



Przetwórstwo tworzyw polimerowych Aspekty technologiczne i nowe trendy

Część 2

*redakcja
Emil Sasimowski*

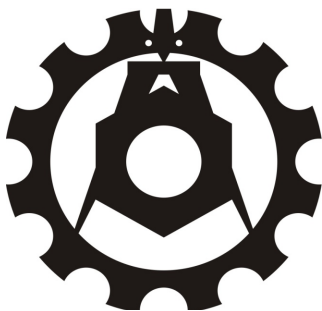
MONOGRAFIE

Przetwórstwo tworzyw polimerowych

Aspekty technologiczne i nowe trendy

Część 2

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Przetwórstwo tworzyw polimerowych

Aspekty technologiczne i nowe trendy

Część 2

redakcja
Emil Sasimowski



Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzent:

dr hab. inż. Tomasz Klepka, prof. Politechniki Lubelskiej

Autorzy:

Tomasz Jachowicz

Łukasz Majewski

Karol Pepliński

Leszek Rudzki

Tomasz Stachowiak

Milena Trzaskalska

Bogusław Królikowski

Monika Margol

Mateusz Plewik

Emil Sasimowski

Kacper Szymanik

Redakcja techniczna i skład: Emil Sasimowski

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2016

ISBN: 978-83-7947-230-7

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: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

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

Nakład: 60 egz. Ogółem 12,47 ark. wyd. W tym w poszczególnych rozdziałach:

R 01 – 1,68 R 02 – 1,09 R 03 – 1,23 R 04 – 0,62 R 05 – 1,46 R 06 – 0,69 R 07 – 0,96 R 08 – 1,42
R 09 – 1,07 R 10 – 0,80 R 11 – 1,31

Spis treści

Wstęp.....	7
1. Wpływ rozwiązania konstrukcyjnego ślimaków w wytłaczarce dwuślimakowej współbieżnej na wybrane właściwości otrzymywanych mieszanin polimerowych. Cz. 2 <i>Bogusław Królikowski</i>	9
2. Wtryskiwanie wspomagane gazem – specjalna metoda przetwórstwa <i>Tomasz Stachowiak</i>	34
3. Barwienie tworzyw polimerowych oraz metody pomiaru barwy i połysku <i>Milena Trzaskalska</i>	52
4. Barwa wyprasek wtryskowych otrzymywanych z tworzywa wielokrotnie przetwarzanego <i>Emil Sasimowski, Kacper Szymanik</i>	72
5. Przędzalnictwo polimerów włóknotwórczych <i>Monika Margol</i>	82
6. Aspekty technologiczne rozdzielania cieplnego polistyrenu porowatego XPS <i>Emil Sasimowski, Leszek Rudzki</i>	106
7. Projekt formy oraz sposobu wytwarzania półokrągłych płyt z laminatów z włókna węglowego metodami PRM i TSF <i>Łukasz Majewski</i>	117
8. Badania wybranych właściwości mechanicznych kompozytowych odlewów polimerowych <i>Tomasz Jachowicz, Mateusz Plewik</i>	132
9. Wybrane nowe trendy i uwarunkowania w zakresie efektywności energetycznej w sektorze przetwórstwa tworzyw <i>Karol Pepliński</i>	154
10. Techniki i czynniki warunkujące efektywność energetyczną procesu przetwarzania wtryskowego polimerów <i>Karol Pepliński</i>	170

11. Wybrane możliwości scenariusza wytwarzania gniazd form nowej generacji dla przetwórstwa rozdmuchowego i wtryskowego tworzyw z zastosowaniem technologii addytywnych <i>Karol Pepliński</i>	182
---	-----

Wstęp

Druga część monografii zawiera zbiór informacji dotyczących aspektów technologicznych wybranych metod przetwórstwa, oraz zagadnień związanych z efektywnością energetyczną procesów przetwórczych. Przedstawiono w niej oryginalne rezultaty badań naukowych i ich dyskusje, oraz odniesienie do aktualnego stanu wiedzy wymienionym jej obszarze.

Przedstawiona problematyka podobnie jak w części pierwszej dotyczy w głównej mierze przetwórstwa fizyczno-chemicznego drugiego rodzaju. Należą do niego takie metody przetwarzania jak wytłaczanie i wtryskiwanie, które są najszerszej stosowane, jak również będące przedmiotem opracowania przędzenie, odlewanie, prasowanie i laminowanie. Spośród metod przetwórstwa fizyczno-chemicznego pierwszego rodzaju omówiono problematykę procesu rozdzielania cieplnego.

W kolejnych rozdziałach pracy przedstawiono następujące zagadnienia: Przedstawiono wyniki badań wpływu rozwiązania konstrukcyjnego ślimaków w wytłaczarce dwu-ślimakowej współbieżnej na wybrane właściwości otrzymywanych mieszanin polimerowych z nie kompatybilizowanych termoplastycznych wtórnych tworzyw polimerowych.

Scharakteryzowano różne odmiany procesu wtryskiwania tworzyw wspomaganego gazem m.in. takie jak wtryskiwanie z doprowadzeniem gazu do gniazda formującego, z przepływem gazu przez gniazdo formujące, z doprowadzeniem gazu na zewnątrz wypraski, wtryskiwanie wieloskładnikowe.

Opisano środki barwiące oraz sposoby barwienia tworzyw polimerowych. jak również metody pomiaru barwy i połysku otrzymywanych wytworów.

Przedstawiono metody przędzenia włókien z tworzyw polimerowych. Otrzymywanie włókien niepalnych, aramidowych, PE-UHMW oraz z polimerów naturalnych. Badania dotyczyły wpływu wielkości ładunków elektrostatycznych na włóknach na przebieg procesu technologicznego przędzenia.

Ponadto opisano proces rozdzielania cieplnego polistyrenu porowatego. Przedstawiono wyniki badań wpływu zmian wybranych warunków rozdzielania płyt z polistyrenu XPS, na szerokość powstającej szczeliny cięcia i strzałkę ugięcia narzędzia - drutu rezystancyjnego.

Sposób wytwarzania półokrągłych płyt z laminatów z włókna węglowego metodami PRM i TSF z wykorzystaniem proszkowej żywicy epoksydowej zawierającej aktywowane termicznie środki sieciujące.

Przedstawiono także proces odlewania tworzyw oraz materiały stosowane na osnowę i wzmocnienie w odlewach kompozytowych. Przedmiotem badań były właściwości wytrzymałościowe odlewów wykonanych z dwuskładnikowych żywic poliuretanowej oraz epoksydowej napełnionych włóknem szklanym o różnej postaci.

Zaprezentowano wybrane trendy i uwarunkowania w zakresie efektywności energetycznej w przetwórstwie tworzyw polimerowych. Sposób oceny, analizę i kierunki działań w zakresie zużycia energii w procesach przetwarzania tworzyw oraz znaczenie zasadności redukcji jej zużycia. Zużycie energii było również przedmiotem analiz na przykładzie efektywności energetycznej procesu przetwarzania wtryskowego polimerów.

Przedstawiono nowy trend jakim jest zastosowanie technologii addytywnych do wytwarzania zrównoważonych gniazd form nowej generacji dla przetwórstwa rozdmuchowego i wtryskowego tworzyw. Technologie te umożliwiają wykonywanie gniazd form z regulowanymi, konformalnymi strefami odprowadzenia ciepła.

Przedstawione w opracowaniu rezultaty badań naukowych, mogą być przydatne do zastosowania w dalszych pracach nad doskonaleniem poszczególnych metod przetwarzania tworzyw polimerowych, oraz mogą być pomocne przy doborze warunków przetwórstwa.

Emil Sasimowski

1. Wpływ rozwiązania konstrukcyjnego ślimaków w wylączarce dwuślimakowej współbieżnej na wybrane właściwości otrzymywanych mieszanin polimerowych. Cz. 2

Badania termiczne

Mieszaniny polimerowe sporządzano przy użyciu wylączarki dwu- ślimakowej współbieżnej wyposażonej w dwa typy ślimaków [1]. Konstrukcje ślimaków dobierano doświadczalnie na podstawie wieloletnich doświadczeń i analizy wyników prac prowadzonych w Instytucie IMPiB, związanych z nowymi konstrukcjami wylączarek do tworzyw polimerowych. Wybrano konstrukcje, które okazały się być najbardziej efektywne w mieszaniu składników kompozycji tworzywo – napelniaacz.

Surowce występujące w formie pierwotnej, granulowanej wstępnie mieszano i zasypywano do leja wylączarki. Taki sposób przygotowywania mieszanek należy do najprostszych stosowanych w praktyce przemysłowej. Przetwórstwo tworzyw lub ich mieszanin przebiegało dwukrotnie w sposób symulujący recykling rzeczywisty wg tabeli 1 [1].

Surowce przed pobraniem do prób poddawano suszeniu wg standardowych procedur, tj. 105°C przez 1 h. Granulat PET wymagał wstępnego suszenia w suszarce dehumidyfikacyjnej w temperaturze 180°C w ciągu 4 h {punkt rosenia (-)41°C}. Dodatkowe suszenie przebiegało w temperaturze przetwórstwa przy wykorzystaniu podwójnego odgazowania w zastosowanej wylączarce typu W2W.

Temperaturę przetwórstwa poszczególnych polimerów dobierano zgodnie z wytycznymi normy dotyczącej prowadzenia oznaczeń wskaźnika płynięcia MFR; w przypadku mieszanin – dla polimeru o wyższej temperaturze topnienia, według tabeli 2 [2].

Badaniom poddawano zarówno granulaty tworzyw pierwotnych (0R), tworzyw pierwotnych przetworzonych z udziałem dwu konfiguracji ślimaków (2R-I, 2R-II) oraz ich mieszanin, jak również kształtki z nich wykonane do badań fizykochemicznych [3].

Podczas realizacji badań termicznych, za pomocą zastosowanych metod badawczych, tj.: DSC, TGA, HDT czy OIT starano się uzyskać jak najwięcej informacji na temat zmian zachodzących w strukturze badanych materiałów [4, 5].

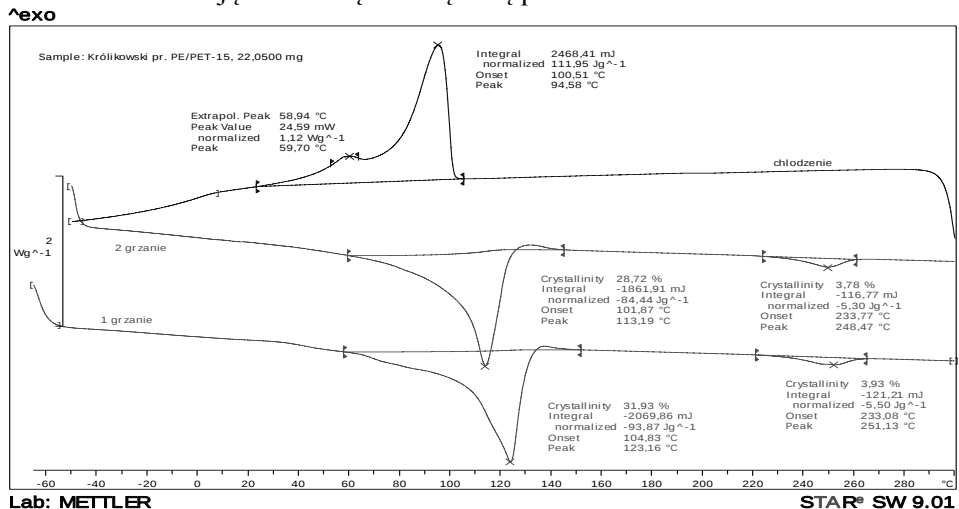
Badania DSC

Na rys. 1 przedstawiono przykładowo przebieg i rejestrację krzywych DSC dla cyklu trzech przebiegów termicznych badanej mieszaniny polimerowej PE/PET-15. Wyraźnie widać dwufazowość struktury wskazującą temperaturę

topnienia dwu tworzyw, tj. PE i PET a w szczególności stopień krystaliczności próbek.

