

Studium teoretyczne i doświadczalne
współdziałania kanału z tworzywa
polimerowego z kablem
optotelekomunikacyjnym

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Tomasz Klepka

Studium teoretyczne i doświadczalne
współdziałania kanału z tworzywa
polimerowego z kablem
optotelekomunikacyjnym



Politechnika Lubelska
Lublin 2012

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Elżbieta Bociąga, Politechnika Częstochowska

prof. dr hab. inż. Robert Sikora, Politechnika Lubelska

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2012

ISBN: 978-83-62596-74-4

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: ESUS Agencja Reklamowo-Wydawnicza Tomasz Przybylak

www.esus.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Rozdział 1

ANALIZA ZAGADNIEŃ TEORETYCZNYCH I TECHNOLOGICZNYCH

1.1. Wstęp.....	11
1.2. Wytwory o właściwościach specjalnych.....	14
1.3. Charakterystyka ogólna kanałów optotelekomunikacyjnych.....	19
1.3.1. Wytwarzanie kanałów z tworzywa polimerowego	20
1.3.2. Wytwarzanie dodatkowej warstwy na wewnętrznej powierzchni kanału	21
1.4. Podział i charakterystyka optotelekomunikacyjnych kanałów walcowych	22
1.4.1. Kryterium technologiczne.....	24
1.4.2. Kryterium materiałowe	25
1.4.3. Kryterium konstrukcyjne	26
1.5. Podział i charakterystyka zespołów kanałowych oraz kanałów o kształtach złożonych	28
1.6. Konstrukcja i charakterystyka kabla optotelekomunikacyjnego.....	33
1.7. Istota oddziaływania kanału z kablem optotelekomunikacyjnym.....	35
1.7.1. Metody wprowadzania kabla do wnętrza kanału	36
1.7.2. Ogólne metody badań kabli i kanałów.....	38
1.8. Badania wzajemnego oddziaływania kanału z kablem na stanowiskach konstrukcji własnej	43
1.9. Ocena dotychczasowego stanu literatury, wnioski i ustalenia	48
1.10. Cele naukowe i zakres rozprawy.....	51

Rozdział 2

MODELE MATEMATYCZNE OPISUJĄCE KONTAKT KANAŁU Z KABLEM

2.1. Wstęp	56
2.2. Podstawowe założenia modelowania matematycznego elementów konstrukcyjnych kanału i kabla.....	57
2.2.1. Wyznaczanie najmniejszej wartości promienia kabla.....	59

2.2.2. Wyznaczanie największej wartości promienia kabla.....	63
2.2.3. Wyznaczanie wartości teoretycznego zużycia żeber ślizgowych	67
2.3. Wnioski i ustalenia dotyczące modelowania matematycznego.....	73

Rozdział 3

MODELE NUMERYCZNE PRZEDSTAWIAJĄCE WZAJEMNE WSPÓLDZIAŁANIE KANAŁU Z KABLEM

3.1. Wstęp	74
3.2. Cel badań numerycznych	75
3.3. Podstawowe założenia modelowania elementów konstrukcyjnych kanału i kabla.....	76
3.4. Wyniki analizy numerycznej.....	79
3.5. Wnioski i ustalenia wynikające z modeli numerycznych	85

Rozdział 4

STANOWISKO DO BADAŃ ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH PRZY WSPÓLDZIAŁANIU ŚLIZGOWYM

4.1. Wstęp	86
4.2. Konstrukcja i charakterystyka nowego stanowiska badawczego.....	88
4.2.1. Metodyka badań oraz interpretacja wyników pomiarów	93
4.2.2. Ocena laboratoryjnej porównywalności wyników badań	96
4.3. Badania powtarzalności pomiarów na nowy stanowisku.....	98
4.3.1. Cele i zakres badań doświadczalnych	99
4.3.2. Przebieg oraz wyniki badań	99
4.3.3. Wnioski dotyczące badań na stanowisku	105
4.4. Wnioski i ustalenia.....	107

Rozdział 5

BADANIA DOŚWIADCZALNE KANAŁÓW Z ŻEBRAMI ŚLIZGOWYMI

5.1. Wstęp	108
5.2. Wytwarzanie struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału ...	108
5.2.1. Charakterystyka zarysu profilu rdzenia kształtującego.....	110
5.2.2. Wykonanie kompletu badawczego rdzeni kształtujących do badań	111
5.2.3. Przebieg wytwarzania kanału w linii technologicznej wytłaczania	114

5.3. Badania kanału z żebrami ślizgowymi w warunkach współdziałania z kablem.....	115
5.3.1. Cel i metodyka badań doświadczalnych	116
5.3.2. Wyniki badań.....	117
5.4. Wnioski i ustalenia dotyczące badań kanałów z żebrami ślizgowymi.....	124

Rozdział 6

BADANIA DOŚWIADCZALNE KANALÓW Z WARSTWĄ ŚLIZGOWĄ

6.1. Wstęp	126
6.2. Budowa i działanie instalacji do nanoszenia natryskowego	127
6.3. Charakterystyka doboru emulsji do nanoszenia natryskowego.....	130
6.5. Charakterystyka i ocena otrzymanej warstwy ślizgowej	137
6.5.1. Cel badań	137
6.5.2. Badania kanału z warstwą ślizgową przy współdziałaniu z kablem ...	138
6.5.3. Badania struktury powierzchni warstwy ślizgowej.....	144
6.6. Wnioski i ustalenia dotyczące badań kanałów z warstwą ślizgową.....	146

PODSUMOWANIE

7.1. Wprowadzenie	147
7.2. Wnioski i ustalenia końcowe	148
7.3. Zakończenie	150

LITERATURA

ZAŁĄCZNIKI

STRESZCZENIE

Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie

A, A', B, B'	– punkty charakterystyczne
A, B, C, D	– wierzchołki żeber
$a_{00}, a_{01}, a_{02}, a_{12}, a_{11}, a_{22},$ $b_{00}, b_{01}, b_{02}, b_{12}, b_{11}, b_{22}$	– współczynniki równania regresji
A1, A2, E1, E2, S, SF1, SF2, SF4, SF5, SF6	– rodzaj emulsji wykorzystanej do wytworzenia warstwy ślizgowej
α	– kąt pomiędzy odcinkami łączącymi punkt S z wierzchołkami dwóch kolejnych żeber
b	– długość odcinka BC
BW	– kanał bez warstwy ślizgowej
β	– kąt nachylenia ramy ruchomej
$\beta_{a,b,c}, \beta_{d,e,f}$	– kąty zarysu makrowgłębień
D, D ₁ , D ₂	– średnica bębna pomiarowego
d_1	– średnica kanału
DCA	– kąt zwilżania
df	– liczba stopni swobody przy analizie statystycznej
D_M	– średnica wewnętrzna do wgłębień pomiędzy żebrami,
D_W	– średnica wewnętrzna do wierzchołków żeber
D_Z	– średnica zewnętrzna
e	– podstawa logarytmu naturalnego
$\varepsilon, \varepsilon_{ijk}$	– błąd modelu
F	– siła poosiowa w kablu, siła oporu
\bar{F}	– wartość średnia siły oporu
F_S	– siła oporu przy tarciu statycznym
F_K	– siła oporu przy tarciu kinetycznym
$F_{(ijk)}$	– ogólny zapisu siły oporu (F_S lub F_K)
F_G	– siła pochodząca od obciążenia G
$F_{K(i)}$	– wartość chwilowa siły oporu
$F_{K(S)}$	– wartości siły oporu F_K w funkcji drogi S
$F_S(V, F_G), F_K(V, F_G)$	– modele regresji opisujące zmianę siły przy określonym rodzaju tarcia

FT-IR	– badania reo-fotoakustyczne
FTTH	– technologia szerokopasmowej transmisji sygnału teleinformatycznego w domowych liniach optotelekomunikacyjnych (<i>ang. Fibre to the Home</i>)
φ	– kąt opasania kanału na bębnie pomiarowym
G	– obciążenie końca kabla przy badaniu na stanowisku
h	– wysokość zębra ślizgowego
h_A, h_B	– wysokość trójkąta SAD oraz trójkąta SBC
$h_{a,b,c}, h_{d,e,f}$	– głębokości makrowgłębień
HFC	– fluorowęglowodór
J, K, M, N, P, Q	– punkty charakterystyczne dotyczące żeber ślizgowego
j, k	– proste charakterystyczne
l	– długość powierzchni bocznej zębra
L, L_{\min}, L_{\max}	– długość przemieszczania się kabla
L_{K1}	– długość odcinka pomiarowego kanału
L_{K2}	– długość odcinka kabla
l_{PQ}	– długości łuku w obszarze wierzchołków żeber ślizgowych
m	– masa obciążenia pomiarowego przy badaniu współdziałania kanału i kabla na odcinku prostym
MFR	– masowy wskaźnik szybkości płynięcia
MS	– średnia suma kwadratów przy analizie statystycznej
μ	– współczynnik tarcia
μ_β	– miara współczynnika tarcia przy badaniu współdziałania kanału i kabla na odcinku prostym
n	– liczba żeber
N-R	– przyrostowo - iteracyjna metoda Newtona - Raphsona
O_O	– środek okręgu w chwili początkowej
O_Y	– środek przekroju kabla w położeniu po przemieszczeniu o wartość y_z
Θ	– podziałka kątowna żeber
p	– poziom istotności
PBT	– poli(tereftalan butylenu)
PC	– Poliwęglan
PDMS	– poli(dimetylosiloksan)
PE, PE-HD, PE-MD	– polietylen, polietylen dużej gęstości, polietylen średniej gęstości
PMMA	– poli(metakrylan metylu)
PMWS	– poli(metylowodorosiloksan)
PP	– Polipropylen
PS	– Polistyren
PTFE	– politerafluoroetylen
PTFE	– poli(tetrafluoroetylen)
PVC	– poli(chlorek winylu)
r	– promień kabla
R	– promień wewnętrzny kanału

RI	– rdzeń do kształtowania żeber o wysokości 0,5 mm
RII	– rdzeń do kształtowania żeber o wysokości 1,0 mm
r_{min}	– najmniejsza wartość promienia kabla
r_{max}	– największa wartość promienia kabla
S	– środek przekroju kanału
S_L	– długość styku kanału z kablem
SEM	– skaningowy mikroskop elektronowy
SFE	– swobodna energia powierzchniowa
SI	– tworzywo silikonowe
SK	– suma kwadratów przy analizie statystycznej
$T_{a,b,c}, T_{d,e,f}$	– podziałki makrowgłębień
$U, U_{1(x)}, U_{2(y)}, U_{3(z)}$	– przemieszczenie, kierunki przemieszczenia
σ	– naprężenie rozciągające
V	– prędkość przemieszczania się kabla względem kanału
$W_{(S)}$	– praca potrzebna na pokonanie siły oporu F_K na określonym odcinku drogi S
$W_{BW}, W_{SF4}, W_{SF5}, W_{SF6}$	– wartość pracy dla kanału bez warstwy ślizgowej oraz kanałów z warstwą otrzymaną z poszczególnych emulsji
y_z	– wartość przemieszczenia kabla w wyniku teoretycznego zużycia

Rozdział 1

ANALIZA ZAGADNIEŃ TEORETYCZNYCH I TECHNOLOGICZNYCH

1.1. Wstęp

Zagadnienia teoretyczne i technologiczne, dotyczące kanałów optotelekomunikacyjnych z tworzywa polimerowe, można charakteryzować ze względu na kryteria technologiczne, materiałowe i konstrukcyjne. Kanały w ogólnym pojęciu stanowią wytwory mające przekrój poprzeczny o kształcie pierścienia oraz znaczną długość. Można je efektywnie otrzymywać z różnych tworzyw polimerowych, wykorzystując ogólnie znaną i stosowaną metodę wytłaczania jednoślimakowego. Pierwsze opisy przetwarzania tworzyw tą metodą na skalę przemysłową pojawiły się już w 1857 r., m.in. w opublikowanej w Londynie pracy T. Hancocka [32], a maszyny do przetwórstwa, obecnie nazywane wytłaczarkami, po raz pierwszy opisano w 1879 roku w angielskim patencie, którego autorem był M. Gray [27]. Teoria i technologia przetwórstwa metodą jednoślimakowego wytłaczania została opisana w licznych monografiach [19, 24, 28, 65, 69, 71, 91, 105] oraz publikacjach zwartych autorstwa np.: H. Deckera (1941), K. Wróbla oraz J. Łuczaja (1961), J. M. McKelvey'a (1962), G. Schenkela (1963), A. J. Griff'a (1968), B. Łaczyńskiego (1969), Z. Tadmora oraz Kleina (1970), E. G. Fishera (1970), W. Michaeli (1979), R. Sikory (1982), C. Rauwendalla (1986), K. Wilczyńskiego (1989), J. L. White'a (2003), J. Staśka (2007), J. W. Sikory (2008) i innych [130, 137, 138, 139]. Obecnie maszyny i urządzenia do wytłaczania wytworów z tworzyw polimerowych są dostępne w ofercie polskich Zakładów Maszyn Chemicznych „Metalchem” w Gliwicach, Zakładów Maszyn Kablowych "Zamak” w Krakowie oraz firm

międzynarodowych, takich jak np.: Battenfeld ExtrusionTechnics, Cincinnati Milacron, Reifenhäuser Extrusion, Colmec Spa, Davis Standard, Maillefer Extrusion, Krauss-Maffei i innych. Wykorzystując tego rodzaju maszyny przy spełnieniu określonych warunków przebiegu procesu wytłaczania, można otrzymywać wytwory o dowolnym kształcie, wymiarach i właściwościach [7, 108, 123, 136, 141].

Do grupy takich wytworów zalicza się m.in. kanały, rury, tuby, pręty i kształtowniki. Są one stosowane z powodzeniem od kilkunastu lat do przesyłania różnorodnych mediów: wody, gazu, ścieków, materiałów sypkich, ochrony kabli, a także na elementy konstrukcyjne części maszyn [13, 46].

W dziedzinie techniki optotelekomunikacyjnej z uwagi na potrzebę wytwarzania z tworzyw polimerowych wytworów o budowie złożonej, mających właściwości specjalne, dotychczas stosowane rury są zastępowane nowymi wytworami wytłaczanymi w postaci kanałów optotelekomunikacyjnych. Kanały te konstruuje się w celu ułatwienia procesu układania kabla optotelekomunikacyjnego we wnętrzu kanalizacji telekomunikacyjnej oraz zapewnienia wymaganego stopnia jego ochrony, przez długi okres użytkowania. Wytwory w postaci kanałów przeznaczone do optotelekomunikacji w literaturze obcojęzycznej są znane pod nazwą „kanał kablowy” (*j. niemiecki*: „Kabelkanal”) lub „kanał”, „kanał wewnętrzny” (*j. angielski*: „duct”, „innerduct”) [15, 23, 82]. Najbardziej odpowiednie nazwy używane w języku polskim, ze względu na cechy charakterystyczne oraz określone funkcje to: „kanał z tworzywa polimerowego”, „kanał optotelekomunikacyjny” lub „kanał osłonowy”.

Wytwory tego rodzaju mogą być wytwarzane [99, 110, 129] zarówno z tradycyjnych tworzyw polimerowych, jak i z ich mieszanin, kopolimerów oraz z kompozytów. Charakterystyczną najczęściej niejednorodną geometrycznie konstrukcją ścianki nośnej kanału [12, 91] uzyskuje się w wyniku zastosowania dodatkowych zabiegów technologicznych przy jej wytwarzaniu lub w wyniku stosowania procesów uzupełniających [13, 104, 116]. Specjalne właściwości otrzymanych w ten sposób wytworów pozwalają na wykorzystanie ich w wielu różnych rozwiązaniach technicznych, nie tylko w optotelekomunikacji, ale też w medycynie, budownictwie itd. [48, 111].

Obecnie wytwory w postaci kanałów z tworzywa polimerowego są

stosowane zarówno do osłony cienkich włókien światłowodowych przed oddziaływaniem środowiska naturalnego, jak i w celu uzyskania dużej efektywności umieszczania w ich wnętrzu kabli optotelekomunikacyjnych, teletechnicznych lub energetycznych [33, 35, 43, 220]. Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne kanałów są przedstawione w opisach patentowych, krajowych i zagranicznych. Duża liczba różnorodnych opisów informuje o tym, że jak dotychczas, nie ma uniwersalnego rozwiązania konstrukcyjnego, spełniającego większość formułowanych przez odbiorców wymagań [33, 46]. Ponadto coraz większy stopień skomplikowania konstrukcji kanałów, a także technologii ich wytwarzania, wymusza i uzasadnia prowadzenie badań oraz pomiarów obejmujących coraz szerszy zakres zagadnień teoretycznych i użytkowych dotyczących tej problematyki.

W niniejszej monografii przedstawiono autorską klasyfikację kanałów z tworzywa polimerowego stosowanych w optotelekomunikacji opartą, ze względu na brak innych opracowań, na krajowych i zagranicznych opisach patentowych. Szczegółowo opisano prace własne dotyczące zagadnień kształtowania ścianki kanału w celu uzyskania określonej struktury geometrycznej powierzchni, a także wytwarzania na niej, dodatkowej specjalnej warstwy o dobrych właściwościach ślizgowych. Wykorzystując modelowanie matematyczne oraz modelowanie inżynierskie przedstawiono i wyznaczono najistotniejsze czynniki charakteryzujące efektywność wzajemnego współdziałania kanału z kablem optotelekomunikacyjnym oraz określono wartości tych czynników. Nowatorski charakter badań oraz złożoność opisywanych zjawisk sprawił, że analizę teoretyczną wykonano z wykorzystaniem matematycznego programu Maplesoft, działającego w układzie algebry komputerowej (CAS), oprogramowania Catia V5 (CAD) oraz oprogramowania Abaqus 6.7 opartego na metodzie elementów skończonych (MES).

Analiza teoretyczna w połączeniu z posiadaną wiedzą technologiczną oraz wynikami doświadczeń wykonywanych częściowo w ramach projektów badawczych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (7 T08E 008 09, 7 T08E 061 20 oraz 3T 08E 052 29) pozwoliła na opracowanie nowej metodyki badań elementów konstrukcyjnych wykonanych z tworzyw, zaprojektowanie i wykonanie oryginalnego stanowiska do badań w warunkach oddziaływań ślizgowych oraz

zaprojektowanie i wykonanie instalacji do natryskowego nanoszenia warstw ślizgowych.

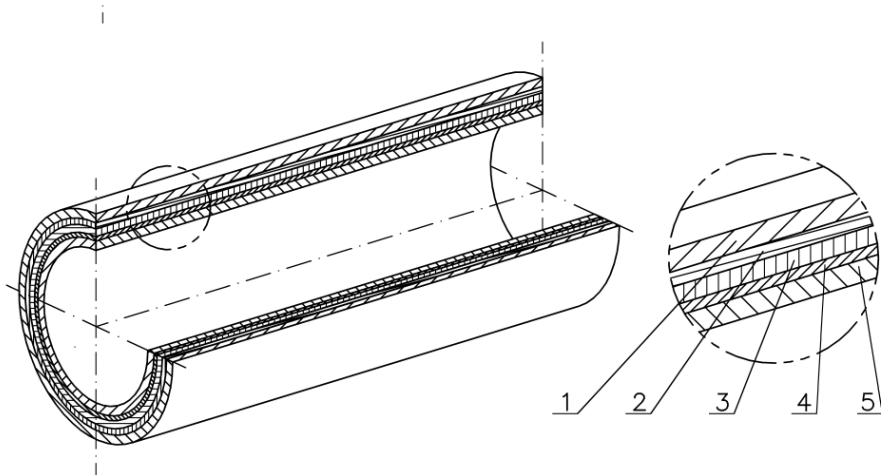
Wyniki przeprowadzonej analizy dotyczącej kanałów z tworzywa polimerowego mogą być wykorzystane m.in. w badaniach nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych kanałów o kształtach złożonych oraz innych wytworów wytłaczanych, działających w warunkach wzajemnego współdziałania z innymi elementami konstrukcyjnymi wykonanymi z różnych materiałów.

1.2. Wytwory o właściwościach specjalnych

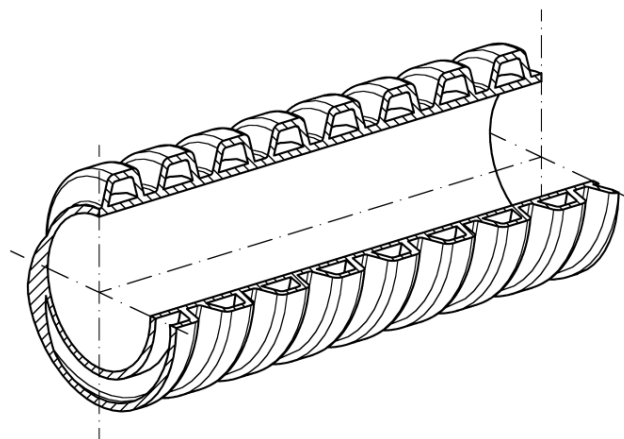
Właściwości specjalne (ślizgowe, magnetyczne itp.) można nadawać wytworom z tworzyw polimerowych na wiele różnych sposobów. Między innymi poprzez odpowiednie ukształtowanie narzędzia przetwórczego, kształtującego wybraną powierzchnię lub określony obszar wytworu, zmianę warunków przetwórstwa lub poprzez wykonanie na jego powierzchni dodatkowych warstw [108, 129, 141]. Efektem tych działań jest m.in. możliwość otrzymywania w linii technologicznej wytłaczania nowych wytworów (tab.1), których właściwości znacznie różnią się od wytworów konwencjonalnych [12, 37, 48, 71, 91]. Wymienione sposoby można także wykorzystać do wytwarzania kanałów z tworzywa polimerowego, przeznaczonych do ochrony kabli optotelekomunikacyjnych [82].

Uwzględniając wymagania konstrukcyjne oraz specyfikę przebiegu procesu przetwórstwa w linii technologicznej wytłaczania, otrzymane kanały mogą charakteryzować się odpowiednią budową ścianki nośnej: litą, porowatą lub warstwową, mieć złożoną strukturę geometryczną powierzchni lub charakteryzować się konstrukcją złożoną [174]. Kanały o konstrukcji złożonej mogą składać się z parzystej lub nieparzystej liczby dopełniających się przestrzennie pojedynczych wytłoczyn, wytwarzanych bezpośrednio na jednym stanowisku technologicznym lub na kilku stanowiskach [158]. Poprzez wprowadzenie dodatkowych procesów uzupełniających oraz zabiegów technologicznych w obszarze za głowicą wytłaczarską, jest możliwe wytwarzanie kanałów o ściśle określonych cechach i właściwościach ścianki nośnej. Pozwala to m.in. na uzyskanie zwiększonej wytrzymałości mechanicznej kanałów [191, 193], odpowiednich cech ich warstwy wierzchniej [110, 188, 189], a także konstrukcji ścianki o budowie hybrydowej, będącej połączeniem tworzywa z elementem metalowym [91].

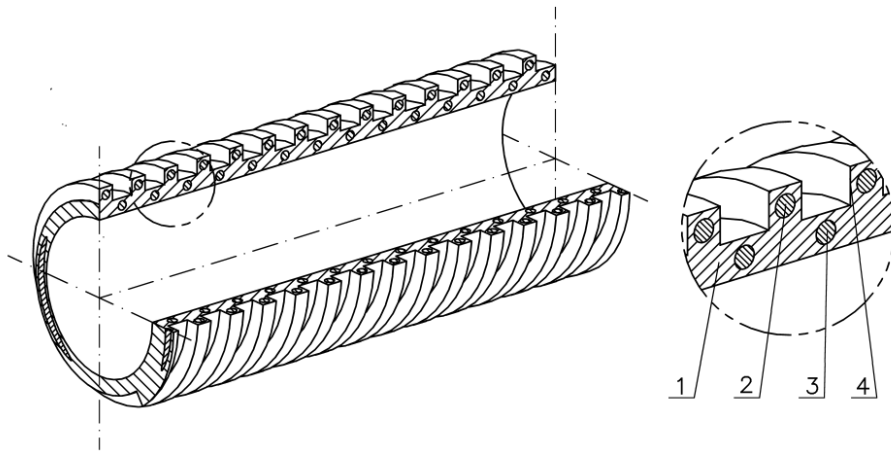
Wytwory o zwiększonej odporności na działanie nacisków zewnętrznych można otrzymać dzięki wykonaniu ścianki wielowarstwowej (rys.1), zastosowaniu odpowiedniego jej kształtu (rys. 2) lub wprowadzeniu dodatkowego wzmocnienia elementem metalowym (rys. 3). Rozwiązania te pozwalają na uzyskanie zwiększonej wytrzymałości mechanicznej całego wytworu, dzięki czemu jest możliwe przenoszenie dużo większych wartości obciążeń, niż w przypadku wytworów tradycyjnych.



Rys. 1. Kanał o ściance wielowarstwowej wykonanej z różnych tworzyw polimerowych: 1 – warstwa zewnętrzna, 2 – warstwa pośrednia, 3 – warstwa wewnętrzna, 4 – dodatkowa warstwa wzmacniająca, 5 – warstwa wewnętrzna [170]

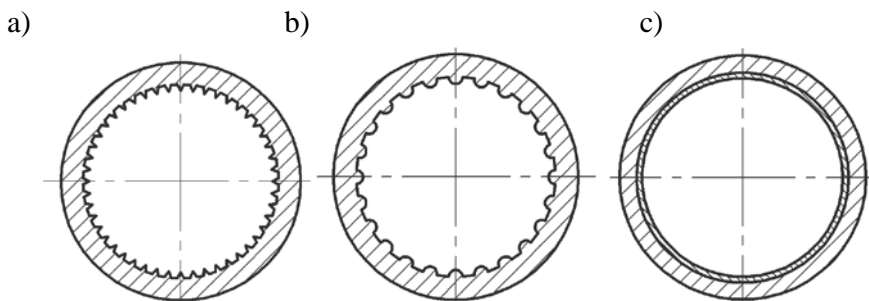


Rys. 2. Kanał o ściance strukturalnej z powtarzającym się elementem geometrycznym mającym w przekroju wzdłużnym zarys trapezu [48]



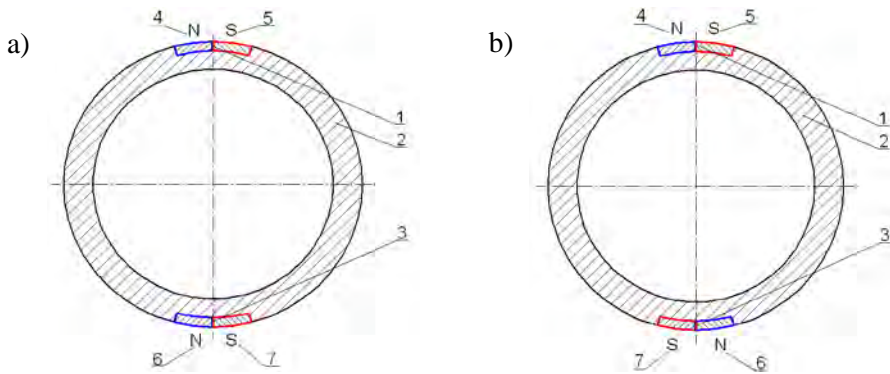
Rys. 3. Kanał z metalowym elementem wzmacniającym umieszczonym w ścianie nośnej zwiększającym wytrzymałość mechaniczną: 1—ścianka nośna, 2 i 3 – element wzmacniający, 4 –żebro zewnętrzne [48, 170]

Do wytworów wytłaczanych o właściwościach specjalnych otrzymywanych metodą wytłaczania, można zaliczyć także te, które wykazują polepszone właściwości tribologiczne [65, 71, 91, 138]. W tym przypadku powierzchnię ścianki wytworu wytwarza się celowo kształtując na jej wybranej powierzchni charakterystyczne makrowzniesienia – żebra ślizgowe o różnych wymiarach (rys. 4) [154, 161, 167] lub wykonując dodatkową warstwę ślizgową w procesie wytwarzania z zastosowaniem metody współwytłaczania lub natryskiwania [115, 137].



Rys. 4. Przekrój poprzeczny walcowego kanału mającego różną powierzchnię wewnętrzną: a) kanał z żebrami ślizgowymi o przekroju trójkątym, b) kanał z żebrami ślizgowymi o przekroju kołowym, c) kanał z warstwą ślizgową [154]

Kolejnymi przykładami (rys. 5) uzyskania w wytworze cech specjalnych są kanały wielowarstwowe o hybrydowej konstrukcji ścianki. Powstają one w wyniku połączenia tworzywa polimerowego z elementem metalowym o określonych właściwościach fizycznych. W przypadku, gdy elementem metalowym jest ferromagnetyk, otrzymany kanał ma także właściwości magnetyczne [55]. W wyniku kodowania magnetycznego, można w ściance kanału utworzyć trwały zapis magnetyczny i prowadzić późniejszą zdalną jego identyfikację po umieszczeniu kanału w gruncie [92, 203].



Rys. 5. Przekrój poprzeczny walcowego kanału z paskami ferromagnetycznymi na powierzchni zewnętrznej: a) kanał z biegunami magnetycznymi o przebiegu równoległym, b) kanał z biegunami magnetycznymi o przebiegu przemiennym: 1 i 3 – paski ferromagnetyczne, 2 – ścianka nośna, 4, 5, 6, 7 – bieguny paska ferromagnetycznego N-S [48, 203]

Podział oraz dokładniejszą charakterystykę wytworów o właściwościach specjalnych można przeprowadzać uwzględniając żadaną do uzyskania właściwość lub cechę charakterystyczną (tab.1). Cechy charakterystyczne wytworom wytłaczanym można także nadawać tylko na określonej powierzchni lub w ściśle określonym obszarze, w zależności od wymaganych szczegółowych zastosowań technicznych.

Wytwory z tworzyw polimerowych o właściwościach specjalnych

Żądana właściwość lub cecha podlegająca zmianie	Charakterystyka wytworu	Przykład konstrukcji
wytrzymałość mechaniczna	wytwór odporny na działanie obciążeń zewnętrznych oraz wewnętrznych, spowodowanych naciskiem gruntu lub ciśnienia przesyłanego medium	<ul style="list-style-type: none"> – kanał wielowarstwowy wzmocniony włóknem szklanym lub elementami metalowymi, – kanał z żebrami na powierzchni zewnętrznej o przebiegu poprzecznym, wzdłużnym lub śrubowym
właściwości tribologiczne	wytwór o małej wartości współczynnika tarcia na powierzchni wewnętrznej, przy przesyłaniu określonego medium lub współdziałaniu z kablem	<ul style="list-style-type: none"> – kanał z żebrami ślizgowymi na powierzchni wewnętrznej, – kanał z warstwą ślizgową natrykiwaną lub współwytłaczaną
właściwości magnetyczne	wytwór z dodatkowymi elementami o właściwościach magnetycznych lub mający specjalną warstwę umożliwiającą trwały zapis sygnału magnetycznego w celu późniejszej jego lokalizacji i identyfikacji	– kanał z fragmentem ścianki z umieszczonym w niej stalowym elementem ferromagnetycznym mającym określony kod magnetyczny
odporność na zapłon i spalanie	wytwór samogasnący o dużej odporności na bezpośrednie działanie płomienia oraz ograniczonej emisji toksycznych produktów rozkładu	– kanał o ściance z tworzywa zawierającego składniki dodatkowe opóźniające palenie, (halogenowe lub bezhalogenowe)
odporność na działanie związków chemicznych	wytwór odporny na degradację w wyniku działania związków chemicznych i biologicznych	– kanał wielowarstwowy odporny na czynniki aktywne chemiczne i biologiczne

1.3. Charakterystyka ogólna kanałów optotelekomunikacyjnych

Kanały z tworzywa polimerowego przeznaczone do optotelekomunikacji, energetyki lub teletechniki należą do wytworów o właściwościach specjalnych. Kable optotelekomunikacyjne zawierające włókna światłowodowe, mają mniejszą wytrzymałość mechaniczną w porównaniu do kabli z nośnikami sygnału wykonanymi z metalu. Dlatego też podczas budowy układów kanałowych dąży się do tego aby elementy, z których są one wykonywane, umożliwiły łączenie i układanie jak najdłuższych odcinków instalacyjnych oraz zapewniły żądany stopień ochrony umieszczanego w nich kabla optotelekomunikacyjnego [157,158]. Wzajemne współdziałanie elementów konstrukcyjnych kanału z kablem, zachodzi w tym przypadku na wewnętrznej powierzchni kanału i zewnętrznej powierzchni kabla. Podczas procesu umieszczania kabla w kanale działające na niego złożone wymuszenia zewnętrzne o wartości proporcjonalnej do oporów jego ruchu wywołują w kablu niekorzystne naprężenia rozciągające, które mogą spowodować jego uszkodzenie[33, 127].

Rozwiązanie tego problemu wymaga zapewnienia odpowiednich właściwości ślizgowych na wewnętrznej powierzchni kanału oraz dużej odporności całej konstrukcji na działanie czynników zewnętrznych, przy jednoczesnym spełnieniu określonych wymagań eksploatacyjnych i ekonomicznych prowadzenia procesu ich wytwarzania [82, 106].

Żądane właściwości kanału [110, 204] można uzyskać stosując do jego wytworzenia odpowiednie tworzywo polimerowe oraz tworząc na jego powierzchni wewnętrznej odpowiednią strukturę geometryczną lub dodatkową warstwę ślizgową [170]. Analizując możliwości konstrukcji ścianki nośnej kanału można w procesie wytwarzania kształtować wymagane elementy struktury geometrycznej warstwy wewnętrznej lub zewnętrznej, tworząc niezbędne makrowzniesienia lub makrowgłębienia. Mogą one przebiegać w układzie ciągłym lub nieciągłym, wzdłużnym, poprzecznym, śrubowym lub na przemian skrętnym. Ponadto kształt przekroju poprzecznego makronierówności może być różny: trójkątny, półkolisty lub trapezowy [154]. Dodatkowe zmniejszenie oporów ruchu kabla w kanale jest możliwe dzięki pokryciu powierzchni wytłoczyny w procesie współwytłaczania dodatkową warstwą z tworzywa polimerowego, charakteryzującą się dobrymi właściwościami ślizgowymi [169, 176].

W przypadku, gdy jest wymagana większa liczba kanałów lub gdy istnieje potrzeba wprowadzenia do jego wnętrza kabla o mniejszej średnicy, można zastosować rozwiązanie „zespołu kanałowego” lub „kanału o kształtach złożonych”. Zespół kanałowy może składać się z określonej liczby walcowych lub niewalcowych wytworów, a kanał o kształtach złożonych może mieć odrębne tunele funkcjonalne scalone ze ścianką w jednolity wytwór. Tego rodzaju wytwory mogą być wykonane z różnych tworzyw, także z charakterystycznymi elementami konstrukcyjnymi w postaci żeber lub rowków, wykonanymi na żądanej powierzchni tunelu funkcjonalnego [51].

1.3.1. Wytwarzanie kanałów z tworzywa polimerowego

Kanały z tworzywa polimerowego o różnych kształtach i wymiarach można wytwarzać w procesie wytłaczania ślimakowego, jak także współwytłaczania [63, 91, 109, 108]. Do wszystkich dostępnych metod przetwórstwa można stosować dodatkowe procesy technologiczne poprawiające wybraną cechę kanału, ważną na przykład z uwagi na funkcję jaką ma spełniać lub warunki w jakich będzie eksploatowany.

Wspomnianymi metodami wytwarza się także wytwory osiowo-symetryczne, stosowane jako kanały do optotelekomunikacji. Przebieg procesu wytłaczania jest znany z literatury [26, 89, 104]. Ciągły charakter tego procesu oraz możliwość dokładnego ustalenia warunków przetwórstwa, przy określonym rodzaju i charakterystyce tworzywa przetwarzanego, pozwala na otrzymywanie kanału o powtarzalnych właściwościach [102, 116]. W wyniku odpowiedniego dobrania elementów składowych linii technologicznej oraz warunków przetwórstwa, jest możliwe uzyskanie kanałów o ściśle określonych właściwościach, kształtach i wymiarach [13, 63, 156] w zależności od potrzeb.

Główne elementy składowe linii technologicznej wytłaczania, do których należy: układ uplastyczniający i układ napędowy wytłaczarki, układ narzędziowy-głowica wytłaczarska, kalibrator oraz odciąg, a także podzespoły wyposażenia takie jak: elementy sterowania, czujniki pomiaru temperatury, ciśnienia, grubości ścianki, są ciągle udoskonalane. Z uwagi na to maszyny, narzędzia i elementy składowe linii muszą być odpowiednio dobrane do określonego rozwiązania konstrukcyjnego wytworu.

Wykonanie na wewnętrznej powierzchni kanału wymaganej struktury geometrycznej, jest możliwe w wyniku zastosowania określonego kształtu narzędzia – głównie rdzenia kształtującego głowicy wytłaczarskiej. Warunki prowadzenia procesu oraz dokładność wykonania elementów geometrycznej powierzchni zewnętrznej narzędzia przetwórczego w dużym stopniu wpływają na ostateczny kształt i wymiar powierzchni wewnętrznej kanału. Do tego rodzaju zadań przydatne są nowoczesne narzędzia komputerowego projektowania inżynierskiego CAD/CAM/CAE oraz programy umożliwiające badania modelowe i symulacyjne, na przykład z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Programy te ułatwiają efektywne projektowanie wymaganych kształtów narzędzi, prowadzenie obliczeń, a także wizualizacje przebiegu zjawisk na powierzchniach współdziałających elementów konstrukcyjnych, których obserwacja tradycyjnymi metodami jest znacznie utrudniona [20, 90, 95].

1.3.2. Wytwarzanie dodatkowej warstwy na wewnętrznej powierzchni kanału

Wytwarzanie dodatkowej warstwy o określonych właściwościach na wewnętrznej powierzchni kanału, jest możliwe w wyniku przeprowadzenia procesu współwytłaczania lub natryskiwania. Obie metody polegają na doprowadzeniu do głowicy wytłaczarskiej dodatkowego tworzywa, innego niż to, z którego jest wytworzona ścianka nośna wytworu [124, 134]. W przypadku współwytłaczania jest to strumień uplastycznionego tworzywa, natomiast przy natryskiwaniu ciekle emulsja zawierająca aktywny środek ślizgowy. Zastosowanie tych metod pozwala na otrzymywanie dodatkowych warstw przylegających adhezyjnie do żądanej ścianki kanału o wymaganej grubości oraz strukturze geometrycznej powierzchni.

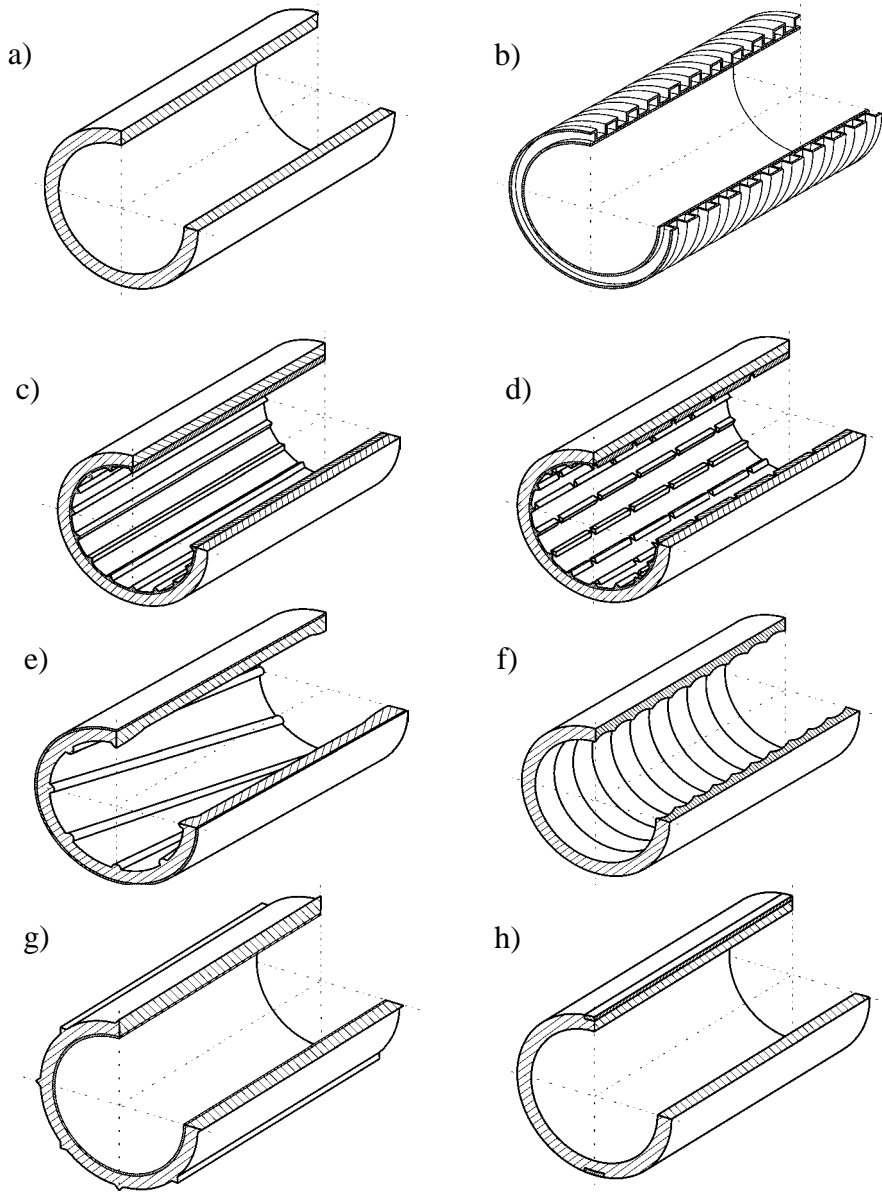
Kanały składające się z dwóch lub większej liczby tworzyw różniących się strukturą, barwą lub właściwościami można wykonywać metodą współwytłaczania [91, 102, 126, 137]. Proces uplastyczniania w tym przypadku jest prowadzony przy jednoczesnym użyciu dwu lub większej liczby układów uplastyczniających oraz pojedynczego narzędzia – głowicy wytłaczarskiej [13, 63, 78, 116]. Właściwości wytwarzanego kanału zależą od ilości warstw oraz rodzaju zawartych w tworzywie dodatków [59, 155, 164, 187]. Warstwa na wewnętrznej powierzchni kanału o żądanych właściwościach ślizgowych wykazuje jednak stosunkowo dużą grubość,

która w zależności od grubości ścianki kanału zawiera się w zakresie od 0,6 do 1,5mm. Składa się ona z ok. 93–97 % tworzywa polimerowego o zbliżonej charakterystyce do tego, z którego jest wykonana ścianka kanału, a aktywny środek ślizgowy stanowi tylko niewielki 3–7 % udział w całkowitej masie współwytłaczanej warstwy [157, 192, 91]. W celu uzyskania równomiernego rozłożenia cząstek aktywnego środka ślizgowego na całej powierzchni wewnętrznej kanału, istnieje potrzeba stosowania dodatkowych stabilizatorów i modyfikatorów [6, 11, 18, 57, 125, 146].

Inną metodą, którą można zastosować do poprawy właściwości ślizgowych wewnętrznej powierzchni kanału, jest stosunkowo nowy proces technologiczny-natryskiwanie emulsji z aktywnym środkiem ślizgowym [45,196, 115]. Może on być przeprowadzany w głowicy wytłaczarskiej podczas procesu wytwarzania kanału lub bezpośrednio po procesie, na oddzielnym stanowisku technologicznym. Natryskiwanie różnego rodzaju cienkich warstw, o właściwościach specjalnych metodą rozpylenia emulsji w strumieniu sprężonego powietrza, jest znane już od kilkunastu lat i z powodzeniem wykorzystywane np. do powlekania powierzchni metalowych powłokami polimerowymi lub materiałami malarskimi. Metoda ta nie była jednak wykorzystywana w procesie wytwarzania warstw ślizgowych na wewnętrznych powierzchniach kanałów z tworzywa polimerowego przeznaczonych do optotelekomunikacji.

1.4. Podział i charakterystyka optotelekomunikacyjnych kanałów walcowych

Kanały z tworzyw polimerowych przeznaczone do optotelekomunikacji otrzymywane metodą wytłaczania mogą różnić się między sobą w dużym stopniu (rys. 6), a ich podział i charakterystyka z uwagi na brak wiadomości w ogólnie dostępnej literaturze, jest utrudniony. W publikacjach [76, 176, 196, 225] można znaleźć dane na temat maszyn, urządzeń, narzędzi oraz warunków prowadzenia procesu wytłaczania w linii technologicznej [38, 71, 81, 228].



Rys. 6. Przykłady walcowych kanałów z tworzywa polimerowego o różnej makrostrukturze geometrycznej powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej w przekroju poprzecznym: a) konwencjonalny kanał walcowy (rura), b) kanał o ściance segmentowej, c) kanał ze wzdłużnymi makrowzniesieniami o ciągłym przebiegu, d) kanał ze wzdłużnymi makrowzniesieniami o nieciągłym przebiegu, e) kanał ze wzdłużnymi makrowzniesieniami o śrubowym przebiegu, f) kanał z poprzecznymi makrowzniesieniami o półkolistym kształcie, g) kanał ze wzdłużnymi makrowzniesieniami na powierzchni zewnętrznej, h) kanał ze ścianką hybrydową - z paskami wykonanymi z metalu [41]

Brak jest także kompleksowej analizy rozwiązań konstrukcyjnych kanałów, informacji na temat metod ich wytwarzania oraz metod badań. Wszystko to powoduje, że nowe rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne kanałów mogą być analizowane głównie na podstawie lektury opisów patentowych krajowych i zagranicznych, a także wyników badań doświadczalnych, w tym doświadczeń własnych [154, 155, 156]. Realizacja celu poznawczego, dotyczącego problematyki optotelekomunikacyjnych kanałów z tworzywa polimerowego, wymaga wprowadzenia określonej klasyfikacji tego rodzaju wytworów. Wykonana we własnym zakresie klasyfikacja oparta została na trzech głównych kryteriach: technologicznym, materiałowym oraz konstrukcyjnym. Dzięki temu jest możliwy podział kanałów w ramach określonego kryterium oraz dokładniejsza charakterystyka zakresu możliwych do uwzględnienia rozwiązań.

1.4.1. Kryterium technologiczne

Kanały optotelekomunikacyjne wytwarza się stosując znane metody przetwórstwa tworzyw [115]. Z uwagi na przyjęte kryterium technologiczne (rys. 7), metody te można podzielić na bezpośrednie i pośrednie (mieszane).

Metodami bezpośrednimi wytwarza się kanały jednolite geometrycznie o walcowej ścianie wewnętrznej i zewnętrznej bez dodatkowych procesów. Natomiast w przypadku wytwarzania kanałów mających co najmniej jedną ściankę niejednolitą geometrycznie stosuje się metody pośrednie.

W przypadku kanałów niejednorodnych geometrycznie, celowo ukształtowane makrowzniesienia i makrowgłębienia są efektem dodatkowych zabiegów technologicznych prowadzonych podczas procesu ich wytwarzania. W efekcie tego, uzyskuje się polepszoną ściśle określoną właściwość lub cechę charakterystyczną kanału. Można także wytwarzać kanały prowadząc dodatkowe procesy technologiczne, w wyniku których modyfikuje się żadaną powierzchnię wewnętrzną lub zewnętrzną kanału.

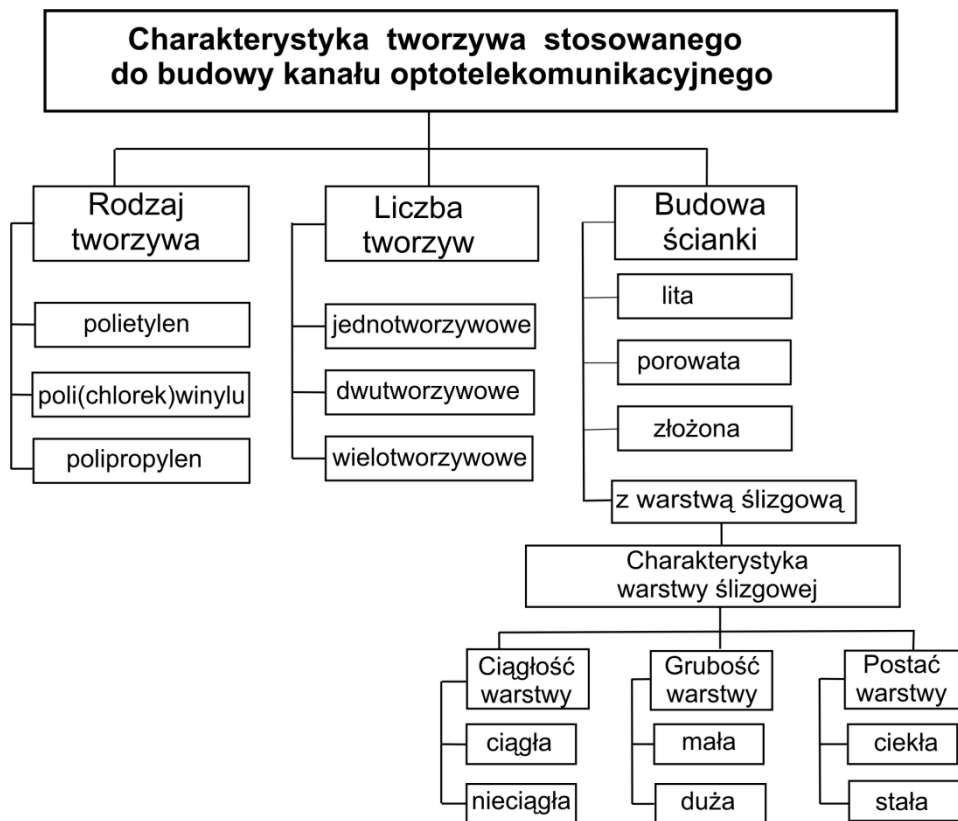
Do procesów tych zaliczyć można m.in. natryskiwanie cienkiej warstwy emulsji o właściwościach ślizgowych, sieciowanie lub aktywowanie (np. metodą wyładowań koronowych) powierzchni i inne [115, 144, 145, 148].



Rys. 7. Podział metod wytwarzania optotelekomunikacyjnych kanałów z tworzywa polimerowego zgodnie z kryterium technologicznym.

1.4.2. Kryterium materiałowe

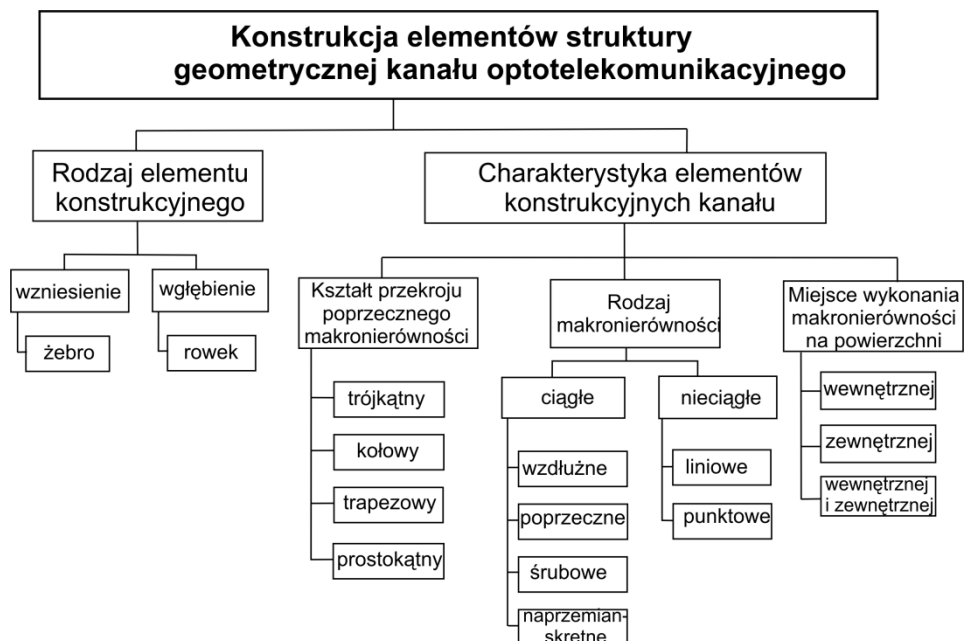
Kanały optotelekomunikacyjne można wytwarzać z różnych tworzyw polimerowych [117]. Z tego też względu rodzaj użytych tworzyw (np. PE, PVC, PP), liczba warstw tworzących ściankę nośną oraz jej budowa może stanowić kolejne kryterium ich podziału (rys. 8). W przypadku warstwy ślizgowej dodatkowa analiza ujawniła, że istotnymi wielkościami, które charakteryzują cechy tej warstwy są: ciągłość warstwy – określająca stopień jej przylegania do powierzchni kanału, grubość warstwy oraz jej postać, która może być stała lub ciekła.



Rys. 8. Podział optotelekomunikacyjnych kanałów z tworzywa polimerowego z uwagi na kryterium materiałowe

1.4.3. Kryterium konstrukcyjne

Kolejnym kryterium charakteryzującym optotelekomunikacyjne kanały z tworzywa polimerowego jest ocena rozwiązań konstrukcyjnych (rys. 9). W tym przypadku przeprowadzona analiza konstrukcji kanałów odniesiona została do charakterystycznych elementów makronierówności geometrycznych kanału, celowo wytworzonych na jego powierzchni wewnętrznej. Wyróżnić można elementy w rodzaju wzniesienia lub wgłębienia, a także wykonać ich podział z uwagi na charakterystykę otrzymanych makronierówności. Charakterystyka ta dotyczy kształtu przekroju poprzecznego, rodzaju oraz miejsca wykonania [118,171, 185].



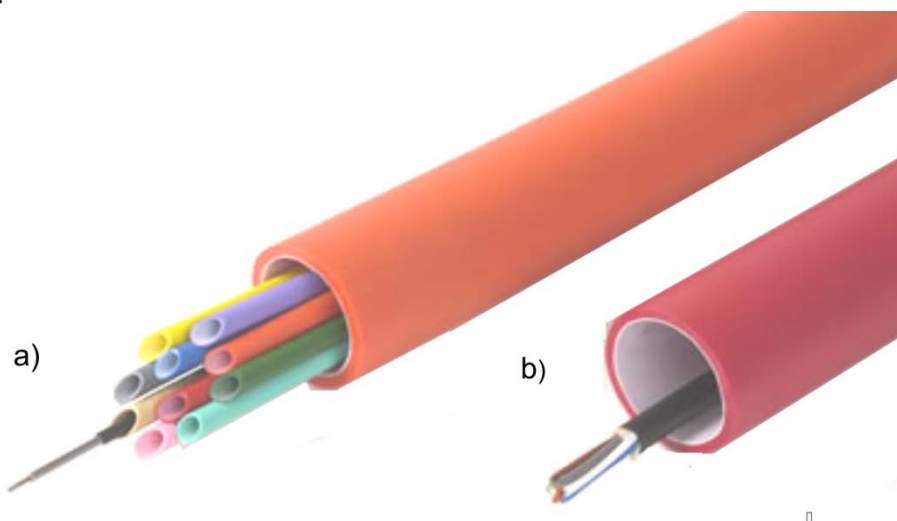
Rys. 9. Podział optotelekomunikacyjnych kanałów z tworzyw polimerowych z uwagi na charakterystykę konstrukcyjną elementów kanału

Elementy konstrukcyjne: żebra lub rowki mogą mieć w przekroju poprzecznym różnorodne kształty geometryczne, na przykład: trójkątny, kołowy, trapezowy lub prostokątny. Ich usytuowanie w stosunku do osi kanału może być w układzie ciągłym lub nieciągłym, w kierunku wzdłużnym, poprzecznym, zgodnie z przebiegiem linii śrubowej lub naprzemianskrętne.

Charakterystyczne elementy konstrukcyjne (wzniesienia lub wglębienia) mogą być wykonane na powierzchni wewnętrznej, zewnętrznej lub także na obu powierzchniach, w zależności od funkcji oraz przeznaczenia kanału, w którym będą umieszczane różne rodzaje kabli [51].

1.5. Podział i charakterystyka zespołów kanałowych oraz kanałów o kształtach złożonych

Współczesne kable optotelekomunikacyjne mają coraz mniejsze wymiary, przy jednoczesnym zwiększeniu ich właściwości transmisyjnych [33]. Wymaga to także zmian konstrukcji kanału, w celu odpowiedniego dostosowania go do budowy i wymiarów kabla. Zmniejszenie wymiarów kabla pozwala na umieszczenie w tradycyjnym kanale większej ich liczby (rys. 10), co z kolei umożliwi uzyskanie zwartej konstrukcji oraz obniżenie kosztów wytwarzania. Rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne tego rodzaju wytworów tworzy się z grupy pojedynczych kanałów z tworzywa polimerowego, które następnie umieszcza się w kanale o średnicy większej. W efekcie tego otrzymuje się wytwór złożony zwany zespołem kanałowym [51].



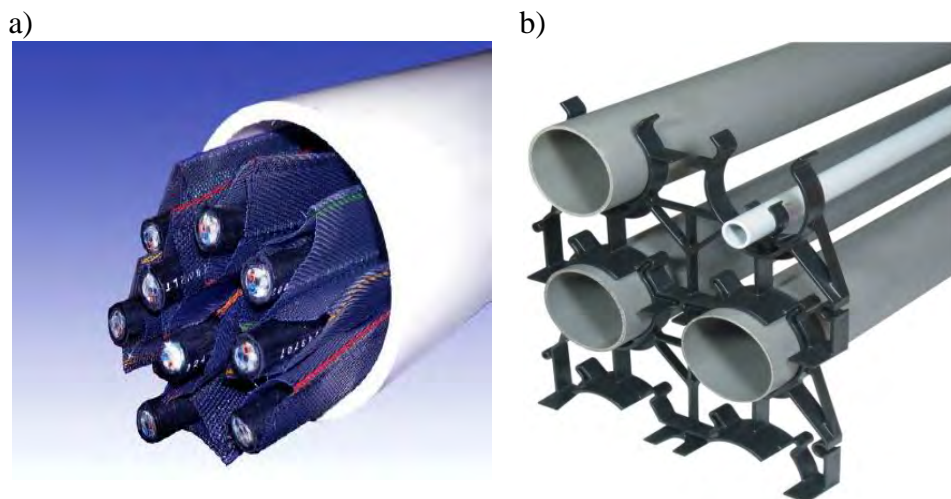
Rys. 10. Wygląd zespołu kanałowego oraz kanału walcowego: a) zespół składający się z kilku walcowych kanałów o mniejszych wymiarach z umieszczonym w nim mikrokablem, b) kanał walcowy o konstrukcji tradycyjnej z umieszczonym w nim kablem optotelekomunikacyjnym [91]

Innym rozwiązaniem optotelekomunikacyjnych zespołów kanałowych jest konstrukcja, składająca się z elastycznych tuneli wykonanych z taśm poliestrowych, do których wprowadza się poszczególne kable (rys. 11a). W efekcie tego uzyskuje się wymagane, wzajemne ich oddzielenie, jednak

z uwagi na małą sztywność tuneli utrudnione jest wprowadzenie kabli o większych długościach.

W zależności od wymiarów kabla zespół kanałowy może być umieszczany wewnątrz kanału walcowego (rys. 10a) lub tworzyć przestrzenną grupę pojedynczych kanałów, połączoną ze sobą zewnętrznymi elementami mocującymi (rys. 11b), w postaci dodatkowych obejm, zatrzasków lub kształtowych wsporników [51].

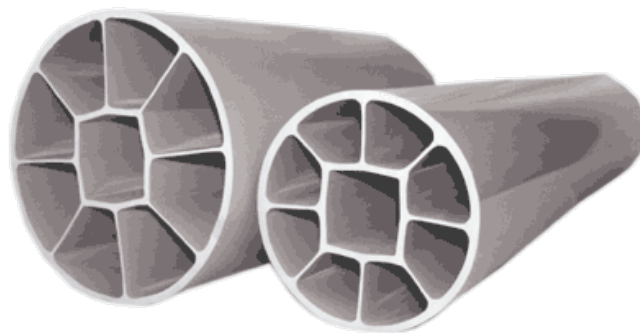
Tego rodzaju rozwiązanie zespołu kanałowego z uwagi na potrzebę łączenia poszczególnych kanałów składowych dodatkowymi elementami, a także z uwagi na znaczne wymiary, w dużym stopniu komplikuje prowadzenie budowy linii optotelekomunikacyjnej.



Rys. 11. Wygląd zespołu kanałowego składającego się: a) z grupy elastycznych taśm poliestrowych z umieszczonymi w nich kablami światłowodowymi, b) z kilku pojedynczych wytłoczyn walcowych połączonych zewnętrznymi elementami mocującymi [51, 104]

Najnowsze konstrukcje zespołów kanałowych, nie mające wymienionych ograniczeń, uzyskuje się wytwarzając kanał stanowiący jednolity wytwór, otrzymany bezpośrednio w procesie wytwarzania w linii technologicznej wytłaczania. Otrzymany kanał o kształcie złożonym składa się, w zależności od określonego przeznaczenia, z wymaganej liczby tuneli funkcjonalnych (rys. 12).

Konstrukcje te mają kształt w przekroju poprzecznym różny od walcowego, z charakterystycznymi przegrodami, które stanowią poszczególne tunele funkcjonalne [162, 180].



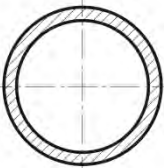
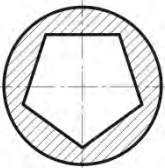
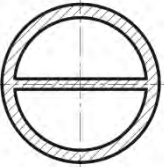
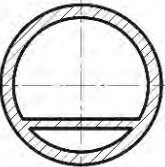

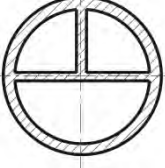

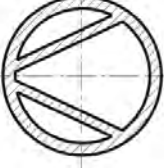





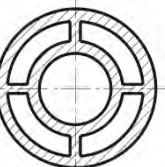


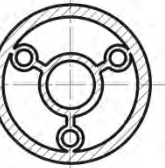
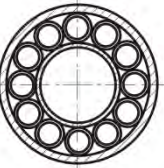
Rys. 12. Wygląd kanałów o kształcie złożonym mających dziewięć tuneli funkcjonalnych [51]

W zależności od przeznaczenia, tunele mogą mieć różne wymiary, a ścianki lub przegrody (tab. 2) mogą charakteryzować się dodatkowo zróżnicowaną strukturą geometryczną [165]. Dzięki różnym kształtom i wymiarom poszczególnych tuneli funkcjonalnych można wprowadzać do ich wnętrza określony rodzaj oraz liczbę kabli lub przewodów [163, 168, 180, 113].

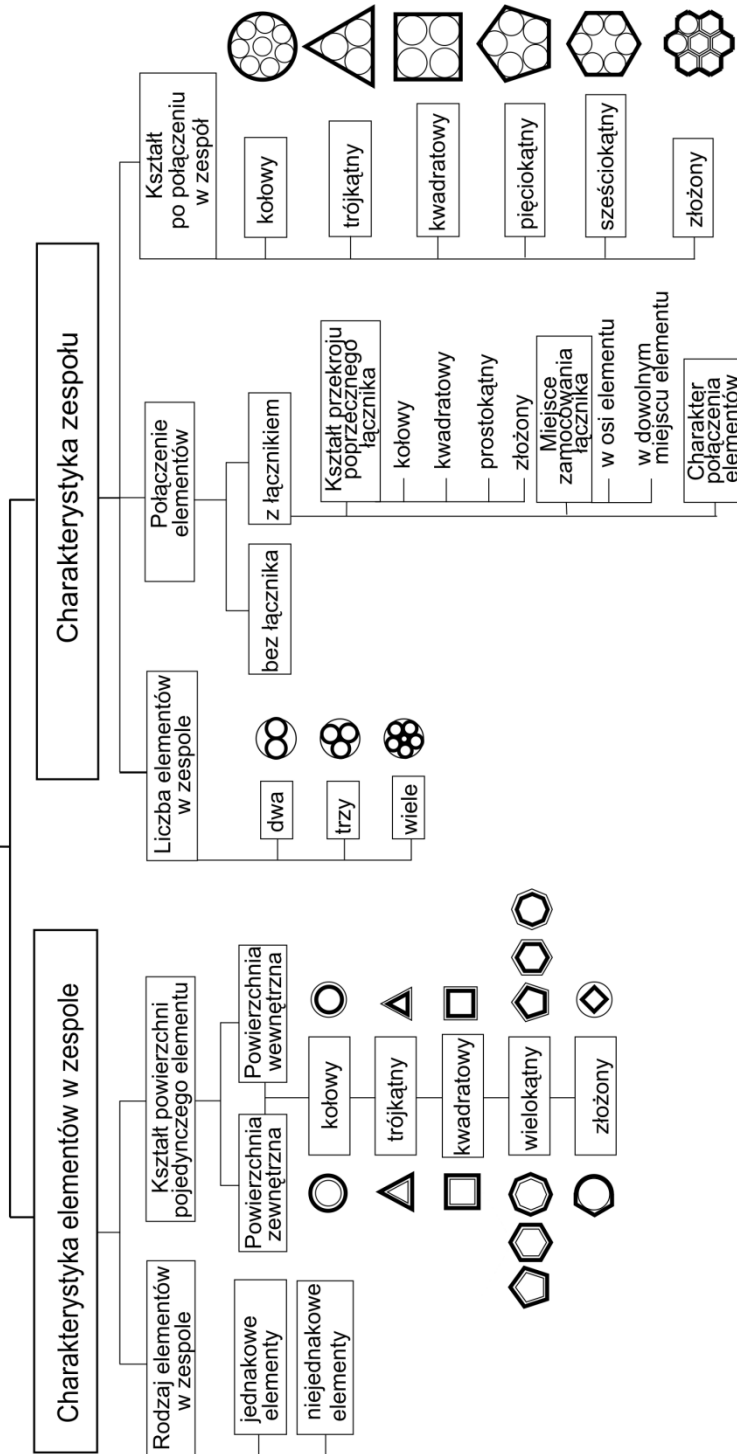
Przeprowadzona przez autora odrębna analiza [48, 51] dotycząca konstrukcji zespołów kanałowych oraz kanałów o kształtach złożonych pozwoliła na podział i dokładną charakterystykę tego rodzaju wytworów. Jako podstawowe kryterium klasyfikacji kanałów przyjęto liczbę tuneli funkcjonalnych oraz kształt w przekroju poprzecznym, a dodatkowe kryterium dotyczyło charakterystyki całego zespołu kanałów jako zbioru pojedynczych elementów składowych. Wyróżniono zespół kanałowy (rys. 13) z uwagi na: charakterystykę elementów w zespole, rodzaj oraz kształt pojedynczego elementu w kanale, jak też charakterystykę całego zespołu z uwagi na liczbę zastosowanych elementów, a także sposób ich połączenia w celu uzyskania ostatecznego kształtu po połączeniu w zespół.

Tabela 2

**Charakterystyka i podział kanałów o kształtach złożonych
w zależności od liczby tuneli funkcjonalnych**

Jeden tunel				
Dwa tunele				
Trzy tunele				
Cztery tunele				
Pięć tuneli				
Wiele tuneli				

Zespół kanałowy optotelekomunikacyjny o kształtach złożonych

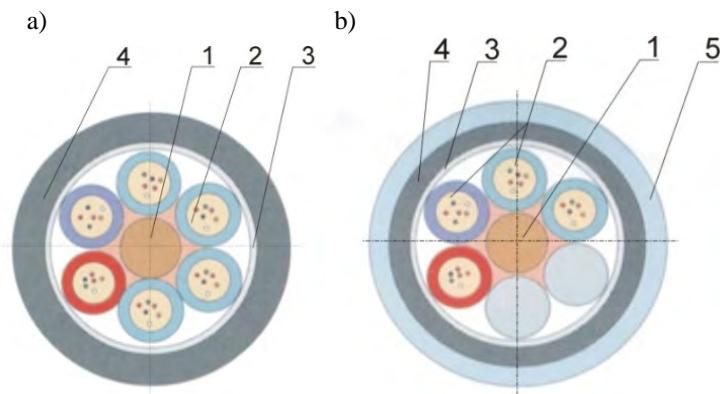


Rys. 13. Podział zespołu kanałowego o kształtach złożonych z tunelami funkcjonalnymi z uwagi na charakterystykę elementów oraz charakterystykę zespołu

1.6. Konstrukcja i charakterystyka kabla optotelekomunikacyjnego

Nośnikiem sygnału optycznego może być włókno szklane lub włókno wykonane z tworzywa polimerowego. W zależności od rodzaju materiału, z którego jest sporządzone włókno oraz jego wymiarów uzyskuje się różną długość fal transmisji sygnału oraz jego tłumienność. Włókna szklane mają znamionową długość fal w zakresie od 1310 nm do 1550 nm. Duża przepustowość tego rodzaju włókien pozwala na uzyskanie szybkości przesyłania danych dochodzącej do 100 Gb/s na znaczne odległości [21, 62, 67]. Włókna z tworzywa polimerowego mogą być wykonane z polistyrenu (PS), poliwęglanu (PC) lub poli(metakrylanu metylu) (PMMA), a znamionowa długość fali w tym przypadku wynosi od 850 nm do 1300 nm. Mniejsza szybkość transmisji sygnału dochodząca do 1Gb/s powoduje, że włókna te są stosowane na krótszych odcinkach instalacji światłowodowej głównie wewnątrz budynków.

Stosunkowo mała wytrzymałość mechaniczna oraz nieduże wymiary włókien światłowodowych powodują, że muszą być one otoczone odpowiednimi powłokami ochronnymi. Zwiększenie wytrzymałości mechanicznej włókien uzyskuje się łącząc je w grupy, w efekcie otrzymując wytwór złożony w postaci kabla optotelekomunikacyjnego [15, 127]. W osi kabla jest umieszczony centralny element wytrzymałościowy wykonany najczęściej z włókna szklanego, dookoła którego znajduje się określona liczba 6, 8 lub 12 tub (rys. 14).

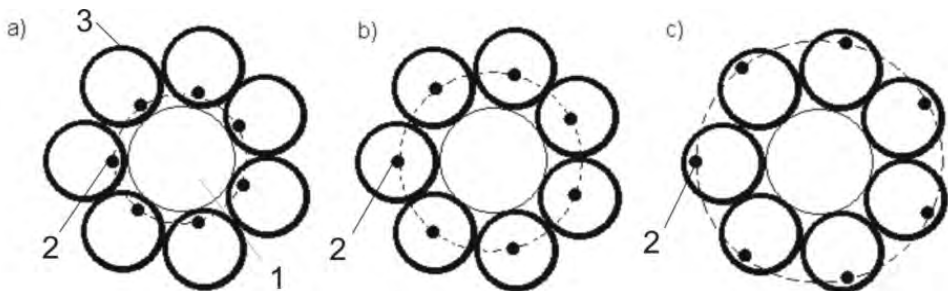


Rys. 14. Przykład przekroju poprzecznego kabla optotelekomunikacyjnego; a) kabel ZXOTKtd; b) kabel ZXOTKtd; 1 –centralny element wytrzymałościowy, 2 – tuby z włóknami światłowodowymi, 3 – warstwa pochłaniająca wilgoć, 4 – powłoka z polietylenu, 5 – dodatkowa warstwa wzmacniająca [33]

W tubach z kolei lokuje się odpowiednią liczbę cienkich włókien światłowodowych. Tuby są wykonywane najczęściej z poli(tereftalanu butylenu) (PBT), a do ich wnętrza wprowadza się żel tiksotropowy o dobrych właściwościach hydrofobowych w celu zabezpieczenia włókien przed działaniem wilgoci oraz wpływem niekorzystnych naprężeń: rozciągających, zginających lub skręcających [127]. W kablu wiązka tub jest owinięta dodatkową warstwą taśmy lub nici poliestrowych, na którą z kolei metodą współwytłaczania nanosi się powłokę zewnętrzną. Powłokę zewnętrzną kabla wytwarza się w procesie wytłaczania powlekającego, najczęściej z polietylenu dużej gęstości (PE-HD). Grubość tej powłoki zależy od wymiarów kabla i wynosi od 0,4 do 3,5 mm. W zależności od dodatkowych wymagań [186, 84] lub specjalnego przeznaczenia kabla, wykonuje się dodatkowe warstwy wzmacniające (rys. 14b) np. z taśmy metalowej lub z innych tworzyw polimerowych.

Niekorzystne czynniki zewnętrzne, takie jak: zwiększona wilgotność, duża lub mała temperatura, wzrost naprężenia rozciągającego, ściskającego lub zginającego może powodować powstawanie na powierzchni włókien mikropełnięć oraz mikro i makrozagięć. W dużym stopniu wpływa to na zwiększenie tłumienia przesyłanego sygnału optycznego. Z tego też względu długość włókna światłowodowego jest najczęściej większa niż długość tuby, dzięki temu włókna mogą się przemieszczać w jej wnętrzu [173].

Konstrukcja kabla z tzw. „luźną tubą” charakteryzuje się określonym dopuszczalnym zakresem naprężeń ściskających i rozciągających, w którym naprężenia te nie przenoszą się na włókna, a powodują tylko zmianę ich położenia (rys. 15) [16, 35, 93, 150].



Rys. 15. Schemat położenia włókien w tubie w zależności od rodzaju naprężeń działających na kabel optotelekomunikacyjny: a) przy rozciąganiu, b) przy braku naprężenia, c) przy ściskaniu; 1 – centralny element konstrukcyjny, 2 – włókno światłowodowe, 3 – tuba

Pod działaniem naprężeń rozciągających włókna mogą przemieszczać się w kierunku do osi kabla, a przy działaniu naprężeń ściskających zajmować położenie odległe od osi kabla. W przypadku braku naprężeń włókna zajmują wymagane położenie w osi poszczególnych tub.

Projektując lub modyfikując określoną konstrukcję kabla optotelekomunikacyjnego, aby uzyskać pewność, że jakość sygnału transmitowanego przez kabel będzie na wymaganym wysokim poziomie, należy uwzględnić wiele niezależnych czynników. Czynniki te determinują między innymi, rodzaj i wartość obciążeń zewnętrznych, jakim może być poddany kabel oraz pozwalają na dobór odpowiedniej metody wprowadzania kabla do wnętrza kanału z tworzywa polimerowego [149, 183, 185, 192].

1.7. Istota oddziaływania kanału z kablem optotelekomunikacyjnym

W wyniku umieszczenia kabla optotelekomunikacyjnego we wnętrzu odpowiedniego kanału z tworzywa polimerowego uzyskuje się dodatkowe jego zabezpieczenie przed współdziałaniem środowiska naturalnego, a także działaniem niekorzystnych wymuszeń zewnętrznych [43]. Dlatego też, kanały te powinny zapewniać przeprowadzenie procesu wprowadzania kabla przy jak najmniejszych oporach ruchu. Ważnym zagadnieniem naukowym jest więc ocena wzajemnego oddziaływania kanału z kablem, w aspektach doboru odpowiedniej technologii wytwarzania powierzchni wewnętrznej kanału, a także możliwości prowadzenia badań laboratoryjnych, pozwalających na ustalenie wartości wielkości fizycznych wpływających na przebieg tego procesu.

Cechą charakterystyczną oddziaływania kanału z kablem jest to, że określony obszar powierzchni zewnętrznej kabla tylko raz styka się z danym obszarem powierzchni wewnętrznej kanału [111, 152]. Inne zagadnienia dotyczą przebiegu procesu układania kabla we wnętrzu kanału, wyboru odpowiedniej metody jego wprowadzania w odniesieniu, na przykład do długości oraz miejsca budowy linii optotelekomunikacyjnej. Przy spełnieniu określonych warunków oraz prawidłowego doboru powierzchni wewnętrznej kanału, długość odcinków instalacyjnych kabla może przekraczać 2000 m [210].

Na podstawie badań własnych [41 – 53] oraz wiadomości opisanych w publikacjach [211, 212] można przyjąć, że wielkością charakteryzującą prawidłowy dobór kanału do rodzaju i konstrukcji kabla jest możliwość

uzyskania jak najmniejszej wartości poosiowej siły napięcia w kablu, z jaką jest on wprowadzany do wnętrza kanału z tworzywa polimerowego.

Jednak określenie wartości tej siły w warunkach eksploatacyjnych jest znacznie utrudnione. Dlatego też, duże znaczenie mają odpowiednie badania laboratoryjne, umożliwiające wcześniejsze wyznaczenie wielkości fizycznych dotyczących właściwego doboru rodzaju kanału, także na etapie projektowania linii [111, 127].

1.7.1 Metody wprowadzania kabla do wnętrza kanału

Metody wprowadzania kabla do wnętrza kanału z tworzywa polimerowego oraz warunki prowadzenia tego procesu są opisane w normach optotelekomunikacyjnych oraz standardach międzynarodowych [5, 209, 210, 217]. Wśród tych metod w zależności od długości budowanej linii wyróżnić można te, z wykorzystaniem których podczas wprowadzania kabla do wnętrza kanału nie przekracza się dopuszczalnych naprężeń rozciągających w kablu lub nie przekracza się maksymalnego promienia jego zgięcia [15, 33, 177].

Optotelekomunikacyjne linie dalekosiężne z kanałami wytworzonymi z tworzywa, można układać bezpośrednio w glebie, wykorzystując do tego celu specjalne urządzenia tzw. pługo-układacze (rys. 16).



Rys. 16. Schemat przykładowego urządzenia do układania kanału z tworzywa polimerowego bezpośrednio w glebie: 1 – bęben, 2 – kanał, 3 – układ do kształtowania wgłębienia w glebie, 4 – ułożony odcinek kanału [161]

Natomiast na terenach o dużym stopniu urbanizacji kanały optotelekomunikacyjne są umieszczane w specjalnych przystosowanych do

tego celu tunelach (rys. 17) wykonanych z betonu lub z tworzyw polimerowych, najczęściej z polietylenu (PE), poli(chlorku winylu) (PVC), polipropylenu (PP) [128, 161, 172, 217]. Zgodnie z wymaganiami konstrukcyjnymi [214] średnica kanału optotelekomunikacyjnego powinna być co najmniej 2,5 razy większa od średnicy umieszczanego w nich kabla. Kanał powinien także spełniać dodatkowe wymagania opisane w normach telekomunikacyjnych [193, 212].



Rys. 17. Wygląd kanałów optotelekomunikacyjnych z tworzywa polimerowego umieszczonych bezpośrednio w tunelach wykonanych z betonu [35]

Podczas wprowadzania kabla do wnętrza kanału jest wymagane wywarcie na niego siły w kierunku osi kanału, która pokona opory ruchu na określonym odcinku instalacyjnym [29, 179, 184]. W zależności od rodzaju kabla, jego masy oraz długości odcinka instalacyjnego siła oporu przy jakiej wprowadza się kabel do wnętrza kanału może mieć różne wartości. W przypadku tego procesu duże znaczenie mają także warunki zewnętrzne, przy których następuje wprowadzanie kabla, takie jak: wilgotność, temperatura otoczenia, długość oraz liczba krzywoliniowych odcinków kanału [29, 161]. Prędkość wprowadzania kabla do wnętrza kanału, zależy z kolei od jego średnicy, konstrukcji ścianki, a także od ukształtowania oraz stopnia urbanizacji terenu. Zawiera się ona w zakresie od 0,2 do 100 m/min [85]. Z uwagi na miejsce prowadzenia prac instalacyjnych oraz długość wymaganych odcinków linii optotelekomunikacyjnej [29, 166, 172] można wprowadzać kabel bez dodatkowych urządzeń-metodą ręczną, z wykorzystaniem urządzeń tzw. zaciągarek, metodą mechaniczną (rys. 18)

oraz metodą pneumatyczną z wykorzystaniem dodatkowych urządzeń podających kabel optotelekomunikacyjny.

a)



b)



Rys. 18. Wygląd przykładowego oprzyrządowania specjalistycznego: a) zaciągarka mechaniczna, b) podajnik gąsienicowy kabla stosowany przy metodzie pneumatycznej [57]

Wszystkie wymienione metody wprowadzania kabla do wnętrza kanału, wymagają stosowania dodatkowego oprzyrządowania specjalistycznego. Jest ono przeznaczone do prawidłowego usytuowania geometrycznego kabla względem osi kanału oraz zmniejszenia oporów ruchu na łukach i odcinkach krzywoliniowych budowanej linii optotelekomunikacyjnej [3, 33, 35, 175].

1.7.2. Ogólne metody badań kabli i kanałów

Gotowe wytwory z tworzyw polimerowych są poddawane badaniom kontrolnym oraz dodatkowym ocenom. W przypadku kanałów i kabli oprócz metod badań podstawowych [1, 2, 90, 129] (na przykład: określania gęstości, lepkości tworzywa, wytrzymałości podczas próby rozciągania, odporności na korozję naprężeniową itp.), wykonuje się także badania dodatkowe (tab. 3). Dotyczą one oceny właściwości otrzymanego kabla lub kanału i mają na celu porównanie wyników z informacjami opisanymi w odpowiednich standardach oraz normach telekomunikacyjnych [214, 213, 215].

Włókna światłowodowe znajdujące się w kablu poddaje się także dodatkowym procedurom badawczym [33, 35]. Obejmują one sprawdzenie wymiarów geometrycznych włókna oraz ocenę właściwości falowych i transmisyjnych. Wymiary geometryczne włókien bada się przeprowadzając

pomiary: średnicy rdzenia, średnicy pola modu, apertury numerycznej, długości fali odcięcia modu, a także odchyżeń od wartości nominalnych wszystkich wymaganych czynników, przy określonej długości fali sygnału optycznego. Cechy transmisyjne i pomiary tłumienności spektralnej włókna określa się z wykorzystaniem specjalnych układów pomiarowych, umożliwiających badania dyspersji chromatycznej oraz pomiary reflektometryczne [35, 135].

Tabela 3

Przykłady dodatkowych badań kabli optotelekomunikacyjnych oraz kanałów z tworzywa polimerowego

<p>Przedmiot badań: Kable optotelekomunikacyjne ze światłowodami jednomodowymi (OTKJ), przeznaczone do stosowania w sieci telekomunikacyjnej</p>	<p>Przedmiot badań : Kanały z tworzywa polimerowego przeznaczone do umieszczania w nich kablowej sieci telekomunikacyjnej</p>
<p>Rodzaj badań: tłumienność optyczna dyspersja chromatyczna średnica pola modu długość fali odcięcia wytrzymałość na rozciąganie wytrzymałość na zginanie wytrzymałość na zginanie wytrzymałość na skręcanie wytrzymałość na udary mechaniczne wytrzymałość na zmiany temperatury wytrzymałość na wzdłużne przenikanie wody</p>	<p>Rodzaj badań : gęstość tworzywa wymiary poprzeczne owalność kanału powierzchnia i barwa wytrzymałość na ciśnienie wewnętrzne udarność wydłużenie przy zerwaniu stabilność cieplna odporność na korozję naprężeniową współczynnik tarcia kabla o powierzchnię kanału</p>

Określone elementy konstrukcyjne kabla i kanału poddaje się także badaniom mającym na celu sprawdzenie poprawności doboru materiałów zastosowanych na poszczególne elementy składowe [36, 73]. Identyfikuje się także cechy określające poprawność przeprowadzonego procesu wytwarzania elementów konstrukcyjnych, dotyczące otrzymanego kształtu, wymiarów lub struktury geometrycznej powierzchni.

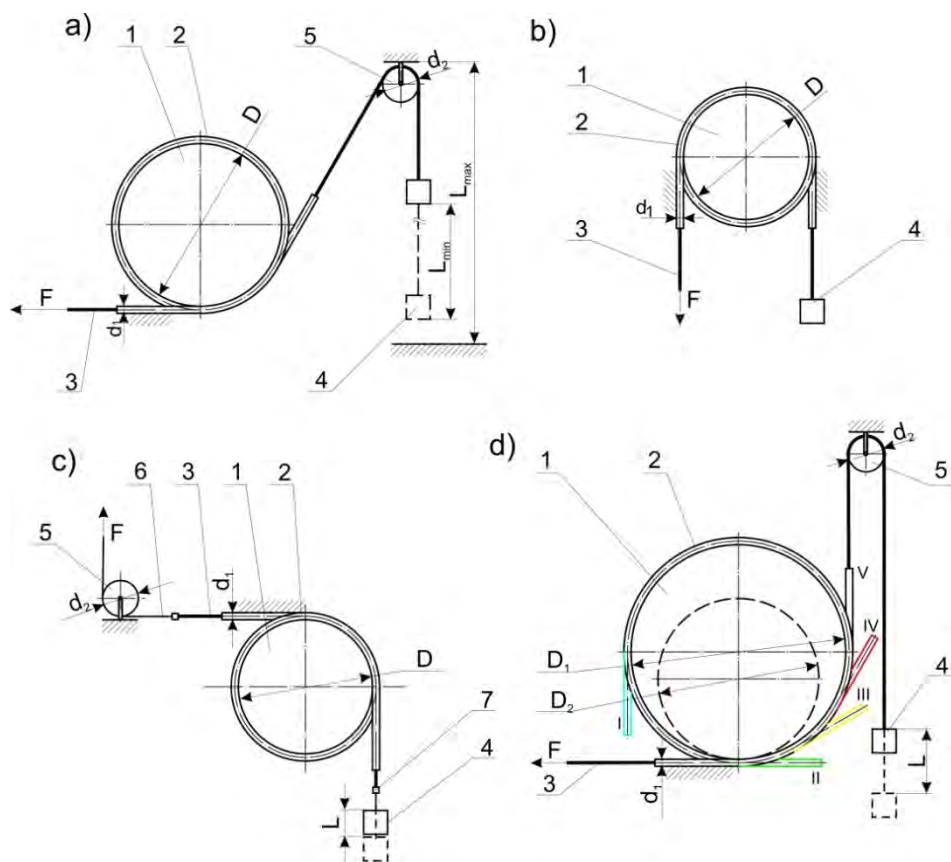
W zależności od rodzaju tworzywa, z którego wytworzono poszczególne warstwy współdziałających elementów konstrukcyjnych kabla i kanału można przeprowadzać dokładną analizę materiałową. Zewnętrzną powłokę kabli wytwarza się najczęściej z polietylenu dużej gęstości (PE-HD) lub

polipropylenu (PP), natomiast wewnętrzną powierzchnię kanałów z polietylenu dużej lub średniej gęstości (PE-HD, PE-MD).

W celu poprawy stanu powierzchni do obszaru kontaktu doprowadza się dodatkowy olej lub pastę o dobrych właściwościach ślizgowych, lub na powierzchni wewnętrznej kanału wykonuje się dodatkową stałą warstwę ślizgową z tworzywa silikonowego (SI) lub politerafluoroetylenu (PTFE) [98, 99].

Wzajemne współdziałanie elementów konstrukcyjnych kanału i kabla zależy od wielu czynników [3, 29, 62]. W zależności od budowy kabla, konstrukcji kanału, jego struktury geometrycznej, rodzaju i grubości warstwy ślizgowej, można wskazać kilka niezależnych wskaźników charakteryzujących ten proces. Na podstawie wyników własnych prac badawczych [42, 53] stwierdzono, że najważniejszymi wielkościami charakteryzującymi proces współdziałania kabla optotelekomunikacyjnego w procesie jego instalowania w kanale z tworzywa polimerowego są: maksymalna siła, z jaką kabel może być wprowadzany do kanału bez wywołania niekorzystnych naprężeń rozciągających we włóknach światłowodowych, prędkość wprowadzania kabla, wymiary, kształt kanału, a także liczba odcinków prostoliniowych, łuków oraz odcinków krzywoliniowych (wynikająca między innymi ze zmiany ukształtowania terenu) tworzonej linii [220].

Ze względu na złożoność przebiegu procesu wprowadzania kabla do wnętrza kanału oraz bardzo ograniczony zakres prowadzonych dotychczas prac badawczych w krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych, żadna z metod klasycznych nie pozwala na uzyskanie zadowalających wyników oraz prowadzenie symulacji przebiegu tego procesu w warunkach laboratoryjnych. Przeprowadzona analiza literatury pokazała, że wyniki badań procesu wprowadzania kabla optotelekomunikacyjnego do wnętrza kanału z tworzywa są przedstawiane bardzo ogólnie i to tylko w kilku publikacjach [29, 211, 218], a stanowiska badawcze, wyposażenie, zakres pomiarowy oraz warunki, w jakich zaleca się wykonanie pomiarów są niekompletne i znacząco różnią się między sobą (rys. 19).



Rys. 19. Schematy ideowe metod badań do określania wartości siły wzdłużnej w kablu zgodnie z normą; a) firmy BellCore [218], b) firmy Telekomunikacja Polska S.A. [220], c) firmy LD Cable oraz British Telecom [211], d) metody opracowanej w KPP PL [197]; 1 – bęben, 2 – kanał, 3 – kabel optotelekomunikacyjny, 4 – obciążenie, 5 – bloczek, 6 – stalowa lina, 7 – uchwyt, F – siła poosiowa powstająca w kablu, D , D_1 , D_2 – średnica bębna pomiarowego, d_1 – średnica kanału, d_2 – średnica krążka, L , L_{min} , L_{max} – długość przemieszczania się kabla, I÷V – poszczególne położenia kanału po opasaniu na bębnie pomiarowym.

Zestawienie metod badań tego typu elementów konstrukcyjnych wykonany na potrzeby badań własnych (tab. 4 i rys. 20) wskazuje, że pomiary te odnoszą się tylko do małego zakresu wybranych warunków wprowadzania kabla, co niekiedy może prowadzić do błędnych wniosków. We wszystkich dostępnych opracowaniach, badania są oparte na pomiarach siły oporu powstającej w kablu podczas wprowadzania go do wnętrza kanału.

Dane techniczne stanowisk badawczych według różnych źródeł

Jednostka badawcza	Wielkości charakterystyczne				
	Średnica bębna pomiar. D, mm	Kąt opasania kanału na bębnie φ , rad	Długość styku kabla z kanałem, S_L mm	Obciążenie końca kabla G, kg	Prędkość wprowadzania kabla V, m/min
Telekomunikacja Polska S A	700	3π	3332	10; 20; 30; 40	5
LD Cable (UK)	1200	$\frac{5}{2}\pi$	4740		
British Telecom (UK)					
Dura Line (USA)	910	$\frac{7}{3}\pi$	3360	6,8	20
BellCore Ltd. (USA)					
Katedra Procesów Polimerowych Politechnika Lubelska (<i>wersja podstawowa – napęd ręczny</i>)	1200	$\pi; \frac{5}{2}\pi; 3\pi$	1895, 4740, 5686.	2,5 ÷ 50	3; 5; 7

Kanał o odpowiedniej długości i wymiarach jest zamocowany i unieruchomiony w odpowiednim położeniu geometrycznym, najczęściej na bębnie, którego średnica w poszczególnych normach jest różna (tab. 4). Ponadto, wartości kątów opasania kabla na bębnie, wartości obciążeń swobodnego końca odcinka pomiarowego kabla, a także prędkość przemieszczania się kabla podczas badania, w różnych opisach norm, mają różne wartości.

Najważniejszymi wielkościami fizycznymi opisującymi proces wprowadzania kabla do wnętrza kanału, pozwalającymi na określenie efektywności tego procesu, są wartości siły oporu powstającej w kablu przy zmianie tarcia statycznego na kinetyczne oraz zmiana wartości tej siły w funkcji czasu lub drogi przemieszczania się kabla. Dodatkowo w określonych warunkach prowadzenia badań, jest możliwe dla zdeterminowanej pary materiałowej kanał-kabel, obliczenie wartości współczynnika oporu, traktowanego w tym przypadku jako współczynnik tarcia ślizgowego.

1.8. Badania wzajemnego oddziaływania kanału z kablem na stanowiskach konstrukcji własnej

W zakresie budowy laboratoryjnych stanowisk badawczych, przeznaczonych do pomiarów wielkości fizycznych przy wzajemnym oddziaływaniu kanału i kabla, jest brak jakiegokolwiek unifikacji. W krajach Unii Europejskiej, w tym także w Polsce, istnieje kilka norm branżowych oraz standardów krajowych, w których wymagania, przebieg i warunki prowadzenia pomiarów są różne. Także w treści norm obowiązujących w Polsce, takich firm jak Telekomunikacja Polska SA, Netia SA czy Telefonía Dialog, nie ma wielu potrzebnych informacji do prowadzenia identyfikacji i oceny oraz sposobu wyznaczania wartości czynników jakościowych i ilościowych istotnie wpływających na przebieg tego procesu [217, 219, 220].

Analiza teoretyczna przebiegu procesu wprowadzania kabla do wnętrza kanału z tworzywa polimerowego oraz konieczność prowadzenia badań porównawczych na odcinkach kanałów pozyskanych bezpośrednio z gotowych wytworów handlowych spowodowały potrzebę budowy odpowiednich stanowisk badawczych. Autor rozprawy opracował dokumentację konstrukcyjną, na podstawie której wykonał we własnym zakresie oryginalne stanowiska badawcze, które umożliwiają prowadzenie wymaganych badań różnych kanałów i kabli (rys. 20).

a)



b)

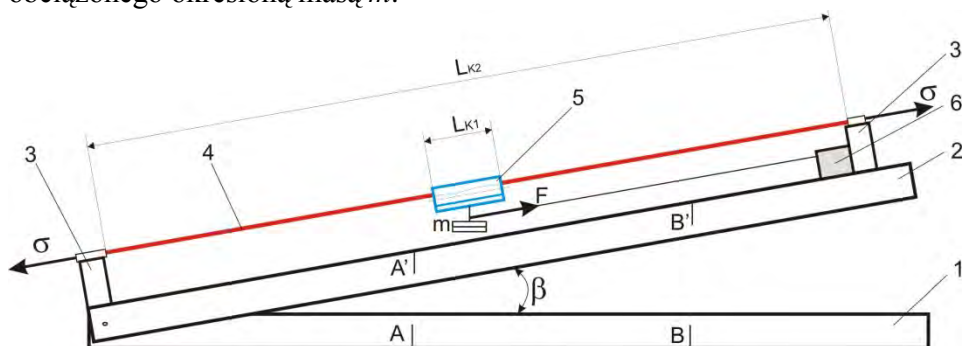


Rys. 20. Wygląd stanowisk do badań wzajemnego oddziaływania kabla z kanałem: a) na odcinku prostoliniowym, b) na łukach kołowych i odcinkach krzywoliniowych [41, 197]

Dzięki temu uzyskano możliwość modelowania w warunkach laboratoryjnych wzajemnego oddziaływania kanału z kablem na odcinku

prostoliniowym (rys. 20a) oraz na łukach kołowych i odcinkach krzywoliniowych (rys. 20b) [41].

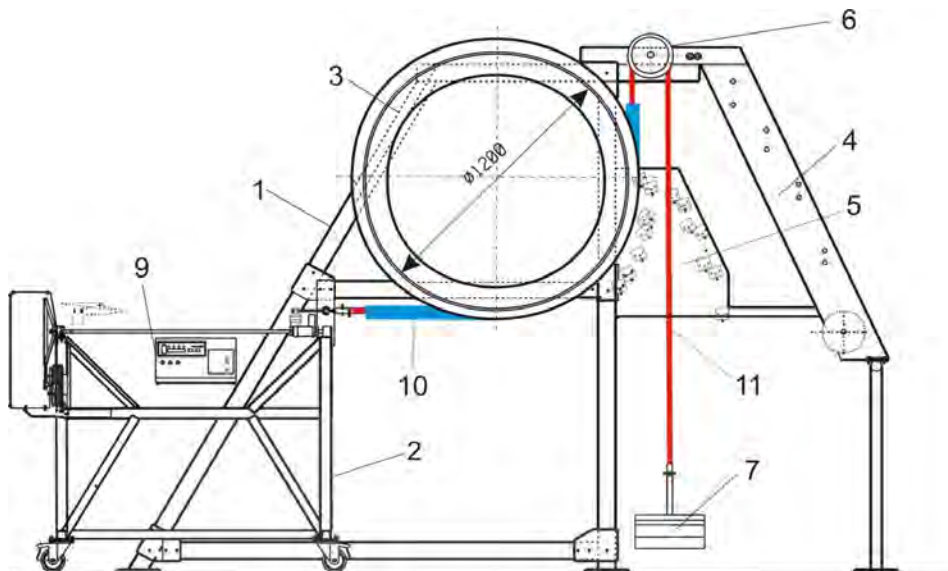
Potrzeba prowadzenia badań na mniejszej długości odcinka kabla i kanału była podstawą zaprojektowania i wykonania stanowiska umożliwiającego pomiary wzajemnego oddziaływania na odcinku prostoliniowym. Konstrukcję stanowiska oparto na założeniach działania równi pochyłej (rys. 21). Płaską powierzchnię nachyloną do poziomu pod określonym kątem zastąpiono ruchomą ramą, wraz z zamocowanym do niej odcinkiem kabla. Podczas pomiarów wzajemny kontakt obu badanych elementów (kabla i kanału) zachodzi wzdłuż ich tworzących walcowych zewnętrznej wewnętrznej powierzchni. Zwiększając kąt β nachylenia ramy ruchomej z zamocowanym w niej kablem) w odniesieniu do ramy stałej, uzyskuje się taką jego wartość, przy której dla układu badanych elementów następuje swobodne zsuwanie się odcinka kanału po powierzchni kabla. Podczas badań na kabel umocowany w uchwytych ramy ruchomej stanowiska działa określone naprężenie rozciągające σ skierowane wzdłuż jego osi. Miarę współczynnika tarcia μ_{β} wyznacza się jako wartość tangensa kąta β nachylenia ramy ruchomej, przy którym następuje ruch oraz swobodne zsuwanie się odcinka pomiarowego kanału o długości L_{K1} , dodatkowo obciążonego określoną masą m .



Rys. 21. Schemat stanowiska do badania wzajemnego oddziaływania kabla z kanałem na odcinku prostoliniowym: 1 – podstawa, 2 – ramię ruchome, 3 – uchwyty, 4 – odcinek kabla, 5 – badany odcinek kanału, 6 – układ napędowy z dynamometrem, β – kąt nachylenia, L_{K1} – długość odcinka pomiarowego kanału, L_{K2} – długość odcinka kabla, σ – naprężenie w kablu, A, A', B, B' punkty charakterystyczne, m – masa obciążenia pomiarowego, F – wartość siły oporu przy wciąganiu odcinka kanału wraz z obciążeniem pomiarowym

Po wyznaczeniu w pierwszej fazie badań wartości kąta β nachylenia ramy ruchomej można wyznaczyć wartość siły F , potrzebną do wciągnięcia badanego odcinka kanału (wraz z obciążeniem pomiarowym) z dolnego skrajnego położenia A' do położenia B'. Przy spełnieniu określonej metodyki prowadzenia pomiarów oraz dobierając odpowiednio masę m obciążenia pomiarowego, do wymiarów kanału oraz średnicy kabla uzyskano zadowalający stopień powtarzalności wyników badań na stanowisku.

Określenie wartości siły oporu powstającej w kablu, gdy kanał z tworzywa polimerowego jest wygięty w łuk lub ma kształt określonego odcinka krzywoliniowego, spowodowało potrzebę budowy innego stanowiska badawczego. W efekcie prac rozpoznawczych i konstrukcyjnych wykonano stanowisko w dwu wersjach: podstawowej, w której kabel jest wprowadzany ręcznie oraz rozbudowanej (rys. 22), z mechanicznym wprowadzeniem kabla do wnętrza kanału.



Rys. 22. Schemat stanowiska do badań wzajemnego oddziaływania kabla z kanałem na odcinku krzywoliniowym (wersja rozbudowana): 1 – rama nośna podzespołu mocującego, 2 – podzespół napędowo-pomiarowy, 3 – bęben pomiarowy, 4 – wspornik mocowania krążka, 5 – wspornik mocowania kanału, 6 – krążek, 7 – obciążnik pomiarowy, 9 – układ sterowania i kontroli, 10 – badany odcinek kanału opasany na bębnie, 11 – odcinek kabla [41]

W obu przypadkach przyjęto, że badany odcinek kanału mocuje się na bębnie pomiarowym o średnicy 1200 mm, do którego wprowadza się odcinek pomiarowy kabla. Kabel z jednej strony jest mocowany do układu napędowo–pomiarowego, a z drugiej do obciążnika o określonej masie G.

W celu spełnienia założonych wymagań badawczych, a także treści różnych norm telekomunikacyjnych [213, 215] w konstrukcji stanowiska przewidziano możliwość zmiany czynników wejściowych, istotnie wpływających na proces wprowadzania kabla do wnętrza kanału z tworzywa polimerowego. Dotyczyło to głównie możliwości zmiany wartości kąta opasania kanału na bębnie, średnicy bębna, prędkości wprowadzania kabla oraz obciążenia swobodnego końca odcinka pomiarowego kabla (tab. 5).

Tabela 5

Podstawowe dane techniczne autorskich stanowisk do badań na odcinku krzywoliniowym

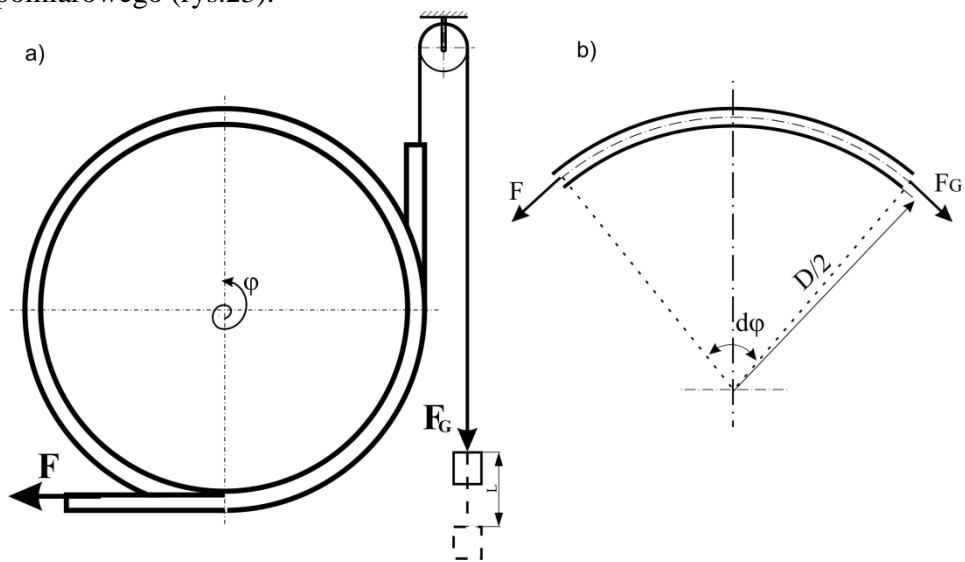
Jednostka badawcza	Wielkości charakterystyczne				
	Średnica bębna pomiarowego o D_b , mm	Kąt opasania kanału na bębnie α , rad	Długość styku kabla z kanałem, S_L mm	Obciążenie końca kabla G, kg	Prędkość wprowadzania kabla V, m/min
Katedra Procesów Polimerowych Politechnika Lubelska (wersja podstawowa - napęd ręczny)	1200	$\frac{5}{2}\pi; 3\pi$	1895	2,5 ÷ 50	3; 5; 7
			4740		
			5686		
Katedra Procesów Polimerowych Politechnika Lubelska (wersja rozbudowana - napęd mechaniczny)	910	$\frac{3}{2}\pi;$ $(2\pi \div \frac{5}{2}\pi)$	2160 (2880 ÷ 3600) co 120 mm	2,5 ÷ 50	0,1 ÷ 8
	1200		$co \frac{1}{12}\pi$		

W skład stanowiska do badań na odcinku krzywoliniowym wchodzi dwa główne podzespoły: podzespół mocujący i podzespół napędowo–pomiarowy.

Podzespół mocujący umożliwi unieruchomienie badanego odcinka kanału w uchwytach, zapewniających jednocześnie zachowanie odpowiedniego położenia geometrycznego podczas pomiaru. Natomiast podzespół napędowo-pomiarowy, zapewnia realizację przemieszczania się kabla, w określonych warunkach oraz pomiar i rejestrację wartości siły oporu w kablu optotelekomunikacyjnym, powstającej podczas tego procesu.

Za pomocą przedstawionych stanowisk jest możliwe prowadzenie badań odcinków kanałów i kabli w warunkach różnych kątów opasania odcinka kanału na bębnie oraz przy różnych warunkach obciążenia swobodnego końca kabla. Dzięki temu uzyskano możliwość symulacji procesu wprowadzania kabla do wnętrza kanału w warunkach laboratoryjnych oraz określania wartości poszukiwanych wielkości na łukach kołowych i odcinkach krzywoliniowych [41].

Teoretyczna analiza rozkładu sił działających na elementarny wycinek kabla mieszczący się na łuku z elementarnym kątem wierzchołkowym $d\varphi$, w odniesieniu do bębna pomiarowego o promieniu $R=D/2$, pozwala, dla określonych materiałów kanału i kabla, na wyznaczenie wartości siły F napięcia w kablu w zależności od siły F_G pochodzącej od obciążenia pomiarowego (rys.23).



Rys. 23. Schemat usytuowania kabla i kanału podczas badań: a) układ pomiarowy z opasaniem na bębnie b) powiększony fragment rozkładu sił działających na elementarny wycinek kanału: F – siła oporu, D – średnica bębna pomiarowego, F_G – siła pochodząca od obciążenia pomiarowego G (pozostałe oznaczenia w tekście)

Przy pominięciu masy kabla wartość siły napięcia (1.1) w kablu, można obliczać zgodnie ze znaną (z podręczników mechaniki, budowy maszyn) zależnością Eulera-Eytelweina:

$$F = F_G e^{\varphi\mu} \quad (1.1)$$

gdzie: F – siła oporu w kablu (siła napięcia), F_G – siła w kablu (pochodząca od obciążenia pomiarowego G), e – podstawa logarytmu naturalnego, φ – kąt opasania, μ – współczynnik tarcia charakterystyczny dla badanych materiałów kanału i kabla

Analiza wyników badań otrzymanych za pomocą opisanych stanowisk [42, 44, 50] pozwala na ustalenie, że jest możliwe prowadzenie powtarzalnych pomiarów w przyjętych warunkach dla różnych konstrukcji kanałów i kabli. Wielkością mierzoną bezpośrednio podczas pomiaru może być wartość poosiowej siły oporu, powstającej w kablu podczas jego kontaktu z powierzchnią wewnętrzną kanału. Na przebieg tego procesu mają wpływ także inne czynniki niezależne, które dotychczas nie są poznane w stopniu wystarczającym.

Odpowiedni dobór rodzaju kanału do określonego kabla optotelekomunikacyjnego ma istotne znaczenie już na etapie projektowania linii telekomunikacyjnej [25, 124, 210]. Poprzez określenie czynników fizycznych istotnie wpływających na przebieg tego procesu, jest możliwe dokładne wyznaczenie warunków współdziałania, a także dobór najbardziej korzystnego rodzaju kanału z tworzywa polimerowego do określonego kabla optotelekomunikacyjnego.

1.9. Ocena dotychczasowego stanu literatury, wnioski i ustalenia

Kanały z tworzywa polimerowego są stosowane w wielu różnych dziedzinach techniki, jednak w przypadku technik optotelekomunikacyjnych, oprócz uzyskania odpowiednich właściwości mechanicznych wymaga się, aby budowa kanału zapewniała dodatkową ochronę cienkich włókien światłowodowych kabla optotelekomunikacyjnego.

Odrębną problematykę stanowi możliwość prowadzenia badań kabli i kanałów w warunkach zbliżonych do tych, jakie występują przy pracach instalacyjnych. Ostateczna ocena i wartości wskaźników jakościowych oraz

ilościowych, opisujących przebieg współdziałania kanału z kablem, zależą od wielu niezależnych czynników. Duże znaczenie ma w tym przypadku rodzaj i właściwości tworzywa polimerowego, z którego wykonane zostały poszczególne warstwy kanału, elementy struktury geometrycznej powierzchni oraz wartości i kierunki działania sił i wymuszeń zewnętrznych.

Podczas projektowania wytworów w postaci kanałów z tworzywa polimerowego nie bez znaczenia jest także rodzaj procesu technologicznego zastosowanego do wytworzenia poszczególnych elementów oraz związane z nim określone warunki przetwórstwa. Odpowiedni dobór procesu technologicznego pozwala na uzyskanie kanałów przy minimalnej liczbie zabiegów dodatkowych. Ma to znaczenie zarówno w odniesieniu do uzyskania powtarzalnych, ściśle określonych właściwości i cech charakterystycznych kanału, a także umożliwia zmniejszenie kosztów ich wytwarzania. W przypadku elementów konstrukcyjnych wykonywanych w linii technologicznej wyłaczania takich jak kanały, tuby czy kable, ważne jest także odpowiednie przeprowadzenie procesu technologicznego tak, aby kanał w dowolnym przekroju poprzecznym charakteryzował się ściśle określonymi właściwościami, spełniającymi wymagania norm oraz specjalistycznych standardów przemysłowych.

Dotychczasowe rozwiązania konstrukcyjne kanałów z tworzywa polimerowego, zagadnienia technologiczne i badawcze, dotyczące wzajemnego ich oddziaływania z kablem optotelekomunikacyjnym, można scharakteryzować tym że:

- Istnieje wiele różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych kanałów z tworzywa polimerowego, jednak dotychczas nie ma rozwiązań zapewniających spełnianie wszystkich wymagań dotyczących efektywnego wprowadzania kabla optotelekomunikacyjnego do ich wnętrza.
- Konstrukcje kabli są ciągle udoskonalane, a proces ich wprowadzania do kanałów z tworzywa polimerowego stanowi o możliwości uzyskania wymaganej transmisji sygnałów optotelekomunikacyjnych na duże odległości, bez straty jakości, w długim okresie eksploatacji.

- W zależności od długości odcinka instalacyjnego kabla i wybranej metody jego wprowadzania do wnętrza kanału, w pojedynczych włóknach światłowodowych mogą powstawać złożone stany naprężeń, prowadzące niekiedy do pogorszenia właściwości transmisyjnych, czego niekorzystnym efektem może być zwiększenie tłumienności sygnału.
- Efektywność wzajemnego oddziaływania kanału z kablem może być oceniana poprzez wyznaczenie wartości siły oporu powstającej w kablu podczas jego wprowadzania do wnętrza kanału w warunkach laboratoryjnych.
- Ocena efektywności wzajemnego oddziaływania kabla z kanałem jest prowadzona w kilku zagranicznych ośrodkach badawczych, jednak z uwagi na różne warunki, przy których są wykonywane pomiary oraz inne działania dostępnych stanowisk, porównywanie wyników badań i ich analiza jest znacznie utrudniona.
- Przebieg procesu umieszczania kabla optotelekomunikacyjnego we wnętrzu kanału można poprawić poprzez modyfikację powierzchni wewnętrznej kanału w procesie jego wytwarzania, stosując metodę konstrukcyjną lub metodę technologiczną.

Pomiary na stanowiskach badawczych ujawniły także potrzebę prowadzenia badań oddziaływania kanałów i kabli na odcinkach o małych długościach. Dokładniejsze poznanie metod badania tradycyjnych kanałów oraz kabli, umożliwi dalszy rozwój technik optotelekomunikacyjnych, rozszerzony o nowe metody konstruowania i wytwarzania kanałów o kształtach złożonych oraz zespołów kanałowych, przeznaczonych do współdziałania z najnowszymi konstrukcjami mikrokabli. W ocenie autora pozwoli to na dokładniejsze poznanie tego procesu, umożliwi prowadzenie dokładnych analiz, na przykład z uwagi na określone kryterium konstrukcyjne, dotyczące elementów struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału. Wszystko to wskazuje na to, że podjęcie dalszych prac, w ramach studium teoretycznego i doświadczalnego oddziaływania kanału z tworzywa polimerowego z kablem optotelekomunikacyjnym jest całkowicie celowe i w pełni uzasadnione.

1.10. Cele naukowe i zakres rozprawy

Zagadnienia naukowe, dotyczące konstruowania i badania kanałów z tworzywa polimerowego stosowanych do umieszczania w nich kabli optotelekomunikacyjnych, są bardzo rozbudowane. Przeprowadzone badania opisane w literaturze [29, 43, 44, 35, 127] dotyczą najczęściej oddzielnie rozpatrywanych czynników oraz efektów ich działania w aspektach określonych kształtów i wymiarów kanału oraz sposobów jego wytwarzania. Dobór maszyn, narzędzi przetwórczych oraz metod badań otrzymanych wytworów jest opisywany w publikacjach [70, 72, 78, 91, 106, 130, 139, 198]. Z kolei możliwości wytwarzania ścianki wytworu, z uwagi na wymagane funkcje, dotyczą różnorodnych tworzyw o różnym składzie chemicznym, zapewniających uzyskanie określonych właściwości użytkowych wytwarzanych kanałów [23, 56, 59, 65, 109, 110]. W przypadku technik optotelekomunikacyjnych oprócz metod wytwarzania kabli, dodatkowy obszar badań stanowi analiza transmisji sygnału przez włókno światłowodowe, co także jest przedstawione w publikacjach [33, 35, 64, 67,73, 172, 179] z tej dziedziny.

Duża różnorodność prezentowanych w literaturze konstrukcji kanałów [151, 155, 158, 160, 165, 184, 191, 194, 195] oraz metod ich badań podczas wprowadzania kabla (opisane w rozdziale 1) uzasadnia zasadniczy cel rozprawy, którym jest kompleksowa analiza oraz ocena przebiegu zjawisk zachodzących w obszarze współdziałania wytłoczyny osiowo-symetrycznej w postaci kanału z określonego tworzywa polimerowego z kablem optotelekomunikacyjnym. Ponadto, pomimo dużej ilości badań wytworów z tworzyw, brak jest jednoznacznych wskaźników umożliwiających prognozowanie ich właściwości użytkowych i nieuchronnych zmian zachodzących w czasie procesu starzenia. Jest to szczególnie istotne przy układach optotelekomunikacyjnych, w których poprzez odpowiedni dobór konstrukcji kanału i rodzaju tworzywa powłoki wewnętrznej do wymiarów kabla, można wpływać na efektywność przebiegu procesu jego układania oraz uzyskać wymaganą jakość transmitowanego sygnału.

Problemy badawcze wzajemnego współdziałania kanału z tworzywa polimerowego z kablem optotelekomunikacyjnym są złożone i jak dotychczas w niewystarczającym stopniu poznane. Dotyczą one m.in. możliwości modyfikacji części roboczych narzędzi przetwórczych, prowadzących do uzyskania w wytwarzanym kanale ściśle określonych

właściwości powierzchni wewnętrznej, mającej bezpośredni kontakt z kablem. Dobór odpowiedniej metody (konstrukcyjnej lub technologicznej) modyfikacji tej powierzchni w linii technologicznej wytłaczania, umożliwia kształtowanie określonej struktury geometrycznej w postaci żeber ślizgowych lub wykonanie dodatkowej warstwy o dobrych właściwościach ślizgowych, która pozwala na poprawę przebiegu procesu umieszczania w nich kabla.

Odrębnym zagadnieniem naukowym jest możliwość prowadzenia badań doświadczalnych, umożliwiających wyznaczenie określonych wartości wielkości fizycznych, istotnie wpływających na przebieg procesu przy wzajemnym współdziałaniu kanału z kablem, w warunkach laboratoryjnych. Możliwość analizy otrzymanych wyników tego typu badań już na wstępnym etapie projektowania linii, pozwala na właściwy dobór odpowiedniej budowy kanału do wymaganej konstrukcji kabla optotelekomunikacyjnego. Badania te, wymagają jednak dostępu do specjalistycznych stanowisk badawczych, za pomocą których jest możliwe uzyskanie określonych wymuszeń zewnętrznych, przy odpowiednim wzajemnym usytuowaniu badanych elementów konstrukcyjnych kanału i kabla względem siebie. Zgromadzona wiedza w poszczególnych dziedzinach nauk technicznych, takich jak: budowa i eksploatacja maszyn, przetwórstwo tworzyw polimerowych, inżynieria materiałowa, tribologia i teleinformatyka, umożliwiają wstępne rozpoznanie zjawisk powstających w analizowanych elementach konstrukcyjnych. Przy tego rodzaju rozbudowanej problematyce naukowej jest zasadne prowadzenie badań opartych na modelowaniu matematycznym, numerycznym wraz z weryfikacją doświadczalną określonego obiektu badań.

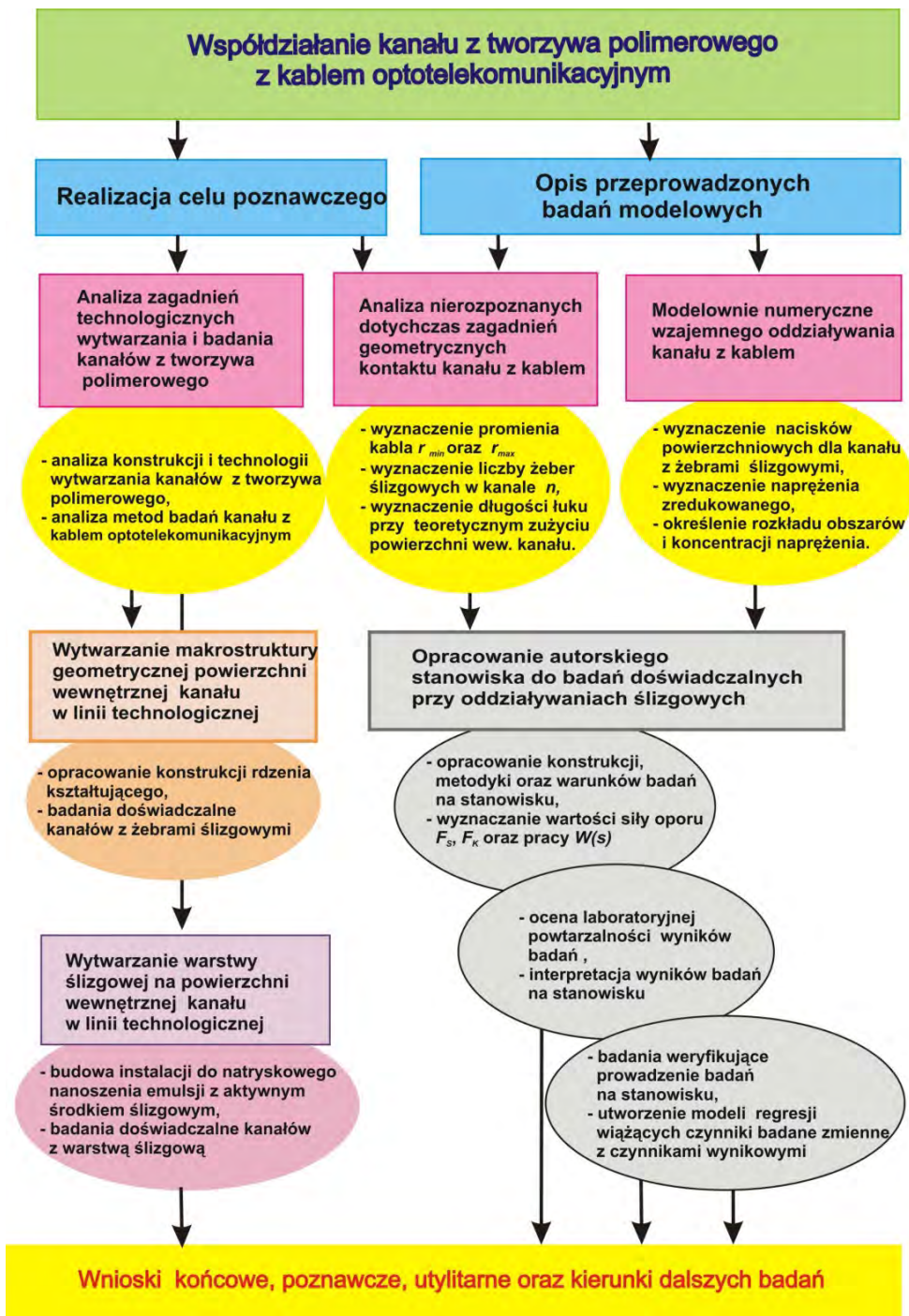
W niniejszej pracy, z uwagi na planowane osiągnięcie zakładanego celu rozprawy, autor przyjął koncepcję wyznaczania zależności geometrycznych oraz poznania przebiegu zjawisk fizycznych dotyczących wzajemnego oddziaływania kanału z tworzywa polimerowego z kablem optotelekomunikacyjnym. Ograniczony zakres badawczy dostępnych stanowisk badawczych oraz potrzeba weryfikacji doświadczalnej obiektu badań spowodowały, że badania te przeprowadzone zostaną z wykorzystaniem nowego, specjalnie do tego celu opracowanego stanowiska. Przyjęto, że wyznaczanie modelu mechanicznego działania stanowiska oraz określanie wielkości tribologicznych, takich jak

współczynnik tarcia oraz wartość rzeczywistego zużycia kanału nie będą w ramach tej pracy analizowane.

Badania modelowe i doświadczalne zostaną przeprowadzone dla wytypowanego tworzywa polimerowego kanału oraz określonych elementów geometrycznych, przy modyfikacji jego powierzchni wewnętrznej, metodami konstrukcyjnymi i technologicznymi (rys. 24). W oparciu o literaturę omówioną w rozdziale 1 ustalono, że wybór rodzaju struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału, w postaci żeber ślizgowych mających w przekroju poprzecznym kształt zbliżony do trójkątów równoramiennych, rokuje uzyskanie najlepszych efektów poznawczych i użytkarnych. Wybór rodzaju modyfikacji technologicznej kanału oparto natomiast na założeniu, że dodatkowa warstwa o dobrych właściwościach ślizgowych ma charakteryzować się małą grubością oraz dużą adhezją do powierzchni wewnętrznej kanału wykonanego z określonego tworzywa polimerowego.

Na podstawie analizy literatury oraz wyników wykonanych badań własnych, obejmujących zagadnienia wytwarzania i badania kanałów z tworzywa polimerowego sformułowano następujący problem badawczy rozprawy oraz cele badawcze i użytkarne.

Wykorzystanie metody konstrukcyjnej do konstytuowania powierzchni wewnętrznej kanału z tworzywa polimerowego podczas jego wytwarzania w linii technologicznej umożliwia wykonanie odpowiedniej struktury geometrycznej, która w istotny sposób wpływa na przebieg wzajemnego oddziaływania z kablem optotelekomunikacyjnym. W obszarze kontaktu kanału z kablem jest możliwe wyznaczenie metodą analityczną wielkości geometrycznych charakteryzujących tę strukturę, a wykorzystując metodę numeryczną obliczenie wartości nacisków powierzchniowych oraz wskazanie rozkładu naprężeń, w zależności od zadanych wymuszeń zewnętrznych. Ocenę współdziałania odcinków kanałów z kablem optotelekomunikacyjnym planuje się wykonać na podstawie wyników pomiarów wartości siły oporu powstającej w kablu podczas badań z wykorzystaniem nowego stanowiska badawczego.



Rys. 24. Schemat zagadnień badawczych opisywanych w rozprawie

Określono także szczegółowe cele rozprawy, które obejmują:

- poznanie zjawisk fizykalnych, zachodzących podczas wzajemnego oddziaływania kanału z tworzywa polimerowego z kablem optotelekomunikacyjnym,
- opracowanie nowej konstrukcji stanowiska oraz metodyki prowadzenia badań na wycinkach kanałów z tworzywa polimerowego w warunkach oddziaływania z kablem optotelekomunikacyjnym, przy docisku kabla do powierzchni kanału.
- analizę możliwości wytwarzania struktury geometrycznej w postaci żeber ślizgowych na wewnętrznej powierzchni kanału z tworzywa polimerowego mających określoną liczbę, kształt i wymiary,
- ocenę i charakterystykę wpływu kształtu, wymiarów oraz wzajemnego położenia względem siebie elementów struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału, w postaci żeber ślizgowych, na efektywność współdziałania z kablem optotelekomunikacyjnym,
- opracowanie metody nanoszenia na wewnętrzną powierzchnię kanału, podczas procesu jego wytłaczania w linii technologicznej, emulsji polimerowej, zawierającej aktywne składniki dodatkowe o dobrych właściwościach ślizgowych,
- ocenę oraz dobór emulsji polimerowej z aktywnymi składnikami dodatkowymi o dobrych właściwościach ślizgowych, na możliwość uzyskania mniejszych wartości oporów ruchu, podczas współdziałania kanału z kablem optotelekomunikacyjnym w ustalonych warunkach.

Uwzględniając to, że opisywane zagadnienia mają aspekty praktyczne, wskazano także cele utylitarne. Dotyczą one głównie możliwości określenia zaleceń konstrukcyjnych oraz technologicznych, przydatnych przy projektowaniu nowych konstrukcji kanałów z tworzywa polimerowego, umożliwiających właściwy dobór liczby, kształtów oraz wymiarów żeber ślizgowych w zależności od rodzaju i wymaganych wymiarów kabla optotelekomunikacyjnego.

Rozdział 2

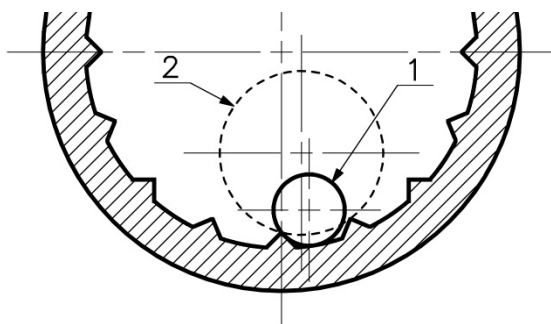
MODELE MATEMATYCZNE OPISUJĄCE KONTAKT KANAŁU Z KABLEM

2.1. Wstęp

Zastosowanie odpowiedniej metody wprowadzania kabla optotelekomunikacyjnego do wnętrza kanału z tworzywa polimerowego oraz warunków prowadzenia tego procesu, pozwala na uzyskanie określonych wskaźników efektywności budowy określonego odcinka linii optotelekomunikacyjnej. Jednym z najważniejszych czynników, które należy uwzględnić już przy projektowaniu linii, jest właściwy dobór rodzaju i konstrukcji kanału do wymiarów kabla. Konstrukcja kabla optotelekomunikacyjnego, średnica zewnętrzna, rodzaj i charakterystyka powłoki zewnętrznej jest znana i opisana np. w podręcznikach [33, 93], a podstawowe wymagania w normach [209, 211, 213]. Brak jest jednak informacji oraz wyników badań dotyczących doboru kanału z tworzywa polimerowego do określonego rodzaju kabla. Jest to szczególnie istotne z uwagi na to, że w wyniku stosunkowo niedużej modyfikacji rdzenia kształtującego głowicy wyłaczarskiej, jest możliwe wykonanie podczas wytwarzania kanału w linii technologicznej wymaganych makrowzniesień lub makrowgłębień, prowadzących do otrzymania żeber ślizgowych lub rowków o żądanych kształtach i wymiarach [25, 101, 105, 160].

Z tego też względu analiza i bliższe poznanie kontaktu w obszarze współdziałania tych dwu elementów konstrukcyjnych – kabla i kanału, ma duże znacznie poznawcze. Dzięki temu możliwe jest zaprojektowanie wymaganej struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanał i odniesienie uzyskanych zależności do określonych wymiarów kabla [33, 124].

Nieuwzględnienie zależności związanych z różnymi, możliwymi wymiarami kabla oraz kształtem elementów geometrycznych kanału (rys. 25), może powodować (na przykład przy zbyt małej średnicy kabla), że wzajemne współdziałanie w tym obszarze, będzie zachodzić w niekorzystnych warunkach. W tym przypadku, podczas umieszczania kabla we wnętrzu kanału, może to powodować zwiększenie oporów ruchu, przekroczenie dopuszczalnych naprężeń rozciągających w kablu i w efekcie prowadzić do powstawania mikropęknięć we włóknach światłowodowych [127]



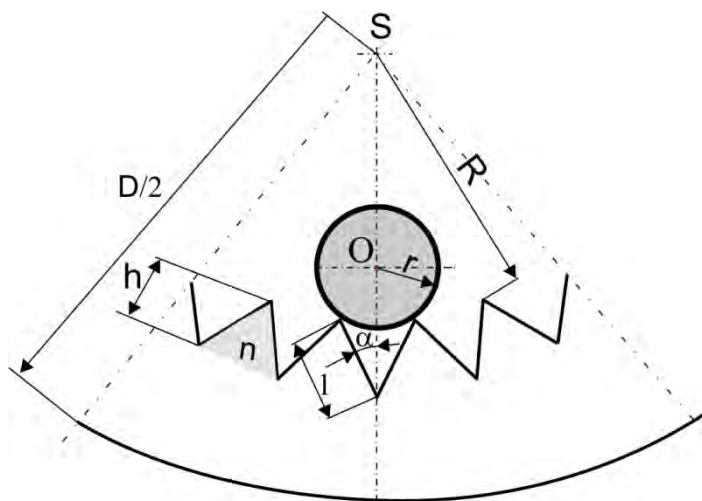
Rys. 25. Przykład wzajemnego współdziałania kanału z kablem: 1 – kabel o zbyt małej średnicy, 2 – kabel o prawidłowo dobranej średnicy

Obszar kontaktu kabla i kanału z tworzywa polimerowego mającego na wewnętrznej powierzchni charakterystyczne, celowo wykonane makrowzniesienia – żebra ślizgowe, można opisać zależnościami geometrycznymi. Po zrzutowaniu na płaszczyznę i przyjęciu założeń nieodkształcalności elementów konstrukcyjnych, analizę kontaktu kanału z kablem można przeprowadzać w odniesieniu do wymiarów oraz kształtów żeber ślizgowych kanału, ich liczby, wysokości, a także wymiarów kabla.

2.2. Podstawowe założenia modelowania matematycznego elementów konstrukcyjnych kanału i kabla

Do modelowania matematycznego kontaktu kanału z kablem przyjęto, że kanał oraz kabel optotelekomunikacyjny są wycinkami elementarnymi, a wartości i kierunki działania wymuszeń zewnętrznych powstających w obszarze kontaktu, nie będą w tym przypadku uwzględniane. Dzięki takim założeniom interesujące zależności w obszarze analizowanych modelowych

elementów konstrukcyjnych, można wyznaczyć za pomocą funkcji trygonometrycznych. Elementy konstrukcyjne opisano więc figurami geometrycznymi (rys. 26) odpowiednio: kabel – kołem o promieniu mniejszym niż promień wewnętrzny kanału, kanał – kołem o promieniu odpowiadającym promieniowi podstawy żeber ślizgowych. Ponadto przyjęto, że żebra w przekroju poprzecznym mają kształt trójkątów równoramiennych i są rozmieszczone równomiernie na obwodzie podstawy żeber. Żebra mają określoną wysokość, a ich liczba zawiera się w zakresie od 20 do 140. Uwzględniono także, że początek kontaktu kanału z kablem, rozpoczyna się od takiego położenia, w którym kabel styka się z co najmniej dwoma kolejnymi wierzchołkami żeber ślizgowych kanału.



Rys. 26. Schemat wzajemnego położenia elementów konstrukcyjnych przy analizie opisanej zależnościami trygonometrycznymi: r – promień kabla, D – średnica zewnętrzna kanału, R – promień wewnętrzny kanału, n – liczba żeber, h – wysokość żebra, l – długość powierzchni bocznej żebra, α – kąt pomiędzy odcinkami łączącymi punkt S z wierzchołkami dwóch kolejnych żeber, O – środek przekroju kabla, S – środek przekroju kanału

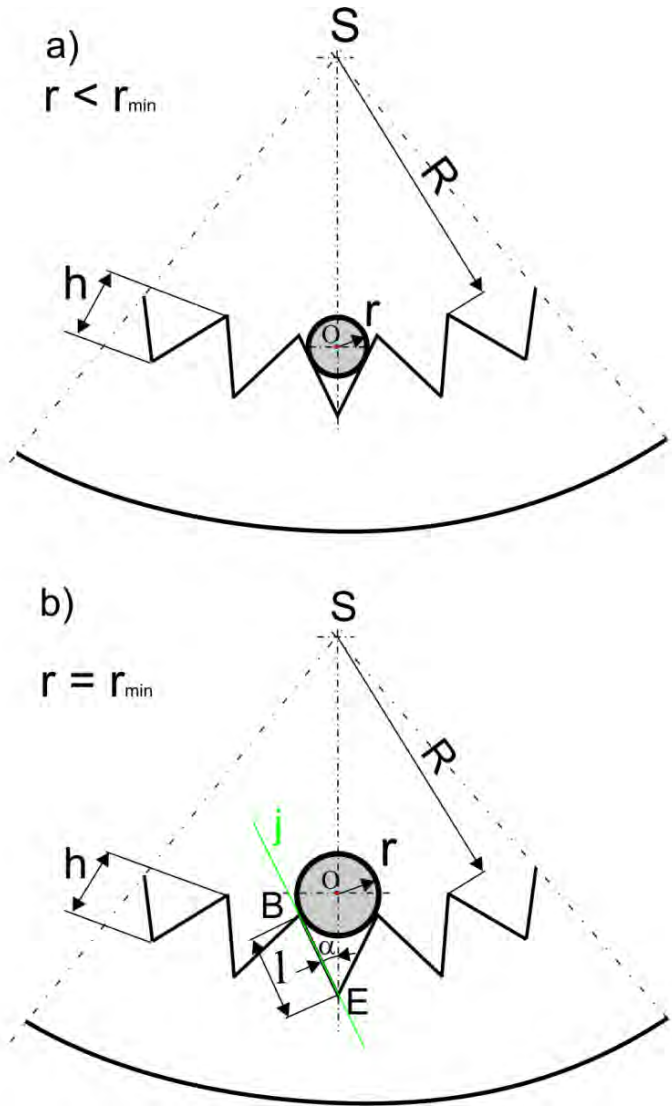
Z uwagi na to, że metodami analitycznymi można wyznaczyć wzajemne relacje poszukiwanych wielkości geometrycznych, kontakt kanału z kablem analizowano przy dwóch przypadkach granicznych. Na tej podstawie wyznaczano najmniejszą i największą wartość promienia r_{min} oraz r_{max} kabla, przy odpowiednio dobranych wymiarach elementów geometrycznych kanału.

Przyjęto że, najmniejszą wartość promienia kabla r_{min} (pierwszy przypadek graniczny) wyznacza się, gdy koło określone tym promieniem (odpowiadające średnicy kabla) nie zawiera się już pomiędzy liniami tworzącymi wewnętrzny zarys dwu kolejnych żeber ślizgowych, ale gdy zachodzi jego styczność z powierzchniami bocznymi żeber (rys. 27b). Natomiast wartość promienia kabla r_{max} (drugi przypadek graniczny) wyznacza się wtedy, gdy w wyniku teoretycznego zużycia dwóch kolejnych wierzchołków żeber (rys. 29b), kabel przemieszcza się o określoną wartość y_z , w efekcie czego zachodzi styczność powierzchni zewnętrznej kabla z dwoma następnymi skrajnymi wierzchołkami żeber.

2.2.1. Wyznaczanie najmniejszej wartości promienia kabla

W celu wyznaczenia najmniejszego promienia kabla z uwagi na korzystne współdziałanie z kanałem mającym żeber ślizgowe, analizowano układ, gdy kabel o promieniu r znajduje się w osi makrowgłębienia, tzn. pomiędzy dwoma tworzącymi sąsiednie zarysy boczne żebrami. W takim przypadku kontakt kabla z kanałem można opisać przy pomocy figur płaskich (rys. 27). Wyznaczanie najmniejszej wartości promienia kabla r_{min} można opisać w odniesieniu do przyjętych założeń oraz określonego kształtu żeber ślizgowych.

W przypadku gdy promień kabla ma małą wartość kontakt z kanałem zachodzi na powierzchniach bocznych tworzących zarys dwóch kolejnych żeber (rys. 27a). Przy zwiększeniu wymiarów kabla, kontakt z kanałem zachodzi na wierzchołkach tych żeber (rys. 27b). W celu wyznaczenia wartości najmniejszego promienia r_{min} kabla (dla pierwszego przypadku granicznego), można w punkcie przechodzącym przez wierzchołek B żebra wyznaczyć styczną j , a wartość kąta BSE oraz długości poszczególnych odcinków charakterystycznych określić na podstawie przyjętych założeń.



Rys. 27. Schemat kontaktu kanału z kablem: a – w przypadku, gdy kabel ma zbyt mały promień, b – w przypadku gdy promień kabla ma najmniejszą graniczną wartość (r_{min}): r – promień kabla, R – promień wewnętrzny kanału, l – długości powierzchni bocznej żebra, B, E – punkty charakterystyczne, α – kąt pomiędzy dwoma wektorami wiodącymi dwóch kolejnych wierzchołków żeber, j – styczna z powierzchnią boczną żebra, O – środek przekroju kabla, S – środek przekroju kanału

W tym przypadku długości odcinków charakterystycznych wynoszą: SB= R , SE= $R+h$, BO= r , kąt BSE = $\frac{\pi}{n}$, a długość linii tworzącej powierzchnię boczną żebra $l = BE$. Z trójkątą OBE otrzymuje się:

$$\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{l}{\sin \frac{\pi}{n}} \quad (2.1)$$

oraz

$$r_{\min} = l \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.2)$$

Wykorzystując wzór (2.1) w zależności (2.2) uzyskuje się:

$$r_{\min} = \frac{R l \sin \frac{\pi}{n}}{\sqrt{l^2 - R^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}}} \quad (2.3)$$

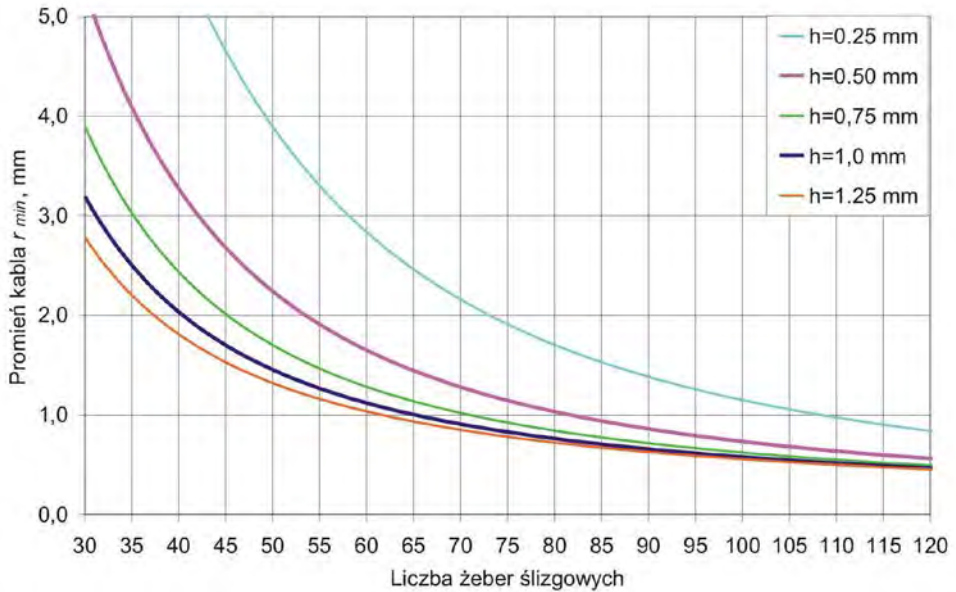
natomiast z trójkąta BSE można wyznaczyć długość odcinka l :

$$l^2 = R^2 + (R+h)^2 - 2R(R+h) \cos \frac{\pi}{n} \quad (2.4)$$

Ostatecznie wartość promienia r_{\min} kabla można wyznaczyć ze wzoru

$$r_{\min} = \frac{R \sin \frac{\pi}{n} \sqrt{R^2 + (R+h)^2 - 2R(R+h) \cos \frac{\pi}{n}}}{R \left(1 - \cos \frac{\pi}{n} \right) + h} \quad (2.5)$$

Przy podstawieniu do wzoru (2.5) konkretnych wartości promienia R oraz wysokości h żebra ślizgowego, uzyskuje się poszukiwaną zależność graficzną (rys. 28). Na podstawie tej zależności dla przyjętych założeń modelowania matematycznego określono wartość najmniejszego promienia r_{\min} kabla, w zależności od liczby żeber ślizgowych umieszczonych na wewnętrznej powierzchni kanału.



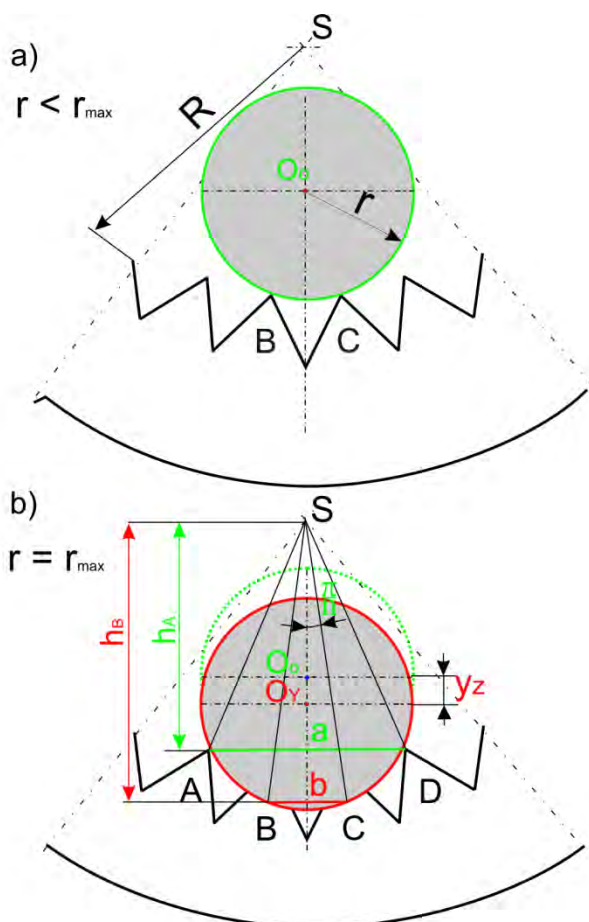
Rys. 28. Przykład zależności promienia kabla r_{min} od liczby żeber ślizgowych, przy określonej wartości wewnętrznego promienia kanału $R = 16,3$ mm oraz wysokości żeber $h = 0,25 \div 1,25$ mm

Z wykresu (rys. 28) wynika, że przy przyjętych założeniach liczba żeber wykonana na wewnętrznej powierzchni kanału ma duży wpływ na właściwy dobór wymiarów kabla. Ponadto, wartość promienia kabla przy skojarzeniu z kanałem, w zależności od przyjętej wysokości żeber ślizgowych, można tak dobrać aby przy określonej ich liczbie nie występowało niekorzystne zjawisko styku kabla z liniami bocznymi makrowłębienia tworzącego dwa kolejne żebra ślizgowe kanału.

Przy mniejszej liczbie żeber oraz małej ich wysokości wartość promienia kabla r_{min} przyjmuje wartości większe. Wynika to z tego, że wraz ze wzrostem liczby żeber, wartość kąta wierzchołkowego BSE maleje. Odpowiednie dobranie wartości promienia większego od r_{min} pozwala przypuszczać, że kontakt kabla z wierzchołkami dwu sąsiednich żebrach chodźć będzie wyłącznie na wierzchołkach tych żeber.

2.2.2. Wyznaczanie największej wartości promienia kabla

Metodą analityczną można wykazać także, że promień kabla nie powinien być większy od określonej wartości promienia r_{max} . W tym celu (dla drugiego przypadku granicznego) przyjęto dodatkowe założenia. Kontakt kabla z kanałem rozpoczyna się na wierzchołkach B oraz C żeber (rys. 29a), a kończy (rys. 29b), gdy kabel styka się z krawędzią krzywoliniową, powstałą w efekcie teoretycznego zużycia żeber ślizgowych z dwoma kolejnymi wierzchołkami A oraz D w wyniku przemieszczenia się kabla o określoną wartość y_z .



Rys. 29. Schemat obszaru kontaktu kabła z kanałem: a – kontakt kabła z wierzchołkami żeber przy położeniu początkowym ($y_z=0$), b – kontakt kabła z wierzchołkami żeber przy położeniu końcowym ($y_z=\max$), y_z – wartość przemieszczenia kabła w wyniku teoretycznego zużycia

Sytuację tę przedstawia rys. 29b, na którym dwa sąsiednie żebra (B oraz C) uległy teoretycznemu zużyciu, natomiast środek kabla przemieścił się z położenia w punkcie O_0 do położenia O_Y . Punkty O_0 oraz O_Y leżą na osi pionowej, przechodzącej przez środek analizowanego układu. Zużycie w ujęciu modelowym dotyczy więc dwóch sąsiednich żeber i może być wyrażone w zależności od wartości przemieszczenia y_z oraz wartości promienia r_{max} kabla.

Dla określonych wartości kątów:

$$ASD = \frac{6\pi}{n} \quad \text{oraz} \quad BSC = \frac{2\pi}{n},$$

długość odcinków AD oraz BC można oznaczyć symbolami a oraz b , zaś wysokości trójkątów SAD oraz SBC odpowiednio symbolami h_A oraz h_B . Z trójkąta SAD oraz trójkąta SBC otrzymuje się następujące związki:

$$a = 2R \sin \frac{3\pi}{n}, \quad h_A = R \cos \frac{3\pi}{n} \quad (2.6)$$

oraz

$$b = 2(R + y_z) \sin \frac{\pi}{n}, \quad h_B = (R + y_z) \cos \frac{\pi}{n} \quad (2.7)$$

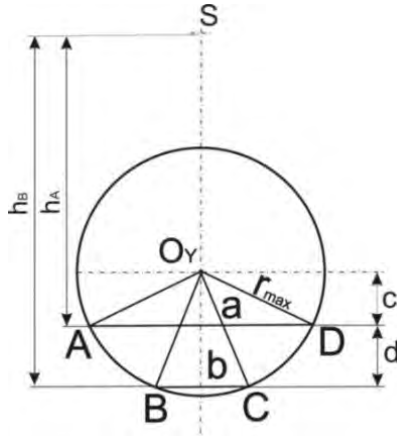
Zależność pomiędzy promieniem r_{max} kabla (rys. 29b) oraz odcinkami o długości a oraz długości b można uzyskać rozwiązując układ równań:

$$\begin{cases} r_{max}^2 = c^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 \\ r_{max}^2 = (c + d)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (2.8)$$

gdzie: c – wysokość trójkąta O_YAD , zaś $(c + d)$ – wysokość trójkąta O_YBC .

Odległość d pomiędzy odcinkami AD oraz BC można wyrazić jako różnicę długości h_A oraz h_B (rys. 30).

$$d = h_B - h_A = (R + y_z) \cos \frac{\pi}{n} - R \cos \frac{3\pi}{n} \quad (2.9)$$



Rys. 30. Schemat usytuowania punktów charakterystycznych na obwodzie koła reprezentującego średnicę kabla

Z układu równań (2.8) po podstawieniu danych otrzymuje się:

$$r_{\max}^2 = \frac{1}{4d^2} \left[\left(\frac{a}{2} \right)^2 - \left(\frac{b}{2} \right)^2 - d^2 \right] + \left(\frac{a}{2} \right)^2 \quad (2.10)$$

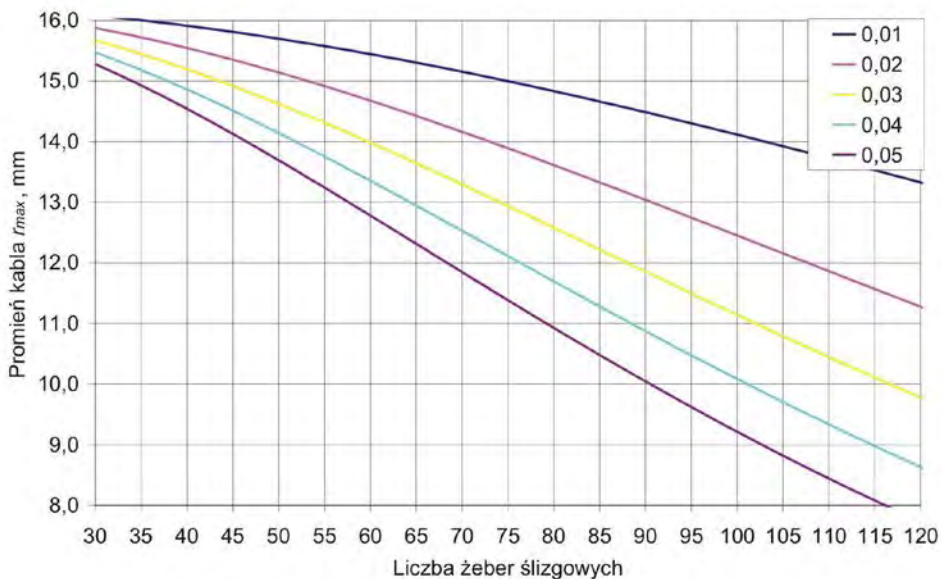
Wykorzystując związki (2.6), (2.7) oraz (2.10), uzyskuje się zależność (2.11) do wyznaczania wartości promienia r_{\max} :

$$r_{\max}^2 = \frac{\left[(R + y_z)^2 + R^2 - 2R(R + y_z) \cos \frac{2\pi}{n} \right] \left[(R + y_z)^2 + R^2 - 2R(R + y_z) \cos \frac{4\pi}{n} \right]}{4 \left[(R + y_z) \cos \frac{\pi}{n} - R \cos \frac{3\pi}{n} \right]^2}$$

i ostatecznie,:

$$r_{\max} = \frac{\sqrt{\left[y_z^2 + 4R(R + y_z) \sin^2 \frac{\pi}{n} \right] \left[y_z^2 + 16R(R + y_z) \sin^2 \frac{\pi}{n} \cos^2 \frac{\pi}{n} \right]}}{2 \left(y_z + 4R \sin^2 \frac{\pi}{n} \right) \cos \frac{\pi}{n}} \quad (2.12)$$

Zależność (2.12) umożliwia powiązanie ze sobą wielkości geometrycznych charakteryzujących określone wartości przemieszczenia się kabla, w wyniku teoretycznego zużycia żeber ślizgowych, w odniesieniu do ich liczby i wymiarów. Przy przyjęciu konkretnej wartości przemieszczenia kabla y_z , jest możliwe wyznaczanie poszukiwanej wartości promienia r_{max} w zależności od liczby żeber ślizgowych (rys. 31), jaka powinna być wykonana na powierzchni wewnętrznej kanału o określonym promieniu R .

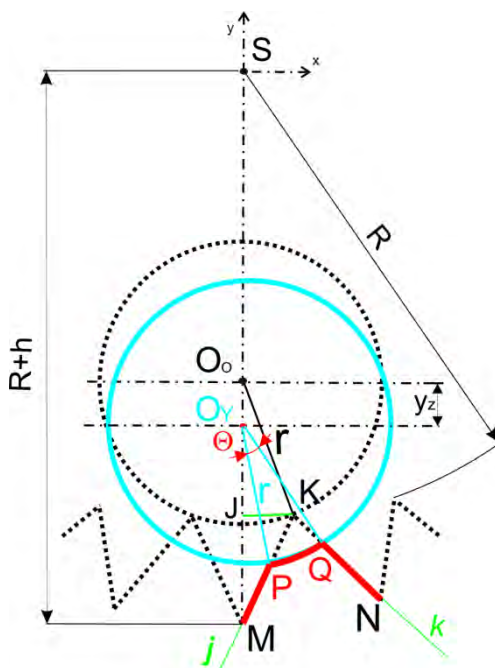


Rys. 31. Przykład zależności liczby żeber ślizgowych znajdujących się na wewnętrznej powierzchni kanału o promieniu $R=16,5$ od wartości promienia kabla r_{max} przy określonej wartości przemieszczenia kabla $y_z=0,01\div0,05$ mm

Z wykresu (rys. 31) wynika, że w przypadku przewidywanej dużej wartości teoretycznego zużycia żeber ślizgowych określonego wartością przemieszczenia się kabla y_z , promień r_{max} kabla powinien przyjmować mniejszej wartości. Tak więc, w przypadku wytworów w postaci kanałów mających zdeterminowaną liczbę żeber ślizgowych, korzystna dla przyjętych założeń wartość promienia r kabla, powinna zawierać się w zakresie zmian $r_{min} > r > r_{max}$.

2.2.3. Wyznaczanie wartości teoretycznego zużycia żeber ślizgowych

Wartość zużycia żeber ślizgowych kanału można określać teoretycznie z wykorzystaniem geometrii analitycznej. W tym przypadku wartość teoretycznego zużycia żeber ślizgowych może stanowić różnicę pola obszaru żeber przed oraz po przemieszczeniu się kabla. Przy różnych wymiarach wysokości oraz liczby żeber, suma pól teoretycznego zużycia rozpatrywana łącznie może mieć podobne wartości, dlatego też przyjęto, że obliczenia obszarów styku kanału z kablem odniesione zostaną do długości krzywej zużycia opisującej pojedyncze zębro ślizgowe kanału. W tym przypadku krzywa teoretycznego zużycia może być wyznaczana jako długość łuku (rys. 32) części wspólnej okręgu reprezentującego przekrój kabla oraz zużytego wierzchołka zębra, po przemieszczeniu kabla o zadaną wartość y_z .



Rys. 32. Schemat wyznaczania współrzędnych punktów P oraz Q prowadzących do określenia długości łuku l_{PQ} w obszarze wierzchołków żeber ślizgowych przy teoretycznym zużyciu spowodowanym przemieszczeniem się kabla o określoną wartość y_z ; x, y – przyjęty układ osi współrzędnych (pozostałe oznaczenia w tekście).

Na płaszczyźnie prostopadłej do osi kanału wyznaczono punkty O_o oraz O_Y odpowiadające położeniu środka okręgu reprezentującego kabel, odpowiednio w położeniu początkowym ($y_z=0$) oraz końcowym ($y_z=\max$). Do obliczenia długości łuku, oprócz założeń przyjętych do podrozdziału 2.2.2, przyjęto założenia dodatkowe. Ustalono położenie środka kanału S , w początku układu współrzędnych oraz wskazano punkty charakterystyczne M , N . Punkt M , będący początkiem odcinka tworzącego powierzchnię boczną pojedynczego żebra, położono na osi rzędnych SY , natomiast punkt N , będący końcem odcinka tworzącego to samo żebro w tej samej płaszczyźnie. Odległość obu tych punktów od środka kanału wynosi $(R+h)$. Wskazano położenia punktu K na okręgu odpowiadającym przekrojowi kabla w położeniu początkowym ($y_z=0$), gdy jego odległość od punktu S ma wartość R .

Z przyjętych założeń wynika, że położenia punktów M , N , K , charakteryzujące żebro ślizgowe mają następujące współrzędne:

$$M \left(0, -R-h \right) \quad (2.13)$$

$$N \left(R+h \sin \frac{2\pi}{n}, -R-h \cos \frac{2\pi}{n} \right) \quad (2.14)$$

$$K \left(R \sin \frac{\pi}{n}, -R \cos \frac{\pi}{n} \right) \quad (2.15)$$

Dodatkowo oznaczono przez punkt J rzut prostopadły punktu K , będący wierzchołkiem żebra ślizgowego, na oś SY . Punkt J ma więc współrzędne:

$$J \left(0, -R \cos \frac{\pi}{n} \right) \quad (2.16)$$

Z trójkąta SJK mamy $JK = R \sin \frac{\pi}{n}$, a zatem:

$$O_o J = \sqrt{r^2 - JK^2} = \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \quad (2.17)$$

stąd wynika, że:

$$SO_o = SJ - O_o J = R \cos \frac{\pi}{n} - \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} \quad (2.18)$$

co oznacza, że punkt O_O ma współrzędne:

$$O_O \left(0, \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} - R \cos \frac{\pi}{n} \right) \quad (2.19)$$

Ponieważ O_Y jest środkiem okręgu (w położeniu na płaszczyźnie), przesuniętym o wartość przemieszczenia kabla y_z w odniesieniu do okręgu o środku w punkcie O_O (w chwili początkowej), zatem O_Y ma współrzędne:

$$O_Y \left(0, \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} - R \cos \frac{\pi}{n} - y_z \right) \quad (2.20)$$

Długość krzywej, będącej częścią wspólną przecięcia okręgu (reprezentującego kabel) z zębem ślizgowym, w wyniku teoretycznego zużycia, może być obliczona jako długość łuku okręgu $o(O_Y, r)$ pomiędzy prostymi j oraz k , zawierającymi odcinki MK oraz NK tworzące zębro. Równania prostych j oraz k można zapisać w postaci:

$$j; \quad y + R \cos \frac{\pi}{n} = \frac{-(R+h) + R \cos \frac{\pi}{n}}{-R \sin \frac{\pi}{n}} (x - R \sin \frac{\pi}{n}) \quad (2.21)$$

$$k; \quad y + R \cos \frac{\pi}{n} = \frac{-(R+h) \cos \frac{2\pi}{n} + R \cos \frac{\pi}{n}}{(R+h) \sin \frac{2\pi}{n} - R \sin \frac{\pi}{n}} (x - R \sin \frac{\pi}{n}) \quad (2.22)$$

Obliczenie długości łuku l_{PQ} umożliwia ustalenie zależności pomiędzy wartością przemieszczenia się kabla y_z , przy zakładanym teoretycznym zużyciu zębca ślizgowego kanału. Wykorzystując zależności:

$$P = j \cap o(O_Y, r) \quad \text{oraz} \quad Q = k \cap o(O_Y, r) \quad (2.23)$$

Stąd oraz ze wzorów (2.21) i (2.22) można wyznaczyć współrzędne punktów P oraz Q jako rozwiązanie dwóch układów równań:

$$\begin{cases} x^2 + \left(y - \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} - R \cos \frac{\pi}{n} - y_z \right)^2 = r^2 \\ y + R \cos \frac{\pi}{n} = \frac{-(R+h) + R \cos \frac{\pi}{n}}{-R \sin \frac{\pi}{n}} (x - R \sin \frac{\pi}{n}) \end{cases} \quad (2.24)$$

oraz

$$\begin{cases} x^2 + \left(y - \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} - R \cos \frac{\pi}{n} - y_z \right)^2 = r^2 \\ y + R \cos \frac{\pi}{n} = \frac{-(R+h) \cos \frac{2\pi}{n} + R \cos \frac{\pi}{n}}{(R+h) \sin \frac{2\pi}{n} - R \sin \frac{\pi}{n}} (x - R \sin \frac{\pi}{n}) \end{cases} \quad (2.25)$$

Z uwagi na duży stopień skomplikowania dalsze obliczenia zostały wykonane numerycznie z wykorzystaniem matematycznego programu komputerowego *Maple*, przykładowy zapis wymaganej procedury dla liczby żeber wynoszącej 36, zamieszczono w tab. 6.

Tabela 6

Procedura obliczania długości łuku

```
Dlugosc luku PQ t:=proc(R,r,h)
with(plots):
y0:=(r,R,n)->sqrt(r^2-R^2*(sin(Pi/n))^2)-R*cos(Pi/n):
n:=36:
punkty:=[]:
print("*****",n,"*****");
for u from 0.001 to 0.1 by 0.01 do
eq1:=x^2+(y-y0(r,R,n)+u)^2=r^2:
eq2:=y+R*cos(Pi/n)=(R+h-R*cos(Pi/n))*(x-
R*sin(Pi/n))/R/sin(Pi/n):
eq3:=y+R*cos(Pi/n)=(-(R+h)*cos(2*Pi/n)+R*cos(Pi/n))*
*(x-R*sin(Pi/n))/((R+h)*sin(2*Pi/n)-R*sin(Pi/n)):
y1:=-R-h:
y2:=-R*cos(Pi/n):
s1:=fsolve({eq1,eq2},{x,y},{y=y1..y2});
s2:=fsolve({eq1,eq3},{x,y},{y=y1..y2});
x1:=eval(x,s1);
```

```

s2:=fsolve({eq1,eq3},{x,y},{y=y1..y2});
x1:=eval(x,s1);
x2:=eval(x,s2);
y1:=eval(y,s1);
y2:=eval(y,s2);
l:=sqrt((x1-x2)^2+(y1-y2)^2);
punkty:=[op(punkty), [u,l]];
print(l)
end do;
kolor:=COLOR(RGB, rand()/10^12, rand()/10^12,
rand()/10^12);
wyk[36]:=pointplot(punkty,style=line,color=kolor):
display(wyk[36])
end proc:

```

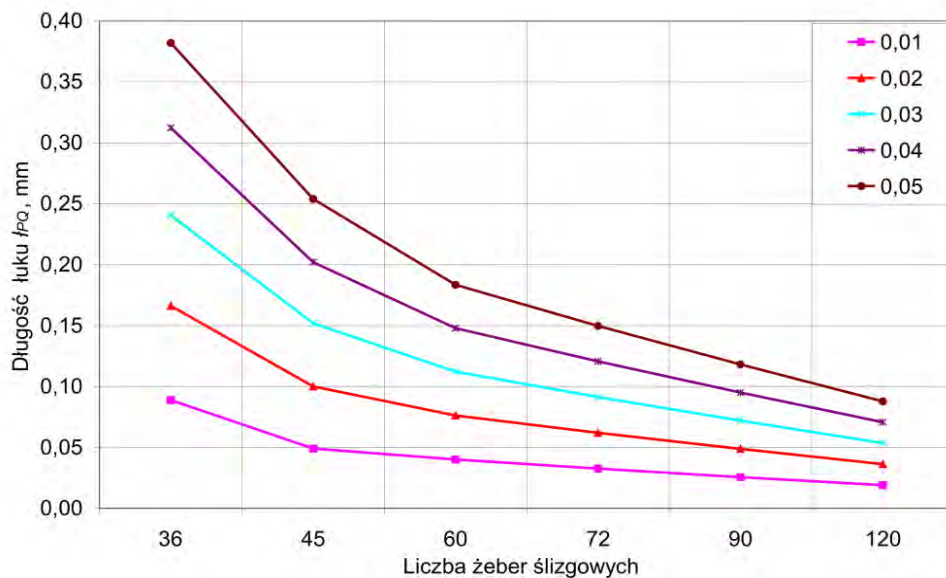
Dysponując współrzędnymi punktów P oraz Q można wyznaczyć długość odcinka PQ (rys. 32), a następnie długość łuku l_{PQ} . Miarę kąta θ wyznacza się z trójkąta $O_Y PQ$:

$$\theta = 2 \operatorname{arc} \sin \frac{PQ}{2r} \quad (2.26)$$

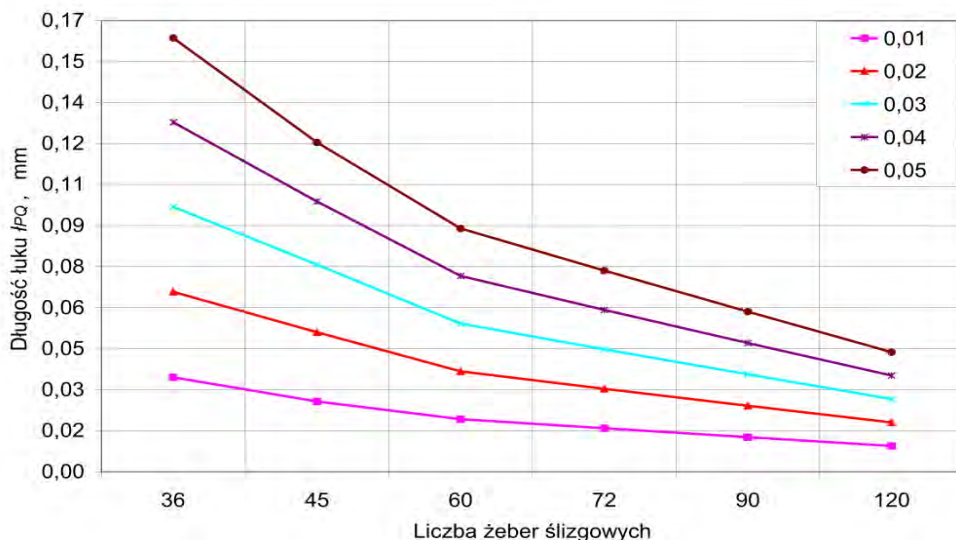
Stąd ostatecznie otrzymuje się wzór do obliczania długości łuku l_{PQ} przy teoretycznym zużyciu żebra ślizgowego kanału:

$$l_{PQ} = r\theta = 2r \operatorname{arc} \sin \frac{PQ}{2r} \quad (2.27)$$

Po podstawieniu do wzoru (2.27) określonych wymiarów kanału oraz kabla, można obliczyć długość łuku przy teoretycznym zużyciu żebra ślizgowego, w odniesieniu do wymaganej liczby żeber ślizgowych kanału (rys. 33 i rys. 34), przy założonej wartości przemieszczenia kabla y_z . Z przedstawionych wykresów wynika, że w zależności od wartości teoretycznego zużycia żebra ślizgowego przy określonym promieniu kabla oraz ustalonych wymiarach kanału, długość łuku zależy od liczby żeber ślizgowych oraz ich wysokości. Wraz ze zwiększaniem się liczby żeber długość łuku maleje proporcjonalnie do wysokości żebra oraz wartości teoretycznego zużycia.



Rys. 33. Zależności długości łuku w funkcji liczby zębów ślizgowych wyznaczone dla pojedynczego zębra ślizgowego, przy teoretycznym zużyciu spowodowanym przemieszczeniem się kabła o określonej wartości $y_z = 0,01 \div 0,05$ mm ($R=16,3$ mm, $r=6$ mm, $h=0,5$ mm)



Rys. 34. Zależności długości łuku w funkcji liczby zębów ślizgowych wyznaczone dla pojedynczego zębra ślizgowego, przy teoretycznym zużyciu spowodowanym przemieszczeniem się kabła o określonej wartości $y_z = 0,01 \div 0,05$ mm ($R=16,3$ mm, $r=6$ mm, $h=1$ mm)

2.3. Wnioski i ustalenia dotyczące modelowania matematycznego

Modelowanie matematyczne potwierdziło, że przy przyjęciu określonych założeń jest możliwa analiza teoretyczna elementów konstrukcyjnych kabla i kanału jako figur geometrycznych powiązanych ze sobą funkcjami trygonometrycznymi. W wyniku obliczeń wykazano, że poprzez odpowiedni dobór wartości promienia większego od promienia kabla r_{min} jego kontakt z dwoma sąsiednimi żebrami kanału zachodzi na wierzchołkach tych żeber, a nie z liniami bocznymi makrowłębienia tworzącego żebra. Przedstawiono także, że wartość promienia kabla r_{max} można wyznaczyć w przypadku przyjęcia określonego teoretycznego, zużycia żeber ślizgowych. W przedstawionych przypadkach granicznych ważnymi wielkościami, które należy uwzględniać podczas tego rodzaju analiz są: liczba żeber, wysokość żeber oraz promień wewnętrzny kanału.

Otrzymane wyniki obliczeń mogą być przydatne do wstępnej oceny prawidłowego doboru określonego kabla do kształtu i wymiarów kanału oraz przy projektowaniu nowych konstrukcji kanałów i kabli (załącznik A), mających zdeterminowaną liczbę żeber oraz ich wysokość. Na podstawie obliczeń stwierdzono, że najbardziej korzystne współdziałanie kanału mającego żebra ślizgowe będzie można uzyskać, gdy wymiary kabla zwiierać się będą w zakresie zmian od wartości promienia r_{min} do wartości promienia r_{max} . Określone założenia dotyczące teoretycznego zużycia żeber ślizgowych umożliwiają też prowadzenie modelowej analizy oddziaływania kanału z kablem. Poprzez wyznaczenie długości łuku, jaki powstaje przy teoretycznym przemieszczeniu się kabla w kierunku do powierzchni kanału, można wyznaczać poszukiwane zależności, np.: pomiędzy liczbą żeber, a promieniem kanału lub ich wysokością, a wielkością teoretycznego zużycia, itp.

Przyjęta do opisu autorska metodyka modelowania matematycznego kontaktu kanału z kablem wynikała z tego, że w dostępnej literaturze nie ma wyników badań analitycznych umożliwiających analizę modelową wzajemnego oddziaływania kanału mającego żebra ślizgowe, w aspektach współdziałania z kablem o określonych wymiarach. Jest to szczególnie istotne przy projektowaniu nowych konstrukcji, a także przy ocenie właściwego doboru kanału z uwagi na przewidywane warunki umieszczania w nim kabla optotelekomunikacyjnego.

Rozdział 3

MODELE NUMERYCZNE PRZEDSTAWIAJĄCE WZAJEMNE WSPÓLDZIAŁANIE KANAŁU Z KABLEM

3.1. Wstęp

W przypadku elementów konstrukcyjnych wykonanych z tworzyw polimerowych, na które działają określone wymuszenia zewnętrzne, przebieg złożonych procesów oraz zmiany stanu naprężenia i odpowiadające im wartości odkształcenia, zależą od wielu czynników [10, 11, 26]. Przy doborze tworzyw w celu uzyskania wymaganych efektów dąży się do tego, aby podczas współdziałania elementów konstrukcyjnych nie przekroczyć ich granicy lepkosprężystości. Z tego też względu, określenie poszukiwanych wielkości fizykalnych przede wszystkim siły oraz naprężenia jest możliwe na podstawie analizy zagadnień kontaktowych. Problematyce kontaktu zachodzącej na powierzchniach elementów konstrukcyjnych, w aspektach mechaniki poświęcono wiele prac naukowych, w których są przedstawione analityczne rozwiązania problemów technicznych opisujące stany naprężenia oraz odkształcenia w sąsiedztwie badanych punktów kontaktowych [17, 68, 101]. Publikacje dotyczące zagadnień kontaktowych można zdaniem autora, analizować w aspektach matematycznych, numerycznych i inżynierskich. Prowadzi to odpowiednio do otrzymania rozwiązań analitycznych dla uproszczonych przypadków, budowania i obliczania wzajemnych relacji w modelach obliczeniowych i wyznaczania przybliżonego rozwiązania oraz przedstawiania wzajemnych zależności fizykalnych umożliwiających porównanie obiektów do określonego wzorca.

Wielkości mające wpływ na przebieg wzajemnego współdziałania kabla z kanałem w obszarze żeber ślizgowych, znajdujących się na jego wewnętrznej powierzchni, nie są łatwe do wyznaczenia [25, 48, 60]. Jednym ze sposobów przedstawienia tego rodzaju zagadnień są obliczenia oparte na zależnościach znanych m.in. z teorii Herza [77, 81]. Jednak w tym przypadku z uwagi na to, że obszar kontaktu kanału z kablem zachodzi na wierzchołkach żeber ślizgowych, powstają trudności opisu tych elementów za pomocą wymaganych w tej teorii promieni krzywizny [40, 81]. Aby wykazać wpływ liczby żeber na wzajemne współdziałanie kanału z kablem, autor zdecydował się na wyznaczenie nacisków oraz stanu wyężenia materiału kanału z wykorzystaniem obliczeń numerycznych z modelowaniem metodą elementów skończonych.

3.2. Cel badań numerycznych

Celem badań numerycznych jest modelowe przedstawienie przebiegu zjawisk fizykalnych powstających podczas wzajemnego oddziaływania kanału, mającego określone żebra ślizgowe, z walcowym kształtownikiem, reprezentującym kabel optotelekomunikacyjny. Poznanie przebiegu tych zjawisk z wykorzystaniem tradycyjnych maszyn wytrzymałościowych lub pomiarów elastooptycznych z wykorzystaniem polaryskopów, jest w tym przypadku trudne. Wynika to głównie z charakteru kontaktu, wymiarów badanych elementów konstrukcyjnych oraz stosunkowo małego zakresu zmian wartości sił działających w obszarze kontaktu kanału z kablem.

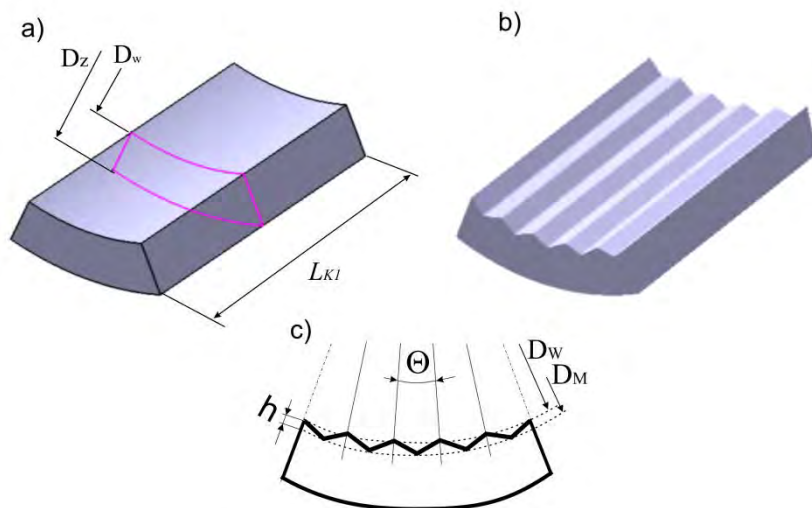
Przy tego rodzaju analizach podstawowym kryterium wytrzymałości konstrukcji są: maksymalne wartości nacisków powierzchniowych oraz naprężeń w elementach tej konstrukcji, odniesione do wartości dopuszczalnych (na przykład do wartości odkształcenia plastycznego) [40, 81]. W większości przypadków prowadząc badania z wykorzystaniem MES rejestruje się przebiegi zmian poszukiwanych wielkości fizycznych, w funkcji określonej zmiennej, np. czasu lub temperatury [34, 52, 100, 143]. Na dokładność otrzymywanych wyników ma wpływ m.in. odpowiedni wybór zdefiniowanego w programie komputerowym rodzaju kontaktu (*np.: node to surface, surface to surface, smal sliding, fine sliding, itp.*) [90, 95], warunki brzegowe, a także rodzaj oraz rozmiary elementów skończonych zastosowanych do dyskretyzacji modelu obliczeniowego.

W ramach analizy numerycznej kontaktu kabła z kanałem, wykonano obliczenia pozwalające na wyznaczenie w obszarze dwóch kolejnych wierzchołków żeber ślizgowych kanału, wartości nacisków normalnych oraz rozkładu naprężeń zredukowanych, będące efektem działania określonej siły dociskającej kabel, w kierunku prostopadłym do jego powierzchni.

Przyjęto, że badania numeryczne dostarczą wiadomości o przebiegu zjawisk w obszarze kontaktu kanał-kabel, a analiza wyników pozwoli na określenie wielkości siły nacisku kabła na kanał, przy której prowadzone będą badania doświadczalne z wykorzystaniem autorskiego stanowiska badawczego.

3.3. Podstawowe założenia modelowania elementów konstrukcyjnych kanału i kabła

Na potrzeby obliczeń metodą elementów skończonych (MES) kanał z tworzywa polimerowego zaprojektowano w programie CAD (*ang. Computer Aided Design*) – Catia v5. Przyjęto, że kanał będzie stanowił wycinek walca o średnicy zewnętrznej D_Z , średnicy wewnętrznej D_W oraz długości L_{KI} (rys. 35).



Rys. 35. Ogólny schemat modelowania wycinka kanału w programie Catia v5: a) model wycinka kanału walcowego, b) otrzymany model obliczeniowy wycinka kanału z żebrami ślizgowymi, c) profil zarysu żeber ślizgowych; D_Z – średnica zewnętrzna, D_W – średnica wewnętrzna do wierzchołków żeber, D_M – średnica wewnętrzna do wgłębień pomiędzy żebrami, L_{KI} – długość wycinka kanału, Θ - podziałka kąтова

Na tej podstawie zbudowano model podstawowy wycinka kanału walcowego (rys. 35 a), a następnie w nim wykonano odpowiednie zarisy profilu żeber ślizgowych (rys. 35 b, c). W efekcie tego uzyskano różne modele obliczeniowe mające określoną liczbę n żeber ślizgowych, rozmieszczonych równomiernie na obwodzie średnicy D_w wewnętrznej kanału. Żebra ślizgowe miały w przekroju poprzecznym kształt zbliżony do trójkątów równoramiennych, a wysokość żeber wynosiła 0,5 mm oraz 1,0 mm. Podstawowe rozmiary elementów konstrukcyjnych modeli zestawiono w tabeli 7.

Utworzono także model obliczeniowy kabla, w tym przypadku dla przejrzystości obliczeń, miał on postać odcinka połówki walcowego kształtownika o średnicy d_z wynoszącej 12 mm oraz długości L_{K2} równej 90 mm.

Tabela 7.

Podstawowe wielkości modeli obliczeniowych wycinka kanału

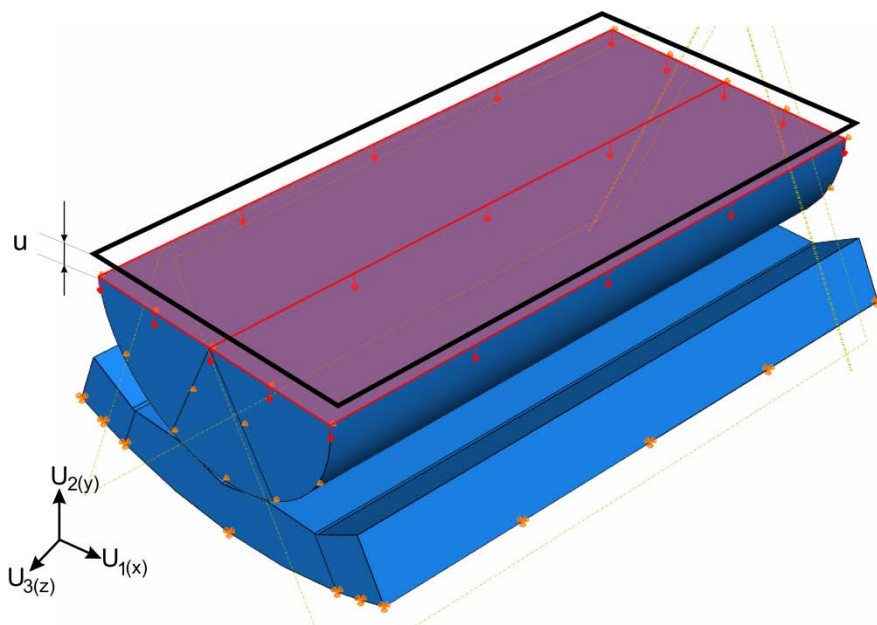
Wielkość charakterystyczna						
Liczba żeber ślizgowych, n	Podziałka kątowa koła D_w , $\theta, ^\circ$	Wysokość żeber ślizgowych		Średnica wewnętrzna wierzchołków żeber, D_w , mm	Średnica zewnętrzna wycinka kanału D_z , mm	Długość wycinka kanału, L_{K1} , mm
		h_1 , mm	h_2 , mm			
36	10	0,5	1,0	32,6	40	40
45	8					
60	6					
72	5					
90	4					
120	3					

Poszczególne modele obliczeniowe poddano dyskretyzacji na elementy skończone w programie Abaqus ver 6.7. Do obliczeń wykorzystano siatkę strukturalną elementów skończonych typu *hex*, opartą na ośmiowęzłowych elementach bryłowych, mających po trzy translacyjne stopnie swobody w każdym węźle. Otrzymanie wymaganej dokładności obliczeń wymagało przyjęcia odpowiednich wymiarów elementów skończonych. W obszarze kontaktu kanału z kablem rozmiar elementu siatki wynosił 0,3 mm,

natomiast w pozostałych obszarach, bezpośrednio nie rozpatrywanych w analizie kontaktu, elementy miały rozmiar 1,2 mm.

Dane wejściowe dla poszczególnych modeli obliczeniowych, obejmowały charakterystykę tworzywa kanału, tworzywa kabla, warunki brzegowe oraz wartości sił działających na poszczególne węzły modelu obliczeniowego [90, 95]. Dla sformułowanych układów badawczych, w celu uzyskania danych przydatnych do oceny wzajemnego oddziaływania kanału z kształtownikiem, przyjęto określone warunki brzegowe. Warunki te obejmowały utwierdzenie modelu kanału w kierunkach $U_{1(x)}$, $U_{2(y)}$, $U_{3(z)}$ poprzez odebranie węzłom znajdujących się na zewnętrznej powierzchni kanału wszystkich translacyjnych stopni swobody. W wyniku zablokowania węzłów na czołowej płaszczyźnie kształtownika na kierunkach $U_{1(x)}$, $U_{3(z)}$ uzyskano możliwość jego przemieszczenia tylko w kierunku $U_{2(y)}$ (rys. 36).

W poszczególnych modelach obliczeniowych poprzez odpowiednie przemieszczanie płaszczyzny kształtownika w kierunku prostopadłym do powierzchni wycinka kanału, w kierunku $U_{2(y)}$, wywoływano wymagany do obliczeń stan obciążenia.



Rys. 36. Schemat zdefiniowanych warunków brzegowych w analizie MES z powierzchnią kabla przesuniętą w kierunku prostopadłym o wartość u przemieszczenia w kierunku $U_{2(y)}$

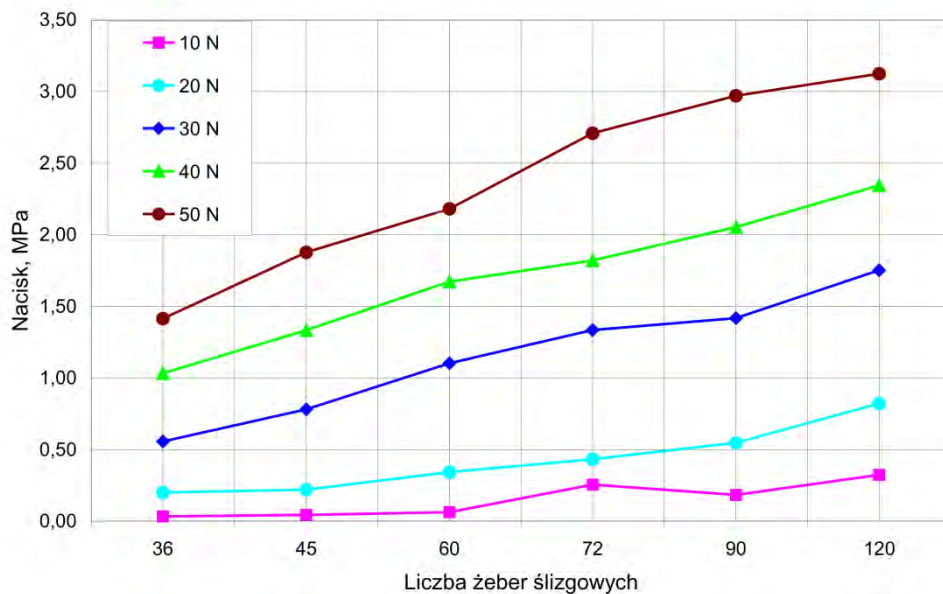
Określone wartości charakteryzujące relacje zachodzące w badanej konstrukcji pomiędzy tensorem naprężenia a tensorem odkształcenia, wprowadzono do programu w postaci danych liczbowych, otrzymanych na podstawie pomiarów z badań laboratoryjnych. Pomiarów te, prowadzono na próbkach wykonanych z tworzywa polietylenowego, z którego jest planowane wytworzenie kanałów do późniejszych badań doświadczalnych. Wartości modułu sprężystości wzdłużnej oraz współczynnika odkształcenia postaciowego charakteryzującego materiał kanału oraz materiał kształtownika wynosiły odpowiednio 736 MPa oraz 0,42.

W obszarze styku kształtownika z dwoma sąsiadującymi żebrami ślizgowymi kanału, zamodelowano kontakt powierzchniowy (*ang.: surface to surface contact*), zdefiniowany jako interakcja powierzchniowa w funkcji naprężeń normalnych. Dla poszczególnych modeli obliczeniowych w przyjętym zakresie wartości przemieszczenia kształtownika uwzględniano nieliniowy charakter oddziaływań. Przy określonej liczbie stopni swobody poszczególnych elementów bryłowych, wymagało to stosowania przyrostowo - iteracyjnej metody Newtona – Raphsona (N-R) [95]. Liczba równań była równa liczbie węzłów pomnożonych przez liczbę stopni swobody w każdym węźle. Rozwiązaniem utworzonych układów równań były wartości poszukiwanych wielkości fizycznych (nacisku oraz naprężenia zredukowanego) we wszystkich węzłach w odniesieniu do określonej siły nacisku kabla na zebra ślizgowe kanału.

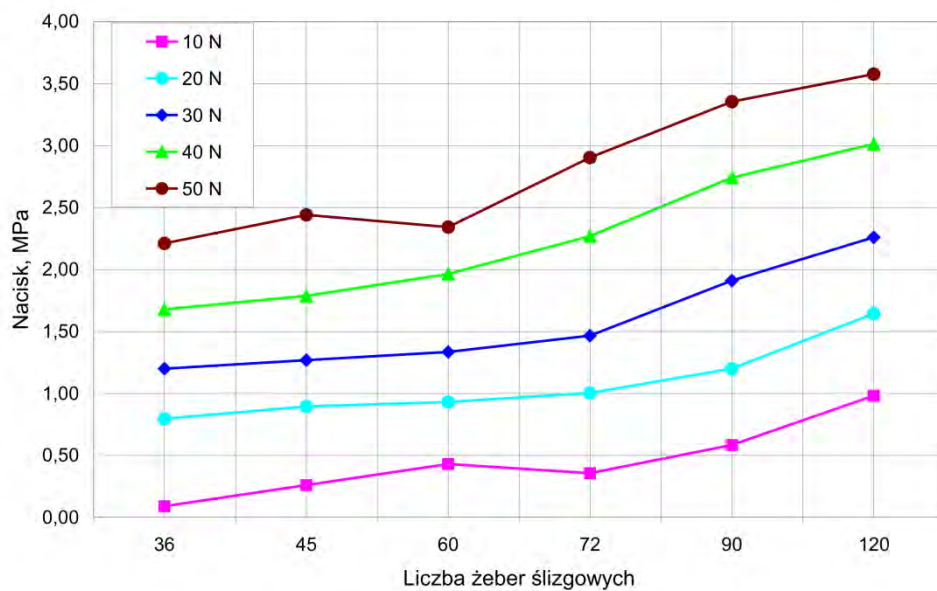
3.4. Wyniki analizy numerycznej

W obliczeniach numerycznych MES, dla każdego przypadku modelu obliczeniowego w poszczególnych węzłach kanału i kształtownika, wyznaczano średnie naciski powierzchniowe oraz rozkłady naprężenia zredukowanego Hubera-Misesa-Hencky'ego w zależności od liczby, kształtu oraz wysokości żeber ślizgowych kanału. W tym przypadku, z uwagi na korzystniejszy przebieg współdziałania kanału z kablem, poszukiwano wartości przy których rejestruje się najmniejsze wartości tych wielkości.

Wyniki obliczeń średnich wartości nacisków powierzchniowych w obszarze wierzchołków żeber ślizgowych w odniesieniu do wysokości żeber, przedstawiono w formie graficznej na wykresach (rys. 37, 38).



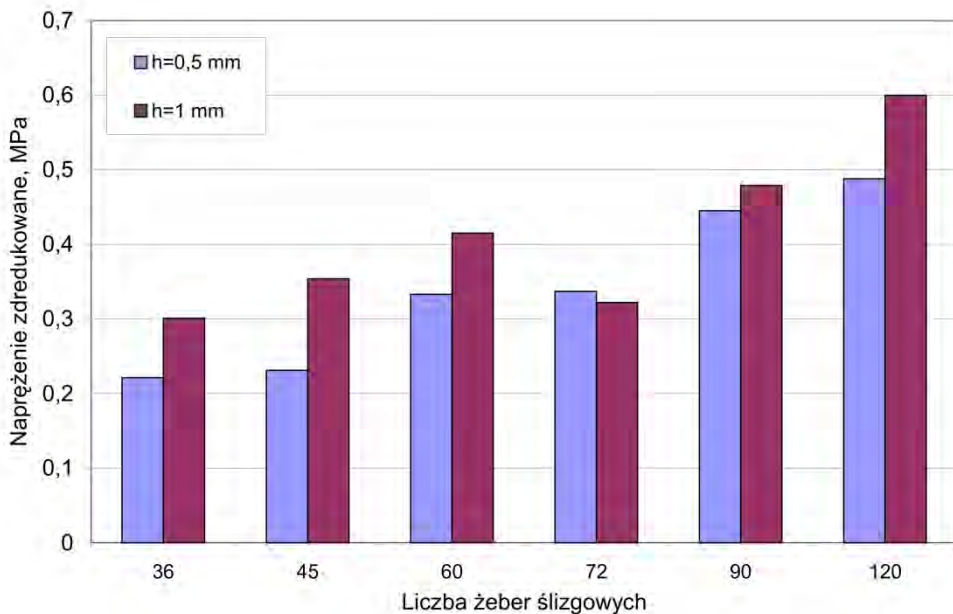
Rys. 37. Zależność średnich wartości nacisków powierzchniowych w obszarze wierzchołków żeber ślizgowych kanału o wysokości $h=0,5$ mm, w funkcji liczby żeber ślizgowych, przy różnych wartościach siły nacisku od 10 do 50 N



Rys. 38. Zależność średnich wartości nacisków powierzchniowych w obszarze wierzchołków żeber ślizgowych kanału o wysokości $h=1$ mm, w funkcji liczby żeber ślizgowych, przy różnych wartościach siły nacisku od 10 do 50 N

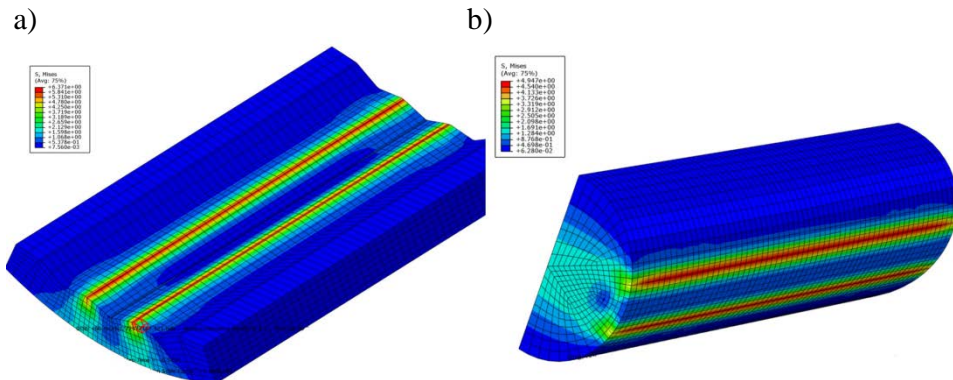
Otrzymane wyniki ukazują, że wraz ze wzrostem obciążenia działającego na kształtownik uzyskuje się w kanale większe wartości nacisków powierzchniowych. Wynika to m.in. z tego, że wraz ze wzrostem liczby żeber kanału zmniejsza się rzeczywista powierzchnia kontaktu z kablem. Wartość składowej siły nacisku działającej w kierunku prostopadłym do tworzącej zarys żebra jest zależna od pola powierzchni styku, na której zachodzi kontakt. Jest to zgodne z wynikami badań analitycznych (zamieszczonych w podrozdziale 2.3), w których wykazano, że długość łuku uzyskana przy teoretycznym zużyciu żeber ślizgowych (rys. 33, 34), zwiększa się wraz z wartością przemieszczenia kabla.

Dla wartości siły nacisku kabła na kanał wynoszącej 20 N zarejestrowano największe zróżnicowanie nacisków powierzchniowych w odniesieniu do wysokości żeber. Wyteżenie materiału w wyniku działania określonej siły nacisku kabła na kanał określano, wyznaczając wartości naprężenia zredukowanego według hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa-Hencky'ego [81, 90, 95], w obszarze żeber ślizgowych (rys. 39).



Rys. 39. Przykład zmian wartości naprężenia zredukowanego (według hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa-Hencky'ego) w zależności od liczby żeber ślizgowych i ich wysokości (wyznaczone przy sile nacisku kabła na kanał wynoszącej 20 N)

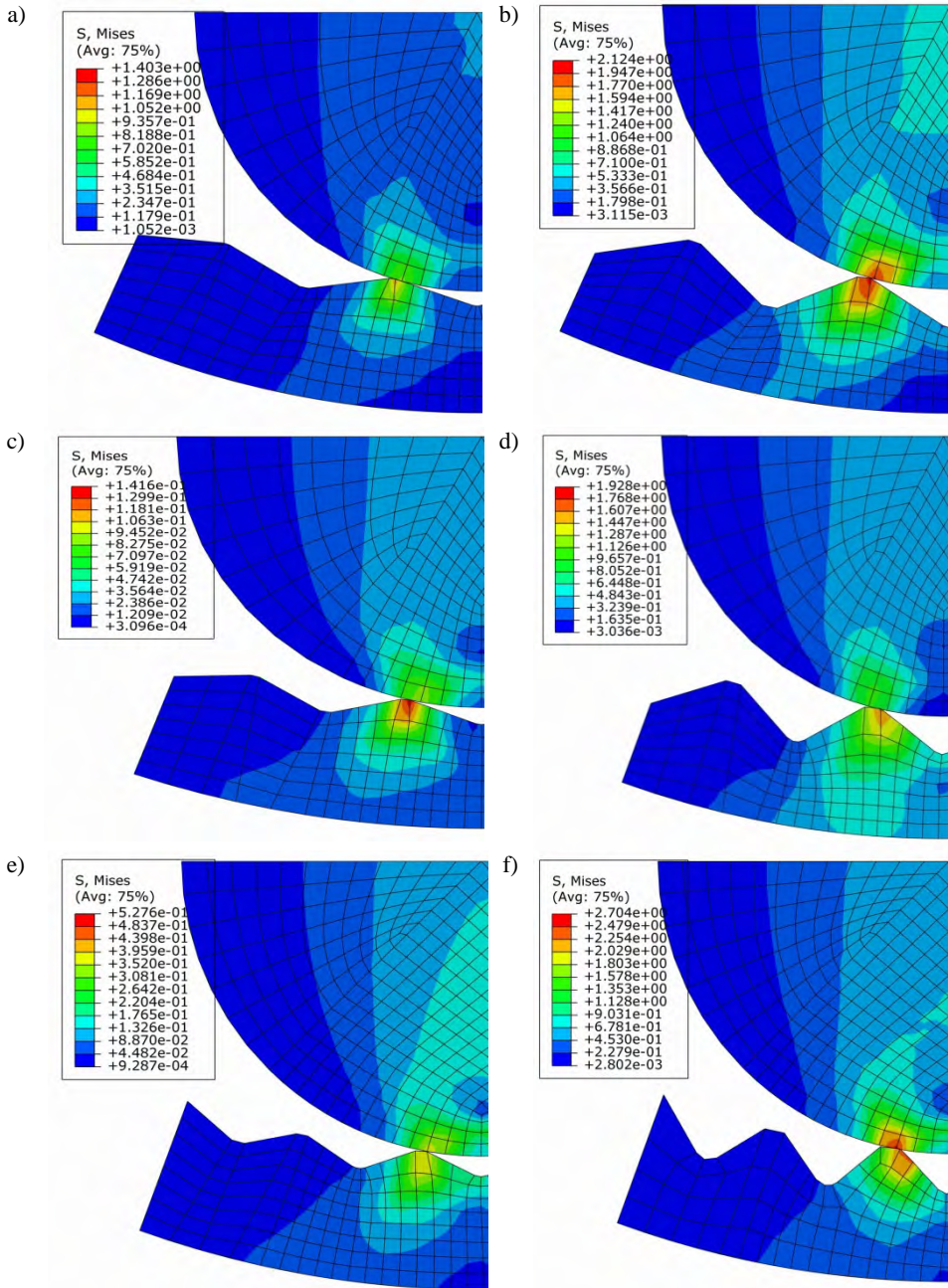
W wyniku obliczeń, wykazano, że wartość naprężenia zredukowanego w obszarze wierzchołków żeber oraz na powierzchni kabła rośnie wraz ze wzrostem siły nacisku kabła na kanał i liczbą żeber. Największe wartości naprężenia zredukowanego wynoszące 0,6 MPa wykazywały kanały o liczbie żeber 120 przy wysokości 1 mm, najmniejsze natomiast, o wartości 0,22 MPa, kanały o liczbie żeber 36 i 45 przy wysokości żebra wynoszącego 0,5mm. Otrzymane małe wartości naprężeń wskazują, że w analizowanym przypadku w obszarze żeber przy określonym zakresie zmian wymuszeń zewnętrznych, obserwowane zjawiska zachodzący będą w zakresie odkształcenia sprężystego. Wykonane obliczenia umożliwiły dokładne określenie rozkładu naprężenia w obszarze poszczególnych fragmentów kanału, jak także na powierzchni zewnętrznej kabła (rys. 40).



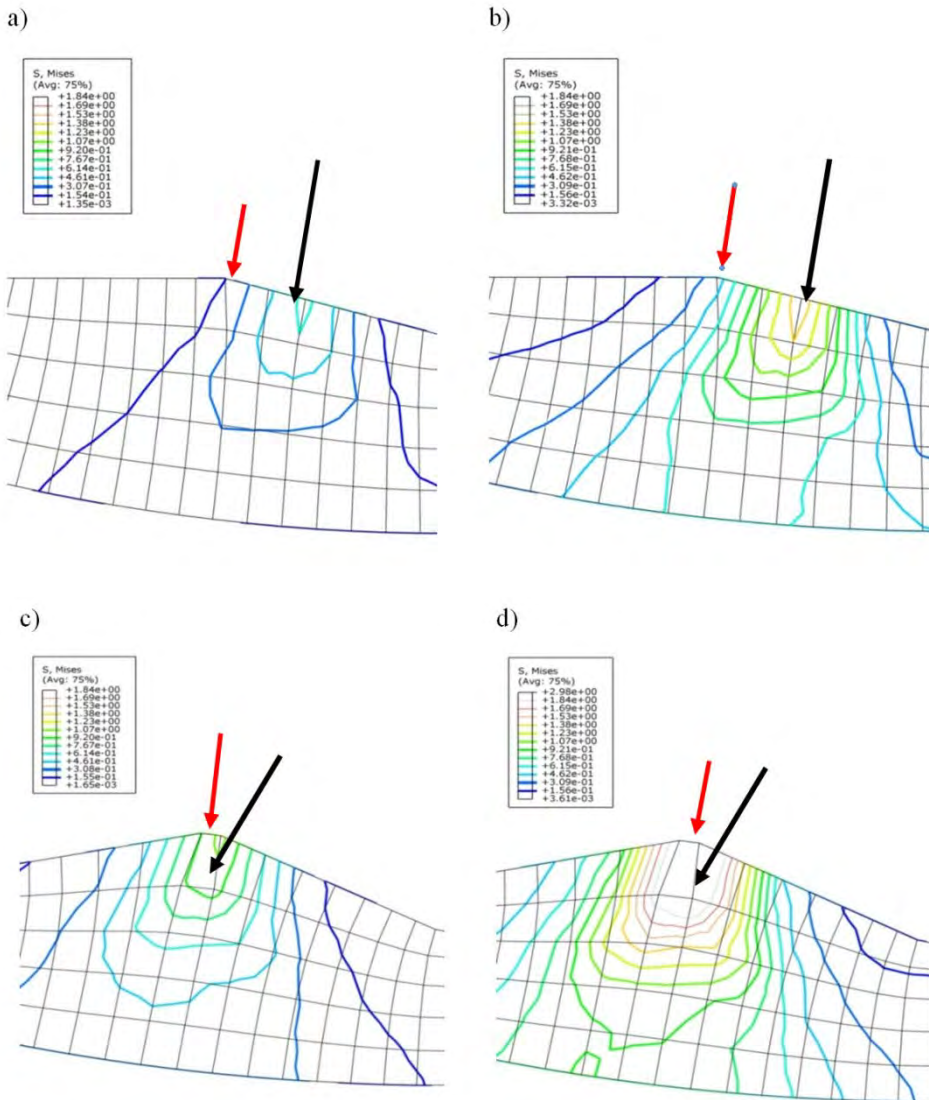
Rys. 40. Przykład rozkładu naprężenia zredukowanego według Hubera-Misesa-Hencky'ego: a) w obszarze wierzchołków żeber, b) na zewnętrznej powierzchni kabła

Umożliwia to wskazanie położenia oraz rozmiaru obszaru koncentracji naprężenia (rys. 41, 42), co może być przydatne zarówno do projektowania elementów struktury geometrycznej powierzchni kanału, jak również przy określaniu wymiarów poszczególnych powłok w nowych konstrukcjach kabli.

Może to stanowić także kolejne kryterium oceny, właściwego doboru liczby żeber ślizgowych do określonych wymiarów kabła w aspektach ich wzajemnego współdziałania.



Rys. 41. Przykłady rozkładu naprężenia zredukowanych w wierzchołkach żeber ślizgowych: kanał o liczbie żeber:60 , 72 oraz 90; a, c, e) wysokość żeber $h=0$, 5 mm, b, d, f) wysokości żeber 1 mm



Rys. 42. Przykład rozkładu naprężeń zredukowanych w odniesieniu dla kanału o liczbie zębów 45 w obszarze wierzchołków zębów ślizgowych w postaci konturowej: a) wysokość zębów 0,5 mm (siła nacisku 20 N), b) wysokość zębów 0,5 mm (siła nacisku 35 N), c) wysokość zębów 1,0 mm (siła nacisku 20 N), d) wysokość zębów 1,0 mm, (siła nacisku 35 N); kolor czerwony–wierzchołek zęba ślizgowego, kolor czarny–obszar największej koncentracji naprężeń

3.5. Wnioski i ustalenia wynikające z modeli numerycznych

Obliczenia numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych pozwalają na przedstawienie wzajemnego współdziałania kanału z tworzywa polimerowego z kablem. Na ich podstawie jest możliwe prowadzenie analiz porównawczych kanałów o różnej strukturze geometrycznej powierzchni wewnętrznej w postaci żeber ślizgowych, określonych warunkach. Dzięki graficznej prezentacji wyników obliczeń jest możliwa wizualizacja przebiegu modelowanych zjawisk fizycznych wzajemnego oddziaływania kanału z kształtownikiem, która nie jest dostępna w toku obserwacji doświadczalnej.

Otrzymane wyniki obliczeń wartości nacisków powierzchniowych dla poszczególnych modeli obliczeniowych wykazują zróżnicowanie w zależności od liczby żeber oraz ich wysokości.

Z uwagi na przyjęte kryterium uzyskania najmniejszych wartości nacisków powierzchniowych, najbardziej korzystne współdziałanie kanału z kablem zachodzi w przypadku, gdy kanał ma liczbę żeber 36 i 45 oraz wysokość żeber wynoszącą 0,5 mm. W tych przypadkach zauważono, że przy mniejszej wysokości żeber kanału, kabel nie styka się z wierzchołkiem żebra, ale z częścią płaszczyzny tworzącej boczny jego zarys. W tego typu współdziałaniu jest niepożądane, wykazano to przy wyznaczaniu wartości promienia r_{min} kabla (podrozdział 2.2.1). Wartość tego „przesunięcia” styku zależy od: liczby żeber, wartości kąta wierzchołkowego, wysokości żeber oraz wymiarów kanału i kabla.

W przypadku większej liczby żeber zaobserwowano, że wartość nacisków powierzchniowych oraz naprężeń zredukowanych zależy od ich wysokości, przy czym maksymalne wartości nacisków koncentrowały się wokół poszczególnych wierzchołków tych żeber.

Największe zróżnicowanie wartości nacisków oraz wartości naprężenia zredukowanego dla dwu wysokości żeber zarejestrowano przy sile nacisku kabla na kanał, wynoszącej 20 N. Na tej podstawie przyjęto, że przy tej wartości siły nacisku prowadzone będą dalsze badania doświadczalne.

Rozdział 4

STANOWISKO DO BADAŃ ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH PRZY WSPÓLDZIAŁANIU ŚLIZGOWYM

4.1. Wstęp

Badania wzajemnych oddziaływań, zachodzących na powierzchniach współdziałających ślizgowo elementów konstrukcyjnych z różnych materiałów, dotyczą znacznej części prac teoretycznych [5, 22, 26, 55] oraz doświadczalnych [97, 142, 147]. W zależności od rodzaju tych elementów, kierunku oraz wartości działających sił, przebieg zjawisk fizykalnych w obszarze ich współdziałania może znacznie różnić się od siebie [76, 87]. W przypadku elementów konstrukcyjnych wykonanych z tworzywa polimerowego, duże znaczenie ma także rodzaj tworzywa, ilość, postać i rozmiar składników dodatkowych, kształt oraz wymiary elementu. Ważny jest także odpowiedni dobór rodzaju metody przetwórstwa, w wyniku której zostały one wytworzone [63, 105, 141]. Wszystkie wymienione czynniki, a także warunki, w których zachodzi wzajemne współdziałanie elementów konstrukcyjnych powodują, że prowadzenie badań oraz modelowanie tego procesu w warunkach laboratoryjnych jest utrudnione.

Obecnie istnieje duża liczba urządzeń i stanowisk do badań właściwości tribologicznych elementów konstrukcyjnych przy oddziaływaniach ślizgowych. W celu prawidłowego przeprowadzenia badań przyjmuje się, że pomiary przeprowadza się na specjalnie przygotowanych próbkach [9, 34, 181, 131] o kształtach w postaci różnych brył geometrycznych (walca, kuli, prostopadłościanu, płyty, tarczy itp.), mających stosunkowo małe rozmiary.

Przy uwzględnieniu kształtów i wymiarów próbek oraz określonych warunków badań, można otrzymać poszukiwane wartości siły oporu tarcia, momentu siły oporu tarcia, ubytku masy próbki itp. Wyznaczenie innych wielkości, na przykład wartości współczynnika tarcia lub zużycia [4, 131] jest możliwe po przyjęciu określonej hipotezy tribologicznej [34, 96]. W zależności od rodzaju stanowiska badawczego pomiary wzajemnego oddziaływania prowadzi się w różnych warunkach: nacisku, prędkości przemieszczania się elementu ruchomego względem elementu nieruchomego, temperatury, czasu, środowiska itp. Umożliwia to prowadzenie analizy wyników badań oraz formułowanie wniosków poznawczych, jednak na ogół tylko w ramach określonej metody.

Biorąc pod uwagę konstrukcje uniwersalnych urządzeń do badań tribologicznych, zakres badawczy oraz warunki obciążenia można stwierdzić, że badania wzajemnego oddziaływania kabla z kanałem, z uwagi na potrzebę ich odpowiedniego usytuowania geometrycznego są trudne do przeprowadzania. Ponadto, badania na takich urządzeniach prowadzi się w odniesieniu do innych przypadków wzajemnych oddziaływań niż te, jakie są wymagane dla kabli i kanałów z tworzywa polimerowego. Najbardziej zbliżone wydają się być warunki badań takich elementów, jak czop-panew, współdziałających ze sobą w układzie ślizgowym, przy ruchu obrotowym ciągłym lub cyklicznym, tuleja-trzpień oraz cylinder-tłok, które z kolei poddaje się badaniom w warunkach ruchu ciągłego, obrotowego oraz posuwisto-zwrotnego [34, 178, 182]. Są to więc badania węzłów tribologicznych, istotne głównie z uwagi na poprawne działanie części maszyn lub mechanizmów, jak też prowadzące do wskazania efektywności doboru rodzaju materiału na określone elementy konstrukcyjne, głównie z uwagi na działanie długotrwałe.

W przypadku kabla i kanału z tworzywa polimerowego dokładniejsze odwzorowanie zjawisk oraz przebieg oddziaływań w obszarze styku uzyskuje się prowadząc badania i pomiary z wykorzystaniem specjalistycznych stanowisk badawczych, na przykład przedstawionych w podrozdziale 1.7.2 niniejszej rozprawy oraz w publikacjach [202, 205]. Stanowiska te, umożliwiają prowadzenie badań w ustalonych warunkach oraz ocenę, który z badanych czynników ma najbardziej istotny wpływ na przebieg i efekty tego procesu.

Z uwagi na różnice występujące w długościach odcinków pomiarowych kabla i kanału, wymagane w dostępnych stanowiskach badawczych, a także z potrzeby dokładniejszego poznania przebiegu zjawisk powstających przy wzajemnym współdziałaniu ślizgowym w obszarze wierzchołków żeber ślizgowych, opracowano we własnym zakresie nowe stanowisko badawcze. Zgodnie z przyjętymi założeniami rozprawy stanowisko ma umożliwić pomiar czynników, bezpośrednio wpływających na proces kojarzenia wycinka kanału z odcinkiem pomiarowym kabla, w warunkach oddziaływań ślizgowych. Zatem, stanowisko skonstruowano tak, aby powierzchnie obu badanych elementów miały ze sobą kontakt jednostronny, podczas przemieszczania się badanego odcinka kabla ruchem jednostajnym, względem nieruchomego wycinka kanału.

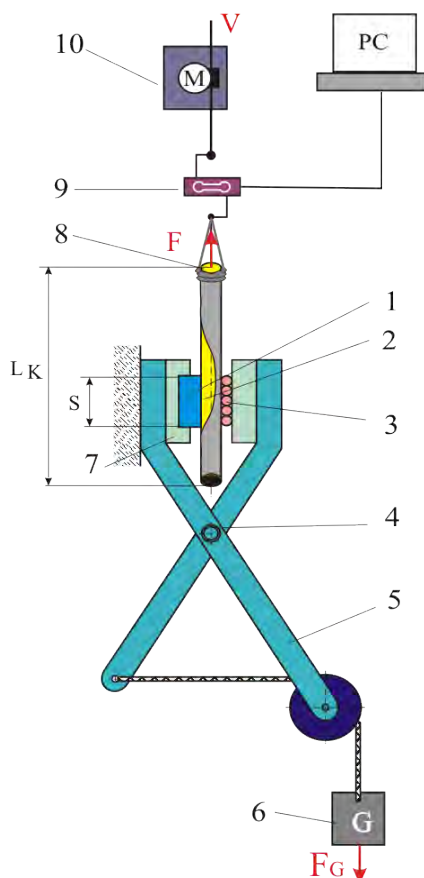
4.2. Konstrukcja i charakterystyka nowego stanowiska badawczego

Koncepcję nowego stanowiska badawczego oparto na założeniu, że dla określonej pary elementów konstrukcyjnych (kanał-kabel) jest możliwe prowadzenie powtarzalnych pomiarów wartości siły oporu przy ruchu kabla, względem określonego wymiarowo wycinka kanału z tworzywa polimerowego. Badanie wzajemnego oddziaływania występującego pomiędzy odcinkiem kabla i wycinkiem kanału przebiega w odpowiednim usytuowaniu geometrycznym i umożliwia uzyskanie dokładniejszych wartości wyników, a poprzez to stanowi rozszerzenie zakresu pomiarów stanowisk przedstawionych w podrozdziale 1.7.2 oraz w podrozdziale 1.8.

Konstrukcję i działanie wymienionego stanowiska oparto na analizie literatury, wynikach własnych prac badawczych [41, 42, 44] oraz norm [208, 209, 210, 211, 214, 216, 218, 219] dotyczących prowadzenia badań różnorodnych kabli i kanałów z tworzywa polimerowego. Wykorzystując odpowiednie mocowanie wycinka kanału można prowadzić badania na specjalnie do tego celu przygotowanych próbkach, a także na wycinkach wytworów. Dzięki temu uzyskano możliwość porównywania wyników badań dla kanałów, mających różnorodne konstrukcje ścianki, w tym także kanałów o kształtach złożonych. Przyjęcie odpowiedniego usytuowania geometrycznego badanych elementów oraz możliwość regulowania wartości siły docisku w płaszczyźnie prostopadłej do osi kabla, umożliwiło prowadzenie badań wzajemnego oddziaływania wycinka kanału zarówno

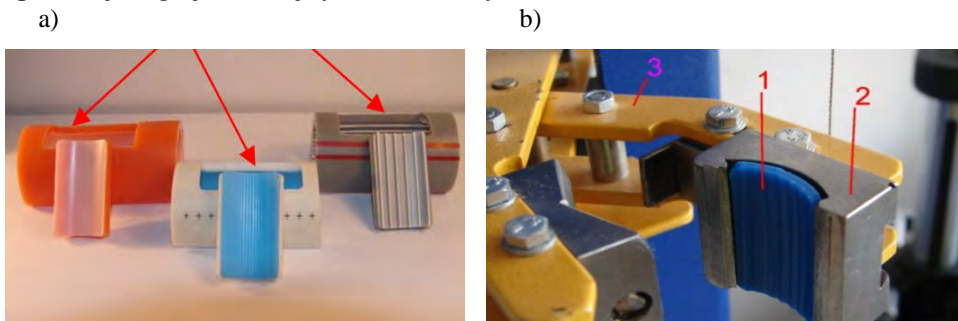
z kablem optotelekomunikacyjnym, mikrokablem, a także co dotychczas było znacznie utrudnione, z pojedynczym włóknem światłowodowym.

Powtarzalność badań prowadzonych na nowym stanowisku porównano z wynikami badań laboratoryjnych wykonanych na uniwersalnych urządzeniach do badań tribologicznych. Otrzymane wyniki oceniano, prowadząc analizę kombinacji poziomów zmienności czynników badanych, a wgląd w przebieg rozkładu nacisków normalnych analizowanego oddziaływania był możliwy na podstawie wyników badań numerycznych (rozdział 3). Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys 43.



Rys. 43. Schemat stanowiska badawczego: 1 – próbka badana (wycinek kanału), 2 – przeciwpróbka kabel, 3 – łożysko, 4 – dźwignia krzyżowa, 5 – ramię ruchome dźwigni, 6 – obciążenie pomiarowe, 7 – uchwyt mocujący wycinek kanału, 8 – oprawa mocująca kable, 9 – przetwornik tensometryczny siły, 10 – układ napędowo-pomiarowy; F – poosiowa siła oporu, V – prędkość przemieszczania się kabla, L_{K1} – długość wycinka kanału, L_{K2} – długość odcinka pomiarowego kabla, F_G – siła obciążenia pomiarowego

Badania na stanowisku przeprowadza się zgodnie z przyjętą procedurą, która polega na tym, że próbkę badawczą o określonym kształcie, wycina się ze ścianki nośnej kanału (rys. 44a), wzdłuż tworzącej walcowej, za pomocą wykrojnika i następnie umieszcza się ją w uchwycie stanowiska (rys. 44b). Badana powierzchnia wewnętrzna kanału, na przykład z interesującą strukturą geometryczną lub z warstwą ślizgową styka się z przeciwpróbką o wymaganej długości L_{K2} , którą jest określony rodzaj kabla optotelekomunikacyjnego lub kształtownika. Kabel umieszcza się w oprawie i mocuje poprzez zaczepek do układu napędowo-pomiarowego, zapewniającego jednostajny ruch liniowy.

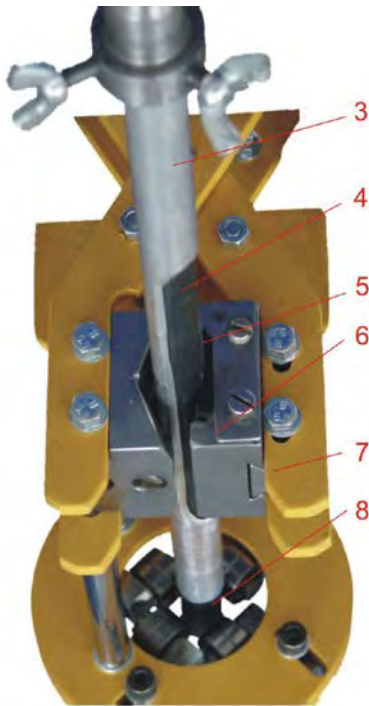


Rys. 44. Miejsca pobrania oraz wygląd obszaru mocowania próbki w uchwycie stanowiska: a) odcinek kanału wraz z obszarem wykrawania wycinka, b) wygląd obszaru mocowania próbki do badań na stanowisku; 1– próbka badawcza, 2– korpus uchwytu, 3– ruchome ramię dźwigni krzyżowej

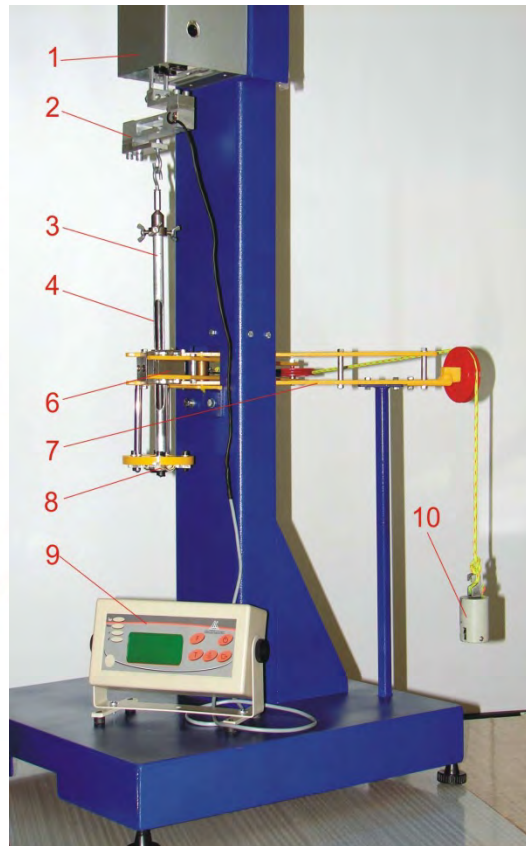
Podczas przemieszczania się kabla w kierunku pionowym do góry z określoną prędkością V , następuje pomiar po osiowej siły oporu F w kablu. W zależności od wymagań wartość siły oporu może być wyznaczana przy tarcia statycznym F_S oraz przy tarcia kinetycznym F_K . Podczas pomiaru wycinek kanału i kabla ma ze sobą styk jednostronny ze stałym dociskiem przy określonej sile F_G , pochodzącej od masy obciążnika pomiarowego G , umocowanego do ruchomego ramienia dźwigni krzyżowej. Dźwignia jest umieszczona w płaszczyźnie prostopadłej do osi kabla i kierunku jego ruchu. Podczas badań obszar kontaktu badanych elementów może być dodatkowo odizolowany od otoczenia, co pozwala na prowadzenie pomiarów przy ściśle określonych warunkach temperatury i wilgotności względnej.

Położenie oprawy mocującej kabel w odniesieniu do badanego wycinka kanału przedstawiono na rys. 45a, natomiast wygląd ogólny stanowiska zaprezentowano na rys. 45b.

a)



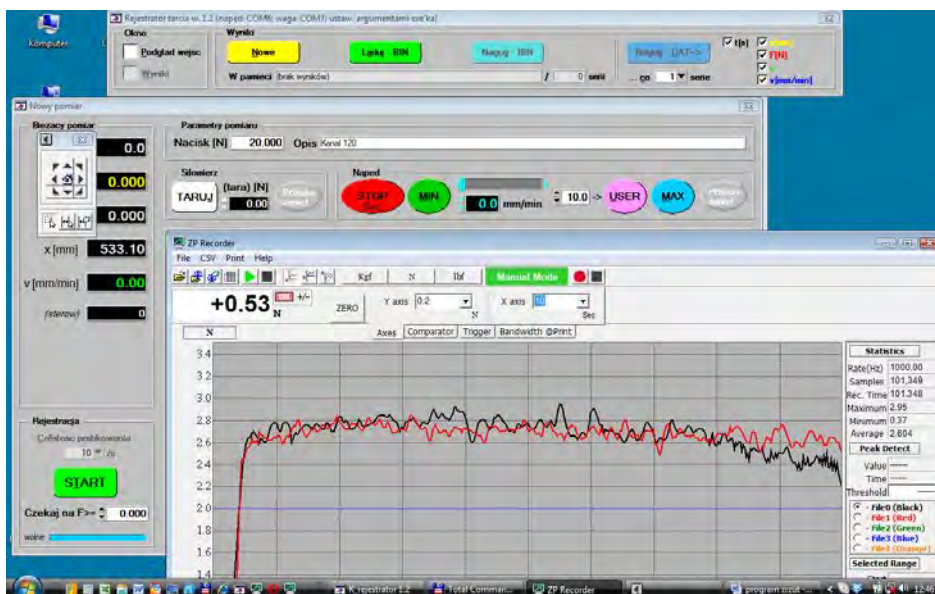
b)



Rys. 45. Wygląd stanowiska do badań z układem dźwigni krzyżowej: a) wzajemne położenie oprawy mocującej kabel w odniesieniu do badanego wycinka kanału (powiększony fragment), b) wygląd ogólny stanowiska; 1 – układ napędowo-pomiarowy, 2 – przetwornik tensometryczny, 3 – oprawa mocowania kabla, 4 – odcinek pomiarowy kabla, 5 – wycinek kanału, 6 – uchwyt mocujący, 7 – ruchome ramię dźwigni krzyżowej, 8 – układ ustalająco-prowadzący, 9 – przetwornik cyfrowy zapisu siły, 10 – obciążenie pomiarowe

Wykonanie odpowiedniego oprzyrządowania oraz oprogramowania stanowiska umożliwi pomiar i rejestrację poosiowej siły oporu F powstającej w kablu, podczas jego przemieszczania się względem badanego wycinka kanału z zadaną prędkością V . Zastosowano mikroprocesorowy

układ pomiarowy, autorski program K-Rejstrator, do sterowania przebiegiem pomiaru (rys. 46) oraz program do rejestracji i archiwizacji wartości siły ZP-Rekorder (firmy Imada).



Rys. 46. Przykładowy wygląd ekranu autorskiego programu K-Rejstrator do sterowania i rejestracji wyników pomiarów na stanowisku, wraz z wykresem zmian wartości siły oporu F , w funkcji drogi przemieszczania się kabla

Elementy mocujące, wymiary oraz kształt uchwytów (rys. 44b) były dostosowane do wymiarów wycinka kanału o średnicy 40 mm (tab. 8). W zależności od rodzaju poszukiwanych wielkości fizycznych, za pomocą stanowiska, mogą być prowadzone badania polegające na dokładnym określeniu wartości siły oporu, w odniesieniu do drogi lub czasu pomiaru, a przy przyjęciu odpowiedniej hipotezy tribologicznej, ze znanych z literatury [34, 130] zależności, możliwe jest obliczenie wartości współczynnika oporu dla badanej pary kanał-kabel.

**Wielkości charakteryzujące prowadzenia badań
na nowym stanowisku badawczym**

Nazwa	Wielkość charakterystyczna
uchwyt mocujący wycinek kanału	średnica kanału 40 mm, grubość ścianki 3,7 mm
oprawa mocująca kabel	kabel o średnicy 12 mm
długość wycinka kanału, L_{K2}	10–60 mm
długość odcinka pomiarowego kabla, L_{K1}	60–120 mm
obciążenie pomiarowe, G	0,2 do 1,5 kg (co odpowiada sile nacisku w zakresie 0,8–50N)
prędkość przemieszczania się kabla, V	3–13 mm/min
pomiar siły oporu, F_S, F_K	przetwornik tensometryczny, (dokładność pomiaru 0,01 N)

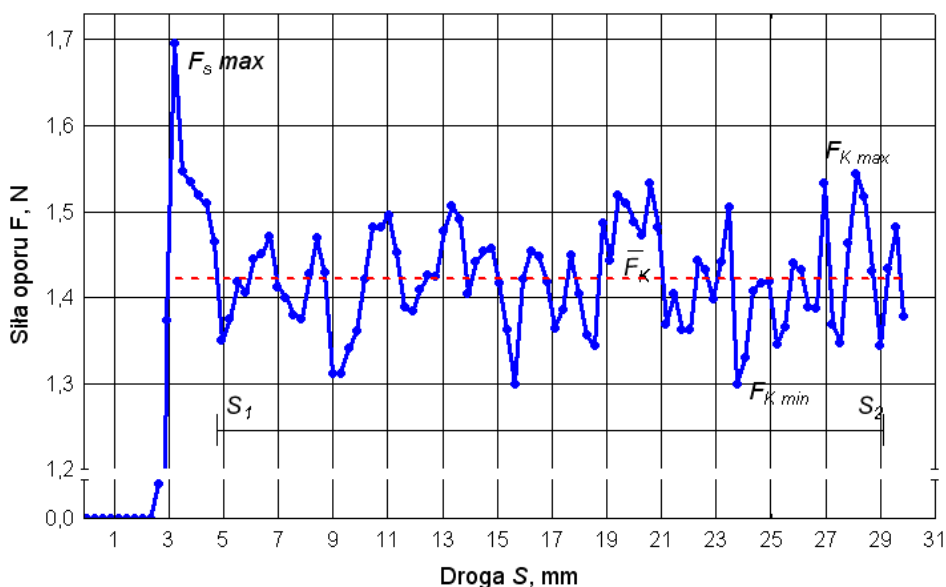
4.2.1. Metodyka badań oraz interpretacja wyników pomiarów

Przyjęcie określonej metodyki prowadzenia badań na nowym stanowisku umożliwiło uzyskanie powtarzalnych wyników pomiarów wzajemnego oddziaływania kabla optotelekomunikacyjnego z wycinkiem kanału z tworzywa polimerowego. Na podstawie własnych prac badawczych [42, 44, 50] ustalono, że na przebieg tego procesu decydujący wpływ mają: budowa kanału, budowa kabla, wzajemne usytuowanie badanych elementów, jak też sposób, wartość i kierunek działania wymuszeń zewnętrznych. Podczas badań w obszarze styku kabla z kanałem wraz ze wzrostem oporów ruchu występuje wzrost odkształcenia sprężystego i plastycznego w elementach współpracujących. W niektórych przypadkach może to powodować powstawanie zjawisk mikroskrawania i nagniatania wewnętrznej ścianki kanału.

W wyniku przemieszczania się kabla, względem nieruchomego wycinka kanału, w zależności od wartości siły docisku, następuje zwiększanie się oporów ruchu, wywołane poprzez tworzenie i zrywanie następujących po sobie lokalnych mikroszczepień adhezyjnych. Wielkością charakteryzującą

przebieg tego procesu jest zmiana wartości siły poosiowej w kablu, przy zachowaniu stałych warunków, prędkości oraz obciążenia pomiarowego.

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych [43, 42] oraz analizy danych z literatury [10, 34, 83, 89, 97] przyjęto, że wyznaczenie wartości poosiowej siły oporu w kablu w zadowalającym stopniu pozwala na określenie efektywności skojarzenia ślizgowego, określonego układu badawczego (kanał-kabel). Wielkościami wejściowymi do dalszych analiz są zależności zmian wartości siły oporu w odniesieniu do drogi lub czasu przemieszczania się odcinka kabła względem wycinka kanału. Analizując otrzymane przebiegi można zauważyć, że w początkowej fazie procesu współdziałania występuje intensywny wzrost siły oporu, wynikający głównie z odkształcenia sprężystego, powstającego w kablu, aż do wartości charakterystycznej odpowiadającej sile oporu F_S przy tarciu statycznym (rys. 47). Po przekroczeniu wartości tej siły ($F_{S\ max}$) następuje zmiana charakteru kontaktu kabła z wycinkiem kanału, a rejestrowana siła oporu F_K dotyczy zjawisk związanych z tarciem kinetycznym.



Rys. 47. Przykład wykresu analizy zmienności sił oporu: F_S – siła oporu przy tarciu statycznym, F_K – siła oporu przy tarciu kinetycznym, \bar{F}_K – średnia siły oporu przy tarciu kinetycznym na odcinku drogi od S_1 do S_2

Dalszy przebieg zmian wartości siły oporu oscyluje wokół średniej, z określonymi odchyleniami. Siła oporu może osiągać różne wartości w zależności od rodzaju i wymiarów badanych elementów konstrukcyjnych, zastosowanych tworzyw polimerowych oraz warunków badań.

Wielkości charakterystyczne dotyczące poszczególnych skojarzeń kanał-kabel w odniesieniu do drogi lub czasu przemieszczania się kabla mogą być więc opisane za pomocą wskaźników ilościowych i jakościowych. Po wykonanym badaniu poszczególnym współrzędnym wartości chwilowej siły oporu F_S oraz F_K można przyporządkować odpowiadające im wartości współrzędnych długości drogi przemieszczenia się kabla od położenia początkowego. Wzajemne oddziaływania kanału z kablem można więc oceniać na podstawie całych przebiegów zarejestrowanych podczas badań lub wskazać wybrane wielkości charakterystyczne, które z kolei można poddawać analizie statystycznej [66, 74, 75].

W zależności od kontekstu prowadzonych prac doświadczalnych zarejestrowany przebieg zmienności siły oporu F może być oceniany z uwagi na:

- wartość siły oporu F_S wyznaczaną przy tarciu statycznym,
- wartość siły oporu $F_{S\max}$ obserwowaną w początkowej fazie współdziałania kanału z kablem,
- wartości siły oporu $F_{K\min}, F_{K\max}$ wyznaczane przy tarciu kinetycznym,
- wartość średnią siły oporu F_K zarejestrowaną na umownie przyjętym przedziale długości drogi od S_1 do S_2 .

$$\bar{F}_K = \sum_{i=1}^m \frac{F_{K(i)} X_i}{X_c} \quad (4.1)$$

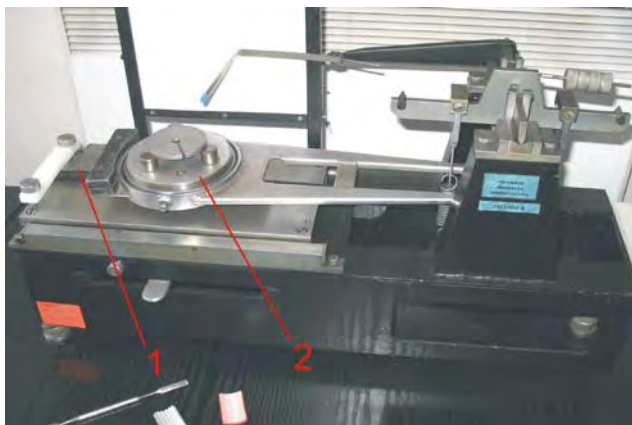
gdzie: $F_{K(i)}$ – wartość chwilowa siły oporu, X_i – liczba pomiarów przypadających na wybrany przedział podziału zmienności F_K , X_c – całkowita liczba podziału zakresu zmienności siły

W przypadku, gdy wartość średnia siły oporu punktów pomiarowych i ich odchyłeń przyjmuje wartość stałą w czasie, obliczenia wielkości charakterystycznych, można sprowadzić do wyznaczenia wartości siły oporu \bar{F}_K jako średniej ważonej. Natomiast, gdy rejestrowane wyniki pomiarów

zmian wartości siły oporu w funkcji drogi wykazują trend rosnący lub malejący do oceny efektywności współdziałania pary kanał-kabel, korzystnie jest stosować dodatkowy wskaźnik określający wartość pracy $W_{(S)}$ potrzebnej na pokonanie siły oporu F_K na określonym odcinku drogi w zakresie od S_1 do S_2 .

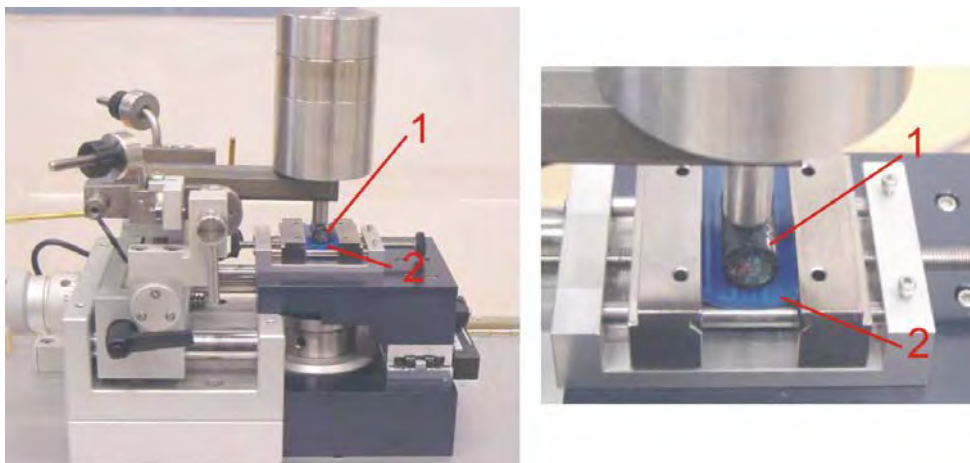
4.2.2. Ocena laboratoryjnej porównywalności wyników badań

Działanie nowego stanowiska badawczego zweryfikowano w ramach badań laboratoryjnych podczas pomiarów porównawczych-na dwóch różnych stanowiskach. Badania wykonano w Zakładzie Inżynierii Materiałowej Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach [207], na przyrządzie do badań tribologicznych WPT-1 (rys. 48) oraz w Laboratorium Firmy CSM Instruments Peseux w Szwajcarii [206], na uniwersalnym urządzeniu Tribometer TRB (rys. 49).



Rys. 48. Wygląd przyrządu WPT/1 podczas wzajemnego oddziaływania wycinka kanału z odcinkiem pomiarowym kabla: 1- odcinek kabla unieruchomiony w uchwytach korpusu, 2- ruchomy uchwyt z zamocowanym wycinkiem kanału

Warunki badań porównawczych były takie same, a mianowicie: prędkość V przemieszczania się badanych elementów wynosiła 10 mm/min, a docisk obu elementów do siebie wynosił 20 N. Podczas badań na pierwszym urządzeniu wycinek kanału był dociskany do powierzchni kabla, natomiast w drugim odcinek kabla naciskał na wycinek kanału.

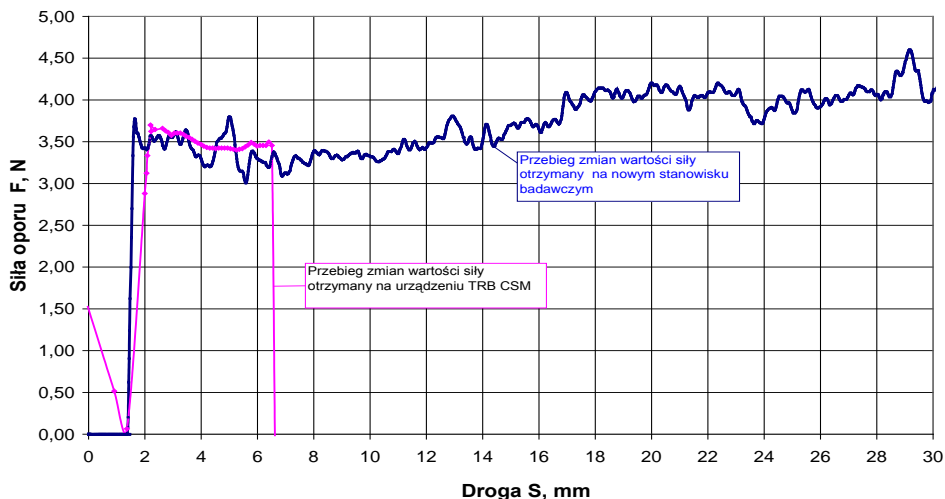


Rys. 49. Wygląd urządzenia TRB CSM Instruments oraz powiększony fragment obszaru badań kanału z odcinkiem pomiarowym kabla: 1–odcinek kabla, 2–ruchomy uchwyt z wycinkiem kanału

Analiza wyników badań wykazała, że pomimo innego usytuowania badanych elementów na nowym stanowisku i na urządzeniu TRB CSM oraz zapewnieniu tych samych warunków badań doświadczalnych, zmienne siły oporu miały wartości porównywalne. Należy nadmienić, że na nowym stanowisku istniała możliwość rejestracji drogi przemieszczania się kabla względem odcinka kanału w większym zakresie, co pozwala na dokładniejsze poznanie procesu współdziałania obu analizowanych elementów konstrukcyjnych. Jest to uwidocznione na przykładzie (rys. 50), w którym wyniki siły oporu mają podobne przebiegi, a długość drogi na jakiej można prowadzić analizy znacznie różni się między sobą.

Badania porównywalności pokazały, że przed rozpoczęciem pomiarów na przyrządzie (rys. 48) oraz urządzeniu (rys. 49), powstawały trudności z właściwym ustaleniem położenia odcinka kabla względem wycinka kanału, w odpowiednim układzie geometrycznym. Inne spostrzeżenia dotyczyły układu odniesienia, który w przypadku tych badań odnosił się do płaszczyzny poziomej.

Zdaniem autora, w badaniach wzajemnego współdziałania ślizgowego kanału z kablem na przyrządach uniwersalnych, z uwagi na duże różnice w rozmiarach próbek, powinno się uwzględniać masę kanału oraz masę odcinka pomiarowego kabla.



Rys. 50. Przykład przebiegu zmian wartości siły oporu w funkcji drogi przemieszczania się kabla; linia czerwona – urządzenie TRB CSM, linia niebieska – nowe stanowisko badawcze, warunki badań: kabel ZXOTKtd, średnica 12 mm, prędkość przemieszczania się kabla $V=10\text{mm/min}$, siła $F_G=20\text{ N}$, wycinek kanału z PE-HD o długości 40 mm, liczba żeber 45 wysokość żeber $h=0,5\text{ mm}$

W przypadku nowego stanowiska (rys. 43, 45) z uwagi na pionowy układ odniesienia, wzajemne usytuowanie badanych elementów w odpowiednim położeniu geometrycznym jest znacznie korzystniejsze. Przyjęcie mocowania kabla i kanału w układzie pionowym umożliwia ponadto określanie oporów ruchu w aspektach oddziaływań ślizgowych, przy pominięciu masy badanych elementów. Pozwala to, na prowadzenie badań i analiz porównawczych współdziałania kanału z tworzywa polimerowego, zarówno z kablem optotelekomunikacyjnym, mikrokablem, jak także z włóknem światłowodowym.

4.3. Badania powtarzalności pomiarów na nowym stanowisku

Jak wykazano w poprzednim rozdziale pomiar wartości siły oporu umożliwia opisanie wzajemnego współdziałania kanału z kablem. Przy pominięciu czynników materiałowych, wymiarów geometrycznych oraz niezmiennych warunków prowadzenia badań na stanowisku, wzajemne współdziałanie elementów konstrukcyjnych kabla i kanału może być ograniczone do dwóch czynników kontrolowanych. Są nimi: prędkość V

przemieszczania się kabla oraz siła F_G nacisku kabla na badany wycinek kanału.

Z uwagi na konstrukcję stanowiska wymaganą prędkość przemieszczania się odcinka pomiarowego kabla uzyskano stosując odpowiedni układ napędowo-pomiarowy, a niezmienną wartość siły nacisku F_G poprzez zmianę długości ramion dźwigni krzywej. Wymaganą powtarzalność prowadzenia pomiarów można więc określić na podstawie wyników badań doświadczalnych.

4.3.1. Cele i zakres badań doświadczalnych

Celem badań doświadczalnych jest ocena powtarzalności wyników otrzymanych z wykorzystaniem nowego stanowiska oraz wyznaczenie zakresu zmienności czynników wejściowych. Na podstawie wyników tych badań jest możliwe sprawdzenie poprawności założeń konstrukcyjnych stanowiska (podrozdział 4.2) oraz ustalenie warunków, przy których będą prowadzone późniejsze badania doświadczalne, wzajemnego współdziałania kanału z tworzywa polimerowego z kablem optotelekomunikacyjnym.

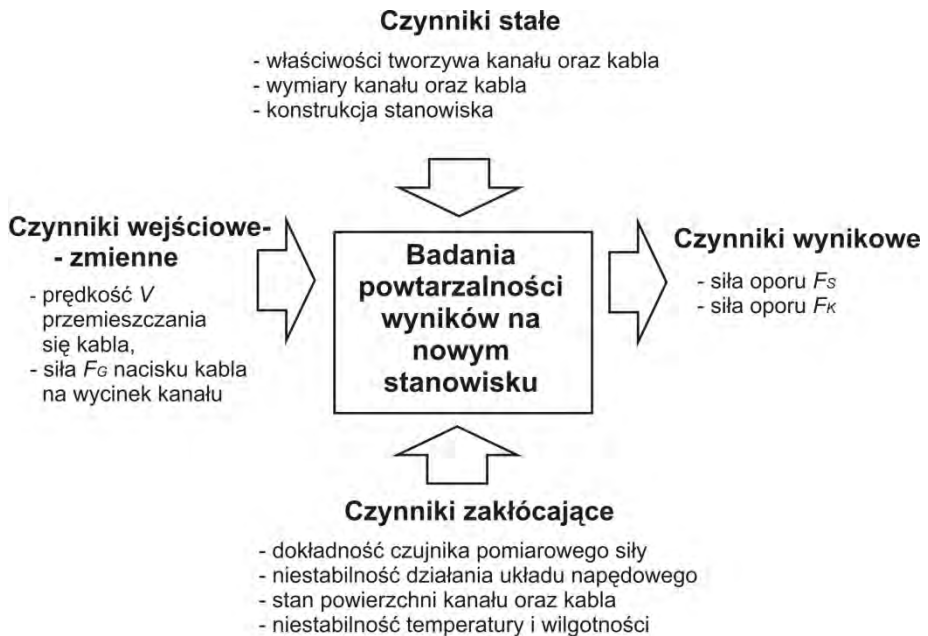
Umożliwi to ustalenie zakresów zmienności czynników badanych (tj. zmiennych kontrolowanych): siły nacisku F_G działającej na elementy konstrukcyjne (kanał - kabel) oraz prędkości przemieszczania się kabla V względem wycinka kanału.

Kolejnym równie istotnym celem badań jest ustalenie charakteru zmienności sił oporu F_S oraz F_K w funkcji czynników kontrolowanych V i F_G określanych przy tarcu statycznym oraz przy tarcu kinetycznym. Wyniki badań pozwolą na stwierdzenie czy charakter zmienności wartości siły oporu F_S i F_K jest różnowartościowy. Spełnienie tego warunku umożliwi poprawne prowadzenie badań na stanowisku w ustalonym zakresie zmian wartości czynników badanych. Przyporządkowanie wartości F_S lub F_K parom czynników zmiennych, tj. prędkości V oraz nacisku F_G będzie w takim przypadku jednoznaczne.

4.3.2. Przebieg oraz wyniki badań

Na podstawie analizy literatury [34, 75, 96], a także uwzględniając zalecenia opisane w treściach norm telekomunikacyjnych [210, 212, 215, 217, 219, 220] wstępnie przyjęto zakres zmienności czynników wejściowych. Z kolei badania rozpoznawcze odnoszone do przyjętych

wymiarów kabla i kanału, umożliwiły dobranie długości ramion dźwigni krzyżowej tak, aby wartość siły F_G nacisku kabla na kanał podczas badań doświadczalnych była stała i zawierała się w zakresie od 9 do 40 N. Prędkość V przemieszczenia się kabla podczas badań ustalono w zakresie od 4 do 13 mm/min. Wzajemne relacje czynników badanych (wejściowych) i czynników wynikowych przedstawiono na rys. 51.



Rys. 51. Diagram przedstawiający wzajemne relacje czynników uwzględnionych w badaniach oceny powtarzalności wyników na nowym stanowisku

Do dalszych rozważań założono, że w ogólnym przypadku zależność funkcyjna wiążąca czynniki badane (wejściowe) (V , F_G) z czynnikami wynikowymi F_S oraz F_K może być nieliniowa[121]. Nieznane zależności odpowiadające zmianie siły oporu przy tarcu statycznym $F_S(V, F_G)$ oraz przy tarcu kinetycznym $F_K(V, F_G)$ aproksymowano wielomianem drugiego stopnia[122].

Postać analityczną tych funkcji opisano następującymi równaniami (4.2) i (4.3).

$$F_S(V, F_G) = a_{00} + a_{01}V + a_{02}F_G + a_{12}VF_G + a_{11}V^2 + a_{22}F_G^2 \quad (4.2)$$

oraz

$$F_K(V, F_G) = b_{00} + b_{01}V + b_{02}F_G + b_{12}VF_G + b_{11}V^2 + b_{22}F_G^2 \quad (4.3)$$

gdzie: $F_S(V, F_G)$, $F_K(V, F_G)$ – równania opisujące zmianę siły przy określonym rodzaju tarcia, a_{00} , a_{01} , a_{02} , a_{12} , a_{11} , a_{22} , b_{00} , b_{01} , b_{02} , b_{12} , b_{11} , b_{22} – współczynniki równania regresji, V – prędkość przemieszczania się kabła, F_G – siła nacisku kabła na kanał

Poszczególne człony równania regresji zawierały kombinacje składowych wyrażających efekty liniowe V oraz F_G , efekty nieliniowe V^2 i F_G^2 , w tym interakcję dwuczynnikową VF_G .

Kombinacje czynników badanych, według których zmieniano wartości prędkości V przemieszczania się kabła oraz siły nacisku F_G , odpowiadały planowi kompozycyjnemu [75, 121, 132]. Replikację każdego z układów doświadczalnych realizowano w sposób losowy. Wartości średnie pomiarów siły oporu oraz błędu standardowego określane przy tarciu statycznym oraz przy tarciu kinetycznym zamieszczono w tab. 9.

Tabela 9

Układy doświadczalne planu kompozycyjnego

Nr układu doświadczalnego	Prędkość przemieszczania się kabła V , mm/min	Siła nacisku kabła na kanał F_G , N	Siła oporu przy tarciu statycznym F_S , N		Siła oporu przy tarciu kinetycznym F_K , N	
			Średnia \bar{F}_S , N	Błąd standardowy	Średnia \bar{F}_K , N	Błąd standardowy
1	4,3	25	4,22	0,31	3,74	0,06
2	5,5	13	2,39	0,15	2,30	0,04
3	5,5	36	5,05	0,15	4,86	0,12
4	8,5	9	2,05	0,12	1,96	0,04
5	8,5	25	3,63	0,39	3,44	0,16
6	8,5	41	7,34	0,14	5,20	0,11
7	11,5	13	2,70	0,10	2,39	0,04
8	11,5	36	5,61	0,72	4,93	0,10
9	12,7	25	3,44	0,21	3,47	0,11

Na podstawie przyjętych równań (4.2), (4.3) oraz wyników pomiarów wyznaczono wartości współczynników modeli regresji (tab. 10, 11), jak również wykonano analizy statystyczne weryfikujące poprawność budowy tych modeli.

Tabela 10

Wartości współczynników modelu regresji $F_S(V, F_G)$

Współczynnik modelu regresji	Wartość współczynnika a regresji	Błąd standardowy współczynnika modelu	Przedział ufności	
			-0,95	+0,95
a_{00}	3,64	0,27	3,06	4,21
a_{01}	-0,07	0,12	-0,34	0,20
a_{11}	0,05	0,17	-0,32	0,42
a_{02}	1,62	0,13	1,34	1,90
a_{22}	0,43	0,17	0,06	0,81
a_{12}	0,05	0,18	-0,34	0,44

Tabela 11

Wartości współczynników modelu regresji $F_K(V, F_G)$

Współczynnik modelu regresji	Wartość współczynnika regresji	Błąd standardowy współczynnika	Przedział ufności	
			-0,95	+0,95
b_{00}	2,05	0,61	0,73	3,38
b_{01}	-0,20	0,10	-0,42	0,02
b_{11}	0,01	0,01	0,00	0,02
b_{02}	0,07	0,02	0,02	0,13
b_{22}	0,00	0,00	0,00	0,00
b_{12}	0,00	0,00	0,00	0,00

Statystyczna ocena współczynników modeli regresji jest możliwa na podstawie tzw. analizy wariancji [75]. Wyniki analizy wariancji przedstawiano w tab. 12 i 13.

Tabela 12

Wyniki analizy wariancji - model regresji $F_S(V, F_G)$

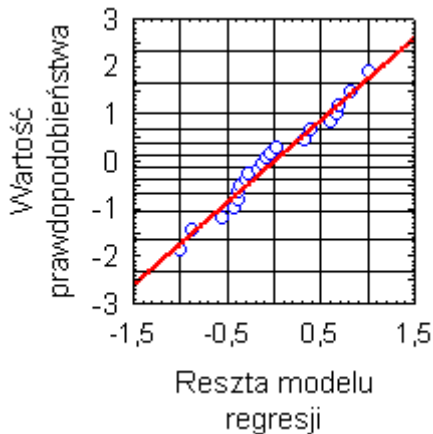
Składowa modelu	Suma kwadratów SK	Liczba stopni swobody df	Średnia suma kwadratów MS	Statystyka F-Snedecora	Prawdopodobieństwo statystyki testowej
V	0,09	1	0,09	0,33	0,57
V^2	0,02	1	0,02	0,08	0,77
F_G	44,28	1	44,28	156,13	0,00
F_G^2	1,74	1	1,74	6,12	0,03
$V F_G$	0,02	1	0,02	0,07	0,79
Błąd braku dopasowania	2,50	3	0,83	2,94	0,07
Błąd modelu	3,69	13	0,28	-	-

Tabela 13

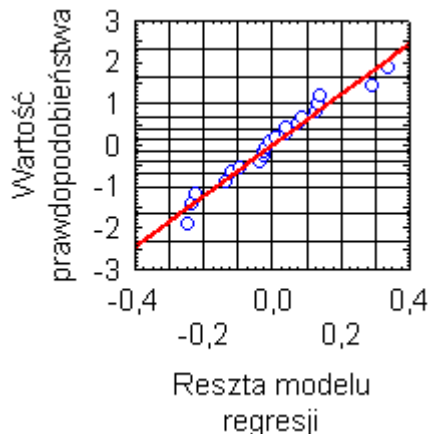
Wyniki analizy wariancji - model regresji $F_R(V, F_G)$

Składowa modelu	Suma kwadratów SK	Liczba stopni swobody df	Średnia suma kwadratów MS	Statystyka F-Snedecora	Prawdopodobieństwo statystyki testowej
V	0,01	1	0,01	0,43	0,52
V^2	0,10	1	0,10	3,76	0,07
F_G	24,91	1	24,91	979,19	0,00
F_G^2	0,05	1	0,05	2,07	0,17
$V F_G$	0,00	1	0,00	0,03	0,86
Błąd braku dopasowania	0,16	3	0,05	2,15	0,14
Błąd modelu	0,33	13	0,03	-	-

Reszty modelu regresji podlegają rozkładowi normalnemu, co przedstawiono na wykresach (rys. 52 i 53). Zatem, został spełniony zbiór podstawowych warunków dowodzących poprawności budowy obydwu modeli doświadczalnych (4.2) oraz (4.3).

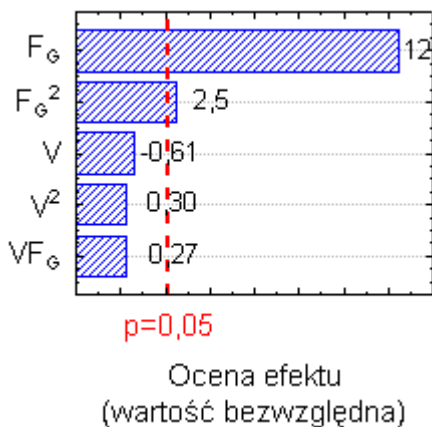


Rys. 52. Porównanie rozkładu reszt modelu regresji $F_S(V, F_G)$ z wartością teoretyczną dystrybuanty rozkładu normalnego

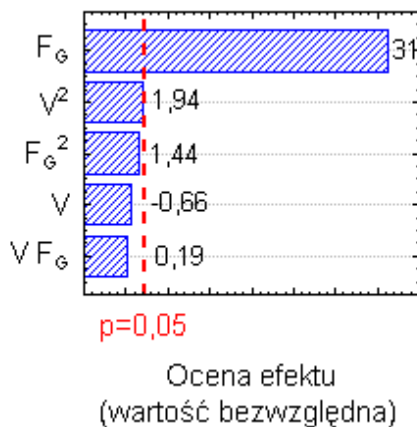


Rys. 53. Porównanie rozkładu reszt modelu regresji $F_K(V, F_G)$ z wartością teoretyczną dystrybuanty rozkładu normalnego

Wyniki analizy wariancji poszczególnych członów składowych modeli poglądowo przedstawiono tzw. analizą Pareto oceny efektów standaryzowanych [121] oddzielnie dla wartości siły oporu F_S (rys. 54) oraz siły oporu F_K (rys. 55).



Rys. 54. Wyniki analizy Pareto efektów standaryzowanych modelu regresji $F_S(V, F_G)$, p - poziom istotności



Rys. 55. Wyniki analizy Pareto efektów standaryzowanych modelu regresji $F_K(V, F_G)$, p - poziom istotności

4.3.3. Wnioski dotyczące badań na stanowisku

Uwzględniając wyniki obliczeń oba modele regresji można zapisać w następującej postaci:

$$F_S(V, F_G) = 3,64 - 0,07V + 1,62F_G + 0,05V F_G + 0,05V^2 + 0,43 F_G^2 \quad (4.4)$$

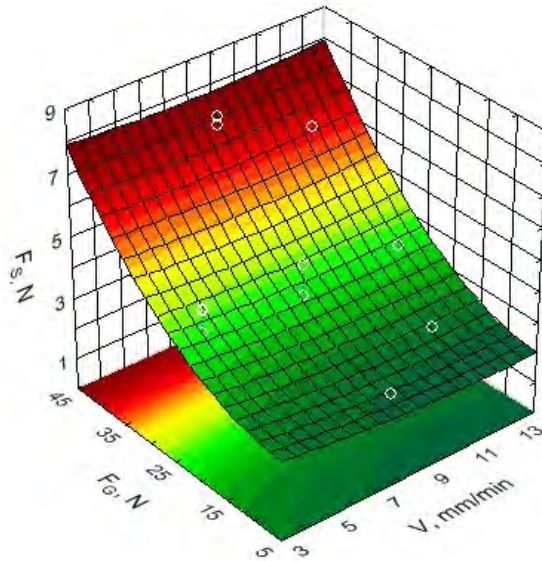
oraz

$$F_K(V, F_G) = 2,05 - 0,20V + 0,07F_G + 0,01 V^2 \quad (4.5)$$

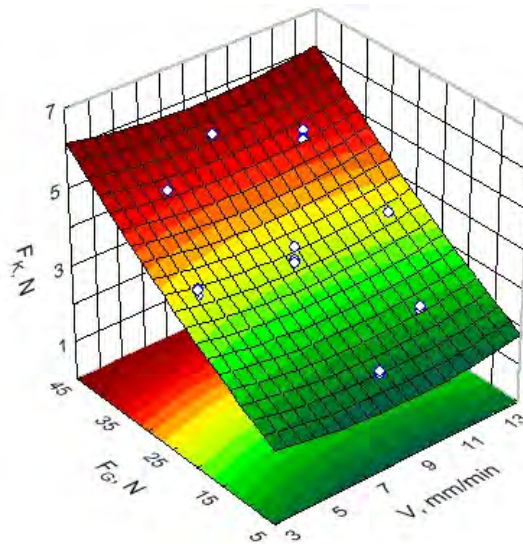
Graficzne przedstawienie równań (4.4) i (4.5) w układzie przestrzennym (rys. 56 i rys. 57) oraz za pomocą wykresów warstwicznych (rys. 58) pozwala na zobrazowanie zmienności siły oporu F_S oraz F_K w funkcji czynników badanych.

Otrzymane wyniki badań powtarzalności pomiarów na nowym stanowisku wykazały, że jedynym czynnikiem badanym mającym istotny wpływ na wartości poszukiwanych wielkości w modelach regresji $F_S(V, F_G)$ oraz $F_K(V, F_G)$ jest wartość siły nacisku F_G . Zaobserwowano także, że wartości sił oporu przy tarcu statycznym oraz przy tarcu kinetycznym są niezależne od prędkości V przemieszczania się kabla. Ponadto udział efektów interakcji dwuczynnikowej w każdym analizowanym modelu regresji, z uwagi na ich małe wartości, może zostać pominięty.

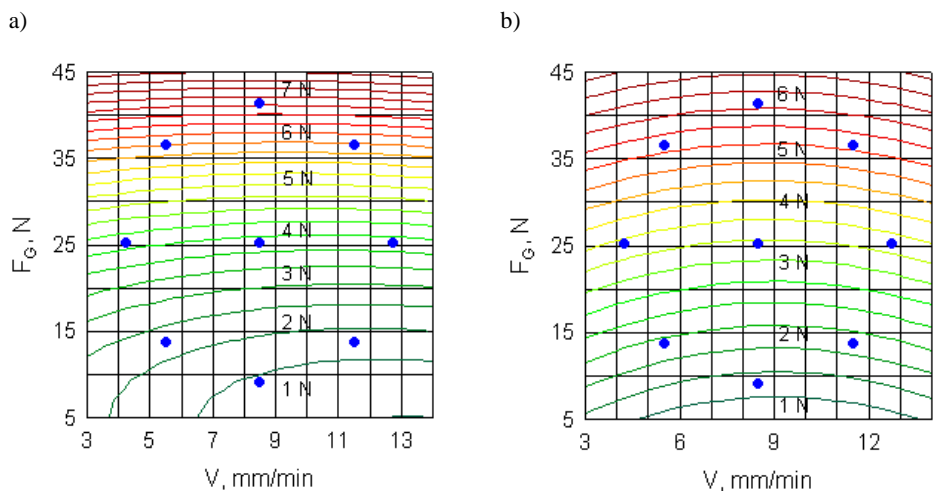
Poprawność aproksymacji obydwu modeli regresji potwierdza test adekwatności dopasowania (analiza wariancji tab. 12, 13), dla których poziom prawdopodobieństwa jest większy od zakładanej wartości $p=0,05$ i wynosi odpowiednio 0,07 oraz 0,14.



Rys. 56. Zamiana siły oporu F_S w funkcji czynników badanych: V – prędkość przemieszczania się kabla, F_G – siła nacisku kabla na kanał



Rys. 57. Zamiana siły oporu F_K w funkcji czynników badanych: V – prędkość przemieszczania się kabla, F_G – siła nacisku kabla na kanał



Rys. 58. Warstwyce modelu regresji w odniesieniu do siły oporu przy określonym zakresie zmian prędkości V przemieszczania się kabla oraz siły nacisku F_G kabla na kanał (wraz z punktami reprezentującymi układy doświadczalne): a) dla siły oporu F_S określonej przy tarcia statycznym, b) dla siły oporu F_K określonej przy tarcia kinetycznym

4.4. Wnioski i ustalenia

Na podstawie wyników badań doświadczalnych z wykorzystaniem nowego stanowiska oraz analiz statystycznych można stwierdzić, że założone warunki badań elementów konstrukcyjnych kanału i kabla, przy współdziałaniu ślizgowym zostały przyjęte prawidłowo.

Wykazano, że zakres zmienności czynników badanych, takich jak: prędkość przemieszczania kabla V oraz siła nacisku kabla na wycinek kanału F_G zostały dobrane poprawnie, a charakter zmienności sił oporu przy określonym rodzaju tarcia, w funkcji tych czynników jest różnowartościowy. Na tej podstawie ustalono, że wzajemne współdziałanie elementów konstrukcyjnych kanału z tworzywa polimerowego z kablem optotelekomunikacyjnym w warunkach ślizgowych może być określane i badane w sposób jednoznaczny z wykorzystaniem nowego stanowiska.

Rozdział 5

BADANIA DOŚWIADCZALNE KANALÓW Z ŻEBRAMI ŚLIZGOWYMI

5.1. Wstęp

Badania doświadczalne kanałów z żebrami ślizgowymi w aspektach ich oddziaływania z kablem, zostały wykonane z wykorzystaniem stanowiska badawczego (opisanego w rozdziale 4). Na podstawie wyników tych badań wyznaczono wartości czynników fizykalnych, mierzonych bezpośrednio na stanowisku. Poprzez to możliwe jest określenie wpływu struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału na przebieg wzajemnego oddziaływania z kablem, a także porównanie ich z wynikami badań analitycznych i numerycznych.

Efektywną metodą wytwarzania kanałów z tworzywa polimerowego jest metoda wytłaczania jednoślimakowego [30, 56, 58, 63, 110, 198], dlatego też przyjęto, że struktura geometryczna powierzchni wewnętrznej kanału w postaci żeber ślizgowych będzie wytwarzana podczas tego procesu.

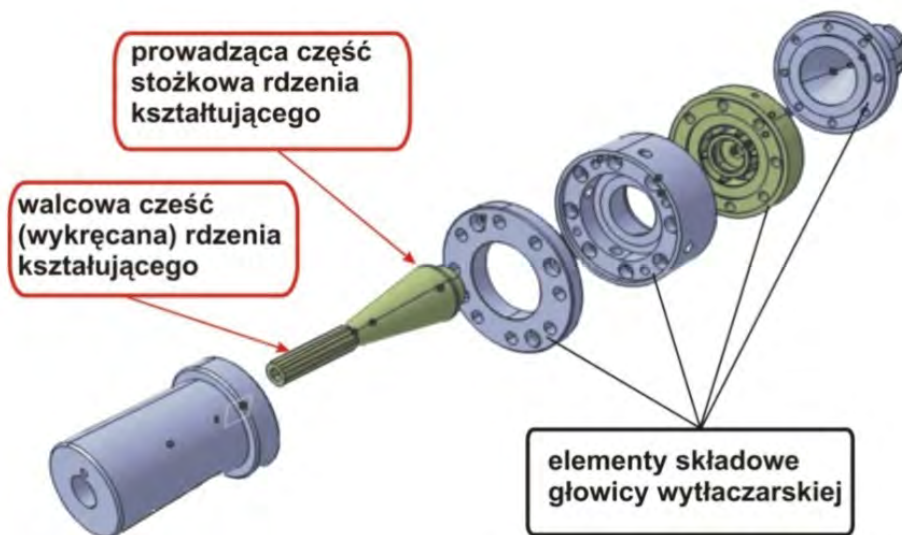
5.2. Wytwarzanie struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału

Wytwarzanie zróżnicowanej struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału z wykorzystaniem klasycznych głowic wytaczarskich, nie jest możliwe bez odłączenia głowicy od cylindra wytłaczarki, wymiany jej części stożkowej, ponownym montażu i ustabilizowaniu warunków procesu wytłaczania [13, 31, 72, 107]. Wyeleminowanie tych trudności było

możliwe poprzez zastosowanie w głowicy wylączarskiej specjalnego dzielonego rdzenia zawierającego prowadzącą część stożkową oraz kształtującą część walcową (rys. 59). Część stożkowa dzielonego rdzenia jest na stałe zamocowana w korpusie głowicy, a część walcowa może być do niej dołączana [53]. Część kształtująca rdzenia ma odpowiednio wykonany zarys profilu, który odpowiada określonym makrowgłębieniom w rdzeniu.

Zakres zmian liczby makrowgłębieni oraz ich głębokość odpowiadały takiemu samemu zakresowi zmienności, który został przyjęty przy badaniach analitycznych i numerycznych. Poprzez to wyniki badań doświadczalnych mogą być odniesione do wykonanych wcześniej badań, co przy spełnieniu określonych wymagań może stanowić ich weryfikację. W efekcie prac konstrukcyjnych opracowano komplet badawczych rdzeni kształtujących, charakteryzujący się określoną liczbą oraz głębokością wzdłużnych makrowgłębieni, o zarysie profilu, w przekroju poprzecznym, zbliżonym do trójkątów równoramiennych.

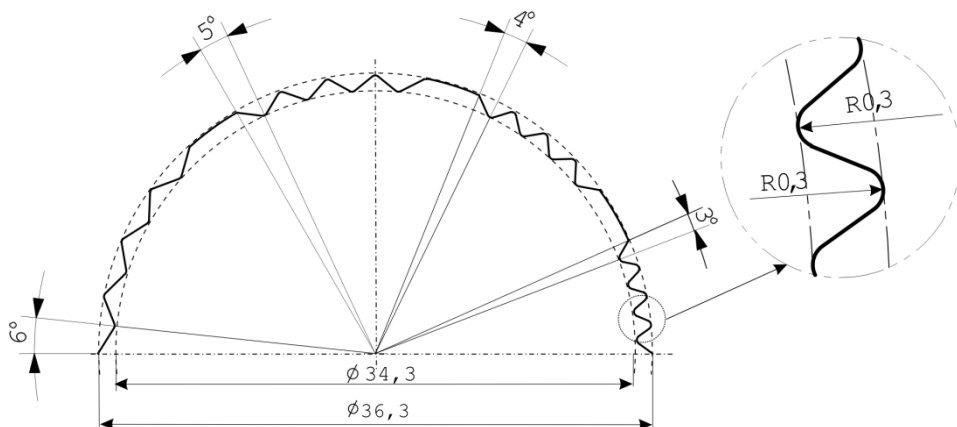
Przeprowadzenie procesu przetwórstwa z wykorzystaniem opisanej głowicy wylączarskiej umożliwiło wykonanie w linii technologicznej wylączania, na powierzchni wewnętrznej kanału, żądanych makronierówności w postaci żeber ślizgowych.



Rys. 59. Wygląd elementów składowych głowicy wylączarskiej wraz z dzielonym rdzeniem kształtującym wewnętrzną powierzchnię kanału z tworzywa

5.2.1. Charakterystyka zarysu profilu rdzenia kształtującego

Zarys profilu walcowej końcówki rdzenia kształtującego wymagał dokładnego zaprojektowania. Do prac projektowych zastosowano program CAD – Catia v 5, w którym opracowano elementy struktury geometrycznej powierzchni zewnętrznej rdzenia [50, 80]. W wyniku zastosowania modelowania z definiowanym podobieństwem kształtów wybranych wymiarów elementów geometrycznych zarysu profilu, uzyskano możliwość projektowania powierzchni rdzenia przy dowolnej liczbie makrowłębieni oraz ich głębokości. Zarys profilu rdzenia oparto na dwóch współosiowych okręgach odniesienia (rys. 60), których wielkości odpowiadały zewnętrznej i wewnętrznej średnicy wgłębień i wzniesień rdzenia. Wykonanie zarysu profilu o wymaganych wymiarach wymagało zmiany kąta pomiędzy osiami symetrii pojedynczych wierzchołków projektowanych wgłębień oraz połączenia ich liniami stycznymi z punktami charakterystycznymi dla określonych dwóch głębokości makrowłębieni, przy określonej podziałce kątowej w zakresie od 3° do 10° .

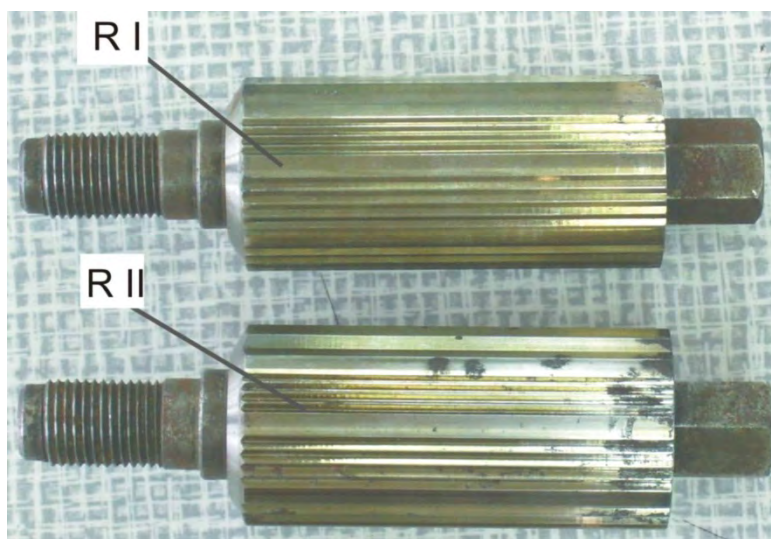


Rys. 60. Wygląd fragmentu zarysu profilu walcowej końcówki rdzenia kształtującego wraz z okręgami odniesienia przy zarysie profilu o wysokości $h=1$ mm

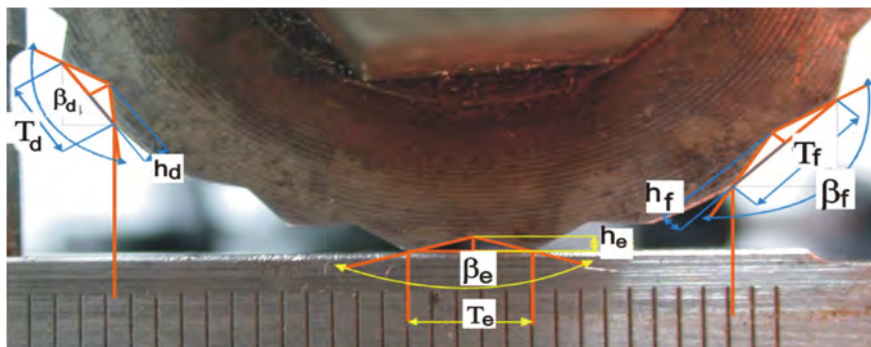
W wyniku projektowania otrzymano wymagane profile walcowej końcówki rdzenia kształtującego przeznaczone do wytwarzania wewnętrznej powierzchni kanału podczas procesu wytłaczania.

5.2.2. Wykonanie kompletu badawczego rdzeni kształtujących do badań

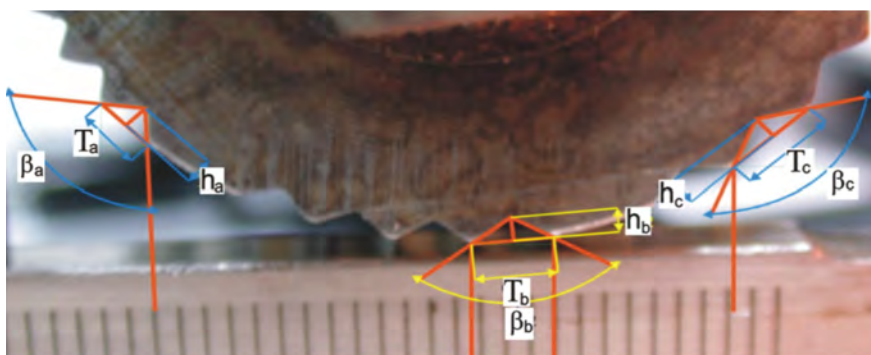
Poszczególne profile o różnej liczbie makrowłębieni i tej samej głębokości połączone na jednym okręgu odniesienia tworząc zarys pojedynczego rdzenia kształtującego. Na podstawie utworzonych modeli wirtualnych CAD, wykorzystując proces obróbki mechanicznej, wykonano ze stali narzędziowej NC 6 dwa komplety badawcze RI oraz RII wykrcanych walcowych końcówek rdzenia kształtującego (rys. 61). Wymaganą dokładność wymiarów powierzchni rdzenia uzyskano poddając rdzeń obróbce wykańczającej z wykorzystaniem profilowanych ściernic korundowych (T1-150x10x20 80K) oraz korundowo-gumowych (T1-100x10x20 99C60P). Dzięki temu otrzymano wymagane odwzorowanie geometryczne makrowłębieni (rys. 62, 63, oraz tab. 14), przy odpowiedniej klasie chropowatości powierzchni rdzenia. Wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu R_a chropowatości zawierała się w zakresie od 0,58 do 0,65 μm .



Rys. 61. Wygląd rdzeni kształtujących z charakterystycznymi wzdłużnymi makrowłębieniami: RI- rdzeń do kształtowania żeber o wysokości 0,5 mm, RII- rdzeń do kształtowania żeber o wysokości 1,0 mm



Rys. 62. Wygląd powiększonego fragmentu czołowej płaszczyzny rdzenia kształtującego RII, dla trzech wariantów geometrycznych, $\beta_{a,b,c}$ – kąty zarysu makrowłębieni, $T_{a,b,c}$ – podziałki makrowłębieni, $h_{a,b,c}$ – głębokości makrowłębieni



Rys. 63. Wygląd powiększonego fragmentu czołowej płaszczyzny rdzenia kształtującego RII, dla trzech wariantów geometrycznych, $\beta_{d,e,f}$ – kąty zarysu makrowłębieni, $T_{d,e,f}$ – podziałki makrowłębieni, $h_{d,e,f}$ – głębokości makrowłębieni

Wartości wybranych wymiarów rdzenia kształtującego

Podziałka kątowna θ ,	Liczba żeber, n	Wielkości charakterystyczne	Wymiary makrowgłębień	
			RI	RII
3^0	120	T_a - podziałka, mm	1,85	1,85
		h_a - głębokość, mm	0,49	0,9
		β_a - kąt zarysu,	$107^{\circ}58'$	$54^{\circ}07'$
4^0	90	T_b - podziałka, mm	2,44	2,42
		h_b - głębokość, mm	0,49	0,9
		β_b - kąt zarysu,	$126^{\circ}32'$	$82^{\circ}20'$
5^0	72	T_c - podziałka, mm	3,05	3,02
		h_c - głębokość, mm	0,49	0,9
		β_c - kąt zarysu,	$136^{\circ}10'$	$99^{\circ}35'$
6^0	60	T_d - podziałka, mm	3,66	3,61
		h_d - głębokość, mm	0,49	0,9
		β_d - kąt zarysu,	$141^{\circ}57'$	$110^{\circ}56'$
8^0	45	T_e - podziałka, mm	4,88	4,82
		h_e - głębokość, mm	0,49	0,9
		β_e - kąt zarysu,	$148^{\circ}10'$	$124^{\circ}32'$
10^0	36	T_f - podziałka, mm	5,64	5,60
		h_f - głębokość, mm	0,49	0,9
		β_f - kąt zarysu,	$156^{\circ}18'$	$130^{\circ}18'$

5.2.3. Przebieg wytwarzania kanału w linii technologicznej wytłaczania

Wytwarzanie kanałów do badań doświadczalnych z jednoczesnym kształtowaniem struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej, prowadzono w procesie wytłaczania w linii technologicznej [46, 53, 112]. Tworzywem, z którego wykonano kanały był polietylen dużej gęstości (PE-HD) o nazwie handlowej Hostalen CRP 100 blue, gęstość 950 kg/m^3 oraz masowy wskaźnik szybkości płynięcia $\text{MFR}_{(190,5)} = 2,2 \text{ g/10min}$.

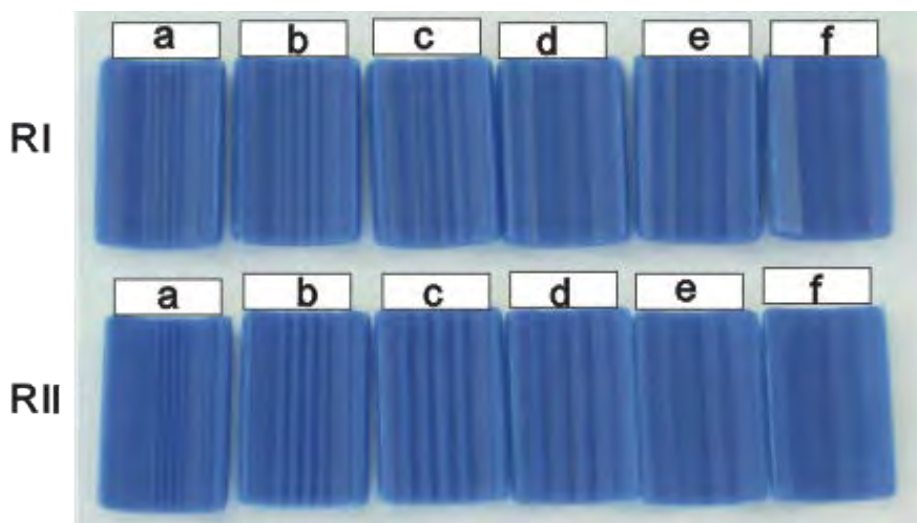
Proces wytłaczania kanałów prowadzono na wytłaczarce jednoślimakowej TYP S-60 produkcji ZMCH „Metalchem” Gliwice (L/D=28), mocując żadaną, scharakteryzowaną w poprzednim podrozdziale, wymienną końcówkę rdzenia kształtującego w głowicy wytłaczarskiej. Temperatura w poszczególnych strefach grzejnych układu uplastyczniającego wzrastała od 160°C do 178°C , natomiast w strefie głowicy od 180°C do 195°C . Proces wytłaczania prowadzono przy szybkości wytłaczania wynoszącej 6 m/min . Podczas procesu wytłaczania kanałów do badań zapewniano ciągłą stabilność warunków przetwórstwa. Utrzymywano stałą wartość temperatury w obszarze pomiędzy dyszą głowicy, a wejściem do kalibratora. Dzięki temu próbki do badań doświadczalnych, dla obu rdzeni kształtujących RI oraz RII uzyskano przy takich samych warunkach wytłaczania.

Podczas procesu temperatura wytłoczyny była korygowana o wymaganą wartość w obszarze kształtowania żeber ślizgowych za pomocą skanera termowizyjnego V-20 ER005-25, wyposażonego w układ detekcji promieniowania podczerwonego. Skaner umieszczony był bezpośrednio w obszarze za głowicą, a podłączenie do układu sterowania wytłaczarką pozwoliło na wprowadzanie korekty wartości temperatury poprzez zmianę odległości kalibratora od czoła dyszy głowicy wytłaczarskiej. Zmiana odległości kalibratora powodowała odpowiednie skorygowanie wartości temperatury w wytłoczynie, poprzez zmniejszenie powierzchni oddającej ciepło do otoczenia. Umożliwiło to utrzymanie wymaganego zakresu zmienności temperatury powierzchni wytłoczyny w przedziale od $\pm 2^\circ\text{C}$ bezpośrednio w obszarze dyszy głowicy oraz do $\pm 5^\circ\text{C}$ w obszarze wejścia wytłoczyny do kalibratora.

5.3. Badania kanału z żebrami ślizgowymi w warunkach współdziałania z kablem

Kanały optotelekomunikacyjne z charakterystycznymi żebrami ślizgowymi zostały poddane badaniom doświadczalnym z wykorzystaniem autorskiego stanowiska badawczego. Przedmiotem badań doświadczalnych były wycinki kanałów charakteryzujące się tym, że ich powierzchnia zewnętrzna miała kształt walcowy, natomiast na wewnętrznej powierzchni były wykonane regularne makrowzniesienia, w postaci wzdłużnych żeber ślizgowych o ściśle określonej charakterystyce. Kanały miały średnicę zewnętrzną 40 mm i grubość ścianki 3,7 mm.

Za pomocą wykrojnika wycięto na prasie próbki do dalszych badań doświadczalnych (rys. 64). Rdzeń RI miał żebra o wysokości $h=0,5$ mm, natomiast rdzeń RII żebra o wysokości $h=1$ mm. Liczba żeber ślizgowych wyniosła 36, 45, 60, 72, 90, 120.



Rys. 64. Wygląd wycinków kanału do badań doświadczalnych w zależności od rodzaju zastosowanego rdzenia kształtującego, liczba żeber ślizgowych: a – 36, b – 45, c – 60, d – 72, e – 90, f – 120

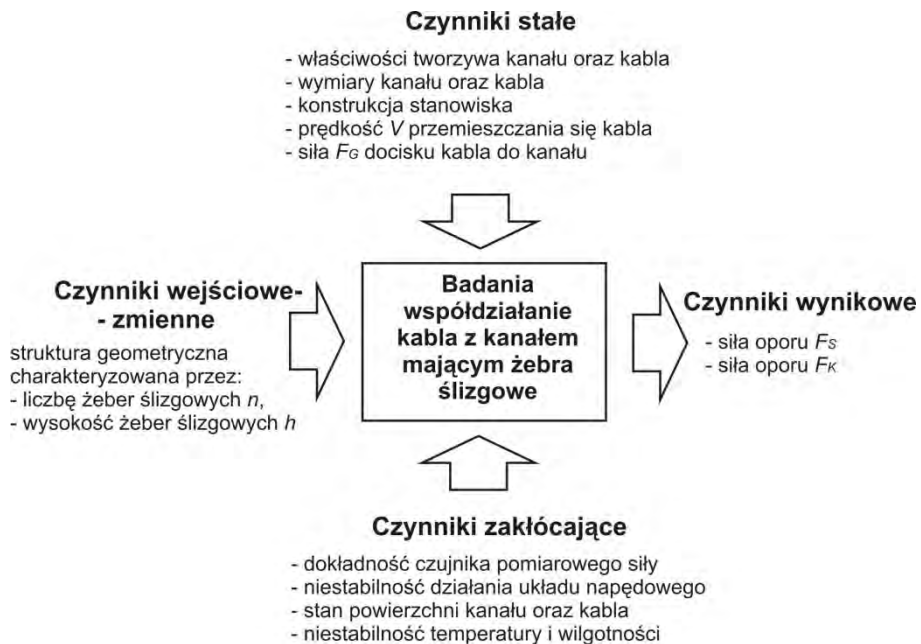
Drugim elementem konstrukcyjnym, z którym kojarzono wycinki kanałów były odcinki pomiarowe kabla optotelekomunikacyjnego. Kabel o określonej budowie ZXOTKtd i wymiarach miał powłokę zewnętrzną wykonaną z polietylenu dużej gęstości (PE-HD) [214].

Warunki prowadzenia badania na stanowisku przyjęto na podstawie literatury [88, 96, 216] oraz wykonanych własnych badań wstępnych [42, 50], zaleceń norm [217, 218, 219, 220] oraz wyników badań numerycznych.

5.3.1. Cel i metodyka badań doświadczalnych

Celem badań była ocena wpływu struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału na zmianę wartości siły oporu występującej przy współdziałaniu z kablem optotelekomunikacyjnym.

W badaniach uwzględniono następujące czynniki badane (rys. 65): strukturę geometryczną, charakteryzowaną przez zmienną liczbę żeber n oraz wysokość h żeber ślizgowych. Czynniki wynikowymi były wartości siły oporu F_S określone przy tarciu statycznym oraz wartości siły oporu F_K określone przy tarciu kinetycznym, bezpośrednio rejestrowane za pomocą układu pomiarowego stanowiska badawczego.



Rys. 65. Diagram przedstawiający czynniki uwzględnione w badaniach współdziałania odcinka kanału mającego żebra ślizgowe z kablem

Plan badań doświadczalnych (tab. 15) odpowiadał tzw. klasyfikacji dwukierunkowej [75, 121].

Wartość siły nacisku kabła na kanał oraz prędkość przemieszczania się kabła ustalono na podstawie wyników badań (opisanych w rozdziale 4 rozprawy) ustalono ogólny zakres zmian warunków badań. Dla określonych elementów konstrukcyjnych wycinka kanału oraz kabła przyjęto, że prędkość V przemieszczania się kabła względem wycinka kanału będzie wynosić 10 mm/min, natomiast wartość siły F_G nacisku kabła na powierzchnię kanału pochodząca od obciążenia pomiarowego wynosić będzie 20 N.

Przyjęte warunki badań odpowiadają warunkom opisanym w literaturze [47, 66, 67, 80, 82], stosowanym przy ręcznym wprowadzaniu kabła do wnętrza kanału z tworzywa polimerowego. Wszystkie badania doświadczalne przeprowadzono w temperaturze otoczenia wynoszącej $23^0 \pm 2^0 \text{C}$, przy wilgotności względnej powietrza $35 \pm 1 \%$.

5.3.2. Wyniki badań

Otrzymane wyniki badań wzajemnego oddziaływania kanału z kablem wykazały, że liczba oraz wysokość żeber istotnie wpływają na wartość siły oporu określaną zarówno przy tarciu statycznym (F_S), jak również przy tarciu kinetycznym (F_K). Wartości zmian siły oporu, statystyki podstawowe (wartość średnią, odchylenie standardowe oraz błąd standardowy) zamieszczono w tab. 15 oraz tab. 16, jak również w załączniku B (rys. B-1 ÷ B-6).

Tabela 15

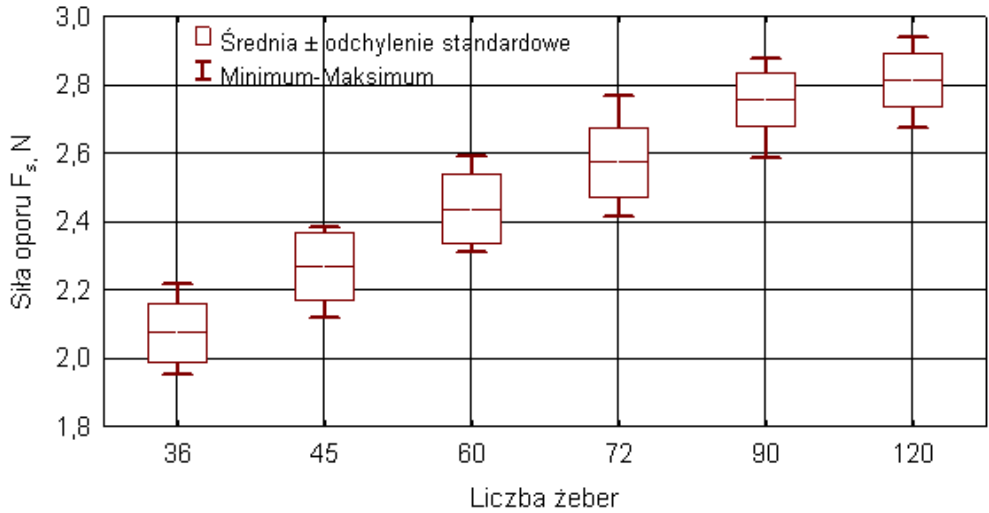
Zestawienie wyników pomiaru siły oporu F_s przy tarciu statycznym

Liczba zeber, n	Średnia, F_s , N	$F_{s\ min}$, N	$F_{s\ max}$, N	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy
Żebra o wysokości h=0,5 mm					
36	2,07	1,95	2,22	0,08	0,02
45	2,27	2,12	2,38	0,10	0,03
60	2,44	2,31	2,59	0,10	0,03
72	2,57	2,42	2,76	0,10	0,03
90	2,76	2,59	2,88	0,08	0,02
120	2,81	2,67	2,94	0,08	0,02
Żebra o wysokości h=1 mm					
Liczba zeber, n	Średnia, F_s , N	$F_{s\ min}$, N	$F_{s\ max}$, N	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy
36	1,98	1,88	2,09	0,077	0,022
45	2,09	1,97	2,20	0,069	0,021
60	2,35	2,24	2,42	0,067	0,020
72	2,92	2,83	3,06	0,068	0,020
90	3,13	2,96	3,25	0,078	0,024
120	3,51	3,37	3,61	0,065	0,019

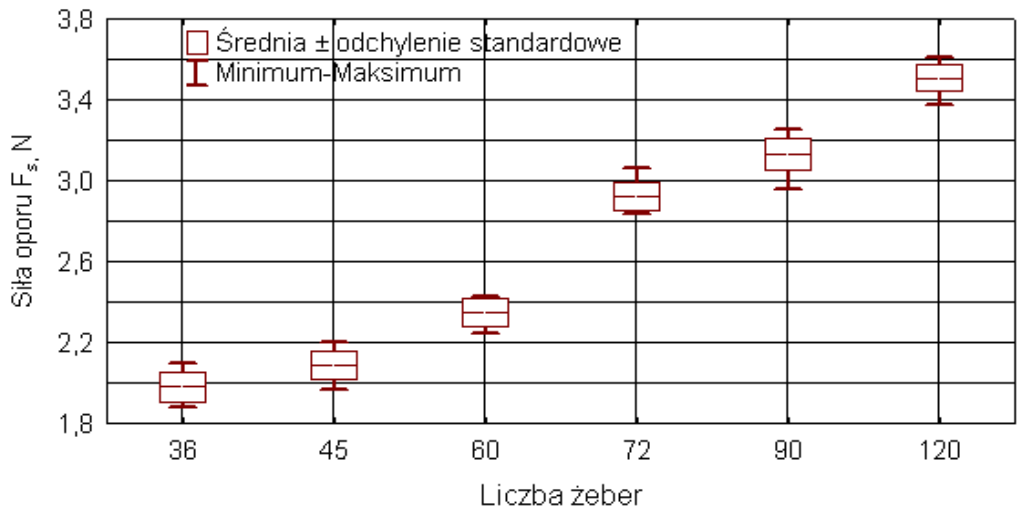
Zestawienie wyników pomiaru siły oporu F_K przy tarcii kinetycznym

Liczba zeber, n	Średnia, F_K, N	$F_{K\ min}, N$	$F_{K\ max}, N$	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy
Żebra o wysokości h=0,5 mm					
36	1,80	1,64	1,96	0,10	0,03
45	1,79	1,63	1,86	0,06	0,02
60	1,81	1,71	1,88	0,06	0,02
72	2,32	2,09	2,52	0,13	0,04
90	2,34	2,17	2,52	0,10	0,03
120	2,65	2,52	2,80	0,08	0,02
Żebra o wysokości h=1 mm					
Liczba zeber, n	Średnia, F_K, N	$F_{K\ min}, N$	$F_{K\ max}, N$	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy
36	1,36	1,29	1,45	0,05	0,01
45	1,44	1,38	1,53	0,04	0,01
60	1,65	1,54	1,76	0,08	0,02
72	1,92	1,77	2,04	0,08	0,02
90	2,18	2,05	2,39	0,09	0,03
120	2,33	2,27	2,43	0,06	0,02

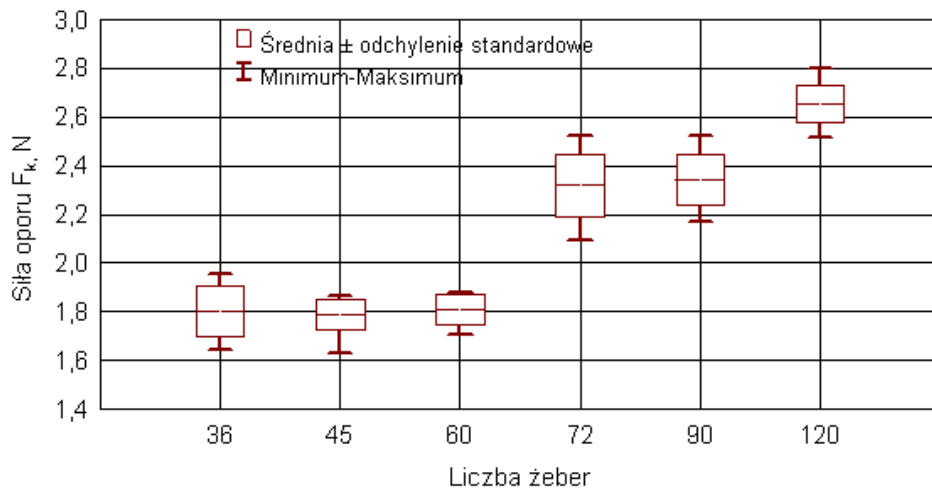
Wartości średnie poszczególnych pomiarów analizowano oddzielnie w zależności od wysokości zeber ślizgowych. Zestawienie porównawcze otrzymanych rezultatów pomiarów oraz wyników obliczeń określanych przy tarcii statycznym przedstawiono na rys. 66 i 67, natomiast przy tarcii kinetycznym na rys. 68 i 69.



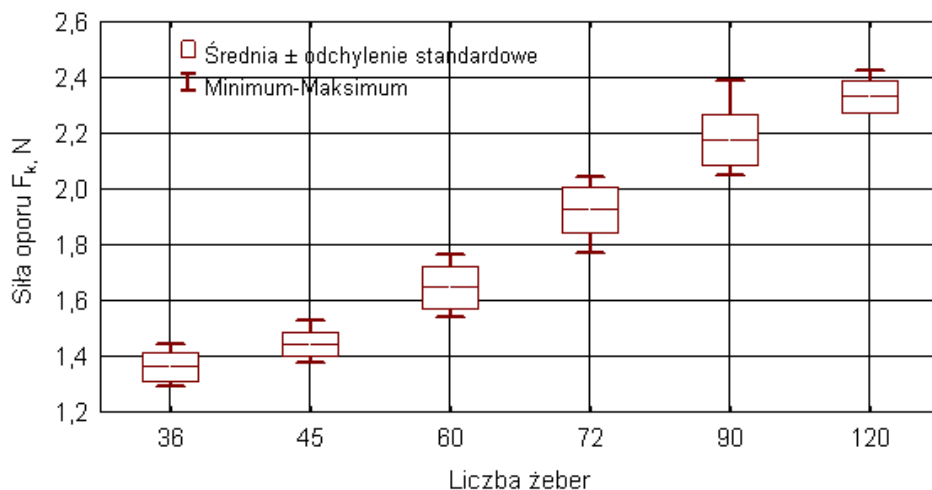
Rys. 66. Wyniki pomiarów siły oporu F_S przy tarcii statycznym dla żeber śligowych o wysokości $h = 0,5$ mm



Rys. 67. Wyniki pomiarów siły oporu F_S przy tarcii statycznym dla żeber śligowych o wysokości $h = 1$ mm



Rys. 68. Wyniki pomiarów siły oporu F_K przy tarciu kinetycznym dla żeber ślizgowych o wysokości $h = 0,5$ mm



Rys. 69. Wyniki pomiarów siły oporu F_K przy tarciu kinetycznym dla żeber ślizgowych o wysokości $h = 1$ mm

Zgodnie z przyjętym programem badań, statystyczną ocenę wyników oparto na analizie wariancji [122]. W kontekście przeprowadzonych badań model wariancji w ogólnej postaci przedstawia równanie:

$$F_{(ijk)} = \bar{F} + h_i + n_j + (h n)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (5.1)$$

gdzie: $F_{(ijk)}$ – wynik pomiaru siły oporu (F_S lub F_K), \bar{F} – wartość średnia siły oporu obliczona na podstawie wyników dla poszczególnych układów doświadczalnych, h_i – efekt przyrostu siły oporu wywołany zmianą wysokości żebra na i -tym poziomie, n_j – efekt przyrostu siły oporu wywołany zmianą liczby żeber na j -tym poziomie, $(h n)_{ij}$ – efekt interakcji wywołany jednoczesną zmianą czynników na poziomach i oraz j , ε_{ijk} – błąd modelu, i – indeks zmiany wysokości żeber (1-2), j – indeks zmiany liczby żeber (1-6), k – indeks pomiaru (1-28).

Na podstawie wyników pomiarów siły oporu przy tarcu statycznym i tarcu kinetycznym, wyznaczono za pomocą ogólnego równania (5.1) modele wariancji, które następnie poddano analizie statystycznej tzw. analizie wariancji.

Wartość wariancji obliczona dla poszczególnych układów doświadczalnych nie różniła się statystycznie, co wykazano testem Leveina [121]. Za poziom istotności testów statystycznych przyjęto wartość prawdopodobieństwa 0,05. Wartości prawdopodobieństwa odpowiadające obliczonej statystyce testowej F-Snedecora (11;126), wynosiły odpowiednio 0,55 (dla F_S) oraz 0,65 (dla F_K) i były większe niż zakładany poziom istotności. Zgodność rozkładu wartości zmiennej standaryzowanej rozkładu normalnego w odniesieniu do tzw. błędu modelu wariancji zamieszczono w załączniku B (rys. B-5 i rys. B-6).

Analiza ta wykazała (tab. 17), że każdy z czynników uwzględnionych w modelu (5.1) decyduje o zmienności siły oporu F_S oraz F_K . Obliczone wartości prawdopodobieństwa, odpowiadające statystykom testowym F-Snedecora, okazały się być mniejsze od przyjętego poziomu istotności $p=0,05$.

Wyniki analizy wariancji modeli F_S oraz F_K

Składowa modelu wariancji F_S	Suma kwadratów SK	Liczba stopni swobody df	Oszacowania wariancji MS	Statystyka testowa F-Snedecora	Prawdopodobieństwo
Efekt zmian wysokości żeber h	1,07	1	1,07	163,00	0,00
Efekt zmiany liczby żeber n	23,42	5	4,68	710,60	0,00
Interakcja ($h n$)	3,52	5	0,70	106,70	0,00
Błąd modelu \mathcal{E}	0,83	126	0,006	--	--
Składowa modelu wariancji F_K	Suma kwadratów SK	Liczba stopni swobody df	Oszacowania wariancji MS	Statystyka testowa F-Snedecora	Prawdopodobieństwo
Efekt zmian wysokości żeber h	3,20	1	3,21	478,30	0,00
Efekt zmiany liczby żeber n	16,67	5	3,33	496,86	0,00
Interakcja ($h n$)	0,39	5	0,07	11,58	0,00
Błąd modelu \mathcal{E}	0,84	126	0,0067	--	--

5.4. Wnioski i ustalenia dotyczące badań kanałów z żebrami ślizgowymi

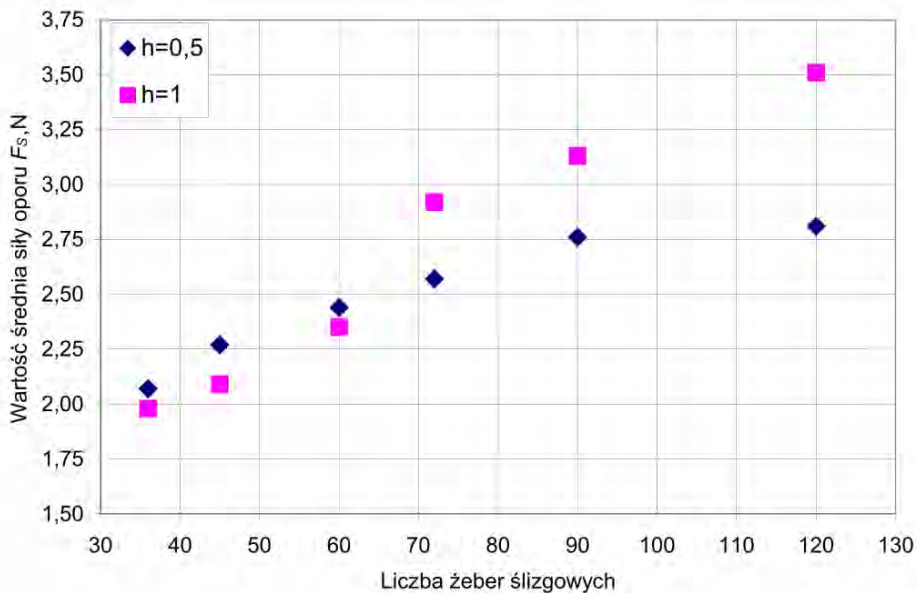
Wyniki badań doświadczalnych kanałów z żebrami ślizgowymi oraz ich analiza fizykalna, jak również statystyczna wykazały, że każdy z rozważanych czynników, takich jak liczba żeber n i wysokość h różnicuje poziom wartości siły oporu określany zarówno przy tarcniu statycznym jak też przy tarcniu kinetycznym. Interpretując otrzymane wyniki można zauważyć, że najmniejsze wartości sił oporu określone przy tarcniu statycznym odpowiadają stosunkowo małej liczbie żeber to jest: 36, 45 i 60, natomiast czynnik związany z wysokością żeber nie ma decydującego znaczenia.

Wykonana analiza tzw. post-hoc z wykorzystaniem testu Tukeya [121] (załącznik B tab. T-1 oraz tab. T-2) ukazała, że otrzymane wartości prawdopodobieństwa większe od $p=0,05$ (odpowiadające poszczególnym układom doświadczalnym, liczby żeber n i wysokości h), świadczą o braku różnicowania wartości średnich siły oporu.

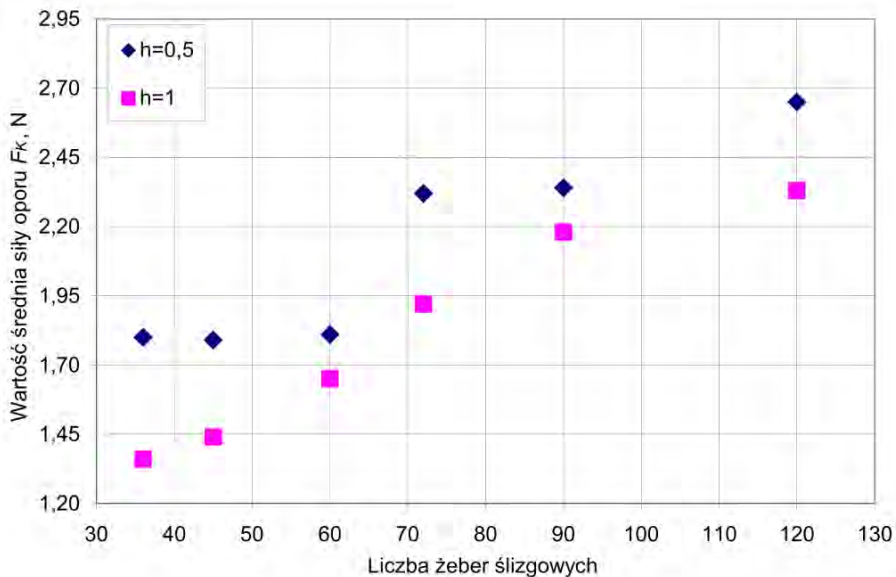
W przypadku, gdy na powierzchni kanału wykonano żebra o liczbie: 72; 90; 120 wyniki badań wykazują wyraźny wpływ zmiany wysokości żebra na wartość siły oporu. Zatem, co wykazała analiza wariancji (tab. 17), występują tu interakcje pomiędzy czynnikami badanymi. W przypadku, gdy kanał ma większą liczbę żeber, czynnik związany z wysokością żebra powoduje wyraźne zwiększenie wartości siły oporu. (rys 70 i rys. 71). Dążąc do uzyskania najmniejszych wartości siły oporu przy tarcniu statycznym należy do określonego kabla dobierać kanał o mniejszej liczbie żeber oraz małej ich wysokości.

Wykazano także, że wartość siły oporu przy tarcniu kinetycznym jest tym mniejsza, im mniejsza jest liczba żeber. Stwierdzenie to odnosi się do obydwu badanych wysokości żeber h wynoszących 0,5 mm oraz 1 mm..

Otrzymane wyniki badań doświadczalnych pozwoliły na wskazanie najbardziej korzystnej konstrukcji kanału z tworzywa polimerowego ze względu na określoną liczbę żeber ślizgowych, dla której rejestrowano najmniejsze wartości siły oporu.



Rys. 70. Zależność zmian wartości średnich siły oporu F_s określanych przy tarciu statycznym w funkcji liczby n zębów ślizgowych dla różnych wysokości h zębów



Rys. 71. Zależność zmian wartości średnich siły oporu F_k określanych przy tarciu kinetycznym w funkcji liczby n zębów ślizgowych dla różnych wysokości h zębów

Rozdział 6

BADANIA DOŚWIADCZALNE KANALÓW Z WARSTWĄ ŚLIZGOWĄ

6.1. Wstęp

Kanały z tworzywa polimerowego, w celu poprawy współdziałania z kablem optotelekomunikacyjnym, mogą mieć wytworzoną na powierzchni wewnętrznej, dodatkową warstwę ślizgową. Warstwę tę najczęściej wykonuje się w procesie współwytłaczania [110, 112, 137] i charakteryzuje się ona stosunkowo dużą grubością, co w przypadku kanałów o większych średnicach oraz kanałów o kształtach złożonych znacznie wpływa na koszty wytwarzania. Na podstawie analizy literatury [170, 171, 201] założono wstępnie, że można na powierzchni wewnętrznej kanału wykonać warstwę ślizgową z wodnej emulsji zawierającej aktywne środki ślizgowe. Grubość otrzymanej warstwy zależy od składu, właściwości emulsji oraz warunków jej nanoszenia i zestalania. Wymagało to opracowania koncepcyjnego i następnie wykonania instalacji do natryskowego nanoszenia, określenie warunków przebiegu tego procesu, tak aby na żądanej powierzchni kanału otrzymać wymaganą warstwę o dobrych właściwościach ślizgowych.

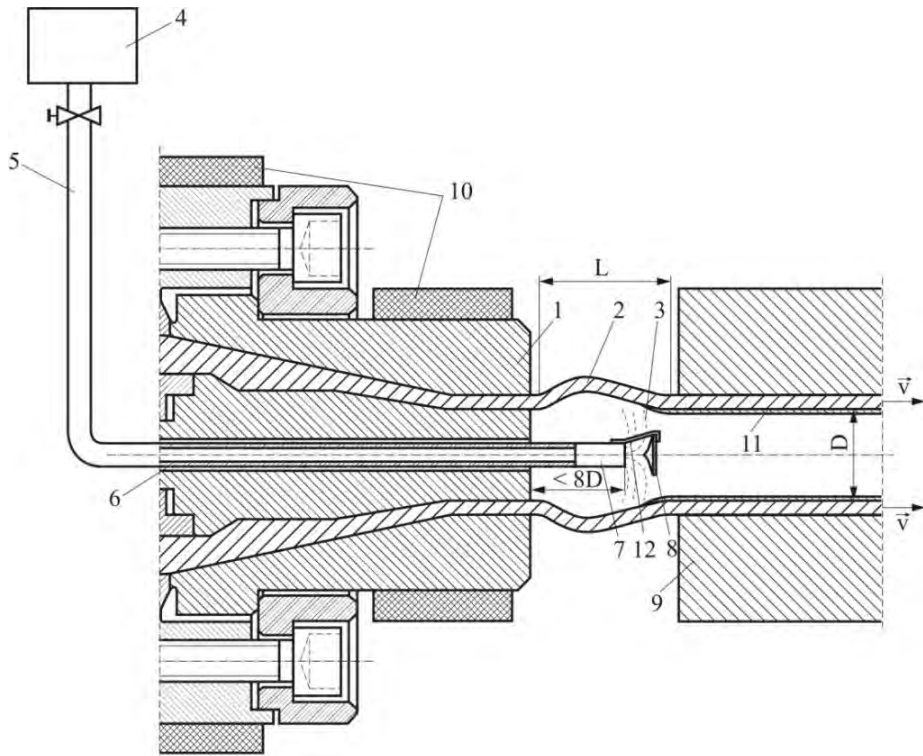
Odrębnym zagadnieniem było odpowiednie dobranie składu emulsji, zakresu badań przy wzajemnym oddziaływaniu z kablem oraz ocena warstwy ślizgowej [204]. Przyjęto, że dobór rodzaju emulsji na warstwę ślizgową zweryfikowany zostanie na podstawie wyników badań doświadczalnych z wykorzystaniem stanowiska badawczego (opisanego

w rozdziale 4). Natomiast ocena otrzymanej warstwy będzie wykonana na podstawie obserwacji struktury powierzchni z wykorzystaniem techniki mikroskopowej.

6.2. Budowa i działanie instalacji do nanoszenia natryskowego

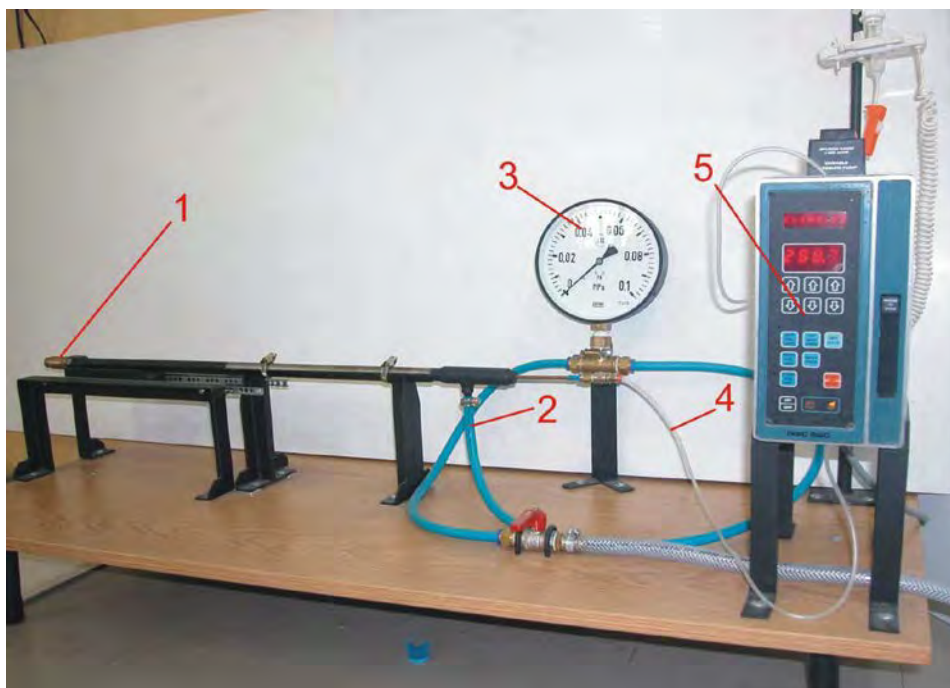
Proces wytwarzania dodatkowej warstwy śluzowej metodą nanoszenia natryskowego na powierzchniach wytworów z tworzywa, polega na doprowadzeniu środka – emulsji o odpowiednich właściwościach do żądanej powierzchni i rozproszeniu jej w strumieniu gazu. Powierzchnia wytworu, na który jest nanoszona emulsja, musi mieć odpowiednią temperaturę. Emulsja stykając się z nagrzaną powierzchnią wytworu, po odparowaniu znajdującej się w jej składzie wody, ulega polimeryzacji tworząc na powierzchni cienką, stałą warstwę, trwale i ściśle przylegającą do podłoża. Analiza literatury [37, 55, 103, 152, 153] wykazała, że metoda ta, nie była dotychczas stosowana przy wytwarzaniu kanałów z tworzywa polimerowego. Wynikało to głównie z braku publikowanych wiadomości, dotyczących sposobu doprowadzenia emulsji do określonego obszaru wytłoczyny, jej składu oraz wyników charakteryzujących właściwości i strukturę otrzymanej warstwy [40, 45, 79]. Doprowadzenie emulsji na wewnętrzną powierzchnię wytłoczyny z tworzywa polimerowego wymagało zbudowania specjalnej instalacji, którą należało umieścić w dodatkowych kanałach wykonanych w korpusie głowicy wylączarskiej. Schemat oryginalnej, współautorskiej [204] instalacji do nanoszenia natryskowego emulsji na wewnętrzną powierzchnię kanału z tworzywa przedstawiono na rys. 72.

W skład instalacji oprócz przewodów doprowadzających emulsję oraz gaz rozpraszający, wchodzi: układ dozowania oraz układ sterowania i kontroli przepływu. Żądany stopień rozproszenia emulsji w określonym obszarze końcówki głowicy wylączarskiej, jest realizowany za pomocą specjalnej dyszy natryskowej, w której zachodzi mieszanie emulsji z gazem rozpraszającym. W efekcie tego emulsja w postaci mgły jest doprowadzana bezpośrednio do nagrzonej powierzchni kanału, gdy opuszcza on głowicę wylączarską.



Rys. 72. Schemat instalacji do nanoszenia natryskowej warstwy ślizgowej; 1 – głowica wytłaczarska, 2 – wytłoczyna-kanal z tworzywa, 3 – emulsja, 4 – zbiornik, 5 – przewody instalacji, 6 – kanał do umieszczania przewodów w głowicy, 7 – dysza natryskowa, 8 – deflektor, 9 – kalibrator, 10 – grzejniki elektryczne, 11 – warstwa ślizgowa, 12 – wspornik, D – średnica wewnętrzna kanału, L – odległość pomiędzy głowicą a kalibratorem

Przed umieszczeniem przewodów instalacji oraz dyszy do korpusu głowicy wytłaczarskiej w linii technologicznej wytłaczania, warunki prowadzenia tego procesu dobrano na podstawie stosownych badań. W wyniku tych badań ustalono najkorzystniejszy kształt i wymiary dyszy natryskowej [8, 45, 159], wartość wydatku emulsji, wartość ciśnienia gazu rozpraszającego w zależności od jej rodzaju oraz w odniesieniu do kształtów i wymiarów kanału. Prace te przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, na zaprojektowanym do tego celu stanowisku (rys. 73, 74) do badań przebiegu procesu natryskiwania emulsji, na wewnętrznej powierzchni kanału wykonanego z transparentnego tworzywa polimerowego.



Rys. 73. Wygląd stanowiska do badań przebiegu procesu natryskiwania emulsji w warunkach laboratoryjnych, znajdującego się w Katedrze Procesów Polimerowych Politechniki Lubelskiej; 1 – dysza natryskowa, 2 – przewody doprowadzające sprężone powietrze, 3 – manometr, 4 – przewody doprowadzające emulsję, 5 – pompa perystaltyczna

a)



b)



Rys. 74. Wygląd fragmentów instalacji do natryskiwania emulsji: a) końcówka dyszy (w powiększeniu), b) wygląd przebiegu natryskiwania emulsji na wewnętrznej powierzchni kanału z transparentnego tworzywa polimerowego

Poprawność wykonania dyszy natryskowej zweryfikowano w warunkach przemysłowych podczas prób technologicznych, wykonanych w amerykańskiej firmie DuraLine w Oddziale Zamiejscowym na terenie Republiki Czeskiej.

6.3.Charakterystyka doboru emulsji do nanoszenia natryskowego

Dobór emulsji do natryskowego nanoszenia prowadzono w dwu etapach, w ramach badań wstępnych oraz badań zasadniczych. W pierwszym etapie założono, że do wytworzenia warstw tą metodą można zastosować wodne emulsje będące gotowymi produktami handlowymi. Produkty te, charakteryzują się m.in. tym, że mają dobre właściwości ślizgowe i z tego względu są z powodzeniem stosowane w innych dziedzinach techniki, np.: do zmniejszania oporów przy obróbce skrawaniem lub do zmniejszania adhezji tworzywa do metalu w gnieździe formującym, podczas procesu wtryskiwania.

Emulsje do badań wstępnych różniły się między sobą głównie rodzajem i zawartością aktywnego środka ślizgowego. Wykorzystano wodne mieszaniny oparte na poli(dimetylosiloksanie) (PDMS), (oznaczenie A1, A2, E1, E2), fluorowęglowodorce (HFC) z estrem alifatycznym (oznaczenie S) oraz mieszaniny własne (oznaczenia SF1 i SF2). Mieszaniny własne otrzymywane były z poli(metylowodorosiloksanu) (PMWS) oraz poli(tetrafluoroetyleny) (PTFE), podczas wysokociśnieniowej homogenizacji w trakcie ich emulgowania. Podstawowe dane, charakteryzujące wybrane właściwości fizykochemiczne stosowanych emulsji, zestawiono w tab. 18.

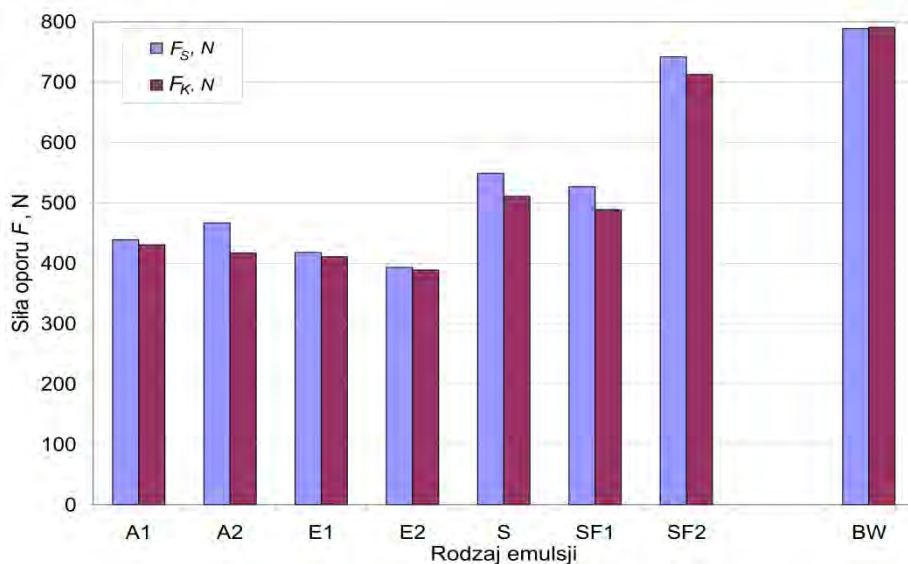
Wybrane właściwości fizykochemiczne emulsji użytych do badań wstępnych

Oznaczenie próbki/Nazwa handlowa, mieszanina	Rodzaj środka aktywnego	Zawartość środka aktywnego w emulsji %	Właściwość *		Temperatura wrzenia °C
			Gęstość kg/m ³	Lepkość m Pa·s	
Emulsja A1 Ambersil MPR 100	PDMS	30	990	160	> 250
Emulsja A2 Ambersil MPR 200	PDMS	40	1000	180	> 250
Emulsja E1 Polsil E-1	PDMS	35	980	100	> 250
Emulsja E1 Polsil E-2	PDMS	45	990	140	> 250
Emulsja S Sorex P 1269	HFC	2	1000	10	> 350
Emulsja SF1 mieszanina własna	PMWS z PTFE	19	1075	179,6	> 90
Emulsja SF2 mieszanina własna	PMWS z PTFE	78	1298	18,7	> 90

*oznaczone w temperaturze 25⁰ C

W efekcie przeprowadzenia procesu wytłaczania z jednoczesnym natryskowym nanoszeniem wymienionych (tab. 18) emulsji otrzymano odpowiednie kanały z tworzywa polimerowego z warstwą ślizgową. Odcinki kanałów o odpowiedniej długości poddawano następnie badaniom przy skojarzeniu z kablem optotelekomunikacyjnym. Podczas badań określano wartość siły oporu F_S w warunkach tarcia statycznego oraz tarcia kinetycznego F_K . Badania prowadzono na stanowisku badawczym z bębnum pomiarowym, na odcinku krzywoliniowym, znajdującym się w wspomnianej firmie DuraLine (USA). Do badań stosowano kabel optotelekomunikacyjny ZXOTKtd o średnicy 12 mm, mający zewnętrzną powłokę wykonaną z polietylenu dużej gęstości (PE-HD). Odcinek pomiarowy kanału był opasany na bębnie pomiarowym o średnicy 1200 mm, kąt opasania wynosił $5\pi/2$ rad, a prędkość wprowadzania kabla do wnętrza kanału miała wartość 5 m/min. Pomiaru prowadzono przy sile pochodzącej od obciążenia

swobodnego końca kabla, wynoszącej $F_G=250$ N. Wyniki otrzymanych pomiarów w formie graficznej przedstawiono na rys. 75.



Rys. 75. Wykres zmiany wartości siły oporu w zależności od rodzaju stosowanej emulsji ślizgowej: siła oporu F_S , F_K , A1, A2, E1, E2, S, SF1, SF2– rodzaj emulsji wykorzystanej do wytworzenia warstwy ślizgowej kanału, BW– kanał bez warstwy ślizgowej

Otrzymane wyniki badań potwierdziły wstępne założenia, że nanoszenie natryskowe emulsji na powierzchnię kanału z polietyleny, umożliwiła uzyskanie warstwy ślizgowej o oczekiwanych właściwościach. Podczas pomiarów zarejestrowano zmniejszenie wartości sił oporu, przy wprowadzaniu do wnętrza kanału kabla optotelekomunikacyjnego w porównaniu do wyników otrzymanych w przypadku kanału bez warstwy. Najmniejsze wartości siły oporu określone przy tarcu statycznym F_S i kinetycznym F_K otrzymano w przypadku kanału, którego powierzchnia wewnętrzna pokryta została emulsją E2 z aktywnym środkiem ślizgowym opartym na poli(dimetylosiloksanie) (PDMS).

Pokrycie powierzchni kanału mieszaniną PMWS z PTFE (emulsja SF2), mimo dużej zawartości aktywnego środka ślizgowego opartego na poli(tetrafluoroetylenie) (PTFE), skutkowało wartością siły oporu zbliżoną do wartości siły, rejestrowanej podczas wprowadzania kabla do wnętrza

kanału bez warstwy ślizgowej (BW), co można przyjąć, jako pewnego rodzaju niespodziankę.

Na podstawie wyników badań wstępnych oraz analizy literatury [6, 14, 57, 94, 119] przyjęto, że badania zasadnicze nanoszenia natryskowego emulsji zawierającej aktywny środek ślizgowy przeprowadzone zostaną z wykorzystaniem mieszanin własnych, opartych na wodnych dyspersjach oleju poli(dimetylosiloksanu) (PDMS).

Zastosowanie poli(dimetylosiloksanu) (PDMS) jako środka ślizgowego wynikało także z tego że, związek ten wykazuje dużą swobodę ruchów segmentów makrocząsteczek. Odległości pomiędzy makrocząsteczkami są większe niż w przypadku węglowodorów, co powoduje, że siły oddziaływań pomiędzy nimi mają wartości mniejsze. Łatwość rotacji oraz małe wartości oddziaływań pomiędzy podstawnikami w łańcuchu siloksanowym umożliwiają z kolei orientację (PDMS) w zależności od wartości swobodnej energii powierzchniowej podłoża na które nanosi się emulsję [188, 190]. Nie bez znaczenia jest także to, że emulsje z oleju (PDMS) nie oddziałują negatywnie na organizmie człowieka i podlegają zarówno degradacji środowiskowej, jak też degradacji mikrobiologicznej [94].

Przy tworzeniu mieszanin jako emulgatory były stosowane niejonowe środki powierzchniowo-czynne w ilości ok. 5 % wag., w stosunku do oleju znajdującego się w emulsji. W celu uzyskania wymaganych układów dyspersyjnych olej-woda, mieszaniny do dalszych badań zasadniczych poddano procesowi homogenizacji wysokociśnieniowej w Zakładzie Technologii i Przetwórstwa Tworzyw IChP w Warszawie. Naniesienie emulsji na powierzchnię wytworu podczas procesu wytlaczania, z uwagi na wnikanie cząstek emulsji w warstwę wierzchnią tworzywa, pozwala w określonych warunkach na utworzenie cienkiej mikrowarstwy o dobrych właściwościach ślizgowych oraz dużej odporności na zużycie. W literaturze [158, 159, 199, 200] wykazano m.in. że w przypadku wytworów z warstwą wykonaną z PDMS, przy zmianie wartości temperatury w zakresie od -50°C aż do $+190^{\circ}\text{C}$ nie rejestrowano istotnych zmian właściwości ślizgowych.

Opracowane emulsje do badań zasadniczych miały określoną gęstość, różniły się między sobą lepkością oraz zawartością oleju poli(dimetylosiloksanu) (PDMS). Wybrane właściwości fizykochemiczne charakteryzujące emulsje zestawiono w tab. 19.

Wybrane właściwości fizykochemiczne emulsji do badań zasadniczych

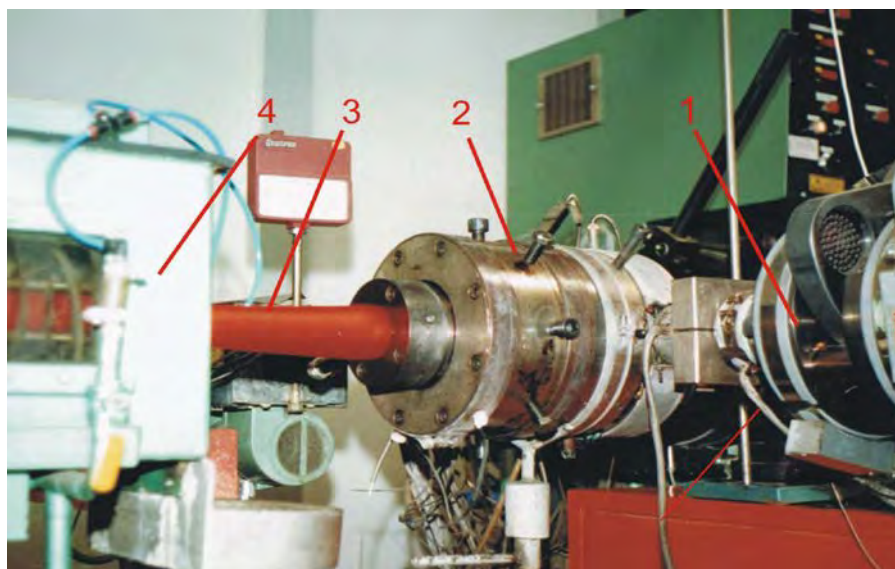
Oznaczenie próbki/Nazwa handlowa, mieszanina	Rodzaj środka aktywnego	Zawartość aktywnego środka w emulsji	Właściwość *		Temp. wrzenia °C
			Gęstość kg/m ³	Lepkość m Pa·s	
Emulsja SF4 mieszanina własna	PDMS	30	993	6,97	> 250
Emulsja SF5 mieszanina własna	PDMS	35	997	11,67	> 250
Emulsja SF6 mieszanina własna	PDMS	42	999	58,02	> 250

*oznaczone w temperaturze 25⁰ C

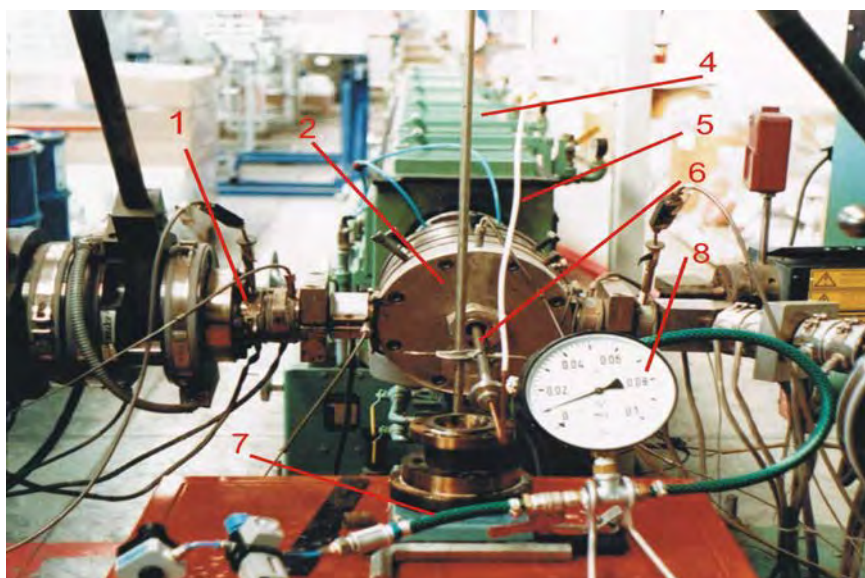
6.4. Przebieg procesu nanoszenia natryskowego emulsji

Proces wytłaczania kanału z jednoczesnym natryskowym nanoszeniem emulsji na wewnętrzną powierzchnię kanału, wykonano z wykorzystaniem linii technologicznej we wspomnianej firmie DuraLine (USA). Poszczególne odcinki badawcze kanałów z tworzywa polimerowego wytworzono w linii technologicznej z wykorzystaniem wytłaczarki jednoślismakowej Davis-Standard Corporation (USA), wyposażonej w głowicę kątową (rys. 76, rys. 77). Temperatura na końcu układu uplastyczniającego oraz w ostatniej strefie głowicy wynosiła 210 °C, a szybkość wytłaczania 7,2 m/min.

Tworzywem, z którego wytwarzano ściankę nośną kanału, był polietylen dużej gęstości Liten BB29, mający masowy wskaźnik szybkości płynięcia $MFR_{(190, 2,16)} = 0,15$ g/10 min. W linii technologicznej wytwarzano walcową wytłoczną, w postaci kanału o średnicy zewnętrznej wynoszącej 40 mm przy grubości ścianki 3,6 mm. Bezpośrednio po ustabilizowaniu się procesu uplastyczniania i ustaleniu warunków wytłaczania, doprowadzono do wewnętrznej powierzchni wytłoczyny, w obszarze końcówki głowicy wytłaczarskiej, przygotowane mieszaniny – emulsje (SF4, SF5, SF6).

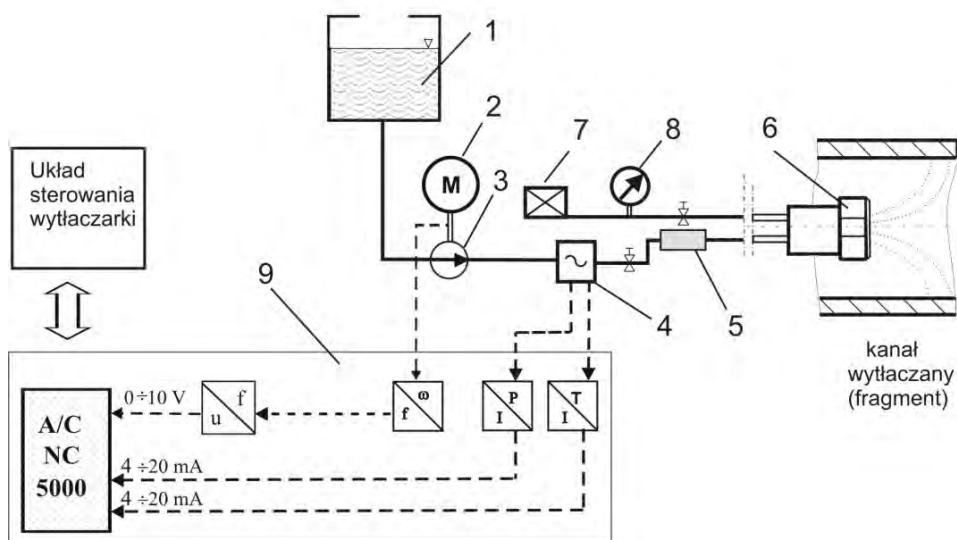


Rys. 76. Wygląd fragmentu linii technologicznej wytłaczania kanału z tworzywa polimerowego: 1 – układ uplastyczniający, 2 – głowica wytłaczarska, 3 – kanał, 4 – kalibrator z wanną chłodzącą



Rys. 77. Wygląd fragmentu linii technologicznej wytłaczania od strony za głowicą wytłaczarską: 1 – układ uplastyczniający, 2 – głowica wytłaczarska, 4 – kalibrator z wanną chłodzącą, 5 – dysza natryskowa, 6 – przewody doprowadzające emulsje z aktywnym środkiem ślizgowym, 7 – przewody doprowadzające powietrze

W procesie nanoszenia natryskowego dla wszystkich badanych emulsji utrzymywano odpowiednie wartości ciśnienia, temperatury oraz natężenia jej przepływu, które zostały ustalone podczas badań laboratoryjnych. W celu zsynchronizowania wydatku emulsji z szybkością wytlaczania kanału, w instalacji zastosowano pompę perystaltyczną wraz z przetwornikiem obrotowo-impulsowym sprzężonym z układem regulacji obrotów ślimaka wytłaczarki. W instalacji wykorzystano także wymiennik ciepła, elektroniczny regulator temperatury przetwornik temperatur i elektrozapór (rys 78).



Rys. 78. Schemat instalacji do nanoszenia natryskowego emulsji wraz z układem sterowania: 1 – zbiornik z emulsją, 2 – silnik napędu pompy, 3 – pompa perystaltyczna, 4 – urządzenie dozujące, 5 – wymiennik ciepła, 6 – dysza natryskowa, 7 – sprężarka, 8 – manometr, 9 – układ sterowania

Wszystkie sygnały z przetworników pomiarowych doprowadzono do układu sterującego współpracującego z komputerem. Zastosowanie wyżej wymienionych podzespołów umożliwiło przeprowadzenie procesu wytłaczania, przy ściśle określonych warunkach nanoszenia natryskowego emulsji, zgodnie z przyjętymi założeniami.

6.5. Charakterystyka i ocena otrzymanej warstwy śluzowej

Zjawiska towarzyszące wzajemnym oddziaływaniom międzyfazowym tworzywo – warstwa śluzowa opisuje kilka niezależnych teorii. Należą do nich teoria adsorpcyjna- uwzględniająca działanie sił van der Waalsa pomiędzy pozbawionymi ładunków elektrycznych powierzchniami ciał stałych [61, 133], dyfuzyjna, elektrostatyczna, wiązań chemicznych, jak również połączeń mechanicznych (tzw. zakleszczania się dwóch powierzchni) [54, 120, 142]. W celu oceny właściwości warstw śluzowych otrzymanych z wymienionych (tab. 19) emulsji, wykonuje się badania doświadczalne znane przede wszystkim z dziedziny chemii, fizyki i inżynierii materiałowej [60, 86, 145]. Należą do nich badania oddziaływań międzyfazowych występujących pomiędzy otrzymaną warstwą a podłożem z tworzywa, z wykorzystaniem badań reo-fotoakustycznych (FT-IR). Inna grupę stanowią badania jakości przylegania warstwy [140, 144, 147], które otrzymuje się poprzez wyznaczenie wartości kąta zwilżania (DCA), obliczanie wartości swobodnej energii powierzchniowej (SFE) lub z wykorzystaniem technik mikroskopowych. Opisano to m.in. w publikacjach [39, 47, 86, 87]. Z uwagi na zakres naukowy i użyteczny rozprawy badania doświadczalne kanałów z warstwą śluzową, oparto głównie na analizie oddziaływania kanału z kablem optotelekomunikacyjnym oraz oceną stanu powierzchni otrzymanej warstwy [47, 49].

6.5.1. Cel badań

Celem badań doświadczalnych, kanałów z warstwą śluzową otrzymaną metodą natryskowego nanoszenia, było wyznaczenie czynników określających przydatność wytworzonej warstwy śluzowej do współdziałania z kablem. Prace badawcze oparto na kryterium uzyskania najmniejszych wartości siły oporu przy tego rodzaju oddziaływaniach. Badania te prowadzono na wycinkach kanałów z warstwą śluzową z wykorzystaniem autorskiego stanowiska badawczego. Przyjęto także, że ocena przylegania otrzymanej warstwy śluzowej będzie obejmować badania jej struktury powierzchni, z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Najważniejsze czynniki uwzględniane w badaniach przedstawiono na diagramie (rys. 79).



Rys. 79. Diagram przedstawiający czynniki uwzględnione w badaniach wzajemnego współdziałania kanału mającego warstwę ślizgową z kablem optotelekomunikacyjnym

6.5.2. Badania kanału z warstwą ślizgową przy współdziałaniu z kablem

Badania kanału z tworzywa polimerowego mającego warstwę ślizgową wytworzoną metodą nanoszenia natryskowego, przy współdziałaniu z kablem optotelekomunikacyjnym, wykonano z wykorzystaniem stanowiska badawczego (opisanego w rozdziale 4).

Celem badań było wskazanie rodzaju emulsji (SF4, SF5, SF6) wykazującej, w określonych warunkach najlepsze właściwości ślizgowe oraz odniesienie uzyskanych wyników do zarejestrowanych przy pomiarach, w przypadku kanału bez warstwy ślizgowej (BW). Badania prowadzono przy prędkości przemieszczania się kabla $V=10$ mm/min oraz sile $F_G=20$ N nacisku kabla na wycinek kanału. Do wszystkich pomiarów zastosowano ten sam rodzaj kabla optotelekomunikacyjnego (ZXOTKtd) o średnicy 12 mm, mającego powłokę zewnętrzną wykonaną z polietylenu dużej gęstości (PE- HD).

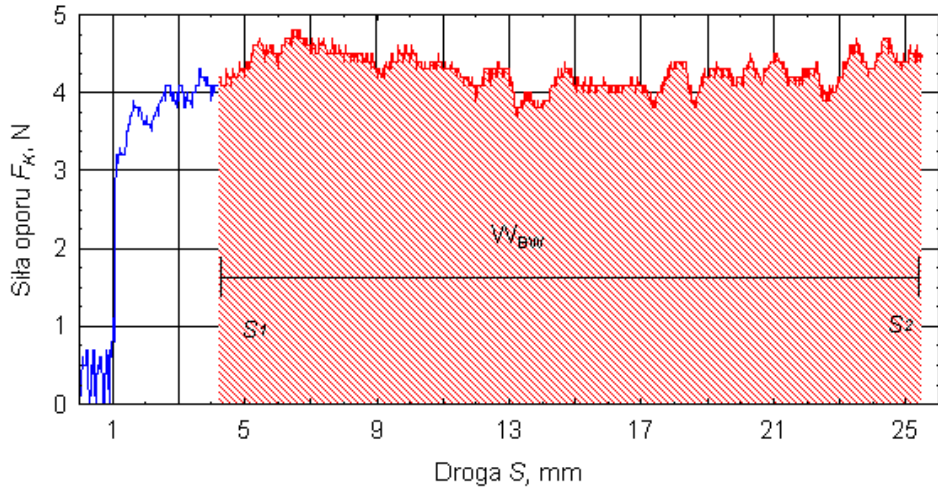
Analizując otrzymane wyniki zauważono, że wartość siły oporu określana przy tarciu kinetycznym ma charakter niestacjonarny. Dla wszystkich przebiegów zmian wartości siły F_K , na badanym odcinku pomiarowym, zaobserwowano charakterystyczny trend (rosnący lub malejący). Na tej podstawie przyjęto, że obliczanie wartości średniej siły oporu \bar{F}_K jako średniej ważonej (4.1) nie jest wystarczającym wskaźnikiem opisującym charakter przebiegu procesu współdziałania kanału z kablem (rozdział 4). Dlatego też ocenę efektywności tego współdziałania wykonano na podstawie dodatkowej analizy zmian wartości pracy $W_{(s)}$ [75].

Wartość tę wyznaczono przez pomiar pola pod otrzymaną krzywą zmian wartości siły oporu F_K na wybranym odcinku drogi od S_1 do S_2 przemieszczania się kabła w kanale. Dla wszystkich rodzajów emulsji, z których wytworzono warstwy wartość pracy wyznaczono z zależności (6.1):

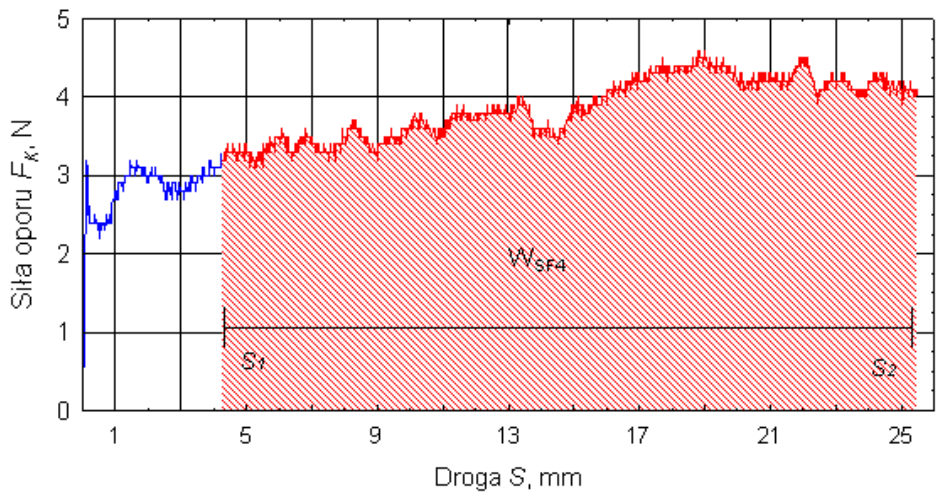
$$W_{(s)} = \int_{s_1}^{s_2} F_K(s) ds \quad (6.1)$$

gdzie: $W_{(s)}$ – praca potrzebna na pokonanie siły oporu, $F_{K(s)}$ – wartości siły oporu F_K w funkcji drogi S , S_1 , S_2 – droga przemieszczania się kabła, odpowiednio koniec i początek

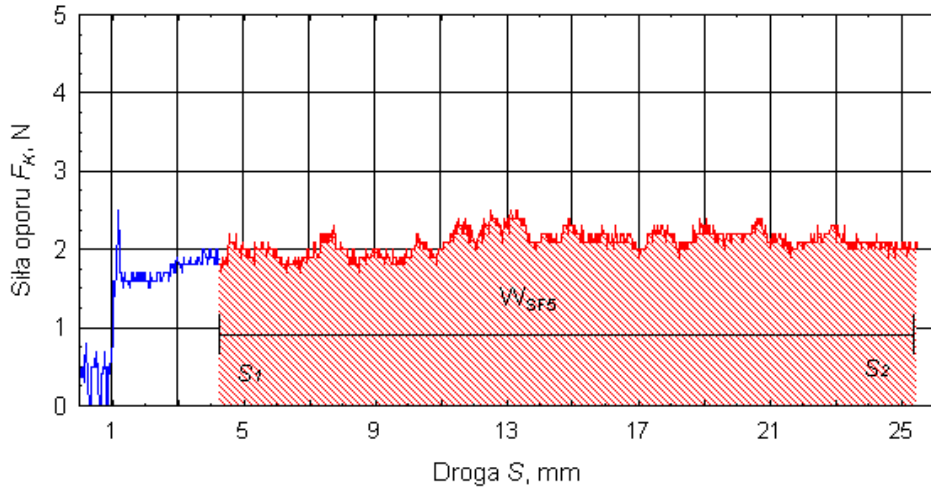
Przykłady otrzymanych zależności zmian siły oporu F_K w funkcji drogi S współdziałania kanału z kablem zamieszczono na rys. 80 – 83. Wyniki obliczeń wartości pracy $W_{(s)}$ oraz wartości odchylenia standardowego zamieszczono w tab. 20.



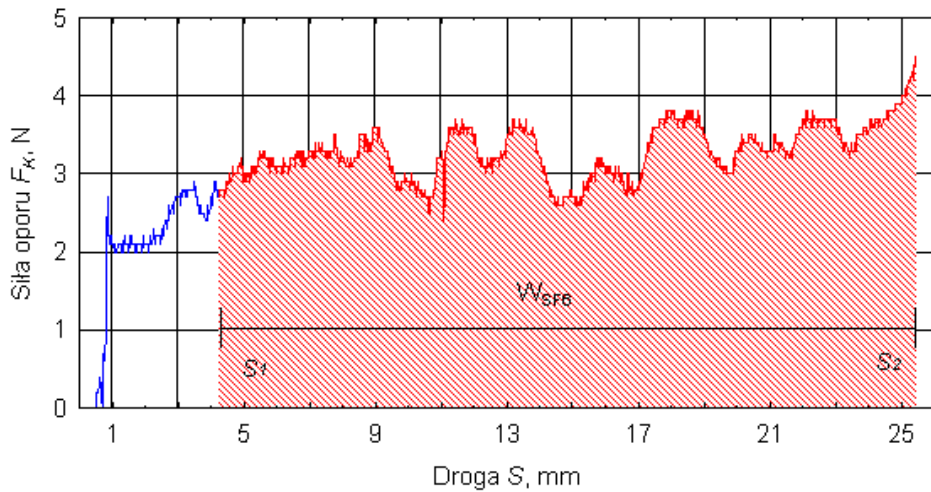
Rys. 80. Wykres zmian wartości siły oporu F_K w funkcji drogi przemieszczania się kabla dla przypadku kanału bez warstwy ślizgowej BW



Rys. 81. Wykresy zmian wartości siły oporu F_K w funkcji drogi przemieszczania się kabla dla przypadku kanału z warstwą ślizgową wykonaną z emulsji SF4



Rys. 82. Wykresy zmian wartości siły oporu F_k w funkcji drogi przemieszczania się kabla dla przypadku kanału z warstwą ślizgową wykonaną z emulsji SF5



Rys. 83. Wykresy zmian wartości siły oporu F_k w funkcji drogi przemieszczania się kabla dla przypadku kanału z warstwą ślizgową wykonaną z emulsji SF6

Tabela 20

**Wyniki obliczeń pracy $W_{(S)}$
wykonanej na pokonanie siły oporu F_K na odcinku drogi od S_1 do S_2**

Symbol pracy w odniesieniu do rodzaju emulsji	Wartość średnia, \bar{W}, J	Wartość najmniejsza W_{\min}, J	Wartość największa W_{\max}, J	Odchylenie standardowe σ, J
W_{SF4}	2,69	2,47	2,92	0,26
W_{SF5}	1,48	1,36	1,57	0,09
W_{SF6}	2,09	1,88	2,36	0,21
W_{BW}	3,17	2,79	3,51	0,29

Do oceny wpływ rodzaju emulsji, zastosowanej do wytworzenia warstwy ślizgowej na wartości otrzymanej pracy sił oporu $W_{(S)}$, wykorzystano jednoczynnikową analizę wariancji (tab. 21). Poprawność założeń prowadzonych analiz w odniesieniu do jednorodności wariancji wykazano testem Levein'a.

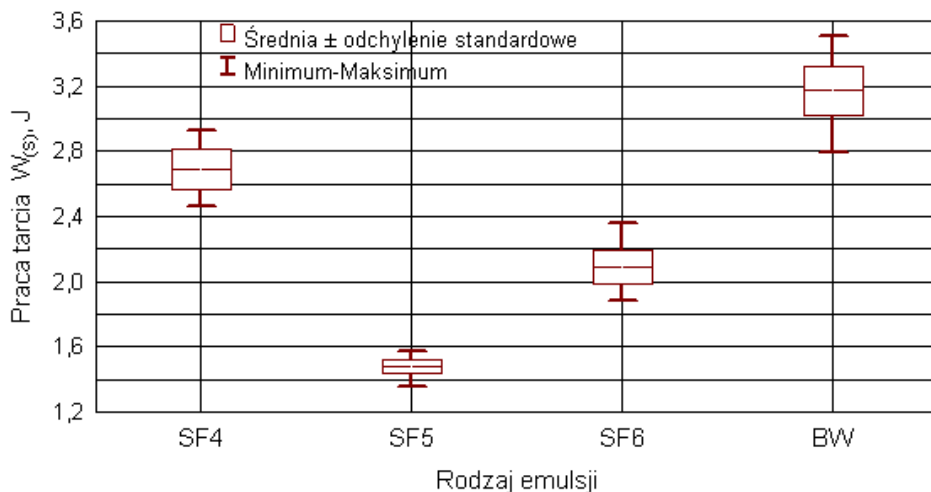
Tabela 21

Wyniki analizy jednoczynnikowej wariancji

Wielkość	Suma kwadratów SK	Liczba stopni swobody df	Średnia suma kwadratów MS	Statystyka F-Snedecora	Prawdopodobieństwo,
Efekt wpływu rodzaju warstwy ślizgowej	6,49	3	2,16	43,02	0,00
Błąd modelu	0,6	12	0,05	-	-

Porównanie wyników badań siły oporu F_S określonej przy tarciu statycznym dla warstw ślizgowych wykonanych z poszczególnych emulsji

(SF4, SF5, SF6), z wynikami zarejestrowanymi dla wycinków kanałów bez warstwy (BW) wykazało, że zastosowanie wymienionych emulsji do wytworzenia warstw ślizgowych powodowało obniżenia wartości tej siły a więc uzyskano polepszenie współdziałania kanału z kablem (rys. 84).



Rys. 84. Porównanie wartości średnich pracy potrzebnej na pokonanie siły oporu $W(s)$ w zależności od rodzaju emulsji

Otrzymane rezultaty obliczeń pracy (W_{SF4} , W_{SF5} , W_{SF6}) potrzebnej na pokonanie siły oporu F_K określonej przy tarcu kinetycznym, dla wszystkich badanych emulsji, miały także wartości mniejsze niż te, które zostały zarejestrowane podczas badań dla kanału bez warstwy ślizgowej (W_{BW}). Zakres zmian wartości pracy, w przypadku kanałów z warstwą ślizgową zawierał się w zakresie od 1,36 do 2,92 J, a dla kanałów bez warstwy wynosił od 2,79 do 3,51 J.

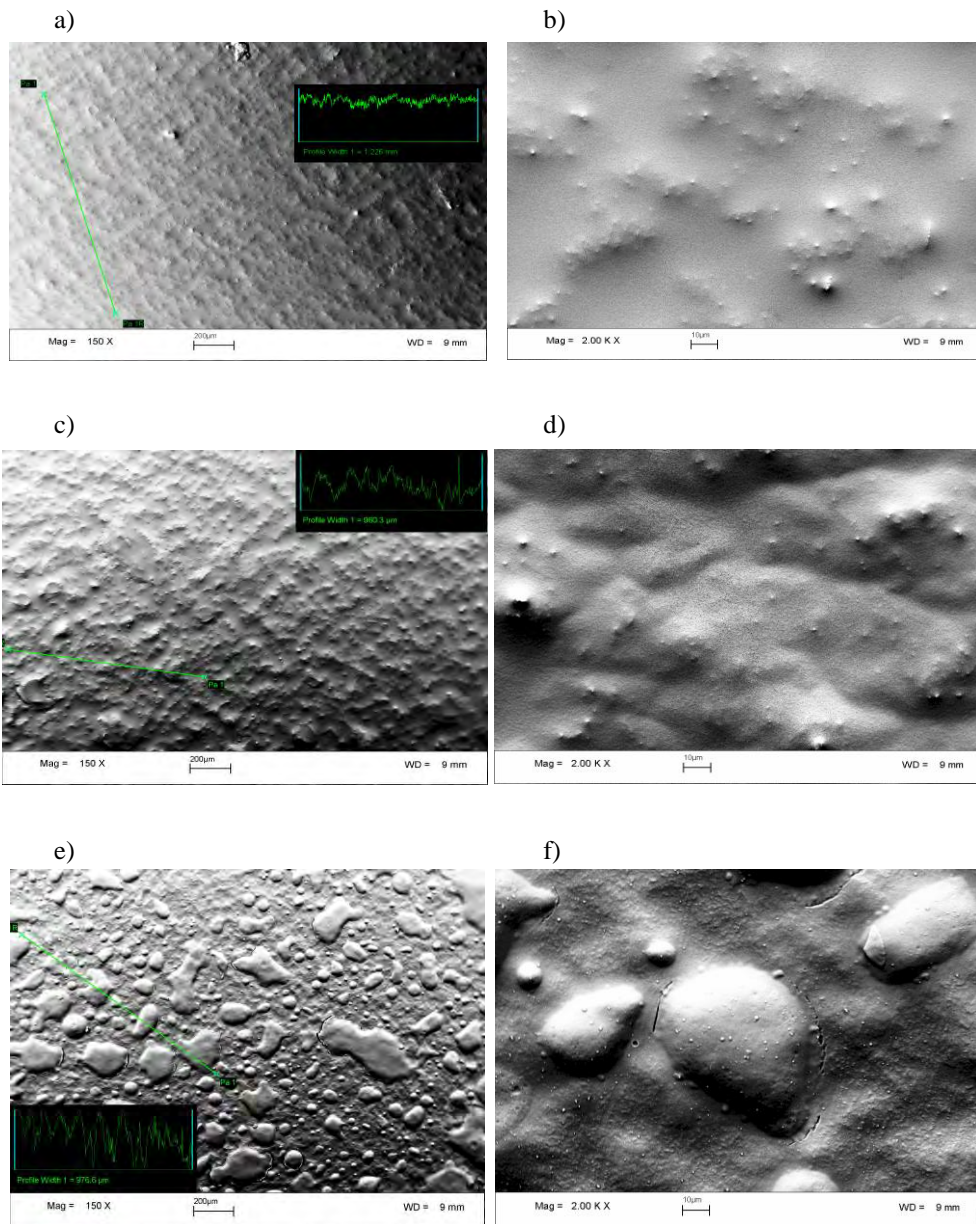
Najmniejsze wartości pracy $W(s)$ określane przy tarcu kinetycznym, uzyskano dla wycinków kanałów (rys. 82, rys. 84), na które naniesiono warstwę ślizgową wykonaną z emulsji SF5. W przypadku pozostałych emulsji zarejestrowane wyniki miały wartości większe, przy czym emulsja SF4 o mniejszej lepkości 6,97 mPa s, miała niekiedy wartości na poziomie zarejestrowanym przy wycinkach kanału bez warstwy ślizgowej BW o lepkości wynoszącej 58,02 mPa s.

Wyniki badań kanałów z warstwą ślizgową podczas współdziałania z kablem ujawniły, że zawartość aktywnego składnika ślizgowego (PDMS) oraz właściwości emulsji, w dużym stopniu wpływa na możliwość uzyskania najmniejszych wartości oporów ruch podczas wprowadzania kabla. Dobór składu emulsji na podstawie ograniczonej liczby czynników, na przykład opartej głównie na ilościowej zawartości środka aktywnego lub tylko wartości lepkości, może niekiedy prowadzić do przyjęcia błędnych założeń.

6.5.3. Badania struktury powierzchni warstwy ślizowej

Ocenę stanu powierzchni otrzymanych warstw ślizowych wykonano na podstawie badań struktury metodą skaningowej mikroskopii elektronowej SEM (ang. *Scanning Electron Microscopy*) z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego SEM typu LE0 1430 VP (Austria). Próbki pomiarowe dla poszczególnych emulsji z których wytwarzano warstwy ślizowe przygotowano przez naniesienie na badaną powierzchnię wymaganej, w tego rodzaju badaniach, warstwy srebra. Badania warstwy ślizowej w zależności od rodzaju emulsji, wykonano w układzie QBSD przy rejestracji elektronów wstecznie rozproszonych od powierzchni wycinka kanału. Wyniki obserwacji struktury powierzchni prowadzono przy różnych powiększeniach, pokazanych na rys. 85.

Analiza otrzymanych wyników badań struktury i stanu powierzchni wykazała, że warstwy wykonane z emulsji SF4 oraz emulsji SF5, mają duży stopień jednorodności. W tym przypadku świadczy to o dobrej adhezji warstwy do podłoża. W przypadku emulsji SF6, która charakteryzowała się największą zawartością aktywnego środka ślizowego oraz stosunkowo dużą lepkością, tworzona na powierzchni kanału warstwa (rys. 85 f) miała charakterystyczne skupiska „kropel” o dużych wymiarach. Otrzymana po zestaleniu warstwa ślizowa nierównomiernie pokrywała powierzchnię wewnętrzną kanału. W efekcie prowadziło to do lokalnych pęknięć warstwy w obszarach większych skupisk zestalonej emulsji, co może świadczyć o występowaniu obszarów, w których adhezja warstwy do podłoża jest mniejsza [148, 144, 145].



Rys. 85. Fotografie SEM powierzchni warstwy śluzowej wykonanej z poszczególnych emulsji : a, b)– SF4, c, d)– SAF5, e, f)– SF6; przy powiększeniu 150 razy oraz 2000 razy

6.6. Wnioski i ustalenia dotyczące badań kanałów z warstwą ślizgową

Badania kanałów z warstwą ślizgową wykazały, że z wykorzystaniem metody nanoszenia natryskowego jest możliwe wykonanie cienkiej warstwy dodatkowej o dobrych właściwościach ślizgowych. Zaproponowane rozwiązanie instalacji natryskowej zostało sprawdzone w warunkach technologicznych, a otrzymane wyniki zweryfikowane metodami naukowymi. Analiza uzyskanych wartości charakteryzujących warstwy ślizgowe ujawniła, że w zależności od rodzaju emulsji, jej składu oraz rodzaju aktywnego środka ślizgowego, można uzyskać różny jej wpływ na współdziałanie z kablem optotelekomunikacyjnym.

Ocenę ilościową dotyczącą utworzonej warstwy można dokonać na podstawie badań z wykorzystaniem nowego stanowiska, natomiast ocena jakościowa warstwy jest możliwa do przeprowadzenia na podstawie wyników badań struktury powierzchni kanału.

Badania te, umożliwiają wyznaczenia określonych wskaźników, opisujących przebieg zmian siły oporu F_S i F_K oraz pracy $W_{(S)}$ potrzebnej na pokonanie oporu w funkcji drogi przemieszczania się kabla. Uzyskane wyniki badań z punktu widzenia celu rozprawy powalają na weryfikację doświadczalną współdziałania kanału z warstwą ślizgową. Możliwa jest także ocena właściwości stanu i struktury powierzchni wytworu w postaci kanału z tworzywa polimerowego w wyniku poddania go modyfikacji technologicznej z wykorzystaniem emulsji, zawierającej aktywne środki ślizgowe.

Zastosowanie natryskowego nanoszenia emulsji w procesie wytłaczania kanału z tworzywa, pozwala na otrzymywanie warstw ślizgowych z takich tworzyw, które dotychczas nie były wykorzystywane do tego celu lub nie dawały zadowalających rezultatów [14, 23,56, 58]. Nieduża ilość emulsji wymagana w procesie oraz to, że w wyniku tego procesu można otrzymywać warstwy o bardzo małej grubości wynoszącej od 3 do 5 μm [47] pozwala prognozować, że jest możliwe otrzymanie warstw ślizgowych o żądanych właściwościach przy obniżonych kosztach wytwarzania, w porównaniu na przykład do metody współwytłaczania. Jednak te spostrzeżenia wymagają przeprowadzenia odrębnych badań porównawczych i weryfikacyjnych.

Rozdział 7

PODSUMOWANIE

7.1. Wprowadzenie

Wyniki badań teoretycznych, symulacyjnych oraz doświadczalnych przedstawione w ramach niniejszej rozprawy wskazują, że na wzajemne współdziałanie kanału z kablem optotelekomunikacyjnym mają wpływ równocześnie różne czynniki. Do czynników tych można zaliczyć wielkości określające elementy geometryczne takie jak: kształt i wymiary makrowzniesień – żeber ślizgowych (ich wysokość oraz kształt w przekroju poprzecznym). Inną grupę stanowią czynniki wpływające na długość łuku wierzchołka żebra ślizgowego przy jego teoretycznym zużyciu oraz czynniki fizyczne związane z naciskami powierzchniowymi lub stanem wyężenia materiału kanału lub kabla.

W przypadku oceny efektywności przebiegu procesu wzajemnego oddziaływania kanału z kablem najbardziej przydatne wydają się być czynniki wyznaczone doświadczalnie, takie jak wartość siły oporu lub wartość pracy potrzebnej na pokonanie oporów ruchu kabla względem kanału. Opracowane przez autora stanowiska badawcze umożliwiają prowadzenie pomiarów siły oporu przy tarcu statycznym i kinetycznym oraz pracy potrzebnej na pokonanie tej siły, odniesionej do drogi lub czasu tego współdziałania w warunkach ustalonych.

7.2. Wnioski i ustalenia końcowe

Na podstawie wszystkich dotychczasowych obserwacji, rozważań i analiz oraz wyników badań rozpoznawczych i badań zasadniczych można sformułować następujące wnioski i ustalenia:

1. Elementy struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej wytłoczyny w postaci kanału z tworzywa polimerowego można konstruować i efektywnie wytwarzać w linii technologicznej wytłaczania, aby powstająca podczas wzajemnego współdziałania z kablem siła oporu osiągała wartości najmniejsze, bez potrzeby stosowania dodatkowych środków smarujących.
2. Podstawowymi elementami struktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału z tworzywa polimerowego, mającego żebra ślizgowe, określającymi jego właściwości fizyczne są przede wszystkim liczba żeber ślizgowych oraz ich wysokość.
3. Ocena efektywności współdziałania kanału mającego żebra ślizgowe z kablem jest możliwa do przeprowadzenia z wykorzystaniem modeli matematycznych, opisujących najmniejszy i największy promień kabla, wielkość zakładanego teoretycznego zużycia, a także w wyniku obliczeń numerycznych określając wartości nacisków powierzchniowych oraz obszar i zakres naprężeń powstających w tym obszarze.
4. Opracowana metodyka badań z wykorzystaniem nowego stanowiska umożliwia wyznaczenie wielkości fizycznych, siły oporu tarcia statycznego oraz kinetycznego, za pomocą których można ocenić współdziałanie kanału z kablem w aspektach ilościowych i jakościowych przy określonych warunkach, zgodnie z założonym programem badawczym.

Szczegółowa analiza wyników badań doświadczalnych kanałów z żebrami ślizgowymi oraz kanałów z warstwą ślizgową pozwala na sformułowanie kolejnych wniosków o charakterze poznawczym, użytkowym i prognostycznym.

5. W przypadku kanałów z żebrami ślizgowymi, wykonanymi z polietylenu dużej gęstości (PE-HD), w których umieszcza się kable optotelekomunikacyjne, najbardziej korzystne współdziałanie w aspektach oddziaływań ślizgowych uzyskano, gdy liczba żeber ślizgowych zawierała się w zakresie od 36 do 45, a wysokość zebra wynosiła 1 mm.
6. Wykorzystując metodę natryskowego nanoszenia w linii technologicznej wytłaczania oraz stosując odpowiednią emulsję z aktywnym środkiem ślizgowym uzyskano na wewnętrznej powierzchni kanału warstwę ślizgową, która umożliwia zmniejszenie oporów ruchu przy współdziałaniu z kablem optotelekomunikacyjnym.
7. Najkorzystniejsze właściwości ślizgowe otrzymano stosując do wytworzenia warstwy ślizgowej emulsję SF5 o lepkości wynoszącej ok. 11-12 mPa·s, gęstości 998 kg/m³, która zawiera 35-proc. oleju polidimetylosioksanowego (PDMS) w wodnej dyspersji.
8. Otrzymanie kanału z tworzywa polimerowego o unikalnych właściwościach jest możliwe w wyniku połączenia w procesie wytłaczania w linii technologicznej, jednoczesnego kształtowania żeber ślizgowych wraz z natryskowym nanoszeniem określonej emulsji.

Porównanie wyników badań przedstawionych w niniejszej rozprawie z jej tezami i celami badawczymi stanowi podstawę do stwierdzenia, że zostały one osiągnięte oraz zweryfikowane metodami naukowymi.

Nowe stanowisko badawcze, przy zastosowaniu dodatkowych uchwytów mocujących próbkę, może być z powodzeniem stosowane do badań oddziaływań ślizgowych, przy określonym styku jednostronnym z innymi elementami konstrukcyjnymi takimi jak: folie, płyty, pręty, kształtowniki.

Zaprezentowane rozwiązanie instalacji do natryskowego nanoszenia, przy niewielkiej zmianie budowy dyszy natryskowej, można z dużym powodzeniem zastosować także do nanoszenia warstw ślizgowych na powierzchniach wytworów o kształtach złożonych lub do takich rozwiązań, od których wymaga się dobrych właściwości ślizgowych, przy stosunkowo małej grubości warstwy.

W przypadku natryskiwania, oprócz dyszy i instalacji doprowadzającej emulsję, nie jest wymagane stosowanie energochłonnych maszyn

przetwórczych oraz innych dodatkowych urządzeń. Dlatego też, można prognozować, że przy odpowiednim doborze składu emulsji zawierającej aktywne środki ślizgowe oraz zachowaniu odpowiednich warunków technologicznych natryskiwania metoda ta, będzie miała coraz większe znaczenie.

7.3. Zakończenie

Mając na uwadze skomplikowany charakter omawianych zagadnień, a co za tym idzie wiele nierozwiązanych problemów w przedstawionej rozprawie, praca niniejsza stanowi pewną zamkniętą całość. Można przyjąć, że jest ona skromnym, ale istotnym wkładem w lepsze poznanie zagadnień teoretycznych i doświadczalnych dotyczących procesów i zjawisk zachodzących podczas współdziałania kanału z tworzywa polimerowego z kablem optotelekomunikacyjnym.

Wyniki przedstawione w rozprawie mogą być przydatne w dalszych badaniach modelowych i symulacyjnych, a także przy budowie maszyn i urządzeń pomiarowych przeznaczonych do podobnego rodzaju zagadnień. Rozwój nowoczesnych konstrukcji kabli optotelekomunikacyjnych, ich miniaturyzacja, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych właściwości transmisyjnych powoduje, że istnieje ciągła potrzeba określania dokładanych wytycznych do ich projektowania (załącznik A). Zagadnienia te dotyczą zarówno metod wytwarzania, maszyn, narzędzi i urządzeń wchodzących w skład linii technologicznej wytłaczania, rodzaju tworzywa polimerowego zastosowanego na poszczególne warstwy, a także konstrukcji kanału oraz kabla.

Interdyscyplinarny obszar zagadnień, rezultaty badań oraz wynikające z nich wnioski i ustalenia dają możliwość ich wykorzystania w dalszych działaniach o podobnym charakterze. Uzyskane wyniki badań mogą wskazywać nowe obszary przyszłych badań, na przykład w zakresie problematyki współdziałania kanałów o kształtach złożonych z mikrokablem lub z włóknem światłowodowym. Tego rodzaju nowatorskie konstrukcje kanałów są podstawą najnowszej technologii szerokopasmowej transmisji sygnału teleinformatycznego w domowych liniach optotelekomunikacyjnych FTTH (*ang. Fibre To The Home*), które w naszym kraju nie są jeszcze dokładnie poznane.

Literatura

- [1] Acur E.,E., Vlachopoulos J.: An overview of polymer processing. *Polymer Engineering and Science* 1982, 22, s. 1084–1090.
- [2] Akter S., Hashmi M.,S.: Formation and remelting of solid polymer layer on the wire, in a polymer melt chamber. *Journal of Materials Processing Technology* 1998, 7. s. 68–69.
- [3] Andrzejewski M., Szelaǳ B.: Metody ukladania kabli telekomunikacyjnych w obiektach podziemnej infrastruktury miejskiej. Wydawnictwo Inzynieria, Kraków 2011, s. 45–115.
- [4] Arriaga A., i inni.: Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with Ansys. *Polymer Testing* 2007, 26, s. 284–305.
- [5] Bailey D.,M, Sayles R.,S.: Effect of roughness and sliding friction on contact stress. *Journal of Tribology* 1991, 6, s. 729–738.
- [6] Banasiak A., Sterzyński T., Wasicki A.: Modyfikacja polietylenu napelniazaczami proszkowymi. *Chemik* 2004, 8, s. 280–282.
- [7] Beck E.: High speed screw extruders. *British Plastics* 1957, 10.
- [8] Bignella M., Choib Y.,M.: Thermal effects in small sonic nozzles. *Flow Measurement and Instrumentation* 2002, 2, s. 17–22.
- [9] Bociąga E.: Metodyka badań tribologicznych materialów polimerowych. *Przetwórstwo Tworzyw* 1998, 5, s. 135–140.
- [10] Bociąga E., Baranowski W.: Selected technical problems with polymer application on slide ways. *Technical Sciences* 2005, 8, s. 233–237.
- [11] Bociąga E., Baranowski W., Markowski G.: Zastosowanie tworzyw polimerowych w budowie obrabiarek ciężkich. *Tworzywa Sztuczne i Chemia* 2006, 2, s. 8–9.
- [12] Bortel K.: Rury z tworzyw termoplastycznych. *Plastics Review* 2002, 4, s. 46–49.
- [13] Ceglińska J., Michalski K.: Wytłaczanie rur z poliolefin. *Mechanik* 1982, 4, s. 10–13.
- [14] Chojnowski J.: Precyzyjna synteza blokowych kopolimerów siloksanowo-siloksanowych zawierających segmenty hydrofilowe i hydrofobowe. *Polimery* 2001, 7-8, s. 461–467.
- [15] Chomycz B.: Fiber optics installation. MC Graw-Hill Companies 1996.

- [16] Cowen E. Consideration for drop cable selection. *Fiber Optic Technology* 2005, 9, s. 8–12.
- [17] Crisfield K., A.: *Non-linear finite element analysis of solid and structure*. John Wiley and Sons, Chichester, vol. I, 1991.
- [18] Czupryńska J., Danilczuk M., Michalik J., Żenkiewicz M.: Nowe kierunki modyfikowania materiałów polimerowych za pomocą promieniowania elektronowego. *Przetwórstwo Tworzyw* 2004, 5, s. 128–131.
- [19] Decker H.: *Die Spritzmaschine-Theorie and Ausführung*. Troester, Hannover-Wulfer 1941.
- [20] Douglas E. Smith, D.,A. Tortorelliab, Charles L., T.: Optimal design for polymer extrusion. Part I: Sensitivity analysis for nonlinear steady-state systems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1998, 3-4, s. 303–323.
- [21] Ebendorff H.: Fluoride glass microstructured optical fibre with large mode area. *Optic Letters* 2008, 23, s. 2861–2863.
- [22] Erhard G.: Sliding friction behavior of polymer-polymer material combinations *Wear* 1983, 5, s. 167–172.
- [23] Fischer P.: Dies for multi-layer pipe extrusion. *Kunststoffe-Plastic Europe* 2001, 8, s. 90–93.
- [24] Fisher E.G.: *Extrusion of plastics*. The Plastics Institute, Iliffe, London 1958.
- [25] Ford IJ.: Roughness effect on friction for multi-asperity contact between surfaces. *Journal of Applied Physics* 1993, 12, s. 2219–2225.
- [26] Frącz W., Krywult B.: *Projektowanie i wytwarzanie elementów z tworzyw sztucznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
- [27] Gray M.: Patent angielski: nr 5056 (1879).
- [28] Griff A.,J.: *Plastics Extrusion Technology*, Van Nostrand Reinhold, New York 1968.
- [29] Griffioen W.: The installation of conventional fibre optic cables in conduits using the viscous flow of air. *Lightwave Technology* 1989, 7, s. 297–302.
- [30] Gross H.: Flexible Werkzeugwände. *Kunststoffe* 2003, 8, s. 28–33.
- [31] Gupta M., Zacarias F., Schrader S.: Balancing of profile dies using three-dimensional flow simulation. Annual Meeting. The Polymer Processing Society, Yamagata, Japan 2006.

- [32] Hancock T.: The origin and progress of caoutchouc or India Rubber Manufacture in England. Longman London 1857.
- [33] Harte L., Eckard D.: Fiber optic basics. Technology, systems and installation. Althos Publishing, La Vergne 2006.
- [34] Hebda M., Wachal A.: Trybologia. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1980.
- [35] Holejko K.: Podstawy telekomunikacji światłowodowej. XVI Krajowa Szkoła Optoelektroniki, Zakopane 2001.
- [36] Janson L., E.: Plastics pipes for water supply and sewerage gisposal, Stockholm 2003, (tłumaczenie) Polskie Stowarzyszenie Producentów Rur i Kształtek z Tworzyw Sztucznych, Toruń 2010.
- [37] Jintang G.: Tribochemical effects in formation of polymer transfer film. *Wear* 2000, 245, s. 100–106.
- [38] Johnson K.,L, Greenwood J., A.: An Adhesion Map for the Contact of Elastic Spheres. *Journal of Colloid and Interface Science* 1997, 192, s. 326–333.
- [39] Kaczmarek H., Czajka R., Nowicki M., Ołdak D.: Badania polimerów z wykorzystaniem metody mikroskopii sił atomowych (AFM). Cz. I Podstawy AFM i jej zastosowanie w badaniach morfologii polimerów. *Polimery* 2002, 11-12, s. 775-783.
- [40] Karpenko Y., A., Akay A.: Numerical model of friction between rough surfaces. *Tribology International* 2001, 34, s. 531–545.
- [41] Klepka T.: Oddziaływanie rury osłonowej na kabel optotelekomunikacyjny w procesie jego instalowania, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1998.
- [42] Klepka T.: Wskaźniki charakteryzujące wzajemne oddziaływanie rury osłonowej i kabla optotelekomunikacyjnego. *Polimery* 2001, 2, s. 192–201.
- [43] Klepka T.: Parameters characterizing the interaction between inner protective duct and optotelecommunication cable. *International Polymer Science and Technology* 2001, 9, s. 61–69.
- [44] Klepka T.: Problemy metrologiczne wzajemne oddziaływanie rury osłonowej i kabla optotelekomunikacyjnego. *Przegląd Telekomunikacyjny-Wiadomości Telekomunikacyjne* 2001, 12, s. 813–816.
- [45] Klepka T.: Investigation method of sliding slip layers made on the inner surface of cylindrical extrusion product”. *The Polymer Processing Society, Ateny, Greece* 2003.
- [46] Klepka T.: Rozwiązania konstrukcyjne wytłaczanych wytworów osiowo-symetrycznych”. PAN O/ Lublin. *Teka KBiEM, vol. I, Lublin* 2003, s. 48–53.

- [47] Klepka T.: Charakterystyka stanu powierzchni specjalnych warst ślizgowych utworzonych w procesie wytłaczania. *Polimery* 2004, 2, s. 123–127.
- [48] Klepka T.: Rury o właściwościach specjalnych. Sieci i instalacje z tworzyw, Politechnika Śląska, Gliwice 2005. s. 18–23.
- [49] Klepka T.: Method of coating thin silicone layers on the extrudate's surface. *Polymer Processing Society, Quebec City, Canada* 2005, s. 242–243.
- [50] Klepka T.: New device for mechanical contact research of polymer constructional elements. 7th International Conference, *Advances in Plastic Technology, Katowice* 2007. s. 48–53.
- [51] Klepka T.: Konstrukcje osiowo-symetrycznych wytworów o kształtach złożonych. *Polimery* 2008, 5, s. 390–394.
- [52] Klepka T., Dębski H., Rydarowski H.: Characteristic of high-density polyethylene and its properties simulation with use of element method. *Polimery* 2009, 9, s. 668–672.
- [53] Klepka T., Ferdynus M.: Modelownie elementów głowicy wytłaczarskiej z wykorzystaniem oprogramowania CAD/CAM., PAN O/ Lublin. *Teka KBiEM, vol. II, 2008, s. 75–78.*
- [54] Kozakiewicz J., Zielecka M., Koncka-Foland A., Bujnowska E., Szulc A.: Polimerowe dyspersje hybrydowe zawierające silikony, przeznaczone do zastosowania jako materiały na powłoki. *Polimery* 2006, 2, s. 124–132.
- [55] Kragelski I., V.: *Friction and wear.* Pergamon Press, Elmsford 1982.
- [56] Krzemiński J.: *Technologia tworzyw sztucznych-przetwórstwo.* Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985.
- [57] Kudła S.: Sieciowanie poliolefin metodą silanową. *Polimery* 2002, 11-12, s. 762–768.
- [58] Kuliczkowski A., Kubicka U.: Tendencje materiałowe konstrukcyjne w rozwoju rur tworzywowych, *Inżynieria Bezwykopowa* 2003, 3, s. 48-51.
- [59] Kwacz M., Zadrosz J.: Przykłady zastosowań rur z tworzyw sztucznych w sieciach podziemnych, cz. 1. Wszelkie możliwości systemów z tworzyw sztucznych, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 2008, 3, s. 36–38.
- [60] Lafaye S., Gauthier C., Schirrer R.: Analysis of the apparent friction of Polymeric surfaces. *Journal of Materials Science* 2006, 19, s. 6441–6452.
- [61] Lavielle L.: Polymer–polymer friction, relation to adhesion, *Wear* 1991, 1, s. 63–75.

- [62] Leus M., Gutowski P.: Czynniki determinujące obniżenie siły tarcia w ruchu ślizgowym w obecności drgań kontaktowych stycznych wzdluznych. *Modelowanie Inzynierskie* 2008, 4, s.73–78.
- [63] Levy S., Carley J.,F.: *Plastics extrusion technology handbook*, Industrial Press, New York 1989.
- [64] Li M., A.: Optical distribution frame. *Fiber Optic Technology* 2005, 10, s. 5–9.
- [65] Łaczyński B.: *Metody przetwórstwa tworzyw sztucznych*. Wydawnictwo Nukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [66] Łomnicki A.: *Wprowadzenie do statystyki*, Wydawnictwo Naukowe Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2003.
- [67] Marciniak M.: *Łączność światłowodów*, WKŁ, Warszawa 1998.
- [68] Mavridis H., Shroff R.,N.: Multilayer Extrusion Experiments and Computer Simulation. *Polymer Engineering and Science* 1994, 7, s. 559–563.
- [69] McKelvey J.,M.: *Polymer processing*. Wiley & Sons, New York 1962.
- [70] Michaeli W., Walter M.: *Extrusion dies for plastics and rubber-design engineering computation*. Hanser Publisher, New York Vienna, 2004.
- [71] Michaeli W.: *Extrusion-Werkzeuge fur Kunststoffe und Kautschuk*. Carl Hansen Verlag, Munich 1979.
- [72] Michaeli W.: *Calibration of pipes and profiles*. In *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, Hanser Publisher 1992.
- [73] Midwinter J.,E., Guo Y.,L.: *Optoelektronika i technika światłowodowa*. WKŁ, Warszawa 1995.
- [74] Montgomery D.,C.: *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, New York 2009.
- [75] Myers R.,H., Montgomery, D.,C., Vining, G.: *Generalized linear models with applications in engineering and the sciences*, John Wiley & Sons, New York 2002.
- [76] Myshkin N., K., Petrokovets M.,I., Kovalev A.,V.: Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International* 2005, 38 s. 910–921.
- [77] Myshkin N.,K., Petrokovets N.,I., Chizhik S.,A.: Simulation of real contact in tribology. *Tribology International* 1998, 4, s. 79–86.
- [78] Niewiarowski Z.: Kalibrowanie i chłodzenie rur wytłaczanych z tworzyw sztucznych. *Mechanik* 1982, 3, s. 47–51.

- [79] Ocoś K.,E., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [80] Ohsaki S., Ogawa T., Tateishi R.: Shape optimization of curves and surfaces considering fairness metrics and elastic stiffness. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 2004, 4, s. 250–258.
- [81] Osiński J.: Obliczenia wytrzymałości elementów maszyn z zastosowaniem metody elementów skończonych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- [82] Oswald T., A.: *International plastics handbook: The resource for plastics engineers*. Carl Hansen Verlag, Munich 2006, s. 513–523.
- [83] Palais J.,C.: *Fiber optic communications*, Prentice Hall, Pearson Education, Inc., New Jersey 2005.
- [84] Perlicki K.: *Pomiary w optycznych systemach telekomunikacyjnych*, WKŁ, Warszawa 2002.
- [85] Polak M.,A., Lasheen A.: Mechanical modeling for pipes in horizontal direction drilling. *Tunneling and Underground Space Technology* 2002, 1, s. 231–239.
- [86] Polański J., Żenkiewicz M.: Podstawy mikroskopii sił atomowych w badaniach polimerów. *Polimery* 1999, 7-8, s. 520–533.
- [87] Poerry S.: Scanning probe microscopy measurements of friction. *Material Research Bulletin* 2004, 7, s. 478–83.
- [88] Pousada A.,S., Ferreira E.,C., Pontes A.,J.: Friction properties of molding thermoplastics. *Polymer Testing* 2006, 4, s. 1017–1023.
- [89] Progelhof, R.,C., J.,L. Throne: *Polymer engineering principles. Properties, processes, and tests for design*, Hanser Publishers, New York 1993.
- [90] Rakowski G.: *Metoda elementów skończonych - wybrane problemy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
- [91] Rauwendall C.: *Polimer extrusion*. Carl Hansen Verlag, Munich 2001.
- [92] Rawa H.: *Elektryczność i magnetyzm w technice*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [93] Rezulski M.: *Systemy optotelekomunikacyjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2007.
- [94] Rościszewski P., Zielecka M.: *Silikony właściwości i zastosowanie*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 2002.
- [95] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.: *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.

- [96] Rymuza Z.: Trybologia polimerów ślizgowych. WNT, Warszawa 1986.
- [97] Rymuza Z.: Tribology of miniature systems. Tribology Series, vol.13. Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1989.
- [98] Rymuza Z.: Control tribological and mechanical properties of MEMS surfaces. *Microsystem Technologies* 1999, 5, s. 173–180.
- [99] Saechtling H.: Tworzywa sztuczne. Poradnik. WNT, Warszawa 2000.
- [100] Satyanarayana S., Melkote S., N.: Finite element modeling of fixture–workpiece contacts: single contact modeling and experimental verification. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2004, 9, s. 903–913.
- [101] Sayles R.,S.: Basic principles of rough surface contact analysis using numerical methods, *Tribology International* 1996, 3, s. 639–650.
- [102] Shi Z.H., Utracki L.,A.: Development of polymer blend morphology during compounding in a twin-screw extruder. Part II: Theoretical derivations. *Polymer Engineering & Science* 1992, 24. s. 1824–1833.
- [103] Šikalo Š., Delalič N., Ganič E.,N.: Hydrodynamics and heat transfer investigation of air-water dispersed flow. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2002, 25, s. 511–521.
- [104] Sikora J.,W.: Increasing the efficiency of the extrusion process. *Polymer Engineering and Science* 2008, 9, s. 678–682
- [105] Sikora J.,W.: Budowa głowic wylączarskich do kształtowników niekołowych. *Przetwórstwo Tworzyw* 2009, 3, s. 84–88.
- [106] Sikora J.,W.: Budowa głowic wytaczarskich do wytworów wielotworzywowych. *Przetwórstwo Tworzyw* 2010, 2, s. 52–56.
- [107] Sikora J.,W., Kapuśniak T.: Efektywność procesu wytłaczania a charakterystyka dyszy stożkowo - walcowej. *Polimery* 2005, 10, s. 748–753.
- [108] Sikora R.: Wytłaczanie–wytłaczarki. Zarys historyczny, stan aktualny, perspektywy. *Polimery* 1982, 5, s. 313–317.
- [109] Sikora R.: Techniki wytwarzania-Przetwórstwo tworzyw sztucznych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1982.
- [110] Sikora R.: Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- [111] Sikora R.: Warstwa wierzchnia tworzyw wielkocząsteczkowych. *Polimery i kompozyty konstrukcyjne*. Gliwice. Politechnika Śląska 1996.

- [112] Sikora R.: Przetwórstwo tworzyw polimerowych: podstawy logiczne, formalne i terminologiczne. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
- [113] Sikora R., Klepka T.: Przegląd konstrukcji rur optotelekomunikacyjnych z tworzyw. Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1996.
- [114] Sikora R., Klepka T.: Review of the construction of plastic pipes. New Trends in Mechanical Engineering on The Threshold of The Third Millenium. Technical University of Košice, Slovakia 1997, s. 90–95.
- [115] Sikora R., Klepka T.: Wzajemne oddziaływania rury osłonowej i kabla optotelekomunikacyjnego-metoda i stanowisko badawcze. Świat Telekomunikacji 1999, 12. s. 33–36.
- [116] Sikora R., Klepka T., Kowalska B.: Production of the slip layers in plastic pipes. 18th Polymer Processing Society, Guimaraes, Portugal 2002.
- [117] Silbernagl D., Sturm H., Cappella B.: Influence of film substrate adhesion on the mechanical properties of thin polymer films, Langmuir 2005, 25, s. 5091–5509.
- [118] Smith E., D., Wang Q.: Incorporating adjustable features in the optimal design of polymer sheet extrusion dies. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2006, 1, s. 450–467.
- [119] Smith A.,L.: Analysis of silicones. John Wiley & Sons 1974.
- [120] Smith D.,E. Design sensitivity analysis and optimization for polymer sheet extrusion and mold filling processes. International Journal of Numerical Methods Engineering 2003, 57, s.1381–1411.
- [121] Sobczyk M.: Statystyka. PWN, Warszawa 2008.
- [122] Stanisz A.: Kurs statystyki-modele liniowe i nieliniowe. Tom 2. StatSoft Polska, Kraków 2007. s. 307–367.
- [123] Steller R.: Przepływ uogólnionych cieczy newtonowskich w kanale ślimaka układu uplastyczniającego wytłaczarki. Polimery 2009, 4, s. 288–295.
- [124] Sterling D.,J.: Technical guide to fibre optic. Dermar Cengage Learning, Newy York 2004.
- [125] Stepczyńska M., Żenkiewicz M.: Praktyczne aspekty modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych metodą wyładowań koronowych, Przetwórstwo Tworzyw 2009, 3, s. 7–11.

- [126] Stevens M.,J: Extruder principals and operation. Elsevier Applied Science Publishers, New York 1985.
- [127] Szabelski K., Malicki A., Banaszak J.: Badania własności mechanicznych światłowodów. Politechnika Lubelska, Lublin 1993.
- [128] Szczerski R.: Lokalizacja uszkodzeń kabli i wybrane badania eksploatacyjne linii kablowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [129] Szlezyngier W.: Tworzywa sztuczne. Tom. 1. Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 1998.
- [130] Tadmor Z., Klein I.: Engineering principles of plasticizing extrusion. Van Nostrand Reinhold, New York 1970.
- [131] Tanaka K.: Kinetic friction and dynamic elastic contact behavior of polymers. *Wear*, 100, 1984, s. 243–62.
- [132] Toutenburg H.: Experimental Design and Model Choice: The Planning and Analysis of Experiments with Continuous or Categorical Response. Physica Verlag, Heidelberg 1995.
- [133] Urban M.,W.: Surface and interface vibrational spectroscopy: relevance to adhesion. *J. Adhesion Science & Technology* 1993, 7, s. 18–47.
- [134] Vlachopoulos J., Wagner J.,R.: The SPE guide on extrusion technology and troubleshooting, Society of Plastics Engineers, Brookfield 2001.
- [135] Wachowicz Z., Bortel K., Bywalec N.: Badania rur z tworzyw sztucznych. *Polimery* 1997, 9, s. 312–330.
- [136] White J.,L.: Twin screw extrusion: Technology and Principles, Hanser Publishers, New York 1991.
- [137] White J.,L., Potente H.: Screw extrusion. Carl Hansen Verlag, Munich 2003.
- [138] Wilczyński K.: Teoria wytłaczania jednoślismakowego tworzyw wielkocząsteczkowych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
- [139] Wróbel K., Łuczaj J.: Wytłaczanie tworzyw sztucznych. PWT, Warszawa 1961.
- [140] Zapałowicz Z.: Critical contact Weber number for toluene droplets dropping onto the heated wall surface. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2002, 7, s. 523–528.
- [141] Zawistowski H (praca zbiorowa): Wytłaczanie tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych - Plastech, Warszawa 1999.

- [142] Zhang S.,Li, Li J.,C.: Slip process of stick-slip motion in the scratching of a polymer. *Materials Science and Engineering* 2003, 1, s. 456–462.
- [143] Zohrabi M, Fairfield A.,U., Sibbald A.: Long-term flexible cable duct performance under load. *Construction and Building Materials* 1998, 1, s. 75– 81.
- [144] Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2000.
- [145] Żenkiewicz M.: Wyładowania koronowe w powietrzu jako metoda modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów polimerowych, *Polimery* 2008, 1, s. 3–13.
- [146] Żenkiewicz M., Richert J.: Charakterystyka wybranych nanonapełniaczy polimerowych. *Przetwórstwo Tworzyw* 2009, 6, s. 240–247.
- [147] Żenkiewicz M.: Współczesne technologie fizycznej modyfikacji warstwy wierzchniej materiałów polimerowych: Materiały Polimerowe, Wydawnictwo Uczelniane ZUT w Szczecinie, Szczecin 2010.
- [148] Żenkiewicz M., Lutomirski S., Gołębiowski J.: Urządzenia do aktywowania rur tworzywowych. VI Sympozjum Naukowo-Techniczne. Politechnika Białostocka 1999.

Opisy patentowe oraz zgłoszenia patentowe

- [149] Patent amerykański nr 5 235 136: One-piece reclosable and wire duct (1993).
- [150] Patent amerykański nr 5 285 008: Spoilable tubular member with integrated conductors (1994).
- [151] Patent amerykański nr 5 383 998: Apparatus for modifying corrugated or ribbed pipe to have a smooth outer wall (1995).
- [152] Patent amerykański nr 5 482 637: Anti-friction coating composition containing solid lubricants (1996).
- [153] Patent amerykański nr 5 501 873: Impact spray cladding of innerduct liner (1996).
- [154] Patent amerykański nr 5 510 071: Method and apparatus for production of tubing (1996).

- [155] Patent amerykański nr 5 511 964: Apparatus for the production of plastic pipes (1996).
- [156] Patent amerykański nr 5 516 482: Traveling mold tunnel apparatus for smooth walled duct (1996).
- [157] Patent amerykański nr 5 518 036: Multi-layer plastic pipe and method and apparatus for extrusion thereof (1996).
- [158] Patent amerykański nr 5 586 363: methods of manufacture tube (1996).
- [159] Patent amerykański nr 5 756 430: Mist oil lubricant (1998).
- [160] Patent amerykański nr 5 767 145: Ribbed plastic pipe construction (1998).
- [161] Patent amerykański nr 5 789 708: Underground tubular ducts for telecommunications networks (1998).
- [162] Patent amerykański nr 5 902 958: Arrangement in a cable (1999).
- [163] Patent amerykański nr 5 919 307: Apparatus for coating on inside of pipe or tube (1999).
- [164] Patent amerykański nr 5 996 639: Multiple compartment corrugated hose (1999).
- [165] Patent amerykański nr 6 084 180: Multi channel duct for power and telecom conductors (2000).
- [166] Patent amerykański nr 6 101 304: Air blown fiber tube cable with central innerduct (2000).
- [167] Patent amerykański nr 6 155 813: Pipe molding apparatus with air assist of plastic onto cooling plug (2000).
- [168] Patent amerykański nr 6 210 617: Apparatus and method for adjusting a mandrel and kernel while producing a plastic pipe (2001).
- [169] Patent amerykański nr 6 221 993: Continuous process for producing a silicone polymer (2001).
- [170] Patent amerykański nr 6 313 076: Use of polymers as antimisting additives in water-based cooling lubricants (2001).
- [171] Patent amerykański nr 6 365 013: Coating method and device (2002).
- [172] Patent amerykański nr 6 390 139: Conduit pipe for telecommunication cable (2002).

- [173] Patent amerykański nr 6 476 326: Structural cables for civil engineering works, sheath section for such a cable and method for laying same (2002).
- [174] Patent amerykański nr 6 477 304: Reinforced structure for a cable or duct with high compression resistance (2002).
- [175] Patent amerykański nr 6 485 533: Multistructure of innerduct (2002).
- [176] Patent amerykański nr 6 525 130: Polimerization of silicone in a surficant medium (2003).
- [177] Patent amerykański nr 6 879 760: Instalation bundle with spacer (2005).
- [178] Patent amerykański nr 6 981 400:Slip meter for determination of surface slip resistance (2005).
- [179] Patent amerykański nr 7 046 898: Conduit insert for optical fibre cable(2006).
- [180] Patent amerykański nr 7 140 859: Apparatus for making a multi-walled tabular structure (2006).
- [181] Patent amerykański nr 7 600 411: Surface friction testing apparatus (2009).
- [182] Patent amerykański nr 7 788 965: Portable friction testing device (2010).
- [183] Patent austriacki nr 3 99 548: Mehrfachrohr (1994).
- [184] Patent europejski nr 05 57 760: Kabelkanal (1993).
- [185] Patent europejski nr 06 96 097: Kabelkanal profil (1996).
- [186] Patent europejski nr 08 34 386: Vorrichtung zur Herstellung von Kunststoff-Verbund Rohren (1998).
- [187] Patent europejski nr 08 59 440: Kunststoffrohr mit einem Längsschlitz (1998).
- [188] Patent europejski nr 08 79 125 : Composite friction units and pultrusion method of making (1998).
- [189] Patent europejski nr 10 53 856: Vorrichtung zur Herstellung von Kunststoff - Wellfohren (2000).
- [190] Patent europejski nr 16 68 269: Friction material facing and method for providing such friction material facing (2009).

- [191] Patent niemiecki nr 40 31 783: Kabelführungseinrichtung mit zumindest einem Kabelführungsrohr aus thermoplastischen Kunststoff (1990).
- [192] Patent niemiecki nr 43 21 247: Kabelführungsrohrbündel aus einer Mehrzahl von KunststoffRöhren (1993).
- [193] Patent niemiecki nr 43 12 332: Vorrichtung für den Einsatz in einen Rohr, ins besondere Kabelschutzrohr (1993).
- [194] Patent polski nr 174 991: Kanał instalacyjny (1994).
- [195] Patent polski nr 185 340: Kanał prowadzący (1996).
- [196] Patent polski nr 190 009: Rura z tworzywa polimerowego (2005).
- [197] Patent polski nr 191 870: Sposób badania tribologicznego konstrukcyjnych elementów polimerowych (2006).
- [198] Patent polski nr 195 292: Wyłączarka ślimakowa (2007).
- [199] Patent polski nr 198 290: Sposób otrzymywania modyfikowanych (poli)siloksanów (2004).
- [200] Patent polski nr 201 076: Wodna dyspersja polimerowa oraz sposób pokrywania podłoży (2005).
- [201] Patent polski nr 204 175: Sposób wytwarzania polimerowej dyspersji typu woda w wodzie, polimerowa dyspersja wytworzona tym sposobem oraz zastosowania polimerowej dyspersji (2004).
- [202] Zgłoszenie europejskie EP 2146196 A2: Method and device for control of elements in particular polymers while sliding influences (2009).
- [203] Zgłoszenie patentowe P-301 678: Rura magnetyczna (1995).
- [204] Zgłoszenie patentowe P-391 759: Urządzenie do wytwarzania rury instalacyjnej (2010).
- [205] Zgłoszenie patentowe P-385 674: Sposób i urządzenie do badania elementów, zwłaszcza polimerowych przy oddziaływaniach ślizgowych (2008).

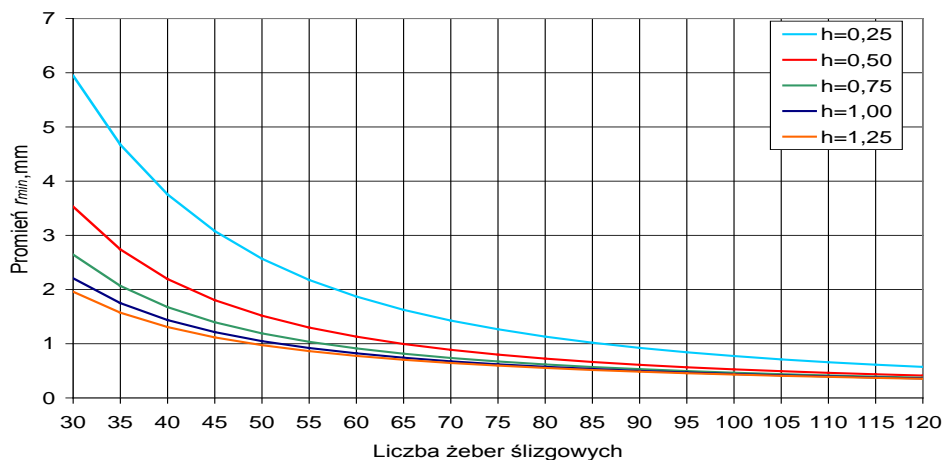
Normy i standardy

- [206] 08A-019/B: Analytical Report.Tribometr TRB. Measure of friction factors. CSM Instruments Laboratory, Peseux-Switzerland (2008).
- [207] 87/08/SM1: Sprawozdanie z badań. Badania właściwości materiału rur z polietylenu dużej gęstości. Centralne Laboratorium Badań Rur z Tworzyw Sztucznych, GIG Katowice (2008).
- [208] ASTM F2176: Standard Specification for Mechanical Couplings Used on Polyethylene Conduit, Duct and Innerduct (2009).
- [209] EIA/TIA 568A: Building Telecommunications Wiring Standards (1995).
- [210] EIA/TIA/ANSI 607-Commercial Building Grounding and Bonding Requirements for Telecommunications (1995).
- [211] LN-461D: Specification for sub-duct mono bore, British Telecommunication UK (1995).
- [212] PN-EN 50086-2-4: Systemy rur instalacyjnych do prowadzenia przewodów. Wymagania szczegółowe dla systemów rur instalacyjnych układanych w ziemi (2001).
- [213] PN-EN 50173-1: Technika informatyczna. Systemy okablowania strukturalnego: Wymagania ogólne (2004).
- [214] PN-EN 60811-4: Wspólne metody badania materiałów stosowanych na izolację i powłoki przewodów i kabli elektrycznych oraz światłowodowych. Część 4: Metody badania polietylenu i polipropylenu (2004).
- [215] PN-EN 61386-1: Systemy rur instalacyjnych do prowadzenia przewodów. Wymagania ogólne (2009).
- [216] PN-EN ISO 8295: Tworzywa sztuczne. Folie i płyty. Oznaczanie współczynnika tarcia (2005).
- [217] TDC-061-0509-S: Zasady budowy sieci optotelekomunikacyjnych. Netia Telekom (1998).
- [218] TR-NWT-000356: Generic requirements of optical cable innerduct, Bellcore, USA (1995).
- [219] ZN/02/TD S.A./09: Budowa sieci optotelekomunikacyjnych. Telefonía Dialog, Wrocław (2002).
- [220] ZN/96/TPSA-17: Rury kanalizacji wtórnej i rurociągu kablowego. Telekomunikacja Polska (1996).

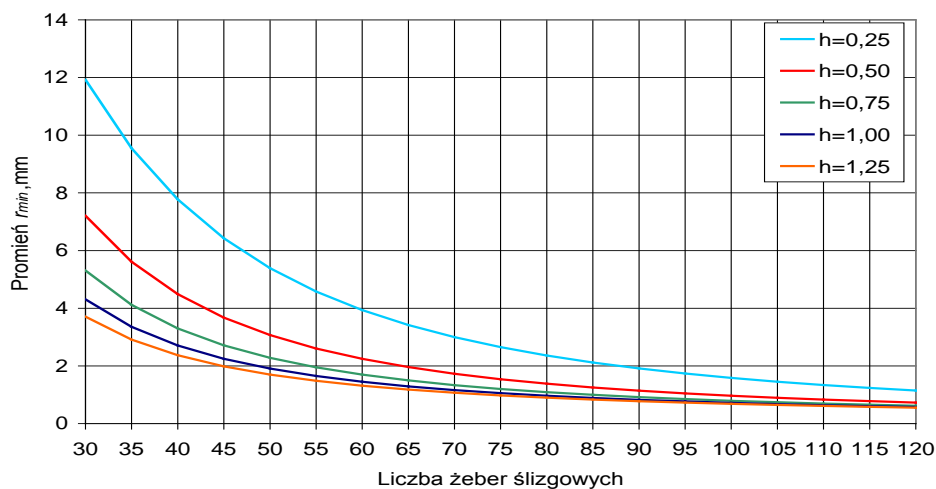
ZAŁĄCZNIKI

ZAŁĄCZNIK A

I. Diagramy doboru wartości promienia kabla r_{min} w zależności od liczby żeber ślizgowych kanału. Dokładny opis oraz założenia przyjęte do wykonania wykresów z wykorzystaniem modelowania matematycznego opisano w podrozdziale 2.2.1 – zależność (2.5).

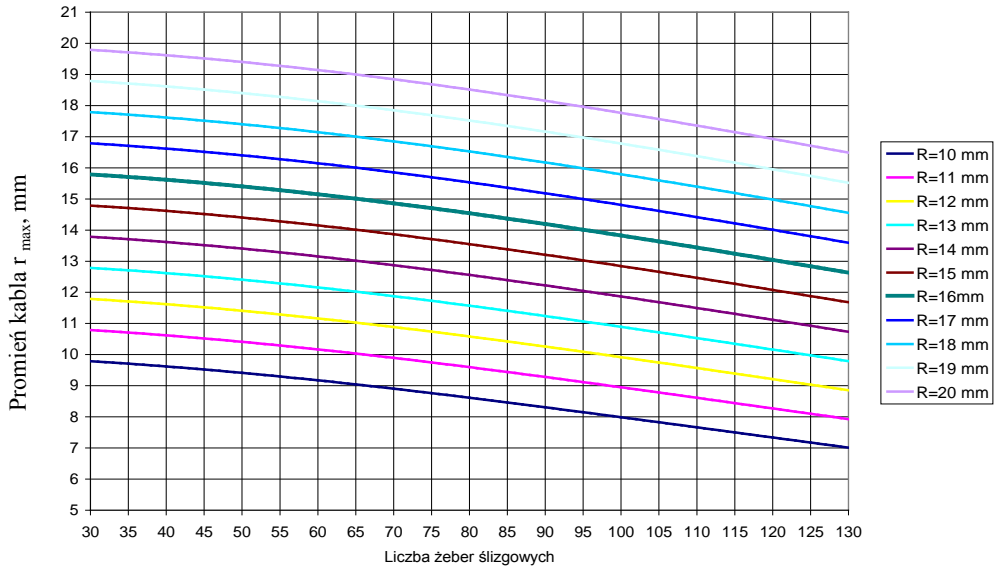


Rys. A-1. Zależności promienia kabla r_{min} od liczby żeber ślizgowych, przy określonej wartości wewnętrznego promienia kanału $R= 13,05$ mm oraz wysokości żeber $h = 0,25 \div 1,25$ mm

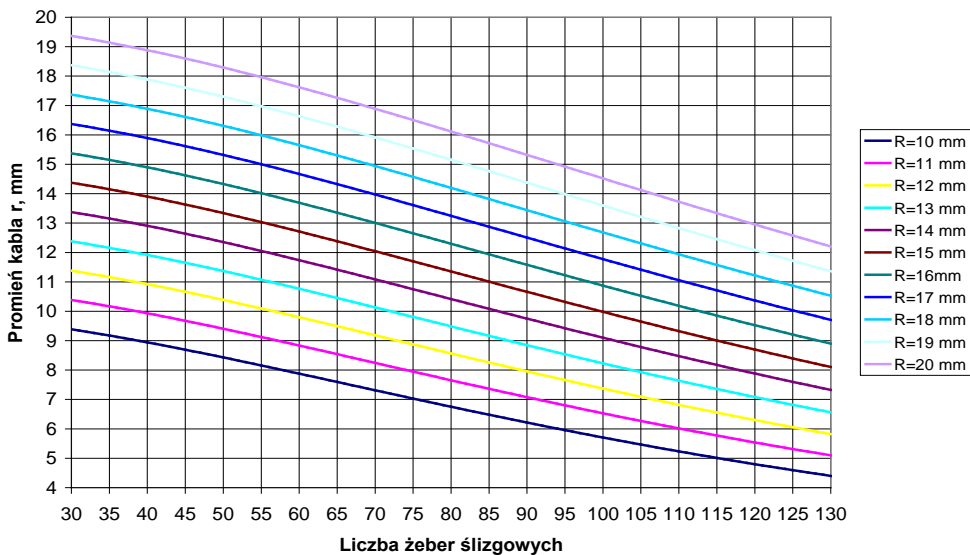


Rys. A-2. Zależności promienia kabla r_{min} od liczby żeber ślizgowych, przy określonej wartości wewnętrznego promienia kanału $R= 13,05$ mm oraz wysokości żeber $h = 0,25 \div 1,25$ mm

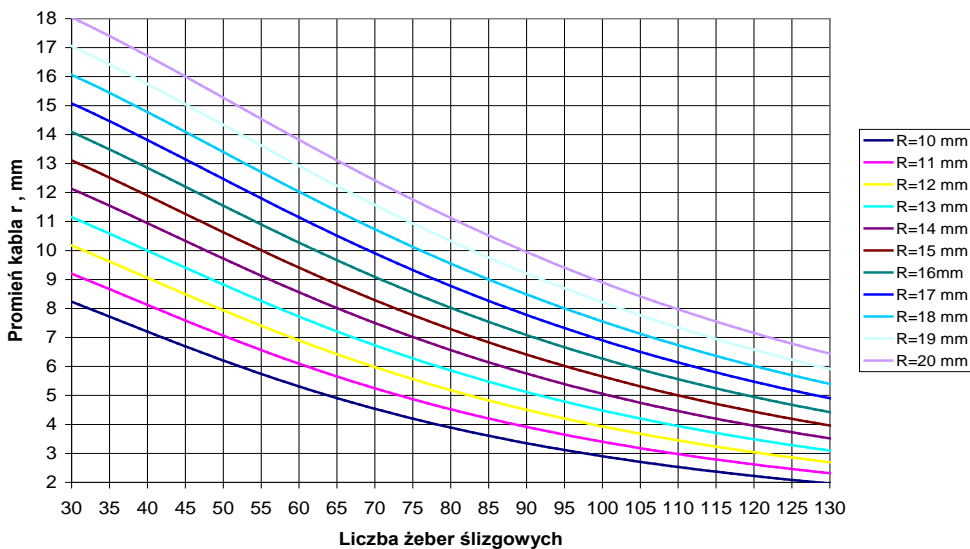
II. Diagramy doboru wartości promienia kabla r_{max} w zależności od liczby żeber ślizgowych kanału. Dokładny opis oraz założenia przyjęte do wykonania wykresów z wykorzystaniem modelowania matematycznego opisano w podrozdziale 2.2.2 – zależność (2.12).



Rys. A-3. Zależności zmian wartości promienia kabla od liczby żeber ślizgowych w odniesieniu do promienia wewnętrznego kanału, przy wartości zużycia teoretycznego wynoszącego $y_z = 0,01$ mm



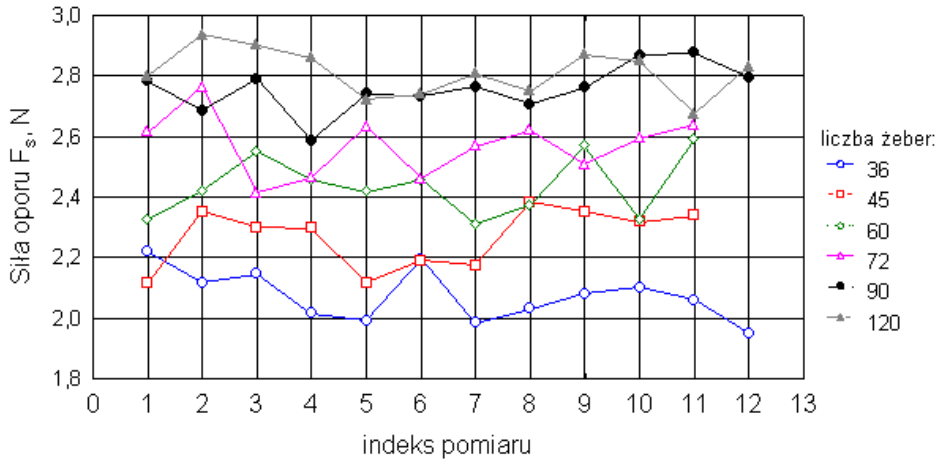
Rys. A-4. Zależności zmian wartości promienia kabla od liczby żeber ślizgowych w odniesieniu do promienia wewnętrznego kanału, przy wartości zużycia teoretycznego żebra wynoszącego $y_z=0,03$ mm



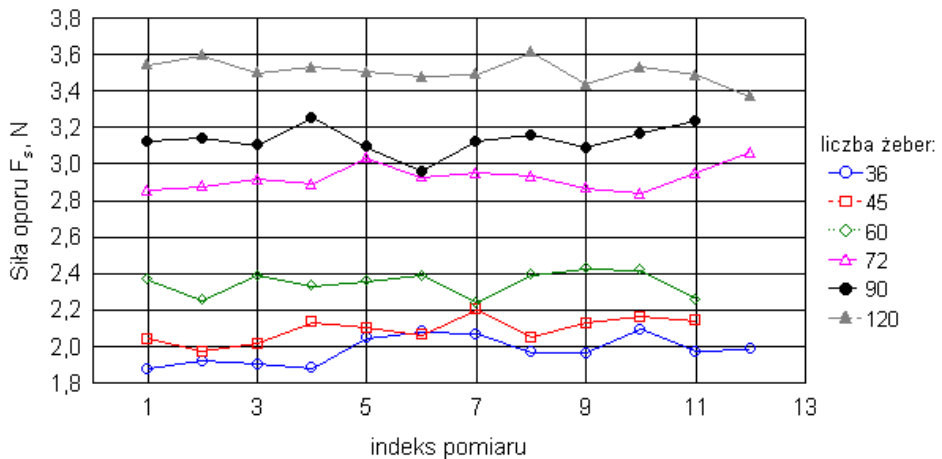
Rys. A-5. Zależności zmian wartości promienia kabla od liczby żeber ślizgowych w odniesieniu do promienia wewnętrznego kanału, przy wartości zużycia teoretycznego żebra wynoszącego $y_z=0,05$ mm

ZAŁĄCZNIK B

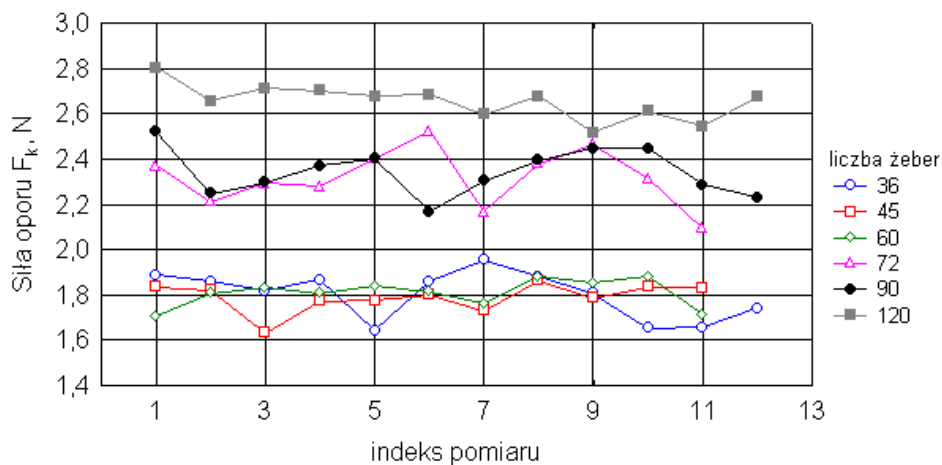
Badania wzajemnego współdziałania kabła z kanałem mającym na wewnętrznej powierzchni zębra ślizgowe – wykresy oraz tabele. Dokładny opis oraz założenia dotyczące wyznaczania siły oporu i przebiegu badań doświadczalnych z wykorzystaniem nowego stanowiska opisano w podrozdziale 5.3.2.



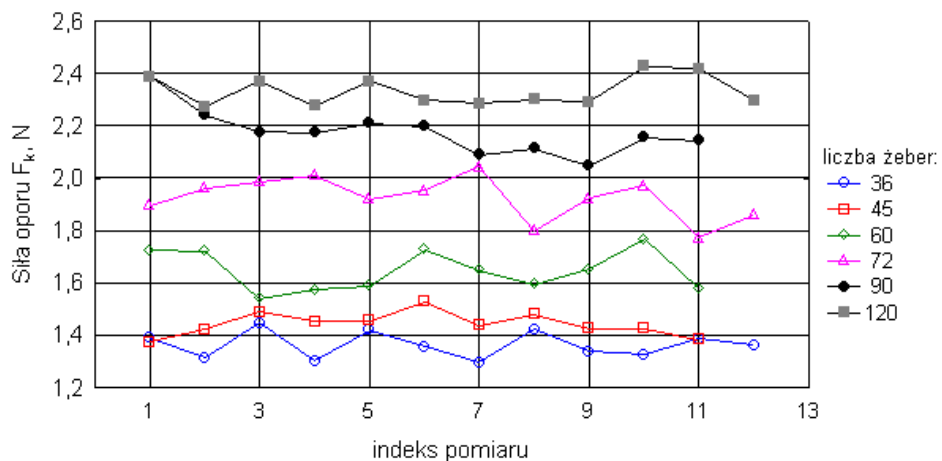
Rys. B-1. Wyniki pomiarów siły oporu F_S określone w warunkach tarcia statycznego (kanał z zębami ślizgowymi o wysokości $h=0,5$ mm)



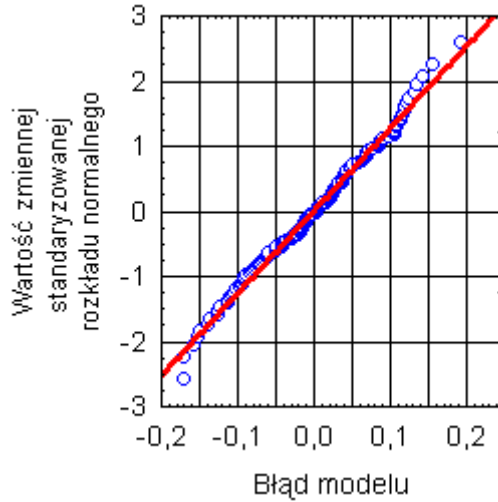
Rys. B-2. Wyniki pomiarów siły oporu F_S określone w warunkach tarcia statycznego (kanał z zębami o wysokości $h=1$ mm)



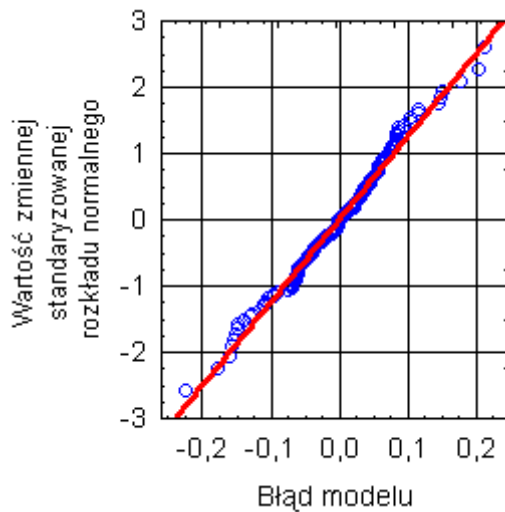
Rys. B-3. Wyniki pomiarów siły oporu F_K określone przy tarcii kinetycznym (kanał z zębami o wysokości $h=0,5\text{mm}$)



Rys. B-4. Wyniki pomiarów siły oporu F_K określone przy tarcii kinetycznym (kanał z zębami o wysokości $h=1\text{mm}$)



Rys. B-5. Porównanie wartości zmiennej standaryzowanej rozkładu normalnego do błęd modelu klasyfikacji dwukierunkowej w warunkach tarcia statycznego



Rys. B-6. Porównanie wartości zmiennej standaryzowanej rozkładu normalnego do błęd modelu klasyfikacji dwukierunkowej w warunkach tarcia kinetycznego

Tabela B1

**Wyniki testu Tukeya przybliżonego prawdopodobieństwa
istotności różnic wartości średnich siły oporu przy tarcu statycznym**

	h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0			
h	n	36	45	60	72	90	120	36	45	60	72	90	120	36	45	60	72	90	120	
0,5	36		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	45	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	60	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	72	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	90	0,00	0,00	0,00	0,00		0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	120	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
1,0	36	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	45	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	60	0,00	0,48	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	120	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Wartość prawdopodobieństwa większa od przyjętego poziomu istotności $p=0,05$
wskazuje na brak różnicowania wartości średnich.

Tabela B2

Wyniki testu Tukeya przybliżonego prawdopodobieństwa
istotności różnic wartości średnich siły oporu przy tarciu kinetycznym

h		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5																		
h	n	36	45	60	72	90	120	120	90	72	60	45	36	45	60	72	90	120	90	72	60	45	36	45	60	72	90	120										
1,0	36		0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									
1,0	45	0,43		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00								
1,0	60	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
1,0	72	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
1,0	90	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
1,0	120	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
0,5	36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
0,5	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
0,5	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
0,5	72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,5	90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,5	120	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Wartość prawdopodobieństwa większa od przyjętego poziomu istotności $p=0,05$ wskazuje na brak zróżnicowania wartości średnich.

STUDIUM TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE WSPÓLDZIAŁANIA KANAŁU Z TWORZYWA POLIMEROWEGO Z KABLEM OPTOTELEKOMUNIKACYJNYM

Przedmiotem monografii jest poznanie i ocena przebiegu zjawisk, zachodzących na powierzchni wewnętrznej kanału z tworzywa polimerowego, w aspektach współdziałania z kablem optotelekomunikacyjnym. Obecnie wytwory w postaci kanałów z tworzywa polimerowego są stosowane zarówno do osłony cienkich włókien światłowodowych przed oddziaływaniem środowiska naturalnego, jak i w celu uzyskania dużej efektywności umieszczania w ich wnętrzu kabli optotelekomunikacyjnych, teletechnicznych lub energetycznych.

Na podstawie analizy stanu literatury, zagadnień teoretycznych i technologicznych wskazano czynniki, które mają decydujący wpływ na przebieg tego procesu. Obszar kontaktu kabla i kanału opisano zależnościami geometrycznymi, co umożliwiło prowadzenie analiz w odniesieniu do poszukiwanych wielkości charakterystycznych, makrostruktury geometrycznej powierzchni wewnętrznej kanału. Wykonano również modelowanie numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), na podstawie którego wyznaczono wartości nacisków powierzchniowych oraz rozkład naprężenia w obszarze wierzchołków analizowanej struktury geometrycznej.

W celu przeprowadzenia badań doświadczalnych opracowano i wykonano autorskie stanowisko badawcze, do prowadzenia powtarzalnych pomiarów kanałów, mających różną strukturę geometryczną powierzchni wewnętrznej w warunkach oddziaływań ślizgowych z kablem optotelekomunikacyjnym. Oryginalne kanały z tworzywa polimerowego wykonano w linii technologicznej wytłaczania z jednoczesnym kształtowaniem wymaganej struktury o ściśle określonych kształtach i wymiarach. Opracowano i wykonano kanały z warstwą ślizgową, otrzymaną z wykorzystaniem metody natryskowego nanoszenia emulsji, zawierającej aktywne środki ślizgowe.

Otrzymane wyniki badań teoretycznych, symulacyjnych oraz doświadczalnych ukazały, że proces wzajemnego współdziałania kanału i kabla można badać poprzez wyznaczenie i analizę zmian wartości siły oporu ruchu, powstającej w kablu podczas przemieszczania go względem nieruchomego odcinka kanału. Umożliwia to prowadzenie dokładnych analiz naukowych, porównawczych oraz określanie poszukiwanych wskaźników w aspektach oceny efektywności przebiegu tego procesu. Monografię kończy podsumowanie oraz wnioski o charakterze poznawczym, utylitarnym i prognostycznym.

THEORETICAL AND EMPIRICAL STUDY OF POLYMER DUCT AND OPTOTELECOMMUNICATION CABLE INTEROPERABILITY

The aim of this monograph is to uncover and assess the phenomena occurring on the inner surface of polymer duct, where interoperability with optotelecommunication cable is involved. Currently, polymer duct products are used for two purposes: sheltering thin optic fibres from harmful influence of the natural environment and obtaining greater effectiveness of placing optotelecommunication, teletechnical and energy cables inside them.

On the basis of relevant analysis of various sources, theoretical and technological issues, several factors key to this whole process have been identified. The area of contact between the cable and duct has been described with geometrical dependencies, which made it possible to conduct analyses pertaining to investigated characteristic units, geometrical macrostructure of the inner surface of the duct. Numerical modeling with finite element method (FEM) has been employed. This enabled us to calculate the values of surface pressures and stress distribution in the area of vertices of the analyzed geometrical structure.

In order to conduct empirical studies, an independent and innovative approach has been formulated to carry out repetitious measurements of ducts, which have varied geometrical structure of the inner surface in the condition of the slip interaction with optotelecommunication cable. The original ducts made of polymer have been made in technological line of extrusion and simultaneous shaping of the desired structure, which has strictly specified shapes and measurements. Ducts with slip layer have been designed and produced using the spray covering with emulsion containing active slip compounds.

The obtained results of the theoretical, simulative and empirical studies have demonstrated that the process of mutual interaction between the duct and cable can be examined by setting and analysis of changes in the value of movement resistance force, which is created in the cable when moving it in relation to the static part of the duct. This makes it possible to conduct precise scientific and comparative analyses and specify the desired indicators in the context of the effectiveness of the whole process. The last part of the monograph is the summary in which cognitive, utilitarian and predictive conclusion is formulated.