

Maciej NOWICKI, Kamil ŻELAZEK, Tomasz KLEPKA  
Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych  
e-mail: m.nowicki@pollub.pl

## Analiza właściwości wytrzymałościowych wytłaczanego dwuwarstwowego wytworu polietylenowo-elastomerowego

**Streszczenie:** Intensywne poszukiwania nowych polimerowych materiałów konstrukcyjnych wynikają z potrzeby wytwarzania wytworów o polepszonych właściwościach. Właściwości te mogą być analizowane w odniesieniu do gotowego wytworu lub dla określonych właściwości poszczególnych jego komponentów. Podczas użytkowania wytworów z tworzyw polimerowych, wraz ze wzrostem temperatury otoczenia mogą zmieniać się znacznie właściwości fizyczne, zwłaszcza mechaniczne, a w skrajnych przypadkach może nastąpić przemiana stanu skupienia tworzywa i utrata określonego kształtu lub wymiarów. W artykule przedstawiono analizę cech wytrzymałościowych opartą na wynikach badań eksperymentalnych, obejmujących badania wyłoczniny otrzymanych podczas wytłaczania jednoskładnikowej taśmy, jak także współwytłaczania wyłoczniny dwutworzywowej w postaci rury o przekroju pierścieniowym.

**Słowa kluczowe:** współwytłaczanie, poliolefiny, elastomery, badania wytrzymałości

### ANALYSIS OF STRENGTH PROPERTIES OF THE EXTRUDED PRODUCT OF A TWO-LAYER POLYETHYLENE-ELASTOMER

**Abstract:** The intensive search for new polymeric materials of construction based on the need for preparing the products of enhanced properties. These properties can be analyzed in relation to the finished product or of the specific properties of its individual components. During use of the products of polymeric materials with an increase in ambient temperature can vary greatly physical, especially mechanical, and in extreme cases can occur transition of state material, and loss of a particular shape or dimensions. The article presents an analysis of the characteristics of strength, based on the results of experimental research, including research residue obtained during the extrusion of mono tape, as well as co-extrusion of extrudate double plastic in the form of a tube of annular cross-section.

**Keywords:** coextrusion, polyolefins, elastomers, strength test

### 1. WSTĘP

Wytłaczanie wielotworzywowe jest powszechną metodą otrzymywania wyrobów z wielowarstwowych tworzyw polimerowych. Metodą tą produkowane są m.in. rury, tuby, kształtowniki i folie, a także pojemniki, w tym butelki i zbiorniki paliwowe [1, 2, 3]. Proces wytwarzania elementów wielowarstwowych polega na wytłaczaniu dwóch lub więcej tworzyw, w oddzielnych układach uplastyczniających i łączeniu ich w jedną zwartą, wielowarstwową wyłoczninę, w głowicy wytłaczarskiej. Celem stosowania wytłaczania wielotworzywowego jest między innymi wytwarzanie wy-

tworów mających polepszoną wytrzymałość, właściwości barierowe oraz dodatkowe cechy estetyczne i dekoracyjne [4, 5, 6, 7]. Rury i przewody wykonywane tą metodą mogą być stosowane do transportu cieczy i gazów lub na osłony kabli elektrycznych i światłowodowych. Potrzeba formowania innych kształtów z tego rodzaju wytworów, powoduje, że pożądaną, dodatkową właściwością jest możliwość łatwego kształtowania rur w wyniku gięcia, w określonej temperaturze. Obecnie do wytwarzania przewodów rurowych do celów kanalizacyjnych stosuje się przede wszystkim poli(chlorek winylu) (PCV), polietylen (PE), oraz polipropylen (PP). Zaletą jednowarstwowo-

wych rur z wyżej wymienionych tworzyw jest długi okres przewidywanej ich eksploatacji, wadą natomiast jest to, że formowanie w wyniku gięcia wymaga dla niektórych materiałów podgrzewania giętej rury [8].

Polietylen dużej gęstości (PE-HD) jest materiałem termoplastycznym stosowanym głównie do wytwarzania rur o małej średnicy do transportu wody i gazu w instalacjach domowych i przemysłowych. Czynnikiem decydującym o jego zastosowaniu w różnych gałęziach przemysłu są dobre właściwości mechaniczne, przy stosunkowo małej grubości ścianki. Wpływa to na wysoką odporność rur na działanie hydrostatycznego ciśnienia wewnętrznego w różnych temperaturach [9]. W porównaniu do innych tworzyw polimerowych materiał ten wykazuje dużą twardość i wytrzymałość na rozciąganie. Jest on również odporny na działanie substancji chemicznych. Wykonywanie rur z polietylenu jest korzystnym rozwiązaniem do transportu cieczy, gazów i ścieków stosowanych w przemyśle komunalnym, morskim, górnictwie i rolnictwie [10].

Inną grupą tworzyw konstrukcyjnych są elastomery olefinowe (TPO), które wykonywane są najczęściej z homopolimeru lub kopolimeru propylenu z kauczukiem – etylen-propylen (EP) lub etylen-propylen-dien (EPDM). Zaletą elementów wykonanych z elastomerów olefinowych (TPO) jest duża udarność w niskich temperaturach

połączona ze stosunkowo dużą elastycznością. Wykazują one dobrą odporność na różne związki chemiczne i mogą być stosowane w zakresie temperatury od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $130^{\circ}\text{C}$  [11].

## 2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Celem badań eksperymentalnych było otrzymanie nowego dwuwarstwowego wytworu polietylenowo-elastomerowego w postaci rury o zwiększonej elastyczności z warstwą zewnętrzną wykonaną z polietylenu dużej gęstości (PE-HD). Elastyczność określana była na podstawie wyników badań podczas próby jednoosiowego rozciągania w temperaturze  $23^{\circ}\text{C}$ .

