powierzchni w punkcie styku, czyli linii nachylonej pod kątem prostym (90°) do promienia w punkcie kontaktu linii stycznej z krzywizną.



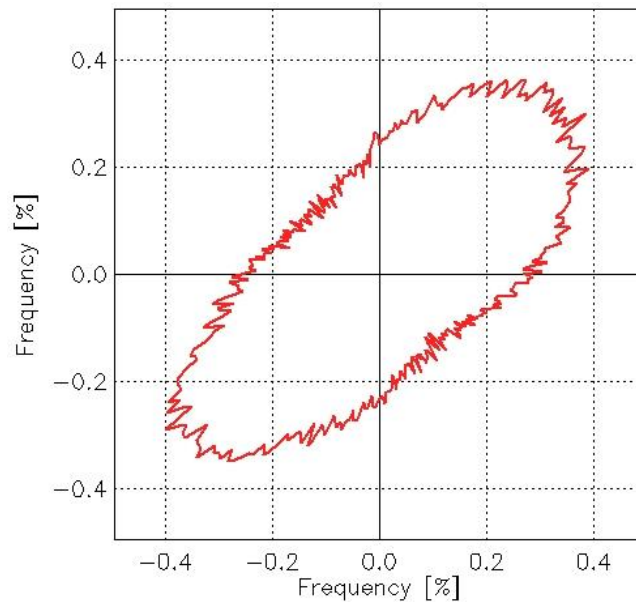
Rys. 6.32. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie płóciennym przed ścieraniem



Rys.6.33. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie płóciennym po ścieraniu



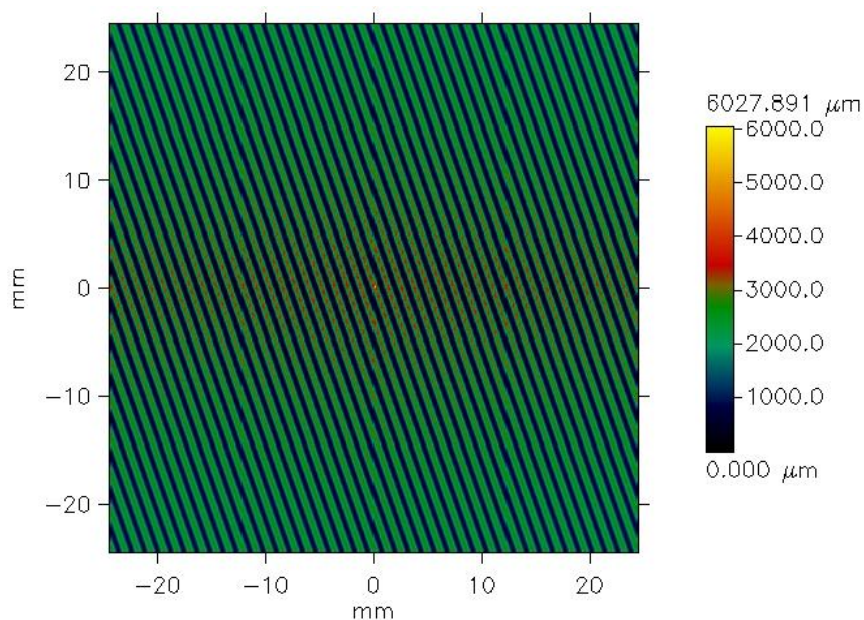
Rys. 6.34. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznej do powierzchni dla tkaniny o splotcie płóciennym przed ścieraniem



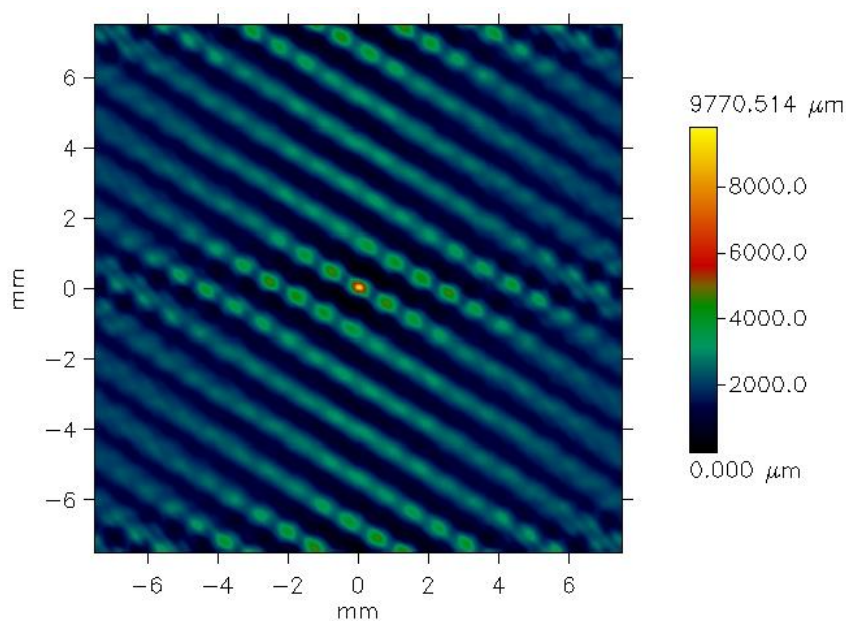
Rys. 6.35. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splotcie płóciennym po ścieraniu

W przypadku tkaniny o splotcie skośnym 3/1 S – wariant nr 7 kierunkowość jest widoczna już przed ścieraniem (rys. 6.36, 6.38). Jest to oczywiste, gdyż skośne prążki na powierzchni tkanin o splotach skośnych są widoczne nawet gołym okiem. Po ścieraniu

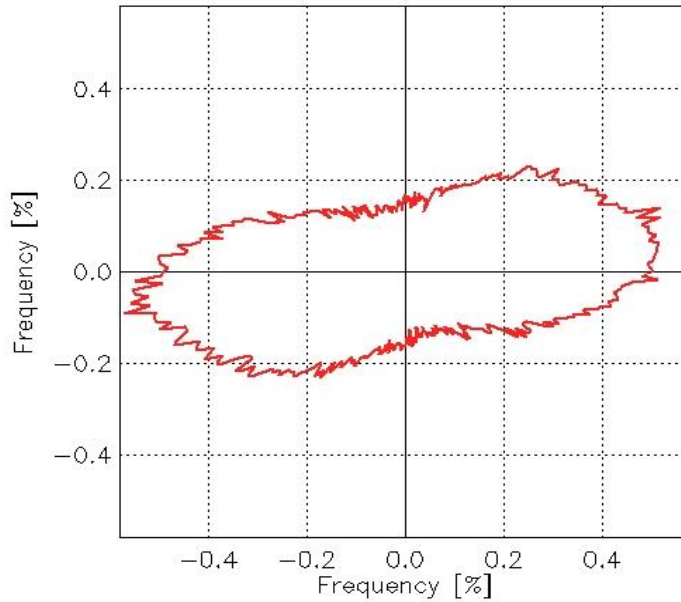
zmienił się kąt nachylenia prążków, ale są one również widoczne na obu wykresach: funkcji autokorelacji (rys. 6.37) i funkcji rozkładu kątów (rys. 6.39).



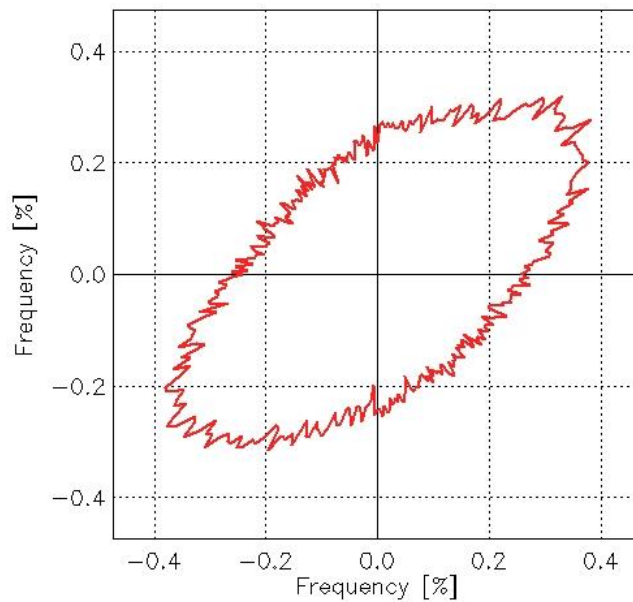
Rys. 6.36. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie skośnym 3/1 S przed ścieraniem



Rys. 6.37. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie skośnym 3/1 S po ścieraniu



Rys. 6.38. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznnej do powierzchni dla tkaniny o splocie skośnym 3/1 S przed ścieraniem



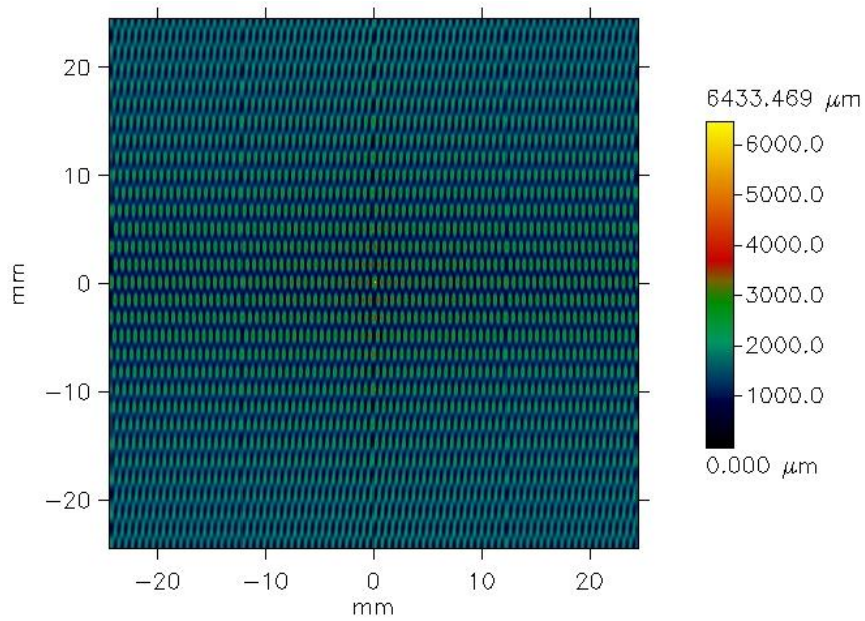
Rys. 6.39. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznnej do powierzchni dla tkaniny o splocie skośnym 3/1 S po ścieraniu