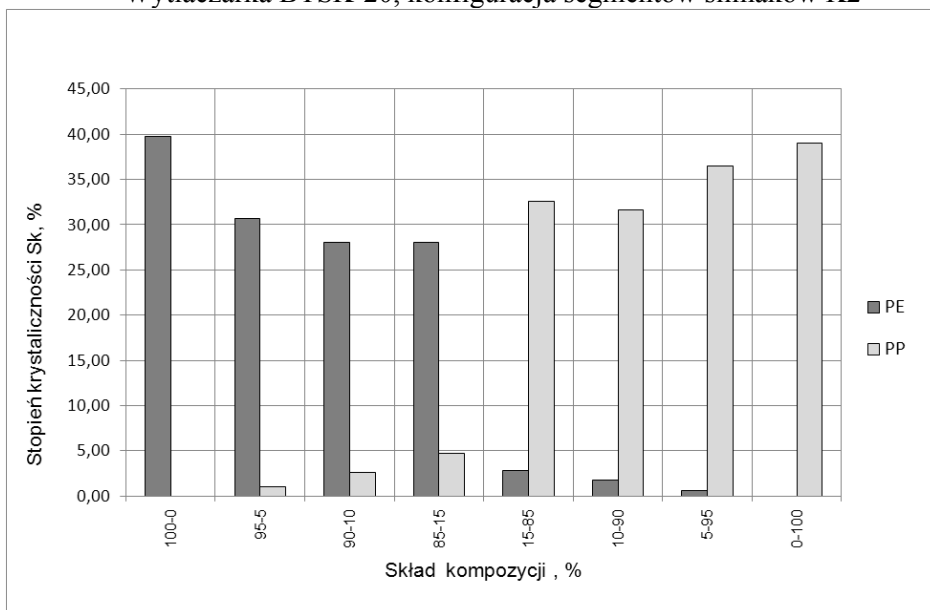
Wyniki badań termicznych DSC, które można byłoby również rozważać jako badania struktury [6, 7], zestawiono w tabeli 1 oraz przedstawiono graficznie na rysunkach 2–9. Na rysunkach tych zestawiono wyniki badań wpływu wzajemnej obecności FR na stopień krystaliczności OP dla regranulatów mieszanin otrzymanych przy użyciu konfiguracji K2 i K5A. Tabela 1 zawiera porównanie wyników badań termicznych próbek tworzyw przetwarzanych, otrzymanych podczas regranulowania z użyciem konfiguracji segmentów ślimaków K2 i K5A w porównaniu do wyników badań DSC tworzyw pierwotnych, badanych podczas procedury wyznaczania wartości parametrów, tj. temperatury topnienia i stopnia krystaliczności za pomocą 3 przebiegów termicznych w cyklu (nagrzewanie – chłodzenie – nagrzewanie). Zauważa się niewielkie, nieistotne zmiany wartości T_m i SK dla tych tworzyw przy zmiennej konfiguracji układu uplastyczniającego. Wyjątek stanowi tworzywo PET, którego wartość SK podczas przetwarzania znacznie obniża się w stosunku do wartości dla PET pierwotnego (patrz: tab. 1).

W przypadku mieszanin do rozważań wzięto jedynie wpływ obecności FR na stopień krystaliczności OP. Jest on niewielki, zarówno dla mieszanin tworzyw krystaliczno-amorficznych (jak np. PE/PS) jak i krystaliczno-krystalicznych (jak np. PE/PP, PE/PET – rysunki 2–5, 6–9). Osnowa zarówno w mieszaninach tworzyw krystaliczno – amorficznych jak i krystaliczno – krystalicznych zachowuje swój stopień krystaliczności na prawie niezmienionym poziomie. Wpływa natomiast na stopień krystaliczności fazy rozproszonej, powodując jej znaczne obniżenie zakłócając strukturę wewnętrzną polimeru.



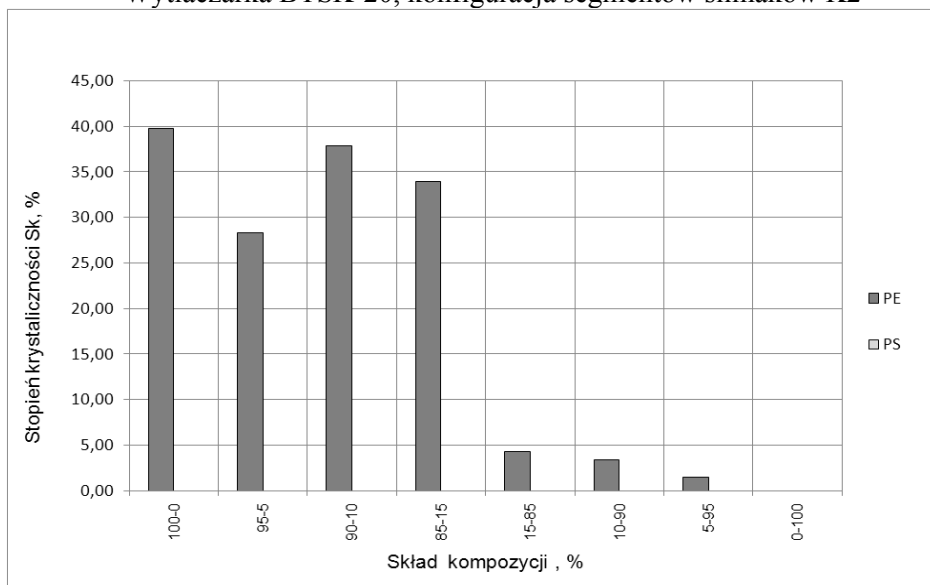
Rys. 1. Przykładowy przebieg krzywych DSC dla badanej mieszaniny polimerowej PE/PET-15 przetwarzanej za pomocą konfiguracji segmentów ślimaków K5A

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2



Rys. 2. Wpływ obecności fazy rozproszonej na stopień krystaliczności osnowy polimerowej na podstawie badań DSC

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2



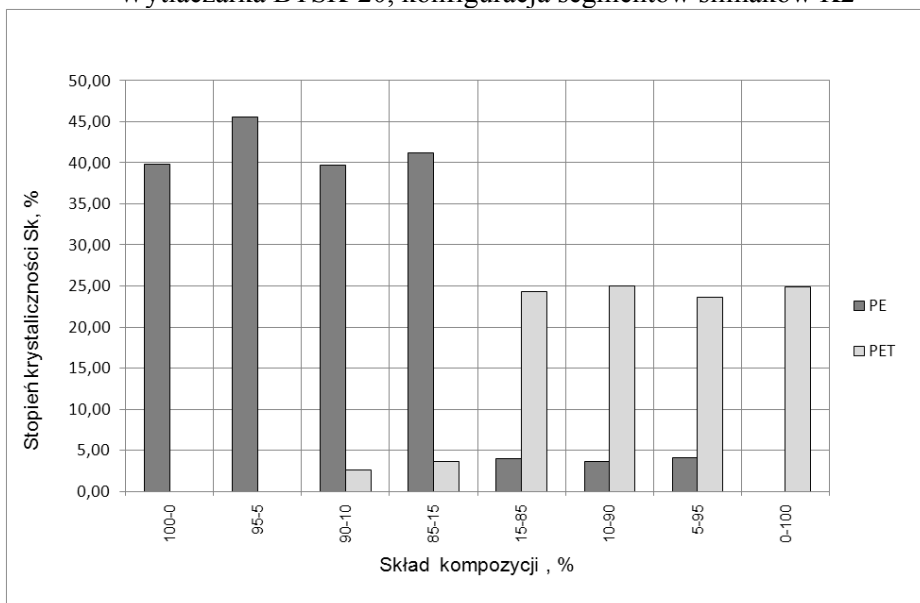
Rys. 3. Wpływ obecności fazy rozproszonej na stopień krystaliczności osnowy polimerowej na podstawie badań DSC

Tabela 1. Porównanie wyników badań termicznych (DSC) polimerów pierwotnych w wyłazarce W2W (BTSC-20) z użyciem ślimaków K2 i K5A

Nr próbki	Materiał	DSC							
		I bieg			II bieg – chłodzenie			III bieg	
		T _g , °C	S _K , %	T _m , °C	T ₁ , °C	T ₂ , °C	T _g , °C	S _K , %	T _m , °C
1.	PE (OR)		37,80	119,1	58,5	89,8		37,95	117,7
2.	PP (OR)		39,24	167,9		105,0		39,15	164,5
3.	PS (OR)	97,9					92,6		
4.	PET (OR)	79,3	43,36	241,6		162,7		25,41	246,9
5.	PVC (OR)	(-) 7,9					3,7		
DSC K2									
6.	PE (2R-I)		39,78	115,4	61,5	95,1		38,91	112,1
7.	PP (2R-I)		39,06	169,6		110,3		41,02	163,6
8.	PS (2R-I)	97,0					92,8		
9.	PET (2R-I)	74,4	24,94	254,2		190,3	84,1	23,88	248,6
10.	PVC (2R-I)	(-) 10,6					0,5		
DSC K5A									
11.	PE (2R-II)		39,58	120,3	60,3	95,0		39,71	112,3
12.	PP (2R-II)		40,45	168,4		108,4		43,37	163,4
13.	PS (2R-II)	96,9					91,3		
14.	PET (2R-II)	73,6	25,53	253,7		185,1		24,63	247,7
15.	PVC (2R-II)	–	–	–	–	–	–	–	–

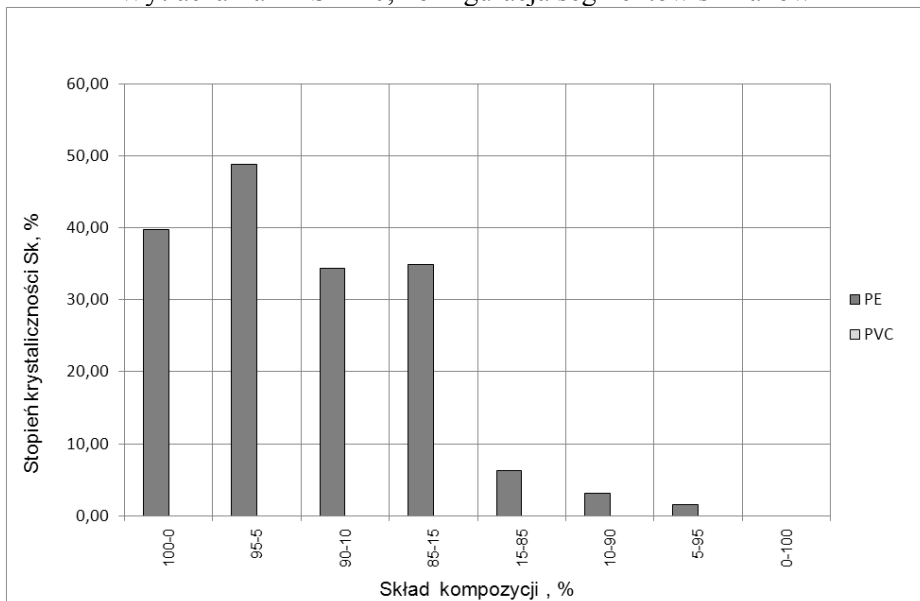
Dodatkowe oznaczenia w tabeli: T_g – temperatura przejścia szklстого, T_m – temperatura topnienia fazy krystalicznej polimeru, SK – stopień krystaliczności, T₁, T₂ – temperatura krzepnięcia różnych frakcji polimeru podczas cyklu chłodzenia