### 2.1 ANALIZA WYTWARZANIA I BADANIA KOMPONENTÓW DWUWARSTWOWEGO WYTWORU

Przeprowadzona analiza dostępnych na rynku tworzyw termoplastycznych wykazała, że brak jest na rynku tego typu dwuwarstwowego wytworu. Do badań właściwości mechanicznych komponentu przeznaczonego na zewnętrzną jego warstwę wytypowano polietylen dużej gęstości (PE-HD), o nazwie handlowej ACP 9240 Plus wyprodukowany przez firmę Lyondell Basell Elevates.

Tab. 1. Wybrane właściwości komponentów wytworu PE-HD/TPO

Tab. 1. Selected properties of the components of a product HDPE/TPO

Grupa materiałowa	Polietylen dużej gęstości (PE-HD)	Elastomery olefinowe (TPO)		
		TO SE 58359A	TO SE 58370A	TO SE 58385A
Nazwa	ACP 9240 Plus			
Gęstość, $\text{kg}/\text{m}^3$	946	895	910	920
Temperatura topnienia, $^{\circ}\text{C}$	150	od 140		
Temperatura przetwórstwa, $^{\circ}\text{C}$	190 ÷ 220	170 ÷ 190		
Wskaźnik szybkości płynięcia $\text{MFR}_{(190,5)}$ , g/10 min	0,20	3,4	4,1	5,0
Wytrzymałość na rozciąganie, w kierunku wzdłużnym, MPa	80	14,8	7,5	8,6
Wydłużenie przy zerwaniu w kierunku wzdłużnym, %	400	870	800	730

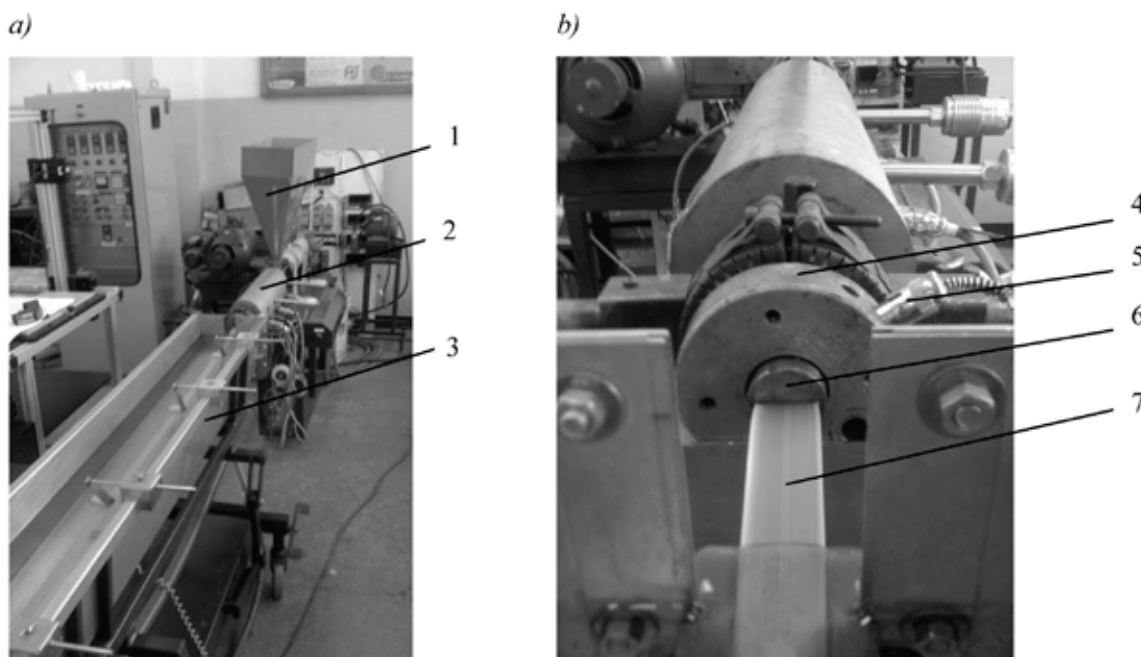
Na komponent stanowiący wewnętrzną warstwę wytworu wytypowano wstępnie trzy odmiany tworzywa z grupy elastomerów olefinowych (TPO) o nazwie handlowej TO SE 583, firmy Mitsubischi Chemical. Materiał oparty jest na kopolimerze styren-etylen/butylen/styren (SEBS) i został wytworzony z przeznaczeniem do przetwarzania w procesie wytłaczania. Wybrane właściwości fizyczne, w tym mechaniczne i przetwórcze tworzyw, według danych producentów zestawiono w tabeli 1.

Na podstawie analizy danych materiałowych dostarczonych przez producentów, można stwierdzić, że polietylen dużej gęstości ma wyższą wytrzymałość na rozciąganie w kierunku wzdłużnym oraz około dwukrotnie mniejsze

wydłużenie przy zerwaniu od materiałów z grupy elastomerów olefinowych (TPO). Z tego też względu będą to właściwe materiały do wytwarzania wytłoczyny o przekroju pierścieniowym.

## 2.2. WYTWARZANIE I BADANIE KOMPONENTÓW

Do wyznaczania podstawowych właściwości mechanicznych charakteryzujących poszczególne komponenty, przygotowano próbki w postaci taśmy o przekroju prostokąta. Taśmy wytworzono w procesie wytłaczania, z wykorzystaniem wytłaczarki jednoślindakowej W-25 wyposażonej w głowicę wytłaczarską szczelinową płaską, o wymiarach szczeliny 23 x 1,3 mm (rys. 1).



Rys. 1. Wygląd wytłaczania próbek do badań a) – linia technologiczna procesu wytłaczania konwencjonalnego, b) – widok głowicy wytłaczarskiej z dyszą szczelinową: 1 – zasobnik tworzywa, 2 – wytłaczarka W-25, 3 – wanna chłodząca, 4 – grzejnik elektryczny, 5 – termopara, 6 – dysza szczelinowa, 7 – wytłaczana taśma

Fig. 1. Exterior extrusion test samples a) – a process line of a conventional extrusion process, b) – back boring head with a die slit: 1 – plastic tray, 2 – extruder W-25, 3 cooling tank, 4 – electric heater, 5 – thermocouple, 6 – crevice nozzle, 7 – extruded tape

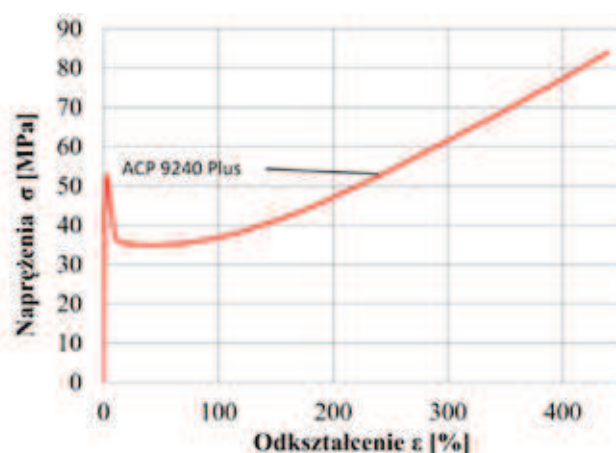
Z wymagań technologicznych procesu współwytłaczania wynika, że temperatury przetwórstwa oraz lepkości przetwarzanych tworzyw muszą być zbliżone. W związku z potrzebą wyznaczenia

właściwości mechanicznych tworzyw będących komponentami uzyskanymi w tych samych warunkach, metodą doświadczalną ustalono stałe warunki procesu wytłaczania, które wykorzysty-

wano przy wytłaczaniu każdego z komponentów. Należały do nich temperatura w poszczególnych strefach grzewczych układu uplastyczniającego (poczynając od zasypu 130 °C, 160 °C, 180 °C), temperatura głowicy wytaczarskiej 180 °C, prędkość obrotowa ślimaka  $V = 53$  obr./min. Czynnikiem zmiennym była prędkość liniowa odbioru wytłoczyny poszczególnych tworzyw.

Z taśmy do badań wycięto próbki w postaci wiosełek o długości 150 mm i przekroju poprzecznym w kształcie prostokąta o wymiarach 1,5 x 3 mm za pomocą wykrojnika. Następnie kondycjonowano je w temperaturze  $23 \pm 2$  °C przez 24 h. Badania statycznej próby roz-

ciągania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012 „Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu” z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej firmy Zwick/Roell Z010. Podczas badań mierzono siłę oddziałującą na uchwyty maszyny wytrzymałościowej oraz ich przemieszczenie z prędkością 200 mm/min. Po czym otrzymane wyniki wartości siły odpowiadającej przemieszczeniu, przeliczono z wykorzystaniem programu komputerowego na zależność naprężenia w funkcji odkształcenia. Przykładowa zależność naprężenia w funkcji odkształcenia została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Zależność graficzna średniego naprężenia otrzymanego w próbie jednoosiowego rozciągania polietylenu dużej gęstości (PE-HD) w funkcji wartości odkształcenia

Fig. 2. Graphic dependence of the average stress in the sample obtained uniaxial stretching high density polyethylene (HDPE) as a function of strain

Wyniki badania potwierdziły, że polietylen dużej gęstości (PE-HD) jest tworzywem półsztywnym, który wykazuje wyraźną granicę plastyczności. W tabeli 2 przedstawiono średnią wartość:

modułu sprężystości podłużnej ( $E_T$ ), odkształcenia na granicy plastyczności ( $\epsilon_y$ ), naprężenia na granicy plastyczności ( $\sigma_y$ ), odkształcenia przy zerwaniu ( $\epsilon_{tb}$ ) i naprężenia zrywającego ( $\sigma_{tb}$ ).

Tab. 2. Wartości średnie wyników pomiarów z próby jednoosiowego rozciągania dla polietylenu dużej gęstości

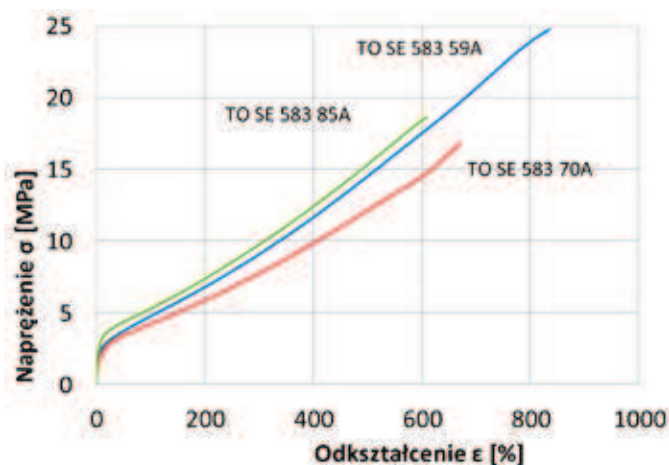
Tab. 2. Average values of the measurement results of the uniaxial tensile sample of high density polyethylene

Nazwa handlowa materiału	Moduł sprężystości $E_T$ MPa	Odkształcenie na granicy plastyczności $\epsilon_y$ %	Naprężenie na granicy plastyczności $\sigma_y$ MPa	Odkształcenie przy zerwaniu $\epsilon_{tb}$ %	Naprężenie zrywające $\sigma_{tb}$ MPa
ACP 9240 Plus	1252	3,22	52,63	439,60	84,06

Średnie wartości uzyskanych pomiarów wykazały, że granica plastyczności została osiągnięta przy odkształceniu ( $\epsilon_y$ ) równym 3,22 % i odpowiadająca jej wartość naprężenia ( $\sigma_y$ ) wynosiła 52,63 MPa. Po osiągnięciu tej wartości naprężenia występujące w próbce spadły, aby następnie wzrastać i osiągnąć maksymalną wartość przy

zerwaniu ( $\sigma_{tb}$ ) równą 84,06 MPa przy odkształceniu ( $\epsilon_{tb}$ ) równym 439,6 (%).

Kolejną grupę próbek w postaci odcinków taśm otrzymano z elastomerów olefinowych (TPO). Przebieg krzywych naprężenie-odkształcenie dla próbek z różnych odmian badanego elastomeru olefinowego (TPO) przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3 Wykres naprężenie – odkształcenie dla próby jednoosiowego rozciągania tworzyw poliolefinowych

Fig. 3 Figure stress – strain for the test uniaxial tension polyolefins

Wyniki badań wskazują, że wybrane elastomery olefinowe są materiałami z łagodnie narastającym odkształceniem wysokoelastycznym, są one bardzo elastyczne i nie wykazują wyraźnej granicy plastyczności. Z wykresu funkcji naprężenie-odkształcenia odczytano takie wielkości jak:

moduł sprężystości podłużnej ( $E_t$ ), maksymalne naprężenie ( $\sigma_m$ ) (wytrzymałość) równe naprężeniu przy zerwaniu ( $\sigma_{tb}$ ) oraz odkształcenie przy maksymalnym naprężeniu ( $\epsilon_m$ ) równe odkształceniu przy zerwaniu ( $\epsilon_{tb}$ ). Wartości wyżej wymienionych parametrów przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Wartości średnie wyników pomiarów z próby jednoosiowego rozciągania dla materiałów z grupy elastomerów olefinowych (TPO)

Tab. 3. The average values of the measurement results of the uniaxial tensile sample materials from the group of olefin elastomer (TPO)

Nazwa handlowa materiału	Moduł sprężystości $E_t$ , MPa	Odkształcenie przy zerwaniu	
		$\epsilon_{tb}$ , %	Naprężenie przy zerwaniu $\sigma_{tb}$ , MPa
		Odkształcenie przy maksymalnym naprężeniu $\epsilon_m$ , %	Maksymalne naprężenie $\sigma_m$ , MPa
TO SE 583 59A	0,54	840,91	24,86
TO SE 583 70A	0,58	671,82	16,77
TO SE 583 85A	1,04	609,37	18,64

Do wytwarzania wyrobu w postaci rury polietylenowo-elastomerowej wytypowano elastomer olefinowy (TPO) o nazwie handlowej TO SE 583 59A, który wykazał największe odkształcenie 840 %, dla którego wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 24,86 MPa.

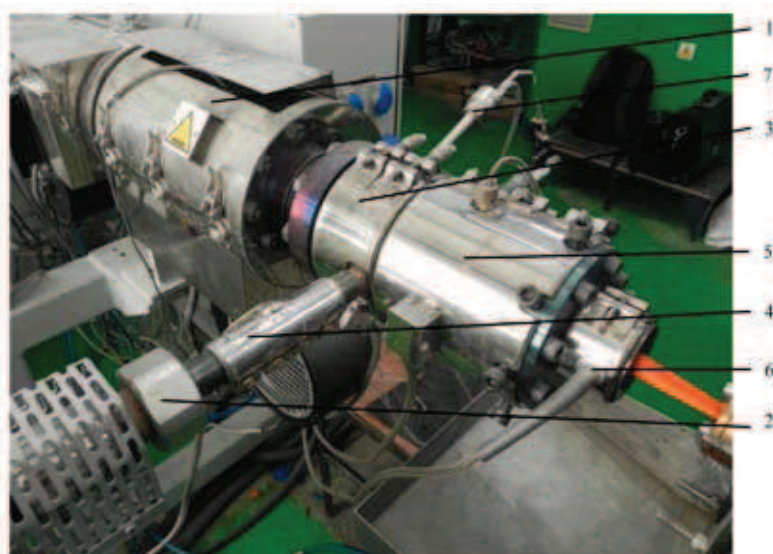
### 3. WYTŁOCZYNA POLIETYLENOWO – POLIOLEFINOWA

W celu wytworzenia wytworu w postaci wytłoczyny o przekroju pierścieniowym o zwiększonej elastyczności oraz określonej wytrzymałości na rozciąganie wytworzono w linii technologicznej dwuwarstwową wytłoczynę polietylenowo-elastomerową. Konstrukcja wytłoczyny o przekroju pierścieniowym posiadała wewnętrzną warstwę wykonaną z elastomeru

olefinowego (TPO), a zewnętrzną z polietylenu dużej gęstości (PE-HD). Przy czym charakterystyki w układzie naprężenie-odkształcenie były dla obu komponentów wyraźnie różne.

#### 3.1. SPOSÓB WYTWARZANIA DWUWARSTWOWEGO WYTWORU POLIETYLENOWO – POLIOLEFINOWEGO

Proces współwytłaczania zrealizowano w Instytucie Inżynierii Materiałów Polimerycznych i Barwników w Toruniu z wykorzystaniem linii technologicznej do współwytłaczania rur przedstawionej na rys. 4. W skład linii wchodziły wytłaczarka główna jednoślindakowa W45, wytłaczarka pomocnicza jednoślindakowa W18, łączniki wzdłużnej głowicy wytłaczarskiej, wana chłodząca oraz odciąg.



Rys. 4. Fragment linii technologicznej z głowicą do współwytłaczania rur: 1 – wytłaczarka główna W45, 2 – wytłaczarka W18, 3 – łącznik wytłaczarki głównej, 4 – łącznik wytłaczarki pomocniczej, 5 – głowica wytłaczarska, 6 – czujnik termopary, 7 – czujniki temperatury i ciśnienia

Fig. 4. A fragment of a technological line with a head co-extrusion of pipes: 1 – main extruder W45, 2 – extruder W18, 3 – linker primary extruder, 4 – switch auxiliary extruder, 5 – head wytłaczarska, 6 – thermocouple sensor, 7 – temperature and pressure sensors

Wytłaczarka główna W45 posiadała zasobnik oraz układ uplastyczniający, w którym znajdowały się cztery strefy grzejne. Ślimak umieszczony w cylindrze miał średnicę 45 mm i stosunek długości części roboczej do średnicy ślimaka wynoszący 30. Ślimak napędzany

był silnikiem elektrycznym firmy Baumüller o mocy znamionowej 97 kW, maksymalnym momencie obrotowym 4400 Nm i maksymalnej prędkości obrotowej 450 obr./min.

Wytłaczarka pomocnicza W18 wyposażona była w zasobnik, układ uplastyczniający, w skład które-

go wchodził między innymi, cylinder z dwiema strefami grzejnymi oraz ślimak o średnicy 18 mm i stosunku długości do średnicy wynoszącym 20. Układ ten był napędzany przez silnik indukcyjny trójfazowy firmy Chiaravalli o mocy znamionowej 0,55 kW oraz maksymalnym momencie obrotowym na wale 3,81 Nm, przy maksymalnej prędko-

ści obrotowej 1380 obr./min. Ślimak połączony był z wałem za pomocą przekładni redukcyjnej Bonfiglioli MVF-49/A o przełożeniu dynamicznym  $i=36$ , co skutkowało osiągnięciem momentu obrotowego na ślimaku o wartości 137,16 Nm. Warunki współwytłaczania wytworu polietylenowo-poliolefinowego zestawiono w tabeli 4.

**Tab. 4. Warunki stałe w procesie współwytłaczania wytworu**

**Tab. 4. Conditions permanently in the process of co-extrusion of a product**

Mierzony parametr	Temperatura w strefach wytłaczarki głównej W45, °C	Temperatura w strefach wytłaczarki pomocniczej W18, °C	Temperatura w strefach grzejnych głowicy do współwytłaczania, °C
Strefa I	120	160	170
Strefa II	145	175	165
Strefa III	155		
Strefa IV	160		

W procesie współwytłaczania czynnikami zmiennymi były:

- prędkość ślimaka wytłaczarki głównej,
- prędkość ślimaka wytłaczarki pomocniczej,
- wartości ciśnienia tworzywa na końcu układu,
- prędkość odciągu wytłoczyny.

Czynnikami zakłócającymi były:

- napięcie prądu elektrycznego: od 219 do 241 V,
- wilgotność względna powietrza: od 45 do 55 %,
- temperatura otoczenia: od 21 do 23 °C.

Założono, że wpływ czynników zakłócających na przebieg procesu był minimalny i że można je pominąć.

Wartości czynników zmiennych i wyników w procesie współwytłaczania dwuwarstwowych rur przedstawiono w tabeli 5, w której próbki do badań oznaczone symbolami RI, RII, RIII i RIV są odcinkami rur pobranych dla kolejnych czynników zmiennych.

Dzięki zastosowaniu jednej głowicy wytłaczarskiej poszczególne warstwy tworzywa zostały połączone tworząc wytłoczynę o przekroju pierścieniowym mającą średnicę zewnętrzną 14 mm oraz grubość ścianki wynoszącą 2 mm. Poprzez zmniejszanie prędkości obrotowej ślimaka wytłaczarki głównej W-45 doprowa-

dzającej PE-HD do głowicy oraz zwiększanie prędkości obrotowej ślimaka wytłaczarki pomocniczej W-18 doprowadzającej elastomer olefinowy (TPO), zmniejszono grubość warstwy zewnętrznej wytłoczyny (PE-HD) i zwiększono grubość warstwy wewnętrznej elastomeru olefinowego (TPO). Wpływało to na możliwość regulacji grubości warstwy zewnętrznej i warstwy wewnętrznej wytłoczonego dwuwarstwowego wytworu bez wymiany narzędzia – głowicy wytłaczarskiej. Szybka zmiana grubości poszczególnych warstw wytłoczyny ma wpływ na wydajność i czas dostosowania linii technologicznej do produkcji wytworu o innych niż dotychczas grubościach ścianek dedykowanych do różnego zastosowania oraz określonych warunków użytkowania.

W celu wyznaczenia udziału objętościowego poszczególnych komponentów w dwuwarstwowej rurze zmierzono średnicę zewnętrzną ( $D=14$  mm) i wewnętrzną ( $d=8$  mm) otrzymanych wytłoczyn. Wykonano fotografie cyfrowe, z wykorzystaniem których za pomocą programu komputerowego wyznaczono średnice graniczne pomiędzy komponentem wykonanym z polietyleno dużej gęstości (PE-HD) a kom-

ponentem z tworzywa poliolefinowego (TPO). Z zastosowaniem przedstawionych w tabeli 6 wzorów, przeliczono pola przekrojów poszczególnych warstw dla wytłoczonych komponentów. Dzięki przeprowadzonym pomiarom zastosowano rozszerzenie oznaczeń poszcze-

gólnych wytłoczonych komponentów RI<sub>75/25</sub>, RII<sub>65/35</sub>, RIII<sub>60/40</sub>, RIV<sub>50/50</sub> w których pierwsza liczba oznacza procentową zawartość polietylenu dużej gęstości (PE-HD), zaś druga liczba procentową zawartość tworzywa poliolefinowego (TPO) w otrzymanej wytłoczinie.

**Tab. 5. Czynniki zmienne i wynikowe procesu współwytłaczania rury oraz wielkości geometryczne uzyskanych wytłoczyn**

**Tab. 5. Factors variables and the resulting coextrusion process pipe and the size of the geometric obtained pomace**

Czynnik zmienny	RI	R II	R III	R IV
Prędkość obrotowa ślimaka wytłaczarki głównej W45, obr./min	15	10	5	1
Moment obrotowy ślimaka wytłaczarki głównej W45, Nm	561	540	440	294
Ciśnienie tworzyw w głowicy głównej W45, MPa	6,5	5,2	3,5	1,7
Prędkość obrotowa ślimaka wytłaczarki pomocniczej W18, obr./min	30	38	46	54
Prędkość odciągu, m/min	1,6	1,3	0,8	0,4

**Tab. 6. Średnice i pola powierzchni przekrojów dwuwarstwowej rury polietylenowo-elastomerowej o przekroju pierścieniowym**

**Tab. 6. Diameters and cross-sectional area of the two-layer polyethylene pipe cross-section annular elastomeric**

Oznaczenie wytłoczyny	Całkowite pole powierzchni $A = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)$	Średnica graniczna $d_{sr}$	Pole powierzchni warstwy polietylenowej (PE-HD) $A_{PE-HD} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_{sr}^2)$		Pole powierzchni warstwy elastomerowej (TPO) $A_{TPO} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{sr}^2 - d^2)$	
Jednostka	mm <sup>2</sup>	mm	mm <sup>2</sup>	%	mm <sup>2</sup>	%
Nr próbki						
RI <sub>75/25</sub>	62,83	9,17	47,05	75	15,78	25
RII <sub>65/35</sub>		9,59	40,87	65	21,97	35
RIII <sub>60/40</sub>		9,8	37,67	60	25,16	40
RIV <sub>50/50</sub>		10,2	31,38	50	31,45	50

### 3.2. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE

Badania próbek uzyskanych w procesie współwytłaczania dwuwarstwowych rur miało na celu określenie zależności grubości warstw na właściwości wytrzymałościowe podczas jednoosiowego rozciągania w temperaturze 23°C.

Zjawisko rozciągania rur występuje podczas ich układania w instalacjach do transportu gazów i cieczy oraz osłon przewodów elektrycznych. Pożądane jest, aby rury tego typu wykazywały elastyczność pozwalającą na ograniczone ich odkształcanie bez przerywania ciągłości ścianki.

Badania wytrzymałościowe w próbie statycznego rozciągania przeprowadzono z wy-



korzystaniem maszyny wytrzymałościowej firmy Zwick/Roell Z010. Z każdego otrzymanego odcinka pomiarowego dwuwarstwowego rury przygotowano próbki o długości 10 cm. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2012 „Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu” [12].

Warstwę zewnętrzną wykonaną z polietylenu dużej gęstości (PE-HD), która rozerwała się jako pierwsza, oraz warstwę wewnętrzną z tworzywa poliolefinowego TO SE 853 59A odkształcającego się w większym zakresie niż warstwa z polietylenu dużej gęstości przedstawiono na rys. 5 – rys. 7.



Rys. 5. Próbka RI<sub>25/75</sub> po próbie rozciągania w temperaturze 23°C

Fig. 5. Sample RI<sub>25/75</sub> after the tensile test at 23°C



Rys. 6. Próbka RII<sub>35/65</sub> po próbie rozciągania w temperaturze 23°C

Fig. 6. Sample RII<sub>35/65</sub> after the tensile test at 23°C



Rys. 7. Próbka RIV<sub>50/50</sub> po próbie rozciągania w temperaturze 23°C

Fig. 7. Sample RIV<sub>50/50</sub> after the tensile test at 23°C

Podczas badań poszczególnych komponentów mierzono siłę oddziałującą na uchwyty maszyny wytrzymałościowej oraz wartości przemieszczenia z prędkością 200 mm/min. Po przeprowadzonych badaniach otrzymane

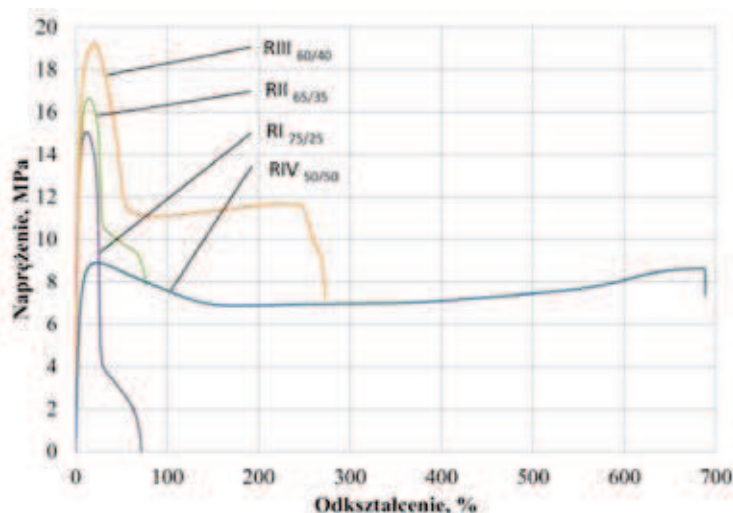
wyniki w układzie siła-przemieszczenie przeliczono z wykorzystaniem programu komputerowego na zależność naprężenia w funkcji odkształcenia.

Wyznaczanymi czynnikami były:

- moduł sprężystości wzdłużnej ( $E_t$ ),
- naprężenie na granicy plastyczności ( $\sigma_y$ ) równe naprężeniu maksymalnemu ( $\sigma_m$ ),
- odkształcenie na granicy plastyczności ( $\epsilon_y$ ).

Powyższe czynniki pozwoliły na określenie wartości odkształcenia w procesie rozciągania dwuwarstwowej rury oraz wyznaczenie maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie, jakim mogą zostać poddane tego rodzaju wytłoczyny.

Przykładowe zmiany wartości naprężenia w funkcji odkształcenia w próbie jednoosiowego rozciągania dla poszczególnych próbek przedstawiono na rys. 8, natomiast w tabeli 7 zamieszczono uśrednione wyniki badań statycznej próby rozciągania poszczególnych rodzajów próbek.



Rys. 8. Przykładowe zależności napężenia od odkształcenia dla wytworów rurowych

RI<sub>25/75</sub> RII<sub>35/75</sub> RIII<sub>40/60</sub> RIV<sub>50/50</sub>

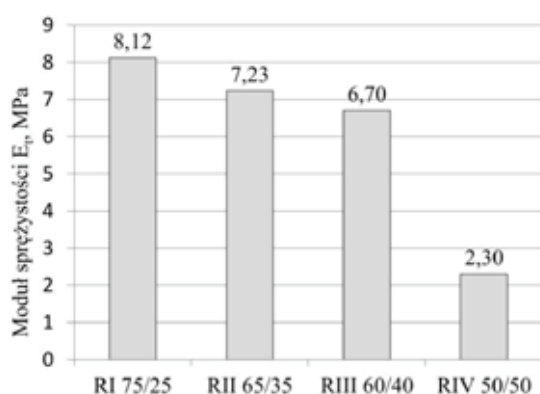
Fig. 8. Examples of stress depending on the deformation of the products of pipe

RI<sub>25/75</sub> RII<sub>35/75</sub> RIII<sub>40/60</sub> RIV<sub>50/50</sub>

Tab. 7. Wyniki badań podczas statycznego rozciągania – wartości średnie

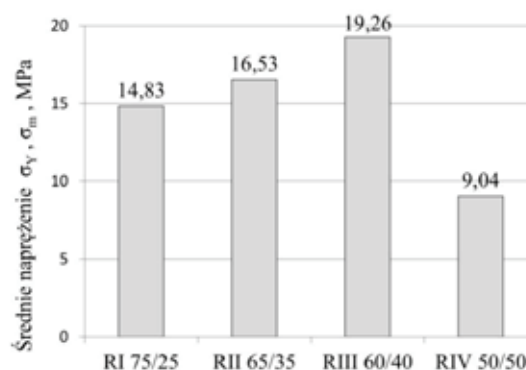
Tab. 7. Results of the static stretching – average values

Oznaczenie Próbek	Wyznaczone czynniki	Moduł sprężystości wzdłużnej $E_t$ MPa	Odształcenie na granicy plastyczności $\epsilon_y$ Odształcenie przy maksymalnym napężeniu $\epsilon_m$ , %	Napężenie na granicy plastyczności $\sigma_y$ Napężenia maksymalne $\sigma_m$ MPa
RI <sub>25/75</sub>		8,12	12,44	14,83
RII <sub>35/65</sub>		7,23	14,13	16,53
RIII <sub>40/60</sub>		6,70	18,47	19,26
RIV <sub>50/50</sub>		2,30	23,96	9,04



Rys. 9. Wykres średnich wartości modułu sprężystości wzdłużnej  $E_t$  dla poszczególnych próbek

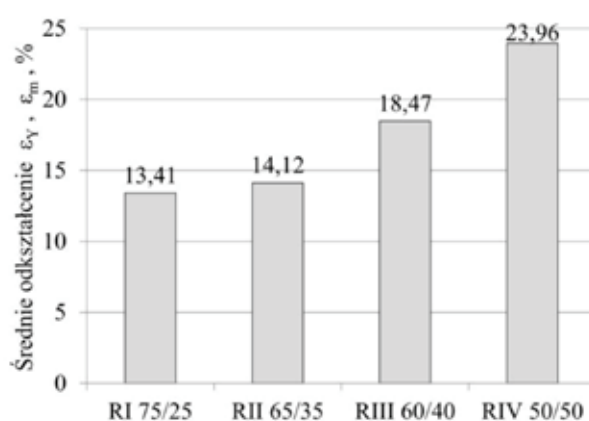
Fig. 9. The average values of elastic modulus for each sample  $E_t$



Rys. 10. Wykres średnich naprężeń na granicy plastyczności  $\sigma_y$  równych naprężeniom maksymalnym  $\sigma_m$  dla poszczególnych próbek

Fig. 10. The average stress at yield  $\sigma_y$  equal to the maximum stress  $\sigma_m$  for each sample

Wykres zmiany modułu sprężystości w zależności od rodzaju próbki przedstawiono na rys. 9, zaś wykres średnich wielkości naprężeń na granicy plastyczności  $\sigma_y$  równych odkształceniom przy maksymalnym naprężeniu  $\sigma_m$  dla poszczególnych próbek obrazuje rys. 10, a wykres średnich naprężeń na granicy plastyczności  $\varepsilon_y$  równych odkształceniom przy maksymalnym naprężeniu  $\varepsilon_m$  dla poszczególnych próbek przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Wykres średnich odkształceń na granicy plastyczności  $\varepsilon_y$  równych odkształceniom maksymalnym  $\varepsilon_m$  dla poszczególnych próbek

Fig. 11. The average yield strength of the strain  $\varepsilon_y$  equal to the maximum strain  $\varepsilon_m$  of individual samples for

#### 4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzenia procesu technologicznego jest możliwe współwytłaczanie wytworów o przekroju pierścieniowym posiadających warstwę zewnętrzną wykonaną z polietylenu dużej gęstości (PE-HD) oraz warstwę wewnętrzną wykonaną z elastomeru olefinowego (TPO). Analiza wyników badań wykazała, że zawartość poszczególnych komponentów we współwytłaczaniu rur ma wpływ na ich właściwości wytrzymałościowe badane podczas próby jednoosiowego rozciągania.

Przebieg poszczególnych krzywych naprężenie-odkształcenie dla poszczególnych wytworów o przekroju pierścieniowym jest

zbliżony do przebiegu krzywej naprężenie-odkształcenie dla polietylenu dużej gęstości (PE-HD) z wyznaczalną granicą plastyczności. Dla wszystkich rozciąganych wytworów po osiągnięciu granicy plastyczności, pole przekrojów próbek zmalała. Jako pierwsza, rozdzieleniu uległa warstwa zewnętrzna wykonana z polietylenu dużej gęstości (PE-HD), natomiast warstwa wewnętrzna z elastomeru poliolefinowego podlegała dalszemu odkształceni. W miejscu pęknięcia warstw nie nastąpiło ich oddzielenie, co potwierdza silne połączenie adhezyjne.

Najmniejsze średnie naprężenie na granicy plastyczności ( $\sigma_y$ ) równe 9,04 MPa przy średnim odkształceni ( $\varepsilon_y$ ) równym 23,96% zarejestrowano dla wytworów, w których zawartość polietylenu dużej gęstości (PE-HD) wynosiła 50%. Jednak wytwory te wykazały duże maksymalne odkształcenie warstwy wewnętrznej z tworzywa poliolefinowego równe 687%. Największe średnie naprężenie na granicy plastyczności wyniosło 19,26 MPa dla odkształcenia ( $\varepsilon_y$ ) 18,47% wykazano dla wytworów, w których zawartość polietylenu dużej gęstości (PE-HD) wyniosła 60%. Po osiągnięciu granicy plastyczności, rozciągane próbki wykazywały skłonność do szybkiego zniszczenia obu warstw.

Analiza zmian wartości modułu sprężystości wzdłużnej dla poszczególnych próbek wykazała, że największą jego średnią wartość równą 8,12 MPa wykazały wytłoczyny, w których zawartość polietylenu dużej gęstości (PE-HD) wyniosła 75%, zaś najmniejszą średnią wartość modułu równą 2,3 MPa wykazały wytłoczyny, w których zawartość polietylenu dużej gęstości (PE-HD) wyniosła 50%. Z otrzymanych wyników obliczono również, że największy średni spadek modułu sprężystości wzdłużnej równy 0,44 MPa na 1% spadku udziału polietylenu dużej gęstości (PE-HD) osiągnięto dla próbek, w których jego zawartość spadła z 60 do 50%.

Zawartość poszczególnych komponentów w wytłoczynie ma wyraźny wpływ na zachowanie się wytłoczyny w próbie jednoosiowego rozciągania. Dla dwuwarstwowej wytłoczyny

RIV<sub>50/50'</sub> w której zawartość warstwy zewnętrznej z polietylenu dużej gęstości (PE-HD) wynosiła 50 %, naprężenia wynoszące zaledwie 9,04 MPa przy odkształceniu 24% spowodowały utratę ciągłości warstwy wykonanej z polietylenu dużej gęstości i w dalszym etapie prób rozciągania odkształcała się jedynie warstwa wewnętrzna z tworzywa poliolefinowego (TPO), przy zachowaniu ciągłości wytłoczyny.

## LITERATURA

1. Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993
2. Garbacz T., Sikora J.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych: ćwiczenia laboratoryjne. Część 1*. Politechnika Lubelska, Lublin 2012
3. Sikora J., Żelazek K., Gajdoś I.: *Właściwości i przetwarzalność kompozytów polipropylenowych a rodzaj i ilość napętniacza. Część I. Charakterystyka badań*. Przetwórstwo tworzyw 2014, 4, 276–283
4. Żenkiewicz M.: *Tworzywa wielocząsteczkowe. Polimeryzacja – właściwości – badania*. Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz 2002
5. Szezyngier W.: *Tworzywa sztuczne. Chemia. Technologia wytwarzania. Właściwości. Przetwórstwo. Zastosowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1996
6. Rabek J. F.: *Polimery. Otrzymywanie, metody badawcze zastosowanie*. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2013
7. Sikora J., Żelazek K., Gajdoś I.: *Właściwości i przetwarzalność kompozytów polipropylenowych a rodzaj i ilość napętniacza. Część II. Wyniki badań*. Przetwórstwo tworzyw 2014, 5, 368–374
8. Madryas C., Kolonko A., Wysocki L.: *Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002
9. Janson L. E.: *Rury z tworzyw sztucznych do zaopatrzenia w wodę i odprowadzania ścieków*. Polskie Stowarzyszenie Producentów Rur i Kształek z Tworzyw Sztucznych, Toruń 2010
10. *High-Density Polyethylene Pipe Systems*, Plastic Pipe Institute
11. Troska-Grudzień J.: *Tworzywa w produkcji uszczelnień*, PlastNews 4/2013
12. PN-EN ISO 527-1:2012 „Tworzywa sztuczne – Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu”
13. Chrusciel J., Leśniak E., Fejdys M.: *Carbofunctional silanes and polysiloxanes. Part I. Applications of carbofunctional silanes*. Polimery 2008, 53, 10, 709 – 716
14. Liang J. Z.: *The elastic behaviour during capillary extrusion of LDPE/LLDPE blend melts*. Polymer Testing 2002, 21, 69–74
15. Wong A. C.-Y., Liang J. Z.: *Relationship between die swell ratio and melt flow index*. Chemical Engineering Science 1997, 52, 18, 3219–3221
16. Florjańczyk Z., Penczek S. (pod red.): *Chemia polimerów. T. 2*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002

Publikację przyjęto do druku: 22.06.16