Należy domniemywać, że ścieranie za pomocą przyrządu Martindale powoduje powstawanie lub zintensyfikowanie kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni tkanin. Oczywiście w warunkach rzeczywistych użytkowania odzieży ścieranie może

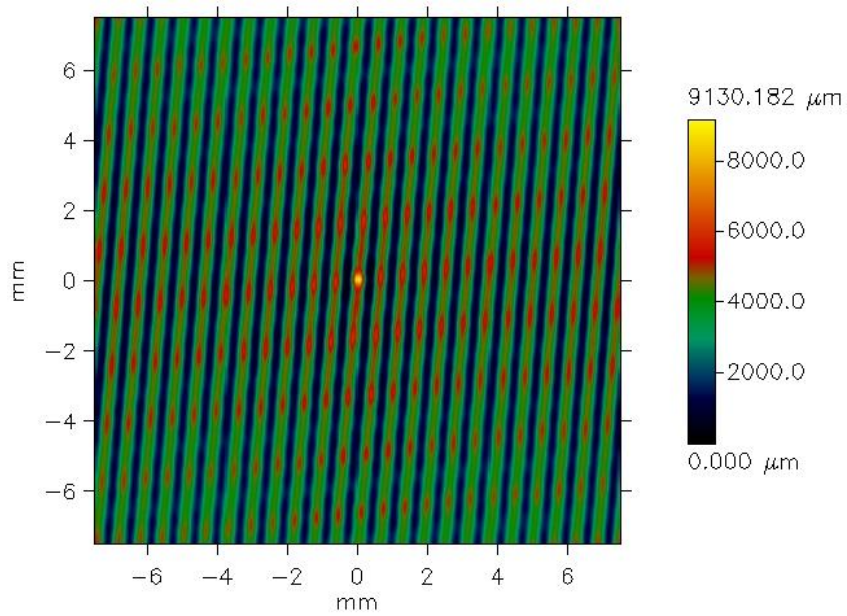
przebiegać inaczej, niekoniecznie zmiany struktury geometrycznej powierzchni tkanin w wyniku rzeczywistego użytkowania muszą powodować kierunkowość struktury powierzchni. To zależy od warunków ścierania i powierzchni ścierającej. Proces ścierania za pomocą przyrządu Martindale jest tylko próbą przybliżenia rzeczywistych warunków użytkowania tkanin. W przypadku tekstyliów technicznych proces ścierania w trakcie użytkowania może być bardziej przewidywalny i powtarzalny, w zależności od konkretnego zastosowania technicznego.

W pozostałych przypadkach stwierdzono tendencje podobne do tendencji zaobserwowanej dla tkaniny o splotie płóciennym. W każdym przypadku: tkanin o splotie rypsowym (rys. 6.40, 6.42, 6.44, 6.46) i tkaniny o splotie panama (rys. 6.48, 6.50), przed ścieraniem nie występowało zjawisko kierunkowości powierzchni. Natomiast pojawiła się niewielka kierunkowość po procesie ścierania (rys. 6.41, 6.43, 6.45, 6.47, 6.49, 6.51).

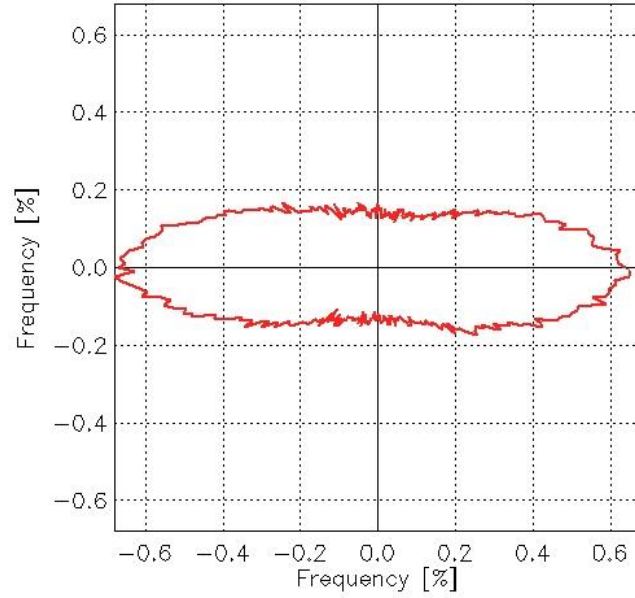
W przypadku tkanin o splotie rypsowym i panama przed ścieraniem na wykresach funkcji autokorelacji widoczne są drobne regularne punkty, czy niewielkie obszary rozłożone równomiernie na całej powierzchni badanej próbki. Punkty te odpowiadają nieregularnościom powierzchni wynikającym z zastosowanego splotu tkanin i stosunkowo dobrze odzwierciedlają raport splotu. W przypadku tkaniny o splotie rypsowym 1/1 (010) – wariant nr 16, na wykresie funkcji autokorelacji widoczne są podłużne (w kierunku osnowy) wąskie obszary odpowiednie na splotu rypsowego podłużnego (rys. 6.40). Na wykresie funkcji autokorelacji tkaniny o splotie rypsowym 2/2 (2) występują jaśniejsze regularne obszary wydłużone w kierunku wątku (rys. 6.44). Są one zbliżone do rozkładu pokryć osnowowych w tkaninie o splotie rypsowym poprzecznym. Również jaśniejsze obszary na wykresie splotu panama 2/2/ (020) odzwierciedlają raport splotu, tj. pokrycia osnowowe, które są rozmieszczone regularnie w obu kierunkach: osnowy i wątku (rys. 6.48).



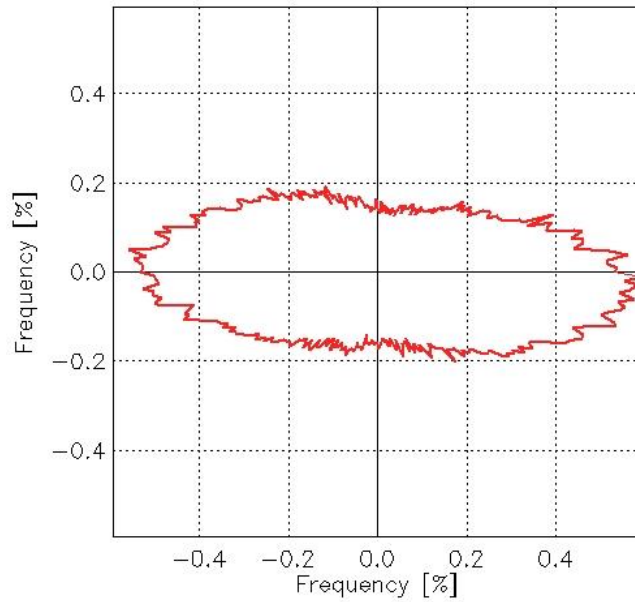
Rys. 6.40. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie rypsowym 1/1 (010) (wariant 16) przed ścieraniem



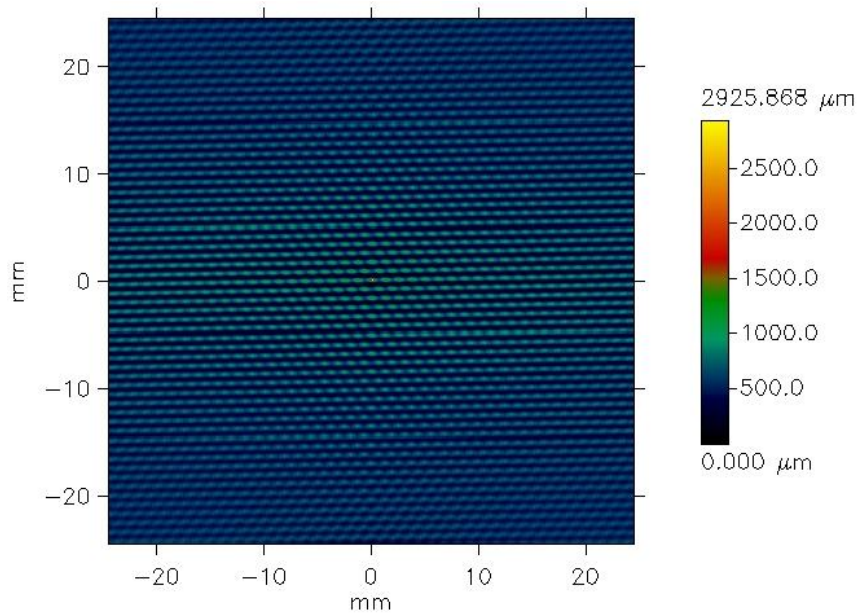
Rys. 6.41. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie rypsowym 1/1 (010) po ścieraniu



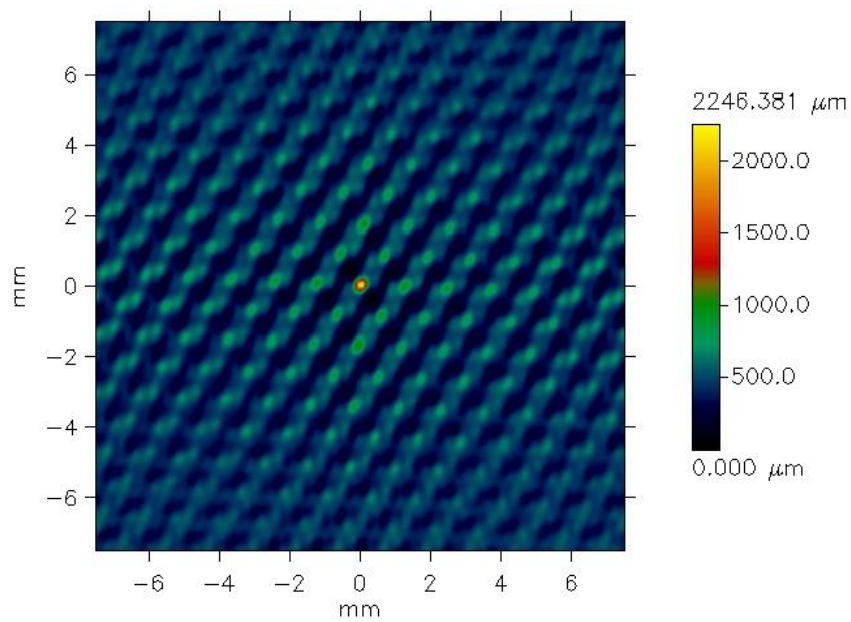
Rys. 6.42. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznej do powierzchni dla tkaniny o splocie rypсовym 1/1 (010) (wariant nr 16) przed ścieraniem



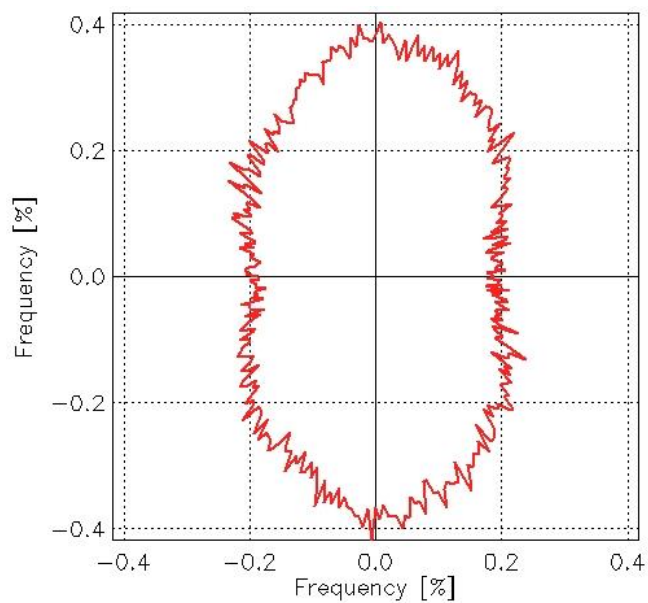
Rys. 6.43. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznej do powierzchni dla tkaniny o splocie rypсовym 1/1 (010) (wariant nr 16) po ścieraniu



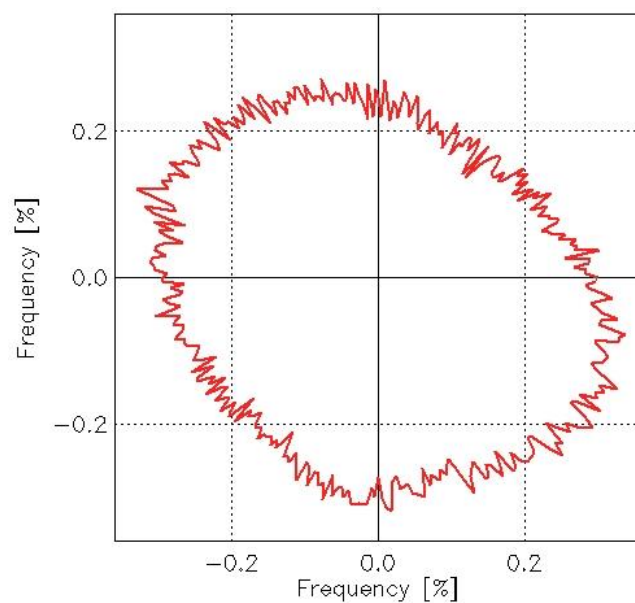
Rys. 6.44. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie rypсовym 2/2 (2)
(wariant nr 18) przed ścieraniem



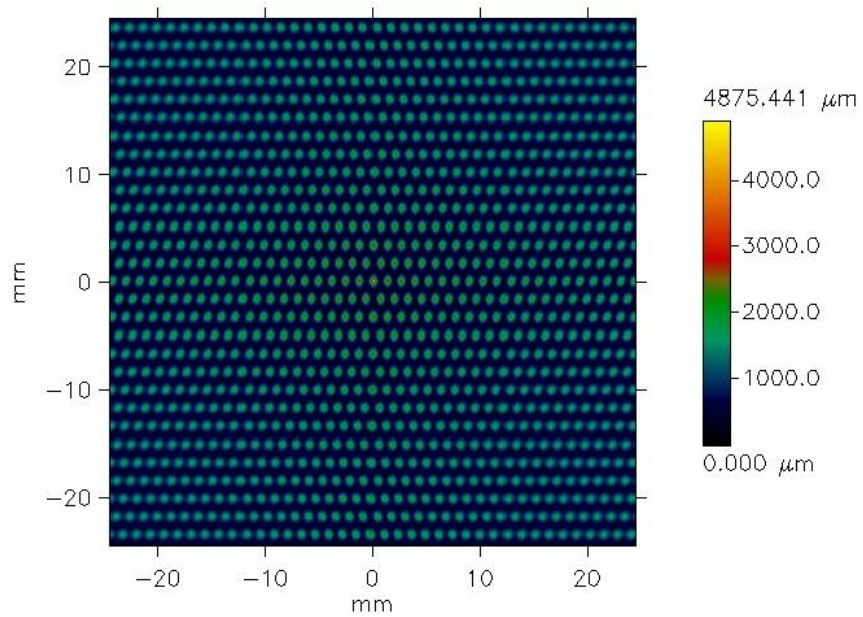
Rys. 6.45. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie rypсовym 2/2 (2)
(wariant nr 18) po ścieraniu



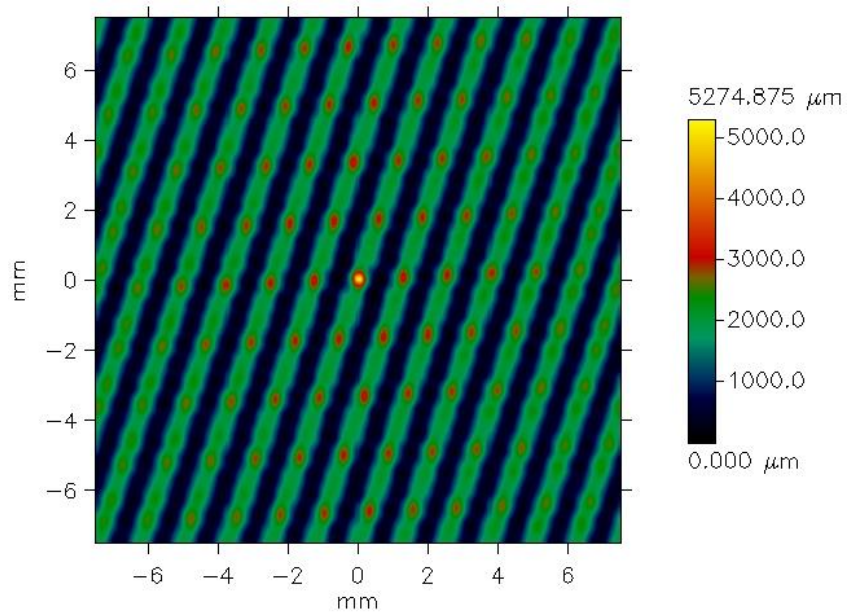
Rys. 6.46. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznej do powierzchni dla tkaniny o splocie rypsowym 2/2 (2) (wariant nr 18) przed ścieraniem



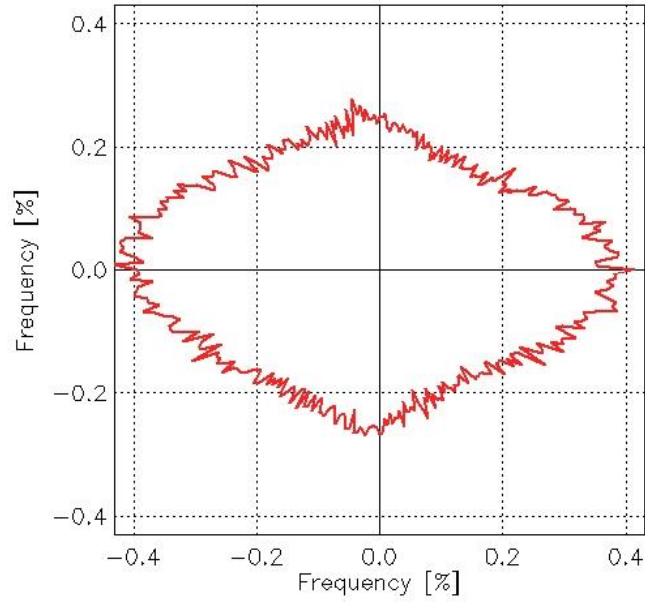
Rys. 6.47. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznej do powierzchni dla tkaniny o splocie rypsowym 2/2 (2) (wariant nr 18) po ścieraniu



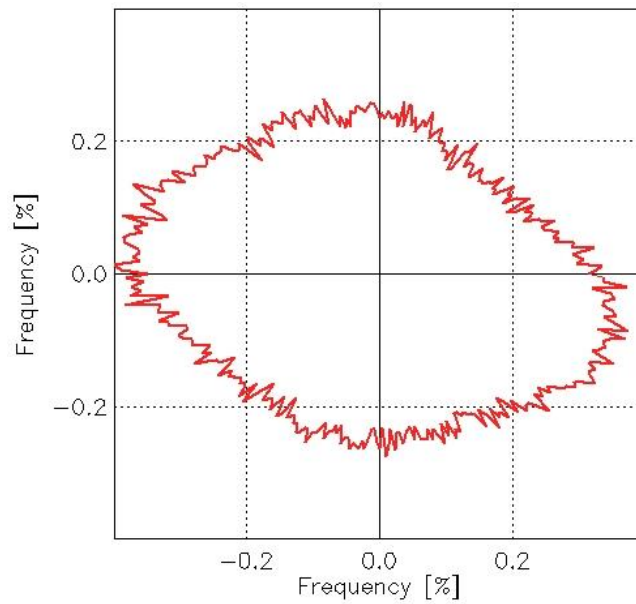
Rys. 6.48. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (wariant nr 20) przed ścieraniem



Rys. 6.49. Przykładowa funkcja autokorelacji dla tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (wariant nr 20) po ścieraniu



Rys. 6.50. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznej do powierzchni dla tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (wariant nr 20) przed ścieraniem



Rys. 6.51. Przykładowa funkcja rozkładu kątów nachylenia stycznej do powierzchni dla tkaniny o splocie panama 2/2 (020) (wariant nr 20) po ścieraniu

6.4. Podsumowanie analizy zmian struktury geometrycznej powierzchni tkanin poddanych badaniom za pomocą przyrządu Martindale'a

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników można stwierdzić, że pomiary geometrycznej struktury powierzchni tkanin za pomocą metody bezkontaktowej, optycznej pozwalają ocenić zmiany struktury powierzchni poddanej procesowi ścierania za pomocą przyrządu Martindale'a. Po 10.000 cykli ścierania zaobserwowano zmiany niemal wszystkich wartości parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną tkanin. W zależności od parametru, wartości uległy zwiększeniu lub zmniejszeniu. To pozwala sądzić, że niektóre parametry struktury geometrycznej powierzchni tkanin, takie jak: największa wysokość profilu chropowatości sRz , wysokość największego wzniesienia profilu chropowatości sRp , głębokości najniższego wgłębienia profilu chropowatości sRv , głębokości całkowitej wysokości profilu chropowatości sRt skośność $sRsk$ czy kurtoza $sRku$, mogą być wykorzystane do oceny odporności tkanin na ścieranie. Praktyczne wykorzystanie ww. metody i parametrów wymaga dalszych badań i pogłębionych analiz, m.in. przy zastosowaniu różnej liczby cykli ścierania oraz oceny innych zmian ścieranych próbek, np. ubytku masy próbki po ścieraniu, i odniesieniu tych wielkości do wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni tkanin.

Niestety, uzyskane wyniki wskazują na to, że najbardziej rozpowszechnione i rutynowo wyznaczone parametry: średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości sRa i średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości sRq nie są przydatne w tej analizie. Co prawda po ścieraniu zaobserwowano zmiany wartości tych parametrów, lecz dla większości wariantów były one nieznaczne. Ponadto, nie stwierdzono jednoznacznej tendencji zmian wartości obu parametrów spowodowanych procesem ścierania.

Histogramy ilustrujące rozkład wysokości punktów na powierzchni tkaniny również mogą być wykorzystane do oceny zmian struktury geometrycznej powierzchni tkanin po ścieraniu. We wszystkich przypadkach zaobserwowano przesunięcie histogramów w kierunku mniejszej wartości zmiennej z – wysokości punktów na powierzchni tkaniny, przy jednoczesnym zmniejszeniu liczności najliczniejszej klasy.

Wykresy funkcji autokorelacji są miarą anizotropowości struktury geometrycznej powierzchni i odzwierciedlają wzór raportu splotu tkanin. Zarówno wykresy funkcji autokorelacji jak również wykresy rozkładu kątów na powierzchni mogą być wykorzystane do oceny kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni oraz zmian kierunkowości w wyniku ścierania tkanin.

7. Analiza porównawcza wyników uzyskanych za pomocą profilometru i system KES-FB4

Analizę porównawczą wyników pomiaru chropowatości tkanin za pomocą profilometru oraz przyrządu KES-FB 4 wykonano w oparciu o badania 11 wariantów tkanin. Były to te same warianty, które analizowano w pierwszej części eksperyment (6 wariantów splotowych x 2 warianty przędzy wątkowej), za wyjątkiem tkaniny o splotcie skośnym 2/2 S z przędzą wątkową o masie liniowej 100 tex – wariant o numerze 14 (Tabela 4.1).

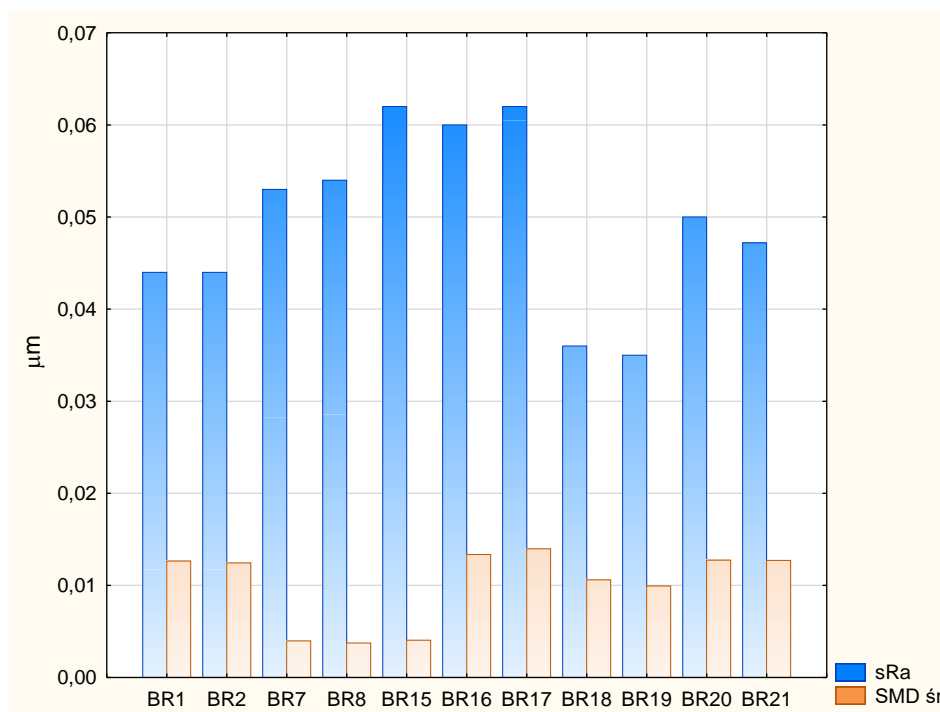
Wyniki pomiaru chropowatości powierzchni tkanin (*SMD*) za pomocą przyrządu KES-FB4 przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Wyniki pomiaru chropowatości powierzchni tkanin za pomocą KES-FB4

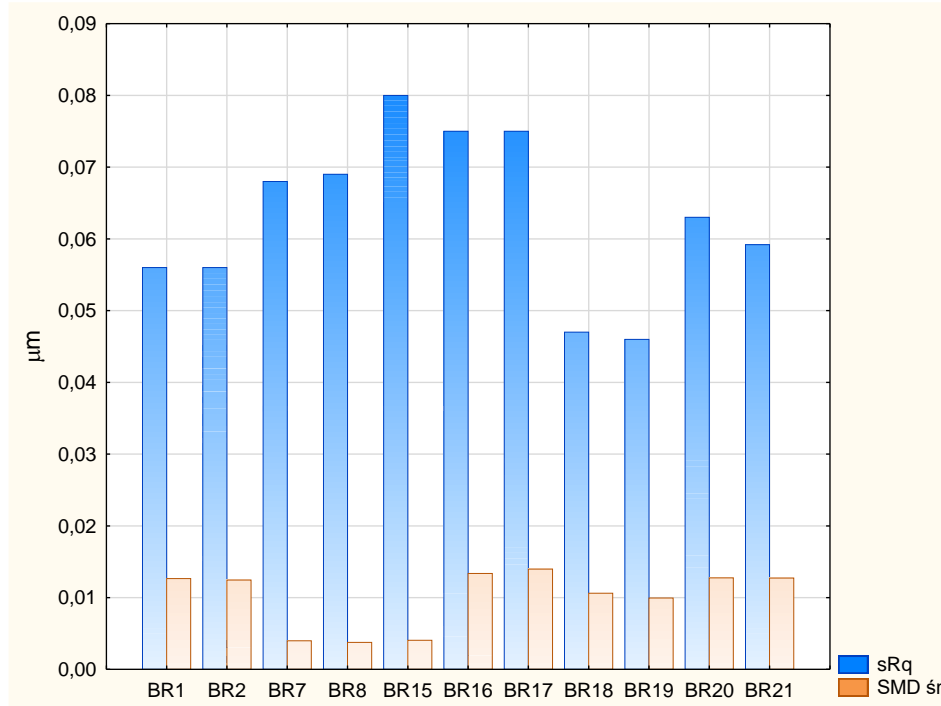
Numer próbki	SMD w kierunku osnowy [mm]	SMD w kierunku wątku [mm]	SMD Średnie [mm]
1	0,018	0,007	0,013
2	0,019	0,006	0,012
7	0,002	0,006	0,004
8	0,002	0,006	0,004
15	0,002	0,006	0,004
16	0,020	0,007	0,013
17	0,020	0,008	0,014
18	0,015	0,006	0,011
19	0,015	0,005	0,010
20	0,019	0,006	0,013
21	0,018	0,007	0,013

Porównanie średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości *sRa* z profilometru z wartościami średniej chropowatości *SMD* z przyrządu KES-FB4 przedstawiono na rysunku 7.1. Widoczne są wyraźne różnice pomiędzy wartościami parametrów chropowatości uzyskanymi za pomocą obu metod pomiarowych. Wartości parametru *sRa* z profilometru są kilkakrotnie wyższe od wartości parametry *SMD* z

przyrządu KES-FB4. To potwierdza wcześniejsze doniesienia literaturowe, że metody kontaktowe nie są w stanie wykryć nierówności powierzchni, których wymiar są mniejsze od wymiarów czujnika pomiarowego. Różnice pomiędzy wartościami parametru *SMD* z przyrządu KES-FB4, a wartościami średniej kwadratowej rzędnych profilu chropowatości – *sRa* są jeszcze większe (rys. 7.2).



Rys. 7.1. Porównanie wartości parametrów *sRa* (z profilometru) i *SMD* (z przyrządu KES-FB4)



Rys. 7.2. Porównanie wartości parametrów sRq (z profilometru) i SMD (z przyrządu KES-FB4)

Przeanalizowano również zależność korelacyjną pomiędzy ww. parametrami chropowatości. Niejednokrotnie bowiem występuje sytuacja, że wartości bezwzględne parametrów uzyskiwane za pomocą różnych metod pomiaru różnią się między sobą, jednakże są skorelowane. Niestety, w omawianym przypadku nie stwierdzono statystycznie istotnej korelacji pomiędzy wartościami parametry SMD i wartościami parametrów sRa i sRq .

Przeprowadzono analizę korelacji pomiędzy wszystkimi parametrami profilu chropowatości uzyskiwanymi za pomocą profilometru i wartościami parametru SMD : średnią, w kierunku osnowy i kierunku wątku.

Wyniki analizy korelacyjnej przedstawiono w tabeli 7.2. Kolorem czerwonym oznaczono zależności statystycznie istotne przy poziomie istotności 0.05.

Tabela 7.2. Wyniki analizy korelacji pomiędzy wynikami z profilometru, a wynikami uzyskanymi za pomocą przyrządu KES-FB 4

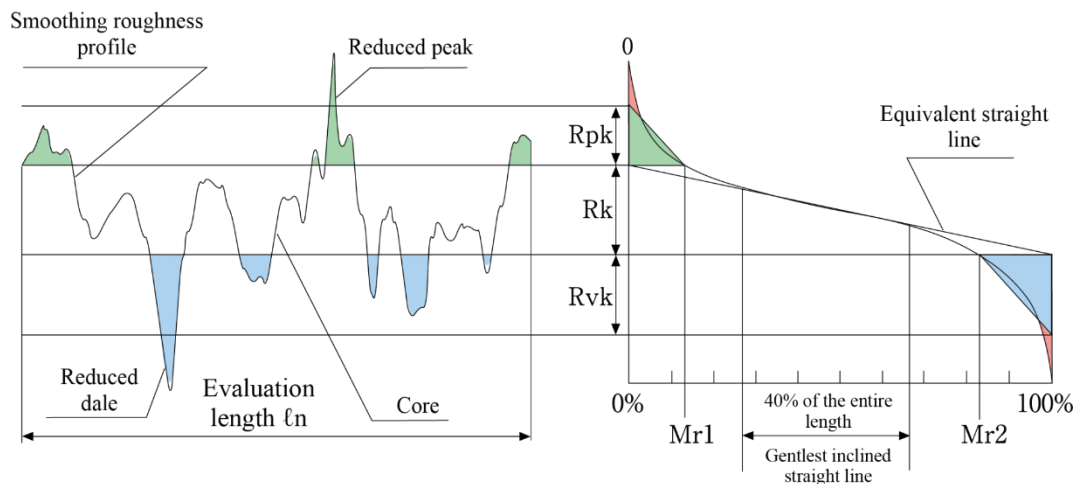
Parametr z profilometru	Wartość współczynników korelacji		
	SMD osnowa	SMD wątek	SMD średnie
sRa	-0,251	0,440	-0,194
sRq	-0,336	0,351	-0,282
sRz	-0,261	-0,207	-0,270
sRmax	-0,364	-0,616	-0,404
sRz25	-0,409	-0,294	-0,415
sRmax25	-0,219	-0,277	-0,235
sRp	0,034	0,115	0,047
sRv	-0,300	-0,122	-0,296
sRt	-0,198	-0,288	-0,216
sRsk	0,720	0,225	0,699
sRku	0,091	-0,502	0,035
sRk	0,526	0,820	0,573
sRpk	0,366	0,329	0,378
sRvk	-0,848	-0,261	-0,822
sMr1	-0,325	-0,620	-0,365
sMr2	0,890	0,444	0,878
sRmr	-0,153	-0,042	-0,150

Na podstawie analizy korelacyjnej stwierdzono, że średnia wartość chropowatości *SMD* z przyrządu KES-FB4 jest skorelowana w wartością parametrów uzyskanych za pomocą profilometru: kurtozą *sRku* oraz parametrami odczytywanymi z krzywej udziału materiałowego (rys. 7.3):

- *sRvk* – średnia głębokość głębokich wgłębień znajdujących się pod rdzeniem profilu chropowatości,
- *sMr2* – najwyższy udział materiałowy.

Chropowatość *SMD* wyznaczona w kierunku osnowy jest również skorelowana z wyżej wymienionymi parametrami uzyskanymi za pomocą profilometru. Natomiast wartość

parametry SMD wyznaczona w kierunku wątku jest skorelowana z parametrem sRk - głębokość części środkowej profilu, wyznaczona przez prostą linearyzującą krzywą udziału materiałowego (Tabela 7.2, rys. 7.3).



Rys. 7.3. Parametry wyznaczane z krzywej udziału materiałowego;

[https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=cmsContent14708](https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=cmsContent14708)

W tym momencie brak jest danych oraz doniesień literatury, które pozwoliłyby wyjaśnić te zależności. Zagadnienie zależności pomiędzy chropowatością tkanin wyznaczoną za pomocą metody kontaktowej (KES-FB4) oraz parametrami odczytywanymi z krzywej materiałowej powinny być przedmiotem dalszych badań. Dlatego też przewiduje się kontynuację badań w tym zakresie.

8. Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej przeprowadzono kompleksowe badania geometrycznej struktury powierzchni tkanin o zróżnicowanej strukturze. Badaniom poddano 21 wariantów tkanin, różniących się splotem, masą liniową przędzy wątkowej oraz licznnością wątku. Pomiary wykonano za pomocą metody bezkontaktowej – profilometru optycznego. Na podstawie uzyskanych wyników przeanalizowano geometryczną strukturę powierzchni badanych tkanin oraz zależności pomiędzy parametrami geometrycznej struktury powierzchni tkani a ich parametrami strukturalnymi. Wykonano również badania porównawcze chropowatości powierzchni za pomocą profilometru oraz przyrządu KES-FB4. Pomiary geometrycznej struktury powierzchni zastosowano także w ocenie zmian powierzchni tkanin na skutek tarcia.

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury oraz wykonanych badań i analizy wyników stwierdzono, co następuje:

- struktura geometryczna powierzchni jest bardzo ważną cechą tkanin, gdyż wpływa na szereg istotnych cech użytkowych, takich jak zwilżalność, odbicie światła, odporność na tarcie, izolacyjność cieplna,
- metody bezstykowe pomiaru geometrycznej struktury powierzchni tkanin znacznie precyzyjniej odzwierciedlają rzeczywistą geometrię powierzchni mierzonych tkanin niż metoda stykowa – za pomocą przyrządu KES-FB4,
- metody bezkontaktowe pomiaru geometrycznej struktury powierzchni materiałów włókienniczych nie są rozpowszechnione; brak jest opracowanych i uznanych procedur przygotowania prób do badań i wykonania badań struktury geometrycznej powierzchni materiałów włókienniczych za pomocą metod bezstykowych, brak jest również wytycznych odnośnie wielkości filtrów stosowanych w metodach optycznych do oddzielenia składowych krótko- i długofalowych,
- złożoność zjawiska oraz duża liczba czynników wpływających na kształtowanie się powierzchni tkanin sprawiają, że wszelkie modelowanie matematyczne/

geometryczne struktury geometrycznej powierzchni tkanin jest bardzo skomplikowane,

- profilometr optyczny MicroSpy® Profile firmy FRT wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem Mark III może być wykorzystany do kompleksowego pomiaru geometrycznej struktury powierzchni tkanin; dostarcza szeregu szczegółowych informacji na temat powierzchni tkanin w postaci parametrów geometrycznej struktury powierzchni, histogramów wysokości punktów na powierzchni, funkcji autokorelacji, funkcji gęstości spektralnej, wymiaru fraktalnego, rozkładu kątów stycznej na powierzchni, krzywej udziału materiałowego i wielu innych,
- uzyskane wyniki i ich analiza jednoznacznie potwierdziły, że podstawowe czynniki strukturalne tkanin: splot, masa liniowa i liczność wątku w statystycznie istotny sposób, przy poziomie istotności 0,05, wpływają na geometryczną strukturę powierzchni tkanin. Statystycznie istotna jest również interakcja pomiędzy splotem, masą liniową przędzy wątkowej oraz licznnością przędzy wątkowej,
- spośród szeregu parametrów, które charakteryzują geometryczną strukturę powierzchni tkanin, takie parametry jak: średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości sRa , średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości sRq , największa wysokość profilu chropowatości sRz , głębokość całkowita wysokości profilu chropowatości sRt , skośność $sRsk$ czy kurtoza $sRku$, wyraźnie wykazują zróżnicowanie spowodowane zmianami parametrów konstrukcyjnych tkanin,
- w analizie geometrycznej struktury powierzchni tkanin oraz zmian tej struktury na skutek tarcia przydatne są również takie narzędzia jak: funkcja autokorelacji, rozkład kątów stycznej do powierzchni oraz histogram wysokości punktów na powierzchni,
- krzywa udziału materiałowego może mieć istotne znaczenie w analizie geometrycznej struktury powierzchni tkanin. Parametry odczytywane z krzywej udziału materiałowego są skorelowane z wynikami pomiaru chropowatości za pomocą przyrządu KES-FB4,
- niskie wartości współczynników korelacji liniowej pomiędzy parametrami struktury tkanin, a parametrami charakteryzującymi geometryczną strukturę powierzchni

tkanin wynikają z tego, że geometria powierzchni tkanin jest kształtowana przez wiele czynników konstrukcyjnych. Żaden z tych czynników nie jest dominujący,

- uzyskane wyniki potwierdziły rozważania teoretyczne, wykazujące wpływ wielu czynników konstrukcyjnych tkanin na geometryczną strukturę ich powierzchni,
- pomiary geometrycznej struktury powierzchni tkanin za pomocą metody bezkontaktowej, optycznej pozwalają ocenić zmiany struktury powierzchni poddanej procesowi ścierania za pomocą przyrządu Martindale'a, Praktyczne wykorzystanie ww. metody i parametrów wymaga dalszych badań i pogłębionych analiz, m.in. przy zastosowaniu różnej liczby cykli ścierania oraz oceny innych zmian ścieranych próbek, np. ubytku masy próbki po ścieraniu, i odniesieniu tych wielkości do wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni tkanin.

Podsumowując przeprowadzone badania i wyprowadzone z nich wnioski można stwierdzić, że teza pracy została w pełni potwierdzona. Badania chropowości powierzchni tkanin za pomocą metody stykowej są niewystarczające do pełnego scharakteryzowania geometrycznej struktury powierzchni tkanin. Badania bezstykowe z wykorzystaniem metody optycznej pozwalają na kompleksowe scharakteryzowanie geometrycznej struktury powierzchni tkanin, jak również na analizę zależności pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi tkanin, a ich wybranymi parametrami struktury geometrycznej powierzchni.

9. Bibliografia

1. Kurpanik R., Rogowska P., Sarraj S., Walke W., Wpływ przygotowania powierzchni oraz parametrów procesu utleniania anodowego na zwilżalność i odporność korozyjną tytanu CPTI GRADE 2, Aktualne Problemy Biomechaniki, nr 18/2019; 5-12
2. Hasan M.M.B., Calvimontes A., Synytska A., Dutschk V. Effects of Topographic Structure on Wettability of Differently Woven Fabrics, Textile Research Journal 2008, 78; 996
3. Liao X., JHu J., Li Y., Li Q., Wu X. A Review on Fabric Smoothness-roughness
4. Sensation Studies, Journal of Fiber Bioengineering & Informatics 2011, 4:2, 105–114
5. Das A., Kothari V. K., Vandana N. A Study on Frictional Characteristics of Woven Fabrics, Autex Research Journal 2005, Vol. 5, No.3, 133-140
6. Krawczyk-Dembicka E., Parametry struktury geometrycznej powierzchni, instrukcja a do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu: Podstawy techniki i technologii, Ćwiczenie 9, Politechnika Białostocka, Wydział Zarządzania Katedra Zarządzania Produkcją, Białystok 2015
7. Wieczorowski M., Teoretyczne podstawy przestrzennej analizy nierówności powierzchni, Inżynieria Maszyn, R. 18, z. 3, 2013
8. Adamczak S., Pomiary geometryczne powierzchni. Zarys kształtu, falistość, chropowatość, WNT Warszawa 2008
9. Malburg M., 3 Steps to Understanding Surface Texture, Digital Metrology Solution, [http](http://).
10. Leach R., Optical Measurement of Surface Topography, Springer-Verlag, Berlin 2011
11. Sahoo P., Surface topography, in: Tribology for Engineers. A Practical Guide, ed. Davim J.P., Wodhead Publishing Ltd. Cambridge England 2011, 1-39
12. Average Roughness basics, <https://michmet.com/average-roughness-basics/>

13. PN-EN ISO 4287:1999 Specyfikacje geometrii wyrobów-- Struktura geometryczna powierzchni: Metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni
14. Pomiar chropowatości powierzchni,
<https://www.mitutoyo.pl/application/files/7715/5888/3439/Chropowatosc.pdf>
15. Santos M., Coelho A.S., Paula A.B., Marto C.M., Amaro I., Saraiva J., Ferreira M.M., Antunes P., Carrilho R., Mechanical and Tribological Characterization of a Dental Ceromer, *Journal of Functional Biomaterials* 2020, 11, 11; doi:10.3390/jfb11010011
16. PN-EN ISO 4288:1997, Wymagania geometryczne wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni metodą profilową
17. PN-EN ISO 25178-2:2012E Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) -- Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni
18. Kacalak W., Wojciech Szafraniec F., Tomkowski R., Lipiński D., Łukianowicz C., Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni. *Pomiary Automatyka Kontrola* Vol. 57, nr 5/2011, 542-546
19. Zaleski K., Matuszak J., Zaleski R., *Metrologia warstwy wierzchniej*, Politechnika Lubelska, Lublin 2018
20. Grzesik W., Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn, *Mechanik* 2015, Nr 8–9, 587-593
21. Zecchino M., Characterizing surface quality: Why average roughness is not enough, www.veeco.com (dostęp: 2003)
22. Cohen D.K., Surface Texture Measurement - Did You Set the Cutoff Lengths Properly? Michigan Metrology Ltd. Blog <https://michmet.com/>
23. Wójcik R., Rosik R., Wejman P, Walczak R., Stereometria warstwy wierzchniej w procesie szlifowania materiałów trudnościeralnych, *Mechanik* 2015, Nr 8-9; 355-359
24. Multiscale surface texture analysis in action, Michigan Metrology LLC, Blog <
<https://michmet.com/multiscale-analysis-in-action/>> dostęp 08.05.2023

25. Grzesik W., Rech J., Żak K., Characterization of surface textures generated on hardened steel parts in high-precision machining operations, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies* 2015, 78:2049–2056 DOI 10.1007/s00170-015-6800-4.
26. Zhu S., Understanding Engineered Surfaces in Automotive, *Quality Magazine*, 2015, December 2015, <https://www.qualitymag.com/articles/92990-understanding-engineered-surfaces-in-automotive>, dostęp: 16.03.2023
27. Deltombe R., Kubiak K.J., Bigerelle M., How to select the most relevant 3D roughness parameters of a Surface. *Scanning* 2014 Vol. 36, Is.1; 150-160
28. Naeim N., AbouEleaz M.A., Elkaseer A., Experimental Investigation of Surface Roughness and Material Removal Rate in Wire EDM of Stainless Steel, *Materials* 2023, 16, 1022. <https://doi.org/10.3390/ma16031022>
29. Kłonica M., Analysis of Geometric Features of The Surface 316l Steel After Different Machining Tools, *Journal of Technology and Exploitation, Mechanical Engineering* 2016, Vol. 2, no. 1, 73–79
30. Matuszewski M., Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej, *Rozprawy Nr 170, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Bydgoszcz* 2013
31. Zawada-Tomkiewicz A., Stroch B., Analiza struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem krzywej udziału materiałowego. *Mechanik* 2016, nr 11, 1728-1729
32. Lou S., Zhu Z., Zeng W., C Majewski C., Scott P.J., Jiang X., Material ratio curve of 3D surface topography of additively manufactured parts: an attempt to characterise open surface pores, *Surface Topography: Metrology and Properties* 2021, No. 9, 015029
33. Wójcik R., Radosław Rosik R., Wejman P., Walczak R., Stereometria warstwy wierzchniej w procesie szlifowania materiałów trudnościeralnych, *Mechanik* nr 8-9/2015, 355-359
34. Wilson A., Fluvial bedrock abrasion by bedload: process and form, Ph.D. Thesis, Trinity College University of Cambridge, 2009

35. Hamdi A., Merghache S.M., Aliouane T., Effect of cutting Variables on Bearing Area Curve Parameters (BAC-P) During Hard Turning Process, Archive of Mechanical Engineering 2020, Vol. 7, No. 1, 73-94
36. Matuszewski M., Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego ul. Ks. A. Kordeckiego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2013
37. Manual Mark III, Version 3.11.FRT the art. of metrology™, 2018
38. Autocorrelation Function, Michigan Metrology LLC, < <https://michmet.com/glossary-term/autocorrelation-function/>>
39. Autocorrelation Length, Michigan Metrology LLC, < <https://michmet.com/glossary-term/autocorrelation-length/>>
40. Str (Texture Aspect Ratio) | Area Roughness Parameters, <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/str-texture-aspect-ratio.jsp>
41. Szosland J., Struktury tkaninowe. PAN Oddział Łódź, Łódź 2007
42. Masajtis J., Analiza strukturalna tkanin, Polska Akademia Nauk, Łódź, O/Łódź, 1999.
43. Dobnik Dubrovski P., Woven Fabrics Engineering, Sciyo 2010, DOI: 10.5772/295.
44. W. Żurek W., Kopias K., Struktura płaskich wyrobów włókienniczych, Warszawa, WNT, 1977
45. Asif A., Rahman M., Farha F.I., Effect of Knitted Structure on the Properties of Knitted Fabric, International Journal of Science and Research 2015, Vol. 4 Is. 1, 1231-1235
46. Czaplicki Z, Mikołajczyk Z, Prażyńska A. Analysis of Functional Properties of Knitted Fabrics Made of Alpaca Wool and Other Fibres, Fibres & Textiles in Eastern Europe 2018; 26, 3(129), 52-59
47. Pourmohammadi A., Nonwoven materials and joining techniques, in Joining Textiles. Principles and Applications, edited by Jones J., Stylios G.K., Woodhead Publishing Limited, Cambridge England 2013

48. Żyliński T., Metrologia włókiennicza. Tom III, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1969
49. Encyklopedia Techniki – Przemysł Lekki, praca zbiorowa pod redakcją H. Najberga, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1986
50. Matusiak M., Ciepłochronność tkanin odzieżowych. Monografia. Prace Instytutu Włókiennictwa. Wydanie specjalne. Instytut Włókiennictwa, Łódź 2011
51. Rossi R., Interactions between Protection and Thermal Comfort, w Textiles for Protection, pod red. Scott R.A., Anglia, Woodhead Publishing in Textiles, Cambridge England 2005, 233 – 260
52. Więźlak W., Elmrych – Bocheńska J., Zieliński J., Odzież – budowa. Własności i produkcja, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Łódź 2009
53. Matusiak M., Tkaniny gofrowane. Właściwości biofizyczne. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2020
54. Krucińska I., Konecki W., Michalak M., Systemy pomiarowe we włókiennictwie. ISBN 83-7283-148-3; Łódź 2006, 252-329
55. Szmelter W., Metrologia włókiennicza, tom IV. PWN, Warszawa 1977
56. Behery H. M., Effect of mechanical and physical properties on fabric hand. The Textile Institute; Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2005
57. Tadesse, M.G., Loghin, C., Dulgheriu, I., Loghin, E. Comfort Evaluation of Wearable Functional Textiles. Materials 2021, 14, 6466.
58. Özcelik G., Supuren G., Gulumser T., Tarakcioglu I., A Study on Subjective and Objective Evaluation of the Handle Properties of Shirt Fabrics, Fibres & Textiles in Eastern Europe 2008, Vol. 16, No. 3 (68), 56-62
59. Sülar V., Okur A., Handle Evaluation of Men's Suitings Produced in Turkey. Fibres & Textiles in Eastern Europe 2008, Vol. 16, No. 2, 61-68
60. Kawabata, S., Niwa, M., Objective Measurement of Fabric Mechanical Property and Quality: Its Application to Textile and Clothing Manufacturing, International Journal of Clothing Science and Technology 1991, Vol. 3, Issue 1, 7-18

61. Thermal Contact Resistance, THERMOPEDIA. A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat & Mass Transfer, and Fluids Engineering, <
<http://www.thermopedia.com/content/1188/>>, dostępienie 18.03.2023
62. Kosiuk G, Matusiak M., Analysis of the Heat Resistance of Multilayer Clothing Packages. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2021; 29, 2(146), 95-99
63. Yaoqi X., Ping Z., Siping Z., Peipei Y., Zhiheng Z., Re-estimation of thermal contact resistance considering near-field thermal radiation effect, *Applied Thermal Engineering* 2019, Vol. 157, 5, 113601
64. Bi D.M., Jiang M., Chen H., Liu S., Liu Y., Effects of thermal conductivity on the thermal contact resistance between non-conforming rough surfaces: An experimental and modeling study, *Applied Thermal Engineering* 2020, Vol. 171, 5, 115037
65. Noman M.T., Petru M., Louda P., Kejzlar P., Woven Textiles Coated with Zinc Oxide Nanoparticles and their Thermophysiological Comfort Properties, *Journal of Natural Fibres* 2022, Vol. 19, Is. 12, 4718-4730
66. Tessier D., Testing thermal properties of textiles, rozdział 4 w: *Advanced Characterization and Testing of Textiles*, pod red. Dolez P., Vermeersch O., Izquierdo V., *The Textile Institute Book Series* 2018, Pages 71-92
67. Hes L., Dolezal I., Indirect measurement of moisture absorptivity of functional textile fabrics, XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018) IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1065, 2018 122026, IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/1065/12/12202
68. ISO 11092 – 2014 Guide: Testing of Thermal Resistance and Water Vapour Resistance of Textile Fabrics
69. Adámek, K., Havelka, A., Kus, Z., Mazari, A., The Correlation between Air and Water Vapour Permeability of Textiles. *Coatings* 2023, 13, 163.
70. Gidik, H., Vololonirina, O., Ghantous, R.M., Ankou, A., Impact of test parameters on the water vapor permeability of textiles. *International Journal of Clothing Science and Technology* 2019, 31, 350-361
71. Li S., Huang J., Chen Z., Chen G., Lai Y., A review on special wettability textiles: theoretical models, fabrication technologies and multifunctional applications, *Journal of Material Chemistry A* 2017, Vol. 5, 5-31

72. Jak działają impregnaty, Dynasil® aktywność powierzchniowa, <https://www.consil.com.pl/technologie-napiecie-powierzchniowe-impregnat.html>, dostęp 19.11.2019
73. Jonas A.M., Cai R., Vermeyena R., Nystena B., Vannesteb M., De Smetb D., Glinel K., How roughness controls the water repellency of woven fabric, *Materials & Design* 2020, Vol. 187, 108389
74. Caio F., Moreau Ch., Influence of Substrate Shape and Roughness on Coating Microstructure in Suspension Plasma Spray, *Coatings* 2019, Vol. 9, 746; doi:10.3390/coatings9110746
75. Mao N., Yiyi Wang Y., Jianguo Qu J., Smoothness and Roughness: Characteristics of Fabric-to-Fabric Self-Friction Properties, In: *The Proceedings of 90th Textile Institute World Conference. The 90th Textile Institute World Conference 2016*, Poznań, Polska
76. Mooneghiv S.A., Saharkhiz S., Varkiani M.H., Surface Roughness Evaluation of Textile Fabrics: A Literature Review, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 2014, Vol. 9, Issue 2, 1-18
77. Frydrych I., Matusiak M., Effect of woven fabrics on the fabric hand of cotton and CO/PES fabrics assessed on the Instron tensile tester, rozdział w: *Effect of mechanical and physical properties on fabric hand*, pod red.: Behery H.M., Woodhead Publishing Limited, Cambridge England 2006, 239-286
78. Matusiak M., Bajzik V., Surface Characteristics of Seersucker Woven Fabrics, *Autex Research Journal* 2020, Vol. 21, Is. 3, 284-292
79. Frączzak Ł, Zgórniak P., Analiza struktury geometrycznej tkanin gofrowanych, rozdział 5 w: *Tkaniny gofrowane. Właściwości mechaniczne*, pod red. Matusiak M., Frączzak Ł, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2021, 174-210
80. Vassiliadis S.G., Provatidis C.G., Structural Characterization of Textile Fabrics Using Surface Roughness Data, *International Journal of Clothing Science and Technology* 2004, 445-457
81. Park K.H., Kwon Y.H., Oh K.W., The Surface Roughness Measurement for Textiles Fabrics by a Non-Contact Method for Tactile Perception, 2003, https://www.researchgate.net/publication/237260788_The_Surface_Roughness_Me

[asurement for Textiles Fabrics by a Non-](#)

[Contact Method for Tactile Perception](#), dostęp 19.03.2023

82. Atalie D., Rotich G.K., Impact of cotton parameters on sensorial comfort of woven fabrics, *Research Journal of Textile and Apparel*, Emerald Publishing Ltd. 2020, 1560-6074
83. Semnani D., Hasani H., Behtaj S., Ghorbani E.; Surface Roughness Measurement of Weft Knitted Fabrics Using Image Processing. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2011, Vol. 19, No. 3 (86), 55-59
84. Maâtoug N., Sahnoun M., Sakli F., Comparative study on the surface roughness evaluation of weft knitted fabrics by TST©, KES FB-4 and the Vibrating Blade test benches, *International Conference of Applied Research in Textile © CIRAT-4*, 2010
85. Kolcavova Sirkova B., Description of Fabric Thickness and Roughness on the Basis of Fabric Structure Parameters, *Autex Research Journal* 2012, Vol. 12, No. 2, 40-43
86. Sülara V., Öner E., Okur A., Roughness and frictional properties of cotton and polyester woven fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, Vol. 30 2013, pp. 349 – 356.
87. Militky, J., Bajzik, V., Characterization of Protective Clothing Surface Roughness, 2nd International Congress on Technical Textiles, Izmir, Turcja 2004.
88. Militký J., Woven Fabrics Surface Quantification, rozdział 5 w: *Woven fabrics*, pod redakcją Jeon H.Y., InTech Europe, Rijeka 2012, 121-154
89. FTT. Fabric Touch Tester, Device Brochure, SDL Atlas LLC, <SDL Atlas | Textile Testing Products>, [dostęp: 24.01.2021]
90. FTT. The New Standard in Comfort Measurement. Broszura informacyjna, Rycobel group https://www.weberleucht.com/images/downloads/FTT_Technical_Bulletin.pdf [dostęp: 18.02.2021]
91. Haji Musa A.B., Malengier B., Vasile S., Van Langenhove L., De Raeve A., Analysis and Comparison of Thickness and Bending Measurements from Fabric Touch Tester (FTT) and Standard Methods, *Autex Research Journal* 2018, Vol. 18 No. 1, 51-60
92. Comfort Measurement FTT Fabric Touch Tester, Prezentacja firmy SDL Atlas
93. Ramgulam, R.B., Amirbayat, J., and Porat, I., Measurement of Fabric Roughness by a Non-Contact Method, *Journa of Textile Institute* 1993, 84, 99-106

94. Militký J., Mazal M., Image analysis method of surface roughness evaluation, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 19, 2007, 186-193
95. Calvimontes A., Hasan M.M.B., Dutschk V., Effects of Topographic Structure on Wettability of Woven Fabrics, w: *Woven Fabric Engineering*, pod red. Dobnik Dubrovski P., Intech Open Rijeka, Croatia 2010, 71-92
96. Calvimontes A., Grundke K., Müller A., Stamm M., Advances for the Topographic Characterisation of SMC Materials. *Materials* 2009, 2, 1084-1103
97. High-resolution 3D Surface Profiling systems. Talysurf CLI, Taylor Hobson Precision 2008, 04/08
98. Modrak J., Evaluation of Change in Structure of Nanofibre Membrane Surface During Washing Cycles, Degree Thesis, Technical University of Liberec, 2012
99. Vik M., Viková M., Hrubosova Z., Surface Topography of Textile Braille Labelling, 7th International Textile, Clothing & Design Conference – Magic World of Textiles, Dubrovnik, Chorwacja 2014
100. Małek E., Miedzińska M., Niezgoda T. Analiza topografii powierzchni tkaniny auksetycznej przy użyciu mikroskopu sił atomowych AFM. XIV Konferencja Naukowo-Techniczna: Techniki komputerowe w inżynierii, TKI 2016, Teresin Polska
101. Matusiak M, Frączczak Ł., Investigation of 3D Woven Fabric Topography Using Laser-Scanning. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2018, 26, 1(127), 81-88
102. Matusiak M., Investigation of Surface Geometry of Seersucker Woven Fabrics, *Autex Research Journal* 2022, (opublikowany on-line) <https://doi.org/10.2478/aut-2022-0023>
103. Matusiak M., Wpływ efektu gofrowania na wybrane właściwości tkanin gofrowanych, *Technologia i Jakość Wyrobów* 66/2021, 46-64
104. Prysiazhnyi V., Kramar A., Dojcinovic B., Zekic A., Obradovic B.M., Kuraica M., Kostic M., Silver incorporation on viscose and cotton fibers after air, nitrogen and oxygen DBD plasma pretreatment, *Cellulose* 2012, Vol. 20 (1), 315-325
105. Broda J., Kobiela-Mendrek K., Rom M., Grzybowska-Pietras J., Przybyło S., Laszczak R., Biodegradation of Wool Used for the Production of Innovative

- Geotextiles Designed to Erosion Control, *International Biodeterioration & Biodegradation* 2016, 351-361
106. Jiang X., Bai Y., Chen X., Liu W., A review on raw materials, commercial production and properties of lyocell fiber, *Journal of Bioresources and Bioproducts* 2020, Vol. 5, Iss. 1, 16-25
107. Zhao Z., Zhou J., Fan T., Li L., Liu Z, Liu Y., Lu M., An Effective Surface Modification of Polyester Fabrics for Improving the Interfacial Deposition of Polypyrrole Layer, *Preprints.org* 2017, 2017050008. <https://doi.org/10.20944/preprints201705.0008.v1>.
108. Ismar E., Bahadir S.K., Kalaoglu F., Koncar V., Futuristic Clothes: Electronic Textiles and Wearable Technologies, *Global Challenges* 2020, 1900092 (1 of 14)
109. Renard, M.; Puszkarz, A.K. Modeling of Heat Transfer through Firefighters Multilayer Protective Clothing Using the Computational Fluid Dynamics Assisted by X-ray Microtomography and Thermography. *Materials* 2022, 15, 5417.
110. Vassiliadis S., Kallivretaki A., Domvoglou D., Provatidis C., Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art, w: *Advances in Modern Woven Fabrics Technology*, pod red. Vassiliadis S., Intech Open Science, Rijeka, Chorwacja 2011, 41-64
111. Peirce, F.T., The geometry of cloth structure. *Journal of the Textile Institute*, 1937, Vol.28, No. T45, 43-77
112. Nasser S., Hallal A., Hammoud M., Hallal J., Karaki M., Geometrical modeling of yarn's cross-section towards a realistic unit cell of 2D and 3D woven composites, *The Journal of The Textile Institute* 2021, 112:5, 767-782,
113. Gałuszyński S., Woven fabric structures and properties, *Indian Journal of Textile Research* 1987, Vol. 12, 71-77
114. _Chen X., *Modelling and simulation of fibrous yarn materials*, Computer Technology for Textiles and Apparel, Woodhead Publishing Series in Textiles 2011, 93-121
115. Robinson J.F., Rios de Anda I., Moore F.J., Gregson F.K.A., Reid J.P., Husain L., Sear R.P., Royall C.P., How effective are face coverings in reducing transmission of COVID-19?

116. Kremenakova D., Methods for investigation of yarn structure and properties, <https://docplayer.net/20843814-Methods-for-investigation-of-yarn-structure-and-properties.html>
117. YilmazD., Göktepe F., KremenakovaD., Göktepe Ö., Packing Density of Compact Yarns, *Textile Research Journal* 2007, 661-667
118. Nazanin E., Tehran M.A., Latifi M., Khrosro M., Modelling of surface roughness based on geometrical parameters of woven fabrics, *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)* IJFTR 2017, Vol. 42, 43-50
119. Milašius V., An Integrated Structure Factor for Woven Fabrics. Part I: Estimation of the Weave, *The Journal of the Textile Institute* 2000, Vol. 91, No 2, 268-276.
120. Milašius V., An Integrated Structure Factor for Woven Fabrics. Part II: The Fabric-firmness Factor, *The Journal of the Textile Institute* 2000, Vol. 91, No 2, 277-284.
121. Milašius A., Milašius V., New Representation of the Fabric Weave Factor, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2008, Vol. 16, No. 4 (69), 48-51.
122. Milašius A., Milašius V., New Employment of Integrating Structure Factor for Investigation of Fabric Forming, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2005, Vol. 13, No. 1 (49), 44-46
123. Begum M.S., Milašius R., Factors of Weave Estimation and the Effect of Weave Structure on Fabric Properties: A Review, *Fibers* 2022, 10, 74. <https://doi.org/10.3390/fib10090074>
124. Ghasemi R., Mozafari-Dana R., Etrati S.M., Shaikhzadeh Najar S., Comparing the Physical Properties of Produced Sirospun and New Hybrid Solo-Siro Spun Blend Wool/Polyester Worsted Yarns, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2008, Vol. 16, No. 1 (66), 24-27
125. Stoffberg M.E., Hunter I., Botha A., The Effect of Fabric Structural Parameters and Fiber Type on the Comfort-Related Properties of Commercial Apparel Fabrics, *Journal of Natural Fibers* 2015, 12:6, 505-517

126. Das D., Ihtiaque S.M., Comfort Characteristics of Fabrics Containing Twistless and Hollow Fibrous Assemblies in Weft, *Journal of Textile and Apparel Technology and Management* 2004, Vol. 3, Iss. 4, 1-7
127. Varshney, R.K., Kothari V.K., Dhamija S., A study on thermophysiological comfort properties of fabrics in relation to constituent fibre fineness and cross-sectional shapes, *The Journal of The Textile Institute* 2010, 101:6, 495-505
128. Matusiak M., Sikorski K., Influence of the Structure of Woven Fabrics on Their Thermal Insulation Properties, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2011, Vol. 19, No. 5 (88), 46-53
129. Matusiak M. Influence of the Structural Parameters of Woven Fabrics on their Drapeability. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2017, 25, 1(121), 56-64
130. Kenkare N., May-Plumlee T., Fabric Drape Measurement: A Modified Method Using Digital Image Processing, *Journal of Textile and Apparel Technology and Management*, 2005; 4, 3, 1-8
131. Stylios G.K., and Powell N.J., Engineering the drapability of textile fabrics, *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2003, 15, 3-4 211-217.
132. Wang X., Liu X., Hurren C., Physical and mechanical testing of textiles, chapter in: *Fabric testing*, edited by Hu J., Woodhead Publishing, Cambridge England, 2008, 90-124
133. Omeroglu S., Ulku S., An Investigation about Tensile Strength, Pilling and Abrasion Properties of Woven Fabrics Made from Conventional and Compact Ring-Spun Yarns, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2007, Vol. 15, No. 1 (60), 39-42
134. Kumpikaitė E., Analysis of Dependencies of Woven Fabric's Breaking Force and Elongation at Break on its Structure Parameters. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2007, 1(60), 35-38
135. Polska Norma, PN-P-04636:1988 Metody badań wyrobów włókienniczych – Wyroby tkane – Wyznaczenie wrobienia nitek osnowy i wątku.
136. Norma międzynarodowa ISO 211-3:1984(en) Textiles–Woven fabrics–Construction–Methods of analysis–Part 3: Determination of crimp of yarn in fabric.
137. Polska Norma, PN EN 1049-2:2000 Tekstylija – Metody analizy struktury wyrobów tkanych – Wyznaczanie liczby nitek na jednostkę długości.

138. Kostajnsšek K., Dimitrovski K., Use of Extended Cover Factor Theory in UV Protection of Woven Fabric. *Polymers* 2021, 13, 1188, <https://doi.org/10.3390/polym13081188>
139. Urbas R., Sluga F., Bartenjev I., Influence of constructional parameters on UV protective efficiency of fabrics. *Tekstilec* 2004, 47, 308–314
140. Dobnik-Dubrovski P., Golob D., Effects of woven fabric construction and color on ultraviolet protection. *Textile Research Journal* 2009, 79, 351–359
141. Operating Manual FRT MicroSpy® Profile, Version 2.104, FRT the art of metrology™, Bergisch Gladbach, Germany, 2016.
142. Kosiuk G., Matusiak M., Analiza parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni tkanin, *Tygiel* 2021
143. PN EN ISO 12947–2:2017 Tekstylija -- Wyznaczanie odporności płaskich wyrobów na ścieranie metodą Martindale'a -- Część 2: Wyznaczanie zniszczenia próbki roboczej
144. PN EN ISO 12947–3:2017 Tekstylija -- Wyznaczanie odporności płaskich wyrobów na ścieranie metodą Martindale'a -- Część 3: Wyznaczanie ubytku masy
145. Measuring Wear, Michigan Metrology LLC, Welcome to the Surface Roughness Analysis Blog; <https://michmet.com/surface-issue/wear/>