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2



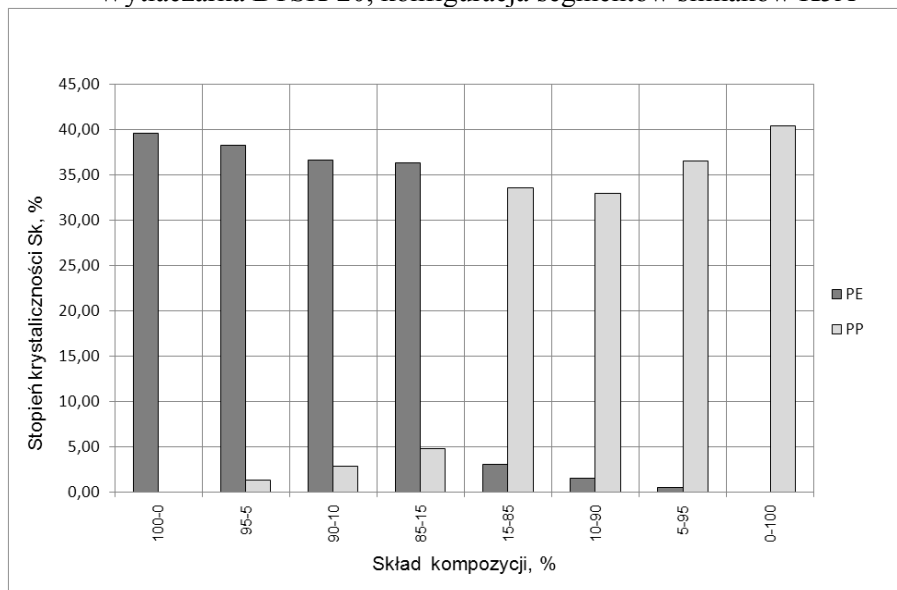
Rys. 4. Wpływ obecności fazy rozproszonej na stopień krystaliczności osnowy polimerowej na podstawie badań DSC

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2



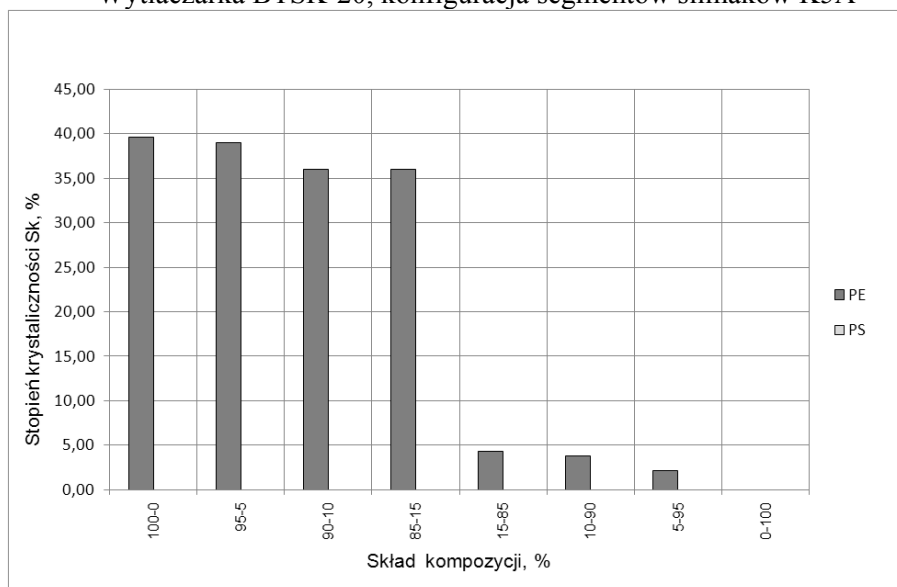
Rys. 5. Wpływ obecności fazy rozproszonej na stopień krystaliczności osnowy polimerowej na podstawie badań DSC

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K5A



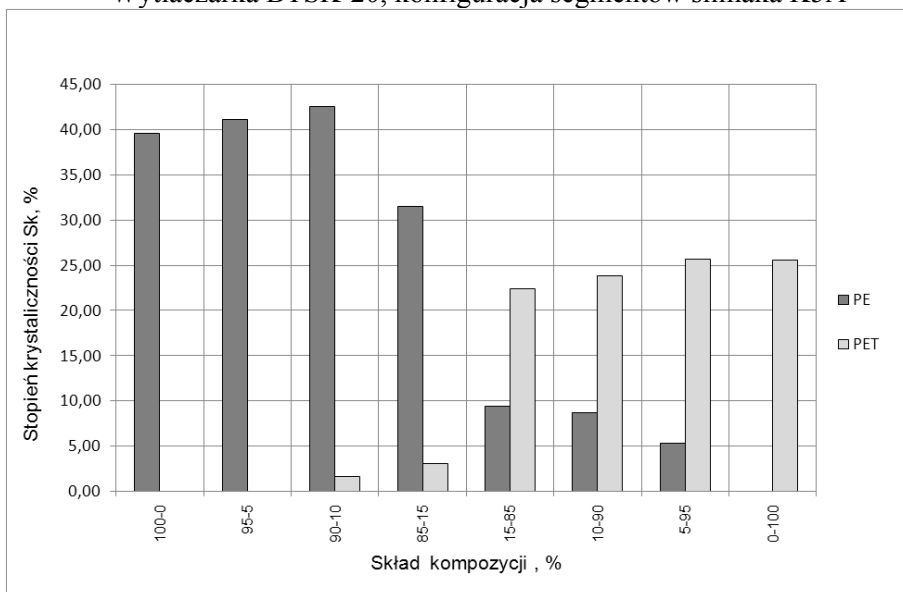
Rys. 6. Wpływ obecności fazy rozproszonej na stopień krystaliczności osnowy polimerowej na podstawie badań DSC

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K5A



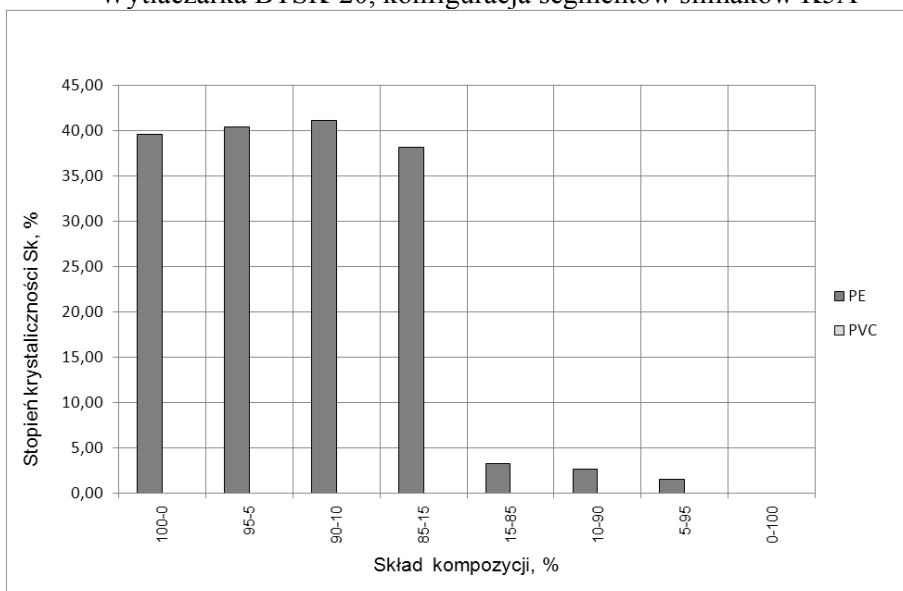
Rys. 7. Wpływ obecności fazy rozproszonej na stopień krystaliczności osnowy polimerowej na podstawie badań DSC

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaka K5A



Rys. 8. Wpływ obecności fazy rozproszonej na stopień krystaliczności osnowy polimerowej na podstawie badań DSC

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K5A



Rys. 9. Wpływ obecności fazy rozproszonej na stopień krystaliczności osnowy polimerowej na podstawie badań DSC

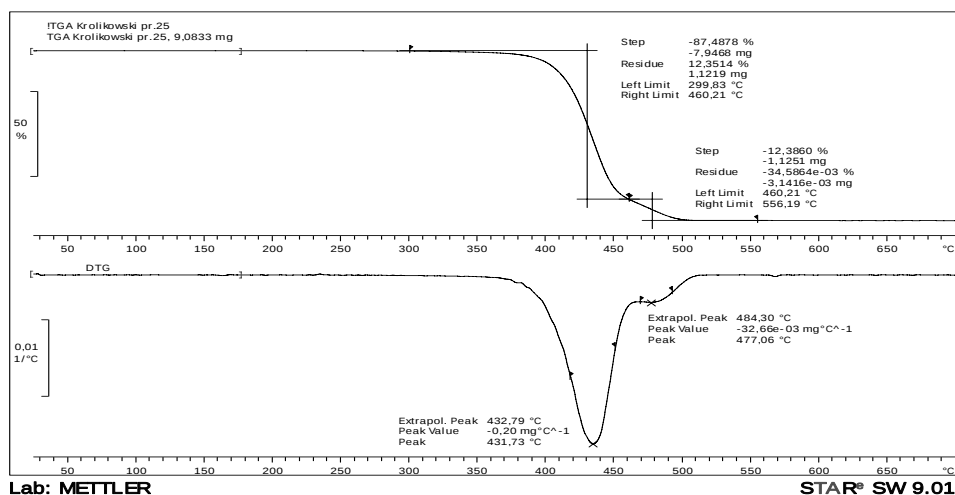
Badania termograwimetryczne TGA

Na rys. 10 przedstawiono przykładowo przebieg krzywych TGA dla badanej mieszaniny polimerowej PS/PE-15 przetwarzanej za pomocą konfiguracji segmentów ślimaków K2. Wyraźnie widoczna jest dwufazowość struktury mieszaniny, a więc osobne piki dla PS (niższa średnia temperatura rozkładu) i PE (wyższa średnia temperatura rozkładu) [5].

Wyniki badań TGA zestawiono w tabeli 2 i na rysunkach 11–26. Na rysunkach tych zgromadzono wyniki badań wpływu wzajemnej obecności FR na temperaturę początkową T_P i średnią T_{SR} rozkładu OP dla regranulatów mieszanin otrzymanych przy użyciu konfiguracji K2 i K5A.

Tabela 2 zawiera porównanie wyników badań termicznych próbek tworzyw przetwarzanych podczas regranulowania z użyciem ślimaków K2 i K5A w porównaniu do wyników badań TGA tworzyw pierwotnych, z uwzględnieniem temperatury końca rozkładu tworzyw T_K .

Zauważa się wyraźny spadek wartości początku temperatury rozkładu dla wszystkich tworzyw w zależności od zwiększającej się funkcji mieszającej ślimaków, tj. K2 i K5A. Świadczyć to może o częściowej degradacji tworzyw. Zauważa się także prawie niezmiennie wartości średniej temperatury rozkładu T_{SR} określanej dla tychże tworzyw w tych samych warunkach. Z tej samej tabeli wynika również fakt podwyższania się temperatury końcowej rozkładu tworzyw T_K .

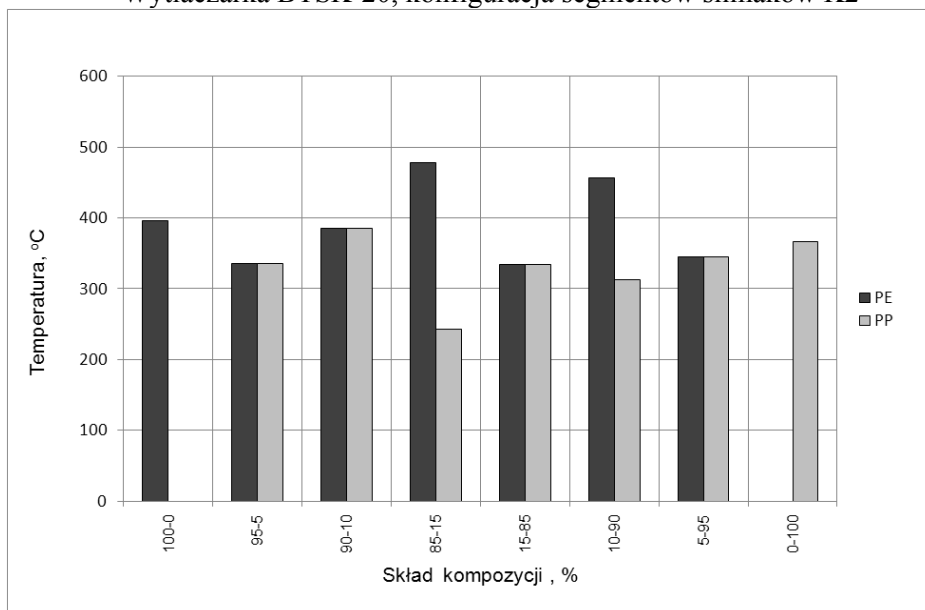


Rys. 10. Przykładowy przebieg krzywych TGA dla badanej mieszaniny polimerowej PS/PE-15 przetwarzanej za pomocą ślimaków K2

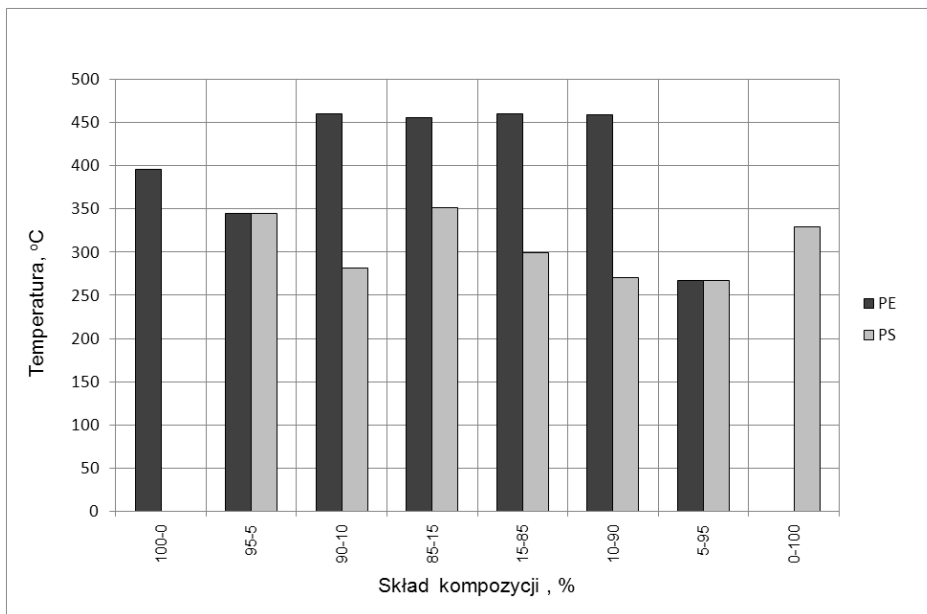
Tabela 2. Porównanie wyników badań termograwimetrycznych (TGA) polimerów pierwotnych, przetwarzanych na wytłaczarce W2W (BTSK 20) z użyciem ślimaków K2 i K5A

Nr próbki	Materiał	TGA		
		T _P , °C	T _K , °C	T _{SR} , °C
1.	PE (0R)	410	521	481
2.	PP (0R)	387	504	468
3.	PS (0R)	346	463	427
4.	PET (0R)	377	524	450
5.	PVC (0R)	223 415	360 581	317 480
TGA K2				
6.	PE (2R-I)	396	541	488
7.	PP (2R-I)	367	534	476
8.	PS (2R-I)	329	483	428
9.	PET (2R-I)	366	530	455
10.	PVC (2R-I)	224 390	363 562	314 479
TGA K5A				
11.	PE (2R-II)	331	654	478
12.	PP (2R-II)	315	651	467
13.	PS (2R-II)	293	656	426
14.	PET (2R-II)	331	684	456
15.	PVC (2R-II)	209	698	310

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2

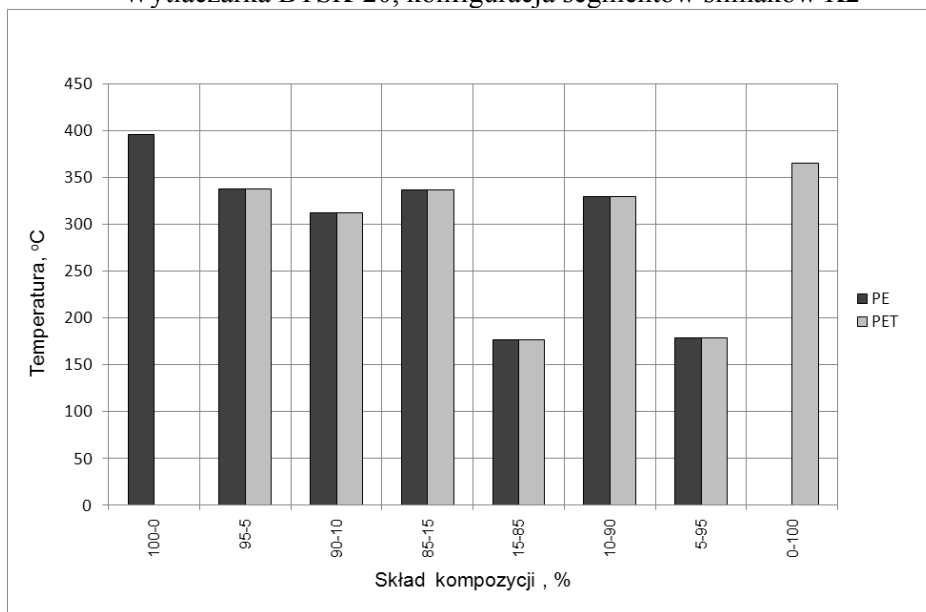


Rys. 11. Wpływ obecności fazy rozproszonej na temperaturę początkową TP rozkładu osnowy polimerowej na podstawie badań TGA

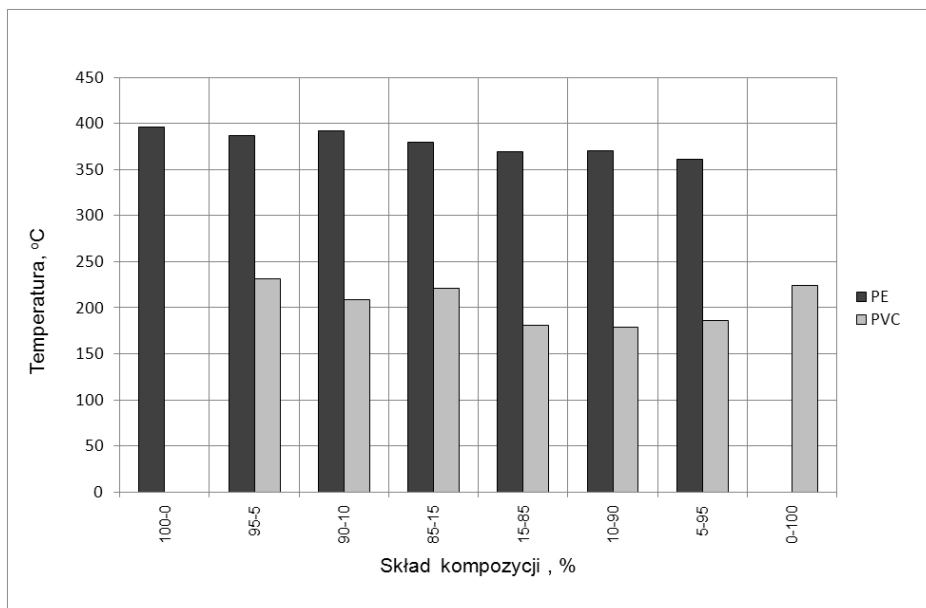


Rys. 12. Wpływ obecności fazy rozproszonej na temperaturę początkową TP rozkładu osnowy polimerowej na podstawie badań TGA

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2

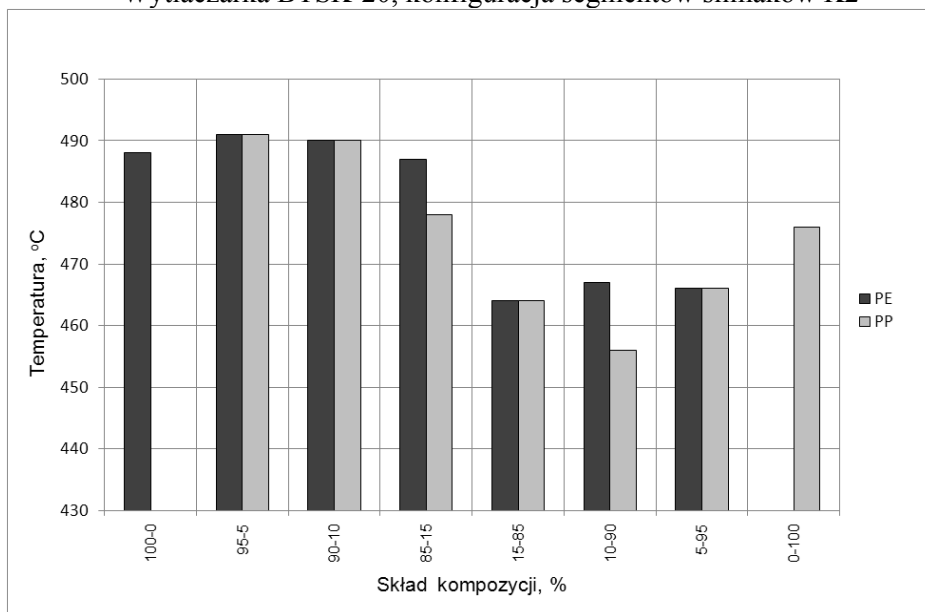


Rys. 13. Wpływ obecności fazy rozproszonej na temperaturę początkową TP rozkładu osnowy polimerowej na podstawie badań TGA

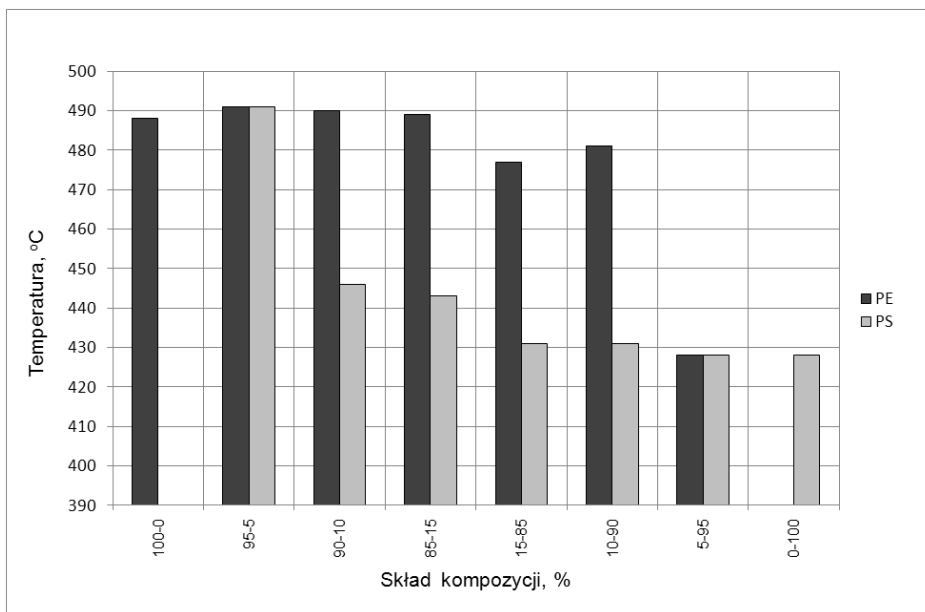


Rys. 14. Wpływ obecności fazy rozproszonej na temperaturę początkową TP rozkładu osnowy polimerowej na podstawie badań TGA

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2

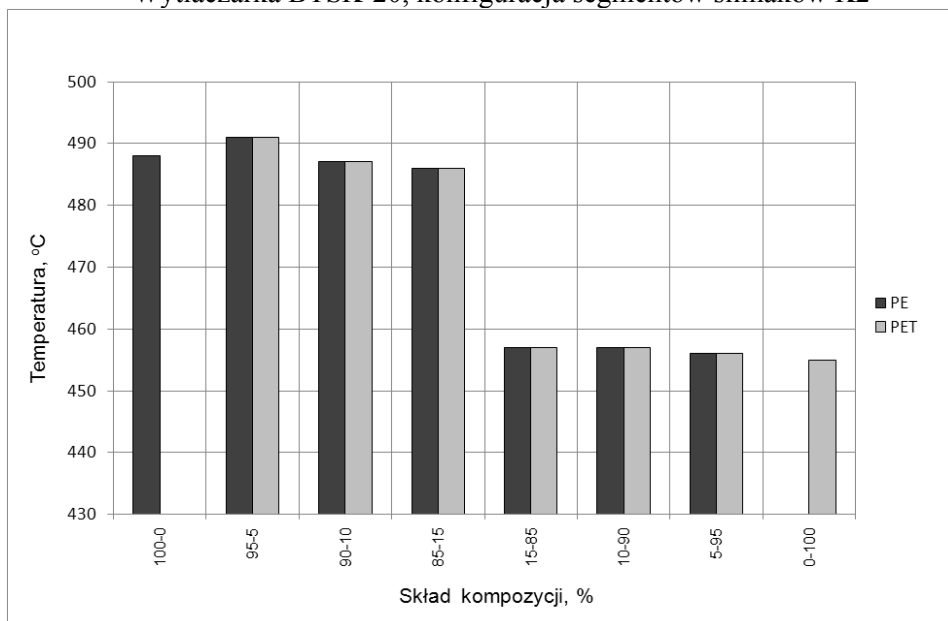


Rys. 15. Wpływ obecności fazy rozproszonej na średnią temperaturę TSR rozkładu osnowy poli-
merowej na podstawie badań TGA

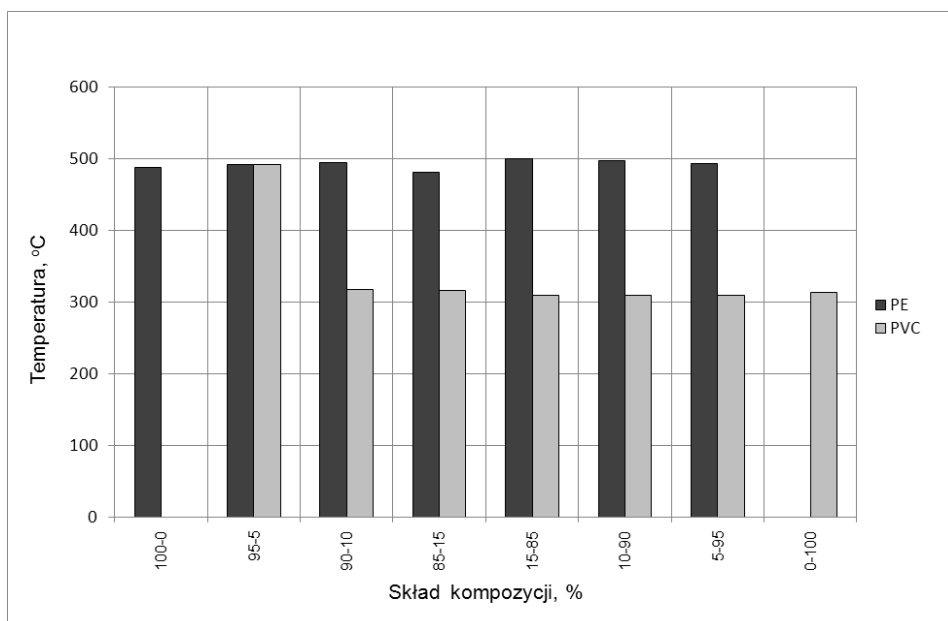


Rys. 16. Wpływ obecności fazy rozproszonej na średnią temperaturę TSR rozkładu osnowy poli-
merowej na podstawie badań TGA

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2

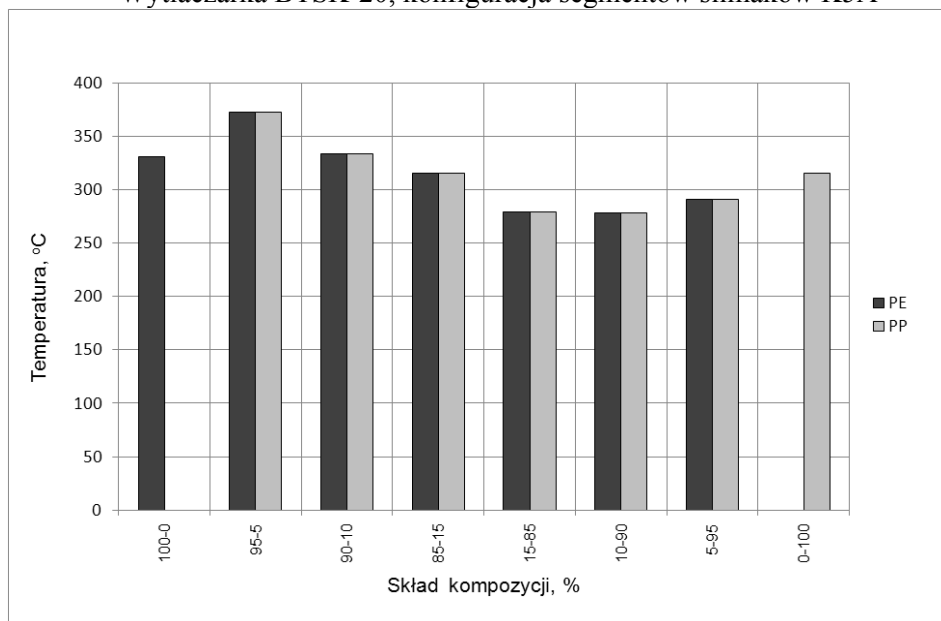


Rys. 17. Wpływ obecności fazy rozproszonej na średnią temperaturę TSR rozkładu osnowy poli-
merowej na podstawie badań TGA

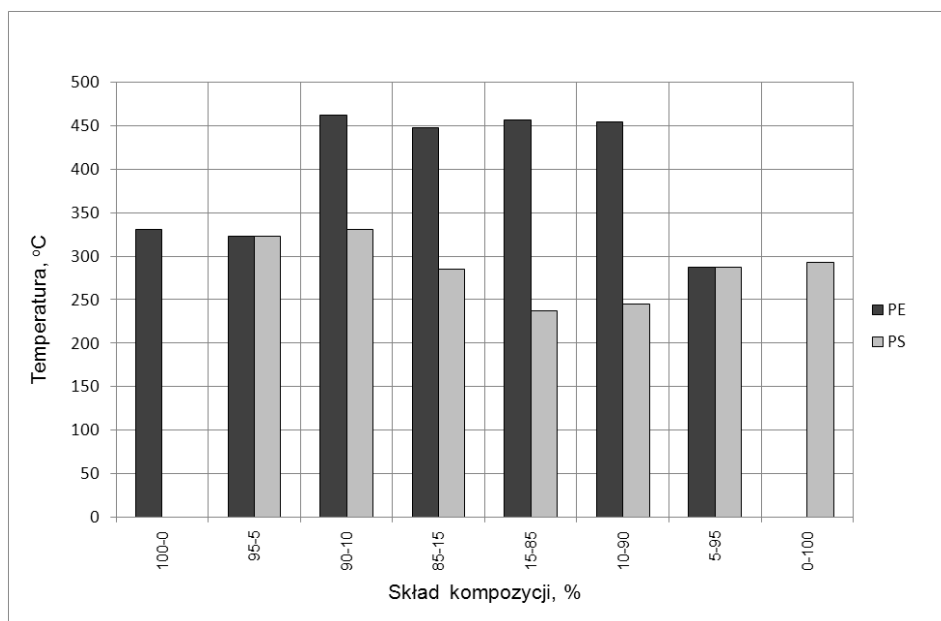


Rys. 18. Wpływ obecności fazy rozproszonej na średnią temperaturę TSR rozkładu osnowy poli-
merowej na podstawie badań TGA

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K5A

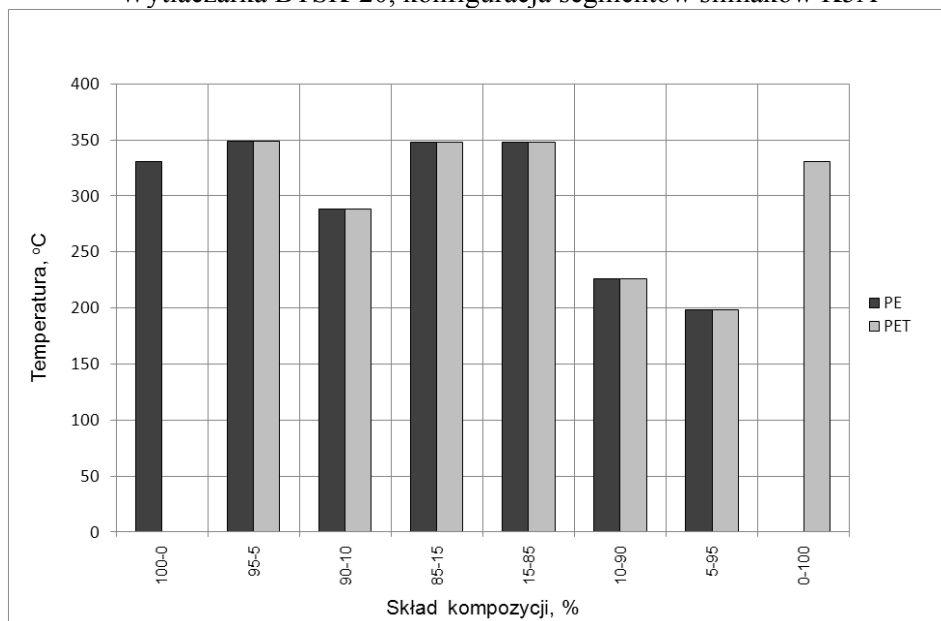


Rys. 19. Wpływ obecności fazy rozproszonej na temperaturę początkową TP rozkładu osnowy polimerowej na podstawie badań TGA

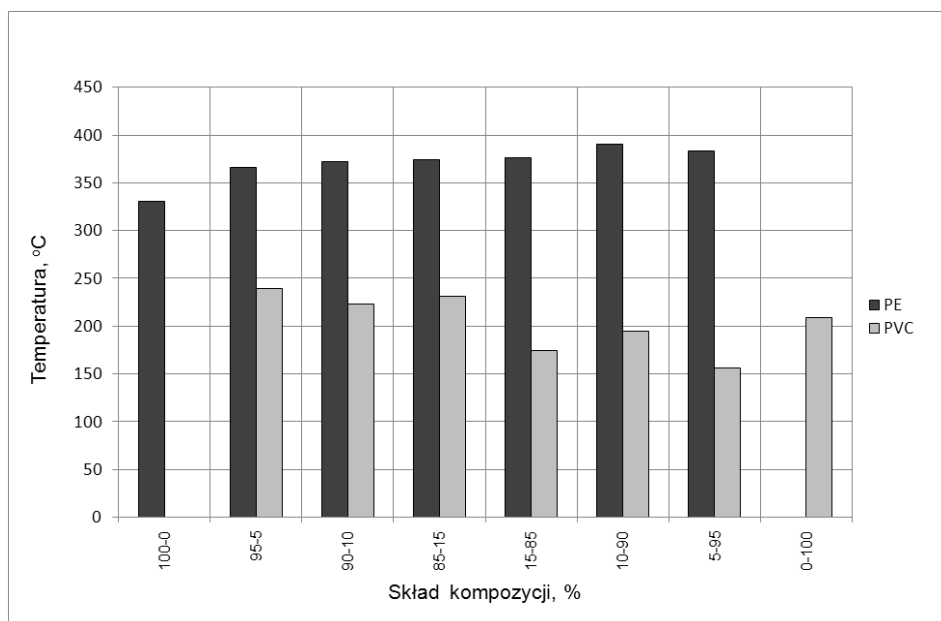


Rys. 20. Wpływ obecności fazy rozproszonej na temperaturę początkową TP rozkładu osnowy polimerowej na podstawie badań TGA

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K5A

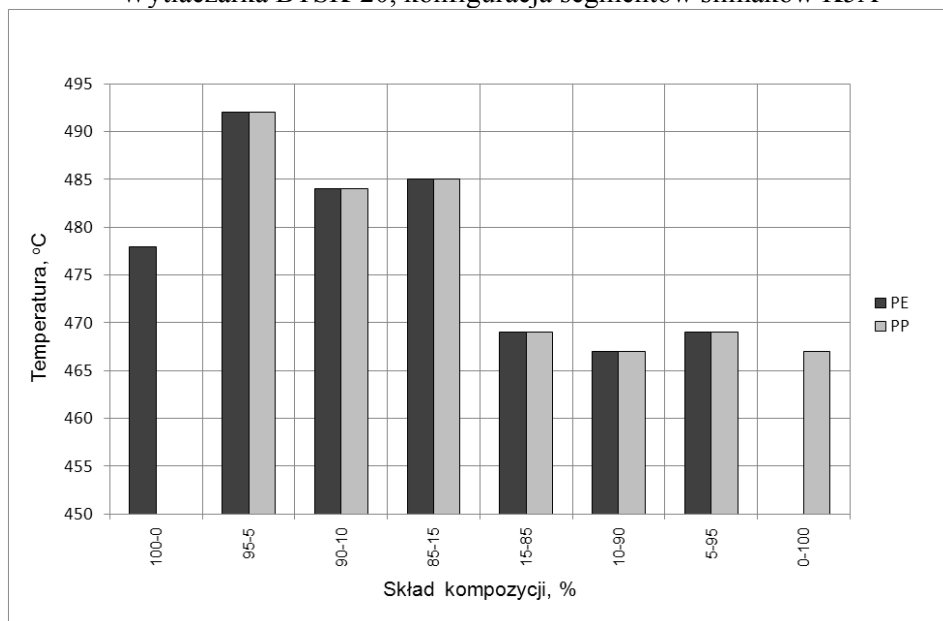


Rys. 21. Wpływ obecności fazy rozproszonej na temperaturę początkową TP rozkładu osnowy polimerowej na podstawie badań TGA

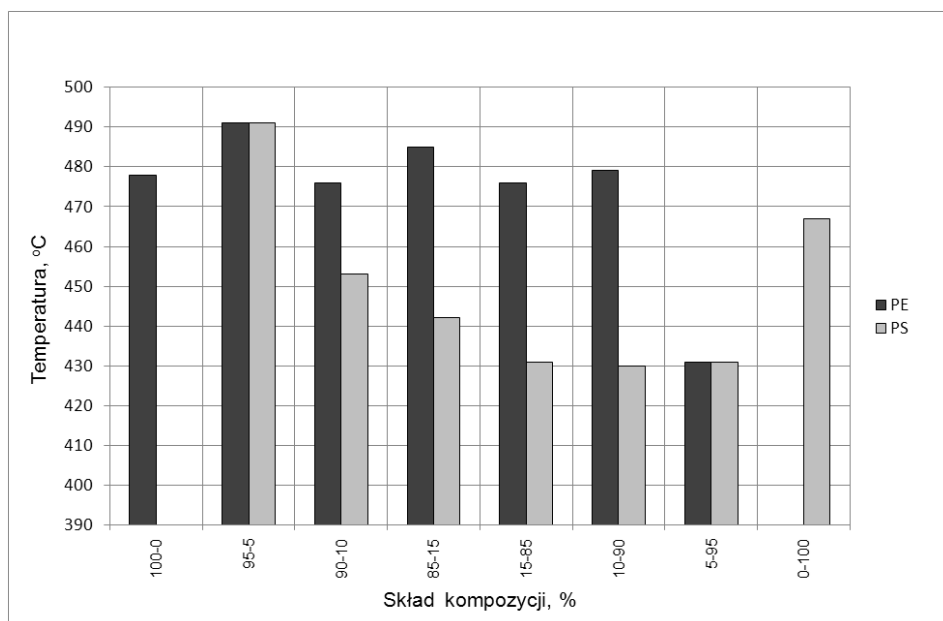


Rys. 22. Wpływ obecności fazy rozproszonej na temperaturę początkową TP rozkładu osnowy polimerowej na podstawie badań TGA

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K5A

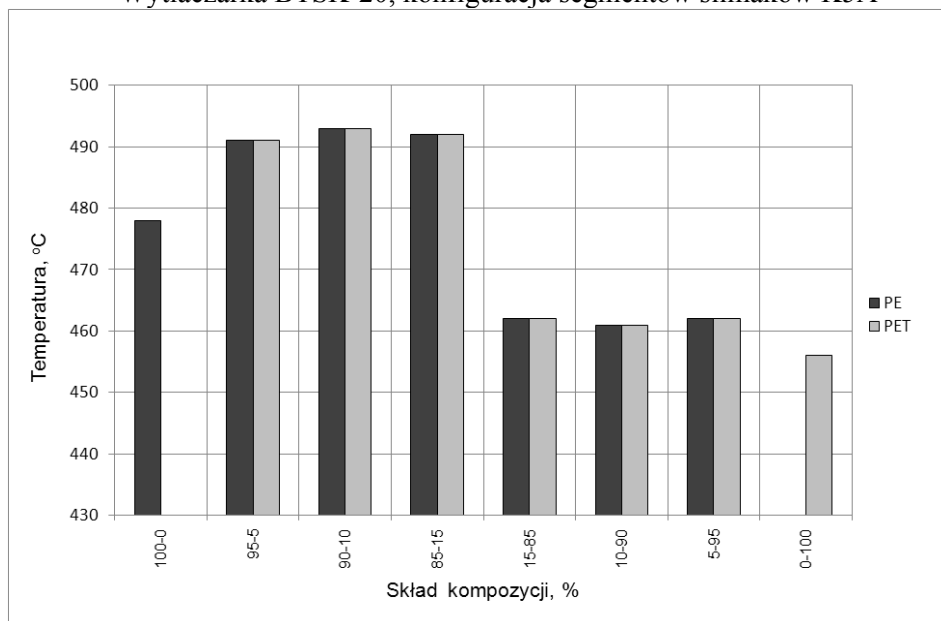


Rys. 23. Wpływ obecności fazy rozproszonej na średnią temperaturę TSR rozkładu osnowy poli-
merowej na podstawie badań TGA

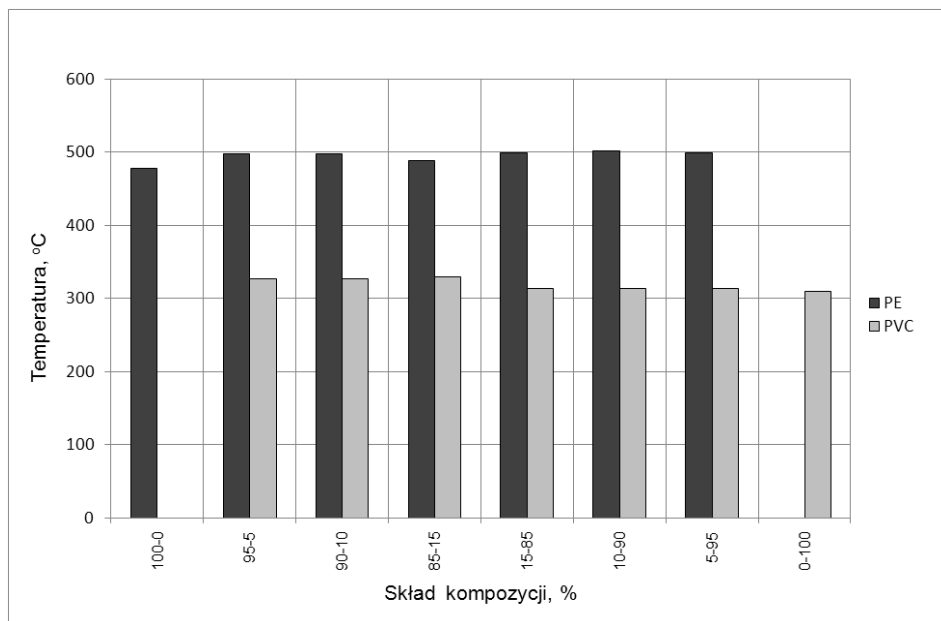


Rys. 24. Wpływ obecności fazy rozproszonej na średnią temperaturę TSR rozkładu osnowy poli-
merowej na podstawie badań TGA

Wytłaczarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K5A



Rys. 25. Wpływ obecności fazy rozproszonej na średnią temperaturę TSR rozkładu osnowy poli-
merowej na podstawie badań TGA



Rys. 26. Wpływ obecności fazy rozproszonej na średnią temperaturę TSR rozkładu osnowy poli-
merowej na podstawie badań TGA

Oznacza to, że badane tworzywa regranulowane w stosunku do pierwotnych wykazują szersze pasmo rozkładu, co może być wywołane pojawianiem się nowych frakcji o innej, niższej lub wyższej masie cząsteczkowej, pochodzących z częściowego rozkładu oraz rekombinacji rodnikowej łańcucha węglowego tworzyw.

Uogólniając wyniki obserwacji wartości T_{SR} rozkładu badanych tworzyw można je próbować rozpatrywać jako pewnego rodzaju „wypadkową” zjawisk termicznych zachodzących podczas ich przetwarzania, pomimo dużych zmian w wartościach T_P i T_K . Niewielkie zmiany T_{SR} wskazują na zachowanie charakteru tworzywa pomimo różnych warunków przetwórstwa.

W przypadku tworzywa PVC zauważa się wyraźnie dwie frakcje ulegające rozkładowi. Pierwsza faza pochodzi od tworzywa podstawowego a druga prawdopodobnie od zmiękczacza polimerycznego.

Nieco inaczej zachowują się wartości T_P i T_{SR} mieszanin tworzyw przetwarzanych z użyciem konfiguracji ślimaków K2 i K5A (rysunki 11–26). W niektórych przypadkach mieszanin polimerowych zauważa się występowanie dwu faz pochodzących od dwu niezmiyszanych tworzyw, zarówno mieszanin regranulowanych przy użyciu ślimaków K2 jak i K5A. Takie zjawisko obserwuje się przy wyższych stężeniach FR w OP (najczęściej powyżej 10% mas.) dla mieszanin PE/PP, PE/PS, PE/PVC regranulowanych na za pomocą ślimaków K2 i dla mieszanin PE/PS i PE/PVC regranulowanych za pomocą ślimaków K5A. Przykład przetwarzanych mieszanin PE/PP (ślimaki K2) i PE/PP (ślimaki K5A) wskazuje na fakt, że lepsze wymieszanie tworzyw powoduje ujednolicenie struktury i w przypadku mieszanin PE/PP (ślimaki K5A) zanika dwufazowość mieszaniny.

Interesujące jest zachowanie się mieszanin PE/PET dla obu konfiguracji segmentów ślimaków, K2 i K5A, gdzie dwufazowość w ogóle nie ujawnia się (rys. 13 i 17 oraz 21 i 25), pomimo wyraźnej dwufazowości prezentowanej w pracach [6, 7] gdzie można określić ściśle wymiary cząstek FR w OP jako osobnej fazy obserwowanej na fotografiach SEM. Wyjaśnieniem wydaje się być fakt podobnych temperatur początku rozkładu tworzyw PE i PET po przetwórstwie z udziałem ślimaków K2 i K5A w stosunku do takich wartości dla tworzyw pierwotnych jak również mieszanin PE/PP po przetwórstwie na K5A.

Badania HDT

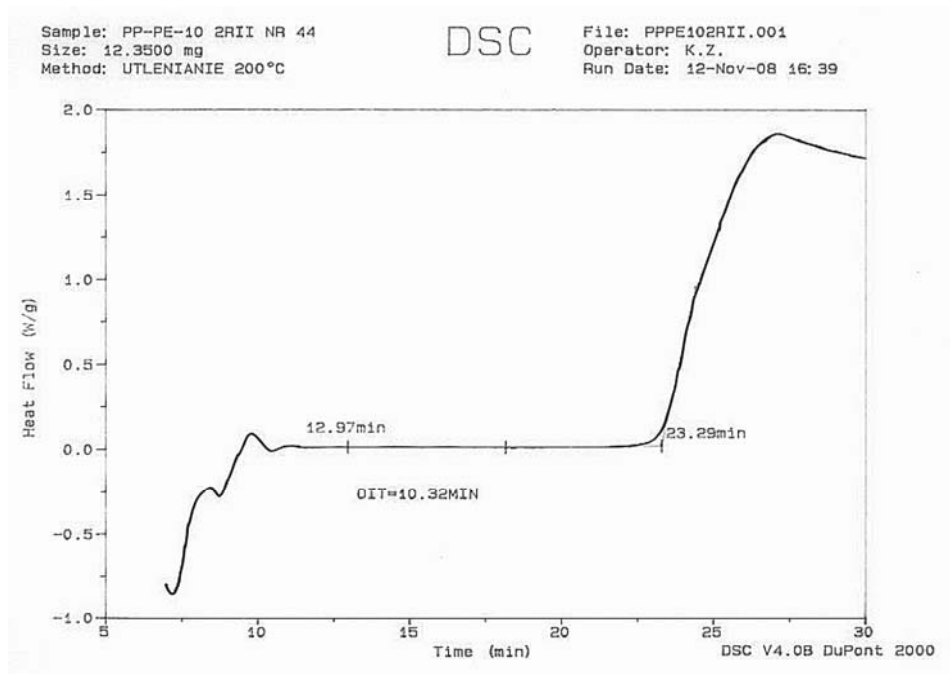
Wyniki badań HDT zestawiono w tabeli 3. Ze względu na fakt, że nie dla wszystkich próbek można oznaczyć wartości HDT, zrezygnowano z przedstawienia graficznego wyników poprzestając na komentarzu do wyników tabelarycznych. Badania HDT można było wykonać tylko dla próbek, które w warunkach normalnych zachowują odpowiednią sztywność. Nie badano PE i PVC jak również mieszanin zawierających PE jako osnowę polimerową.

Dla tworzywa PP wartość HDT spada po przetwórstwie z udziałem ślimaków K2 i K5A w porównaniu do tworzywa pierwotnego. Sugerować to może głębsze zmiany w strukturze PP związane z degradacją tworzywa. Inne tworzywa zachowują prawie niezmienną wartość HDT, niezależnie od rodzaju przetwórstwa.

W przypadku mieszanin, w których PE pozostaje fazą rozproszoną (PS i PET z PE), wartości HDT pozostają na prawie niezmienionym poziomie w obrębie tych samych serii pomiarów, co może świadczyć o niewielkim wpływie PE na wartość HDT i dobrej stabilności tworzyw osnowy.

Badania OIT

Na rys. 27 pokazano przykładowo przebieg krzywej OIT dla mieszaniny polimerowej PP/PE-10, przetworzonej z udziałem ślimaków K5A podczas określania czasu indukcji utlenienia. Wartość czasu OIT w tym przypadku, wynoszącą powyżej 10 min. należy uznać za wysoką.



Rys. 27. Przykładowy przebieg krzywej OIT dla badanej mieszaniny polimerowej PP/PE-10 przetwarzanej za pomocą konfiguracji segmentów ślimaków K5A

Wyniki badań OIT zawiera tabela 4. W sposób graficzny rezultaty badań OIT przedstawiono na rys. 28 i 29. Przetwarzanie polimerów wyjściowych PE i PP za pomocą ślimaków K2 i K5A (próbki 1, 2, 6, 7, 11, 12) wykazuje, że wartości OIT dla tych tworzyw spadają. Wartość OIT dla PP jest wysoka, gdyż polimer

ten jest wysoko stabilizowany (tabela 4, próbki 2, 7, 12). Stąd również wysokie wartości OIT dla mieszanin PP/PE przetwarzanych za pomocą ślimaków K2 i K5A. Podobnie wysokie wartości OIT wykazują mieszaniny PVC/PE dla K2 i K5A, gdyż PVC jest również dobrze stabilizowany. Wartości OIT mogą dochodzić do 40 min. Wzrost zawartości PP lub PVC w badanych mieszaninach polimerowych skutecznie podwyższa ich wartości OIT.

W przypadku innych mieszanin, np. PE/PS czy PE/PET czas ten nie przekracza kilku minut.

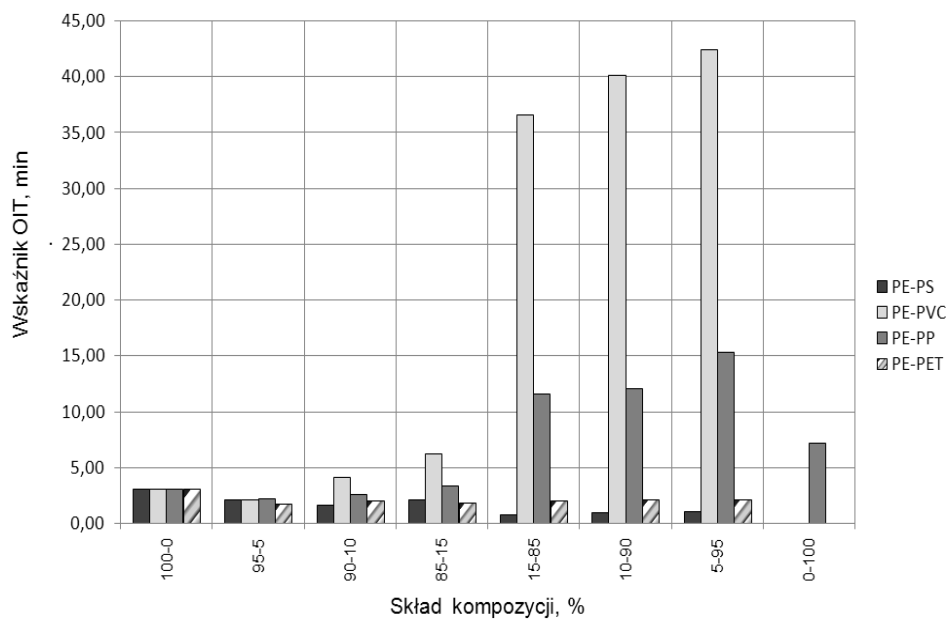
Tabela 3. Temperatura HDT ugięcia próbek tworzyw pierwotnych i mieszanin polimerowych pod obciążeniem

Nr próbki	Skład próbki	Wartość HDT, °C
2	PP (0R)	102,0
3	PS (0R)	84,6
4	PET (0R)	70,3
7	PP (2R-I)	93,2
8	PS (2R-I)	84,0
9	PET (2R-I)	70,3
12	PP (2R-II)	80,9
13	PS (2R-II)	84,0
14	PET (2R-II)	71,9
19	PP/PE-15 (2R-I)	82,8
20	PP/PE-10 (2R-I)	82,1
21	PP/PE-5 (2R-I)	87,2
25	PS/PE-15 (2R-I)	86,8
26	PS/PE-10 (2R-I)	88,4
27	PS/PE-5 (2R-I)	87,6
31	PET/PE-15 (2R-I)	73,4
32	PET/PE-10 (2R-I)	73,5
33	PET/PE-5 (2R-I)	74,3
43	PP/PE-15 (2R-II)	79,3
44	PP/PE-10 (2R-II)	79,2
45	PP/PE-5 (2R-II)	80,0
49	PS/PE-15 (2R-II)	88,4
50	PS/PE-10 (2R-II)	88,1
51	PS/PE-5 (2R-II)	87,2
55	PET/PE-15 (2R-II)	70,4
56	PET/PE-10 (2R-II)	71,2
57	PET/PE-5 (2R-II)	71,7

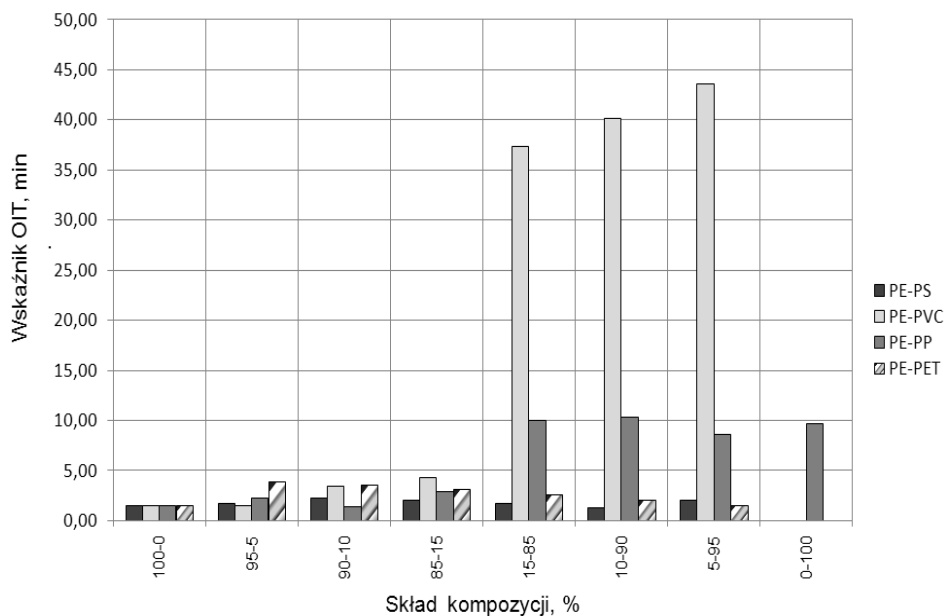
Tabela 4. Wyniki badań OIT dla tworzyw pierwotnych i mieszanin polimerowych

Lp.	Materiał	OIT, min	Lp.	Materiał	OIT, min
1	PE (0R)	0,95	33	PET/PE-5 (2R-I)	2,14
2	PP (0R)	15,04	34	PE/PVC-5 (2R-I)	2,12
3	PS (0R)	0	35	PE/PVC-10 (2R-I)	4,07
4	PET (0R)	0	36	PE/PVC-15 (2R-I)	6,22
5	PVC (0R)	0	37	PVC/PE-15 (2R-I)	36,6
6	PE (2R-I)	3,07	38	PVC/PE-10 (2R-I)	40,08
7	PP (2R-I)	7,14	39	PVC/PE-5 (2R-I)	42,42
8	PS (2R-I)	0	40	PE/PP-5 (2R-II)	2,27
9	PET (2R-I)	0	41	PE/PP-10 (2R-II)	1,44
10	PVC (2R-I)	0	42	PE/PP-15 (2R-II)	2,85
11	PE (2R-II)	1,5	43	PP/PE-15 (2R-II)	9,95
12	PP (2R-II)	9,64	44	PP/PE-10 (2R-II)	10,32
13	PS (2R-II)	0	45	PP/PE-5 (2R-II)	8,63
14	PET (2R-II)	0	46	PE/PS-5 (2R-II)	1,69
15	PVC (2R-II)	0	47	PE/PS-10 (2R-II)	2,2
16	PE/PP-5 (2R-I)	2,2	48	PE/PS-15 (2R-II)	2,02
17	PE/PP-10 (2R-I)	2,62	49	PS/PE-15 (2R-II)	1,72
18	PE/PP-15 (2R-I)	3,36	50	PS/PE-10 (2R-II)	1,33
19	PP/PE-15 (2R-I)	11,59	51	PS/PE-5 (2R-II)	1,99
20	PP/PE-10 (2R-I)	12,04	52	PE/PET-5 (2R-II)	3,87
21	PP/PE- 5 (2R-I)	15,34	53	PE/PET-10 (2R-II)	3,58
22	PE/PS-5 (2R-I)	2,1	54	PE/PET-15 (2R-II)	3,12
23	PE/PS-10 (2R-I)	1,63	55	PET/PE-15 (2R-II)	2,65
24	PE/PS-15 (2R-I)	2,14	56	PET/PE-10 (2R-II)	2,04
25	PS/PE-15 (2R-I)	0,74	57	PET/PE-5 (2R-II)	1,54
26	PS/PE-10 (2R-I)	0,94	58	PE/PVC-5 (2R-II)	1,55
27	PS/PE-5 (2R-I)	1,09	59	PE/PVC-10 (2R-II)	3,47
28	PE/PET-5 (2R-I)	1,81	60	PE/PVC-15 (2R-II)	4,29
29	PE/PET-10 (2R-I)	2,04	61	PVC PE 15 (2R-II)	37,39
30	PE/PET-15 (2R-I)	1,83	62	PVC PE 10 (2R-II)	40,17
31	PET/PE-15 (2R-I)	2,09	63	PVC PE 5 (2R-II)	43,55
32	PET/PE-10 (2R-I)	2,1			

W przypadku próbek 3,4,5,8,9,10,13,14,15 nie zaobserwowano efektu egzotermicznego.



Rys. 28. Wartość OIT dla mieszanin otrzymanych z udziałem ślimaków K2



Rys. 29. Wartość OIT dla mieszanin otrzymanych z udziałem ślimaków K5A

Wnioski dotyczące badań termicznych

Wpływ przetwarzania tworzyw pierwotnych przy użyciu dwu rodzajów ślimaków na maszynie typu W2W nie wywołuje dużych zmian w ich wartościach T_m , jak i S_K oznaczanych za pomocą DSC (tab. 1).

W przypadku mieszanin polimerów krystalicznych osnowa polimerowa OP wpływa na obniżenie stopnia krystaliczności fazy rozproszonej FR i odwrotnie – kiedy polimer FR staje się OP, sytuacja jest podobna. Wynika stąd wyraźnie, że w mieszaninach polimerowych osnowa polimerowa, jako faza dominująca, bardzo zakłóca krystaliczność fazy rozproszonej niezależnie od tego, czy mieszanina tworzyw dotyczy dwu tworzyw krystalicznych, czy tworzywa krystalicznego i bezpostaciowego. Struktura krystaliczna osnowy polimerowej jest stabilna i dodatek drugiego polimeru jako FR (w ilościach do 15% mas.) w niewielkim stopniu zakłóca jej krystaliczność. Zakłócenie tej struktury wyraźnie zależy od zawartości masowej czynnika zakłócającego, gdy FR staje się OP. Makrocząsteczki łańcuchowe o regularnej budowie mogą tworzyć obszary krystaliczne o przestrzennym uporządkowaniu. Homopolimery krystaliczne charakteryzują się sztywnością i wykazują dużą wytrzymałość na rozciąganie [6, 7]. Od stopnia krystalizacji zależą właściwości reologiczne (tj. plastyczność) polimeru; ze wzrostem krystaliczności rośnie sztywność, a maleje plastyczność. W przypadku pracy, gdy zawartość FR w OP nie przekracza 15% mas., zmiany te są niewielkie, co potwierdzają wyniki badań mechanicznych.

Wyniki badań TGA obrazują istotne zmiany w strukturze polimerów pierwotnych po przetwórstwie z użyciem wyciarki typu W2W (tab. 2). Tworzenie się lżejszych frakcji o niższej temperaturze początku rozkładu tworzywa T_P , jak również cięższych frakcji, o wyższej temperaturze końca rozkładu T_K , wskazuje na efektywne działanie mechanochemiczne (wytłaczanie reaktywne) procesu przetwarzania jako wynik procesu rozrywania i przegrupowania łańcucha, odcinania łańcuchów bocznych, rekombinacji rodnikowej [3]. Proces mechanochemiczny jest zrównoważony, co objawia się niewielkimi zmianami średniej temperatury rozkładu polimeru T_{SR} , którą można uznać za „wypadkową” procesów termicznych i mechanochemicznych zachodzących w polimerach pierwotnych.

W przypadku mieszanin polimerowych zauważa się pewną prawidłowość; niektóre mieszaniny wykazują brak dwufazowości obserwowanej dla wartości T_P i T_{SR} , niezależnie od zastosowanych ślimaków K2 czy K5A, tj. w przypadku mieszanin PE/PP i PE/PET, inne natomiast, tj. PE/PS i PE/PVC wykazują dwufazowość, co objawia się pojawianiem na wykresie dwu różnych temperatur T_P i T_{SR} , odpowiednio dla dwu składników mieszaniny (rys. 11–26).

Wyniki badań HDT nie dostarczają żadnych istotnych informacji odnośnie zachowania się tworzyw pierwotnych, przetwarzanych w stosunku do ich mieszanin. Wyniki zgodne są z oczekiwaniami.

Wyniki OIT potwierdzają fakt dobrej stabilizacji niektórych tworzyw jak i ich mieszanin. Odnosi się to do mieszanin tworzyw PP i PVC z polietylenem.

Skróty literowe stosowane w pracy

0R	– granulat tworzyw pierwotnych
2RI	– podwójne granulowanie tworzyw pierwotnych (oraz ich mieszanin) z udziałem ślimaków K2
2RII	– podwójne granulowanie tworzyw pierwotnych (oraz ich mieszanin) z udziałem ślimaków K5A
DSC	– różnicowa kalorymetria skaningowa (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>)
FR	– faza rozproszona
HDT	– temperatura odkształcenia cieplnego (<i>Heat Deflection Temperature</i>)
OP	– osnowa polimerowa
OIT	– czas indukcji tlenowej (<i>Oxygen Induction Time</i>)
S _K	– stopień krystaliczności,
T ₁ , T ₂	– temperatura krzepnięcia różnych frakcji polimeru podczas cyklu chłodzenia
TGA	– analiza termogravimetryczna (<i>Thermal Gravimetric Analysis</i>)
T _g	– temperatura przejścia szklistego,
T _m	– temperatura topnienia fazy krystalicznej polimeru,
T _P , T _{SR} , T _K	– temperatury charakterystyczne dla przebiegu krzywych TGA badanych tworzyw polimerowych i ich mieszanin (wg rys. 10),
W2W	– wylączarka dwuślimakowa współbieżna.

Literatura

- [1] Królikowski B., *Wpływ rozwiązania konstrukcyjnego ślimaków w wylączarce dwu-ślimakowej współbieżnej na wybrane właściwości otrzymywanych mieszanin polimerowych. 1. Układy uplastyczniające ślimakowe do konstituowania mieszanin polimerowych*. Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Aspekty technologiczne i nowe trendy. Część 1, red. E. Sasimowski. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2015, s. 42–64.
- [2] Królikowski B., *Badania nowych kompozycji polimerowych z tworzyw termoplastycznych otrzymanych w wylączarkach dwuślimakowych współbieżnych*. Monografia, wyd. Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników, Toruń 2011.
- [3] Królikowski B., *Wylączarki dwuślimakowe współbieżne w konstituowaniu mieszanin z tworzyw polimerowych wtórnych*. Rozprawy nr 160, praca habilitacyjna, wyd. Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2012.

- [4] Królikowski B., Zimniak J., *Investigation of Thermal Properties of Selected Polymer Blends*, Journal of Polish CIMAC, 2012, 7, 3, s. 107–112.
- [5] Królikowski B., Zimniak J., *Preliminary Assessment of the TGA Method for Determining Structural Changes in Processed Polymer* – Komplex 3: P3.5, International Conference, TECHNOMER 2013, 23. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, Chemnitz, Niemcy, 14–15 November 2013.
- [6] Królikowski B., *Selected Physical – Chemical Properties of Selected Polymer Blends*, 8th International Conference Advances In Plastics Technology APT '09, 3–5 November 2009, Katowice.
- [7] Królikowski B., *Właściwości wybranych kompozytów polimerowych przetwarzanych w warunkach symulowanego recyklingu*, referat w opracowaniu zwanym: „Recykling i odzysk materiałów polimerowych. Materiały – Technologie – Utylizacja”, wyd. Uczelniane ZUT, Szczecin 2010, s. 65–68.

2. Wtryskiwanie wspomagane gazem – specjalna metoda przetwórstwa

Wstęp

Wtryskiwanie tworzyw termoplastycznych jest jedną najbardziej rozpowszechnionych metod przetwórstwa tworzyw polimerowych. Stosując tę technologię można wytwarzać detale o bardzo skomplikowanych kształtach. Wytwarzane detale charakteryzują się określonymi właściwościami mechanicznymi, elektrycznymi, cieplnymi, jakościowymi (barwa i połysk) oraz innymi.

Znanych jest wiele odmian procesu wtryskiwania konwencjonalnego, które umożliwiają otrzymywanie wyprasek spełniających specyficzne wymagania dotyczące między innymi stanu powierzchni, właściwości mechanicznych, przewodności cieplnej lub elektrycznej i innych. Technologie te bardzo często w odróżnieniu od konwencjonalnego procesu wtryskiwania nazywane są metodami niekonwencjonalnymi. W ramach tych technologii należy wymienić wtryskiwanie wieloskładnikowe, dekoracyjne, otryskiwania wstawek, mat, folii, wspomagane gazem lub wodą, wtryskiwanie z rozdmuchiwaniami, porujące i mikroporujące, pulsacyjne, wibracyjne, sekwencyjne, kaskadowe i wiele innych.

Technologia wtryskiwania wspomaganego gazem jest stosowana w szerokim zakresie od kilkunastu lat. Pierwsze opracowania oraz patenty dotyczące wytwarzania wyprasek pustych datuje się na lata siedemdziesiąte XX wieku. Zastosowanie tej technologii prowadzi do otrzymywania wyprasek pustych co umożliwia szerokie stosowanie tych detali w produkcji przedmiotów codziennego użytku np. uchwyty, rączki, obudowy itp.

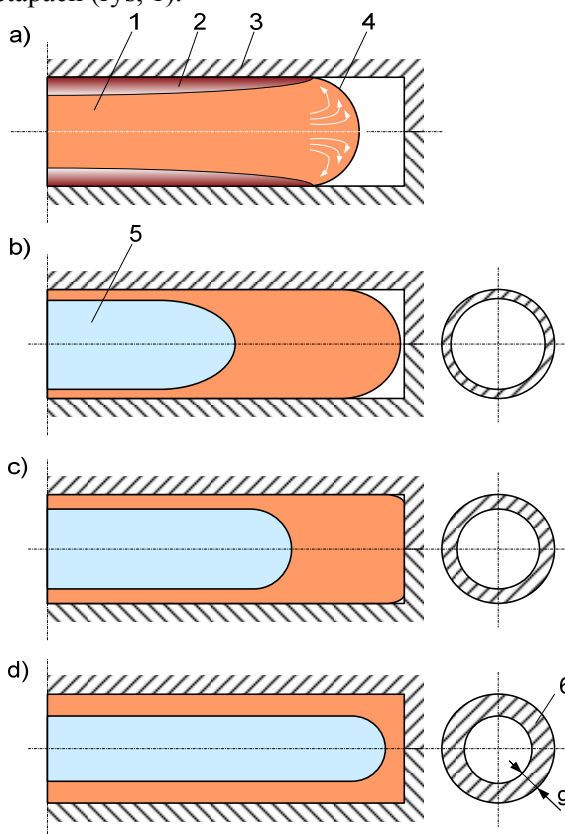
Proces wtryskiwania wspomaganego gazem jest procesem zautomatyzowanym oraz cyklicznym. Charakteryzuje się następującymi cechami:

- umożliwia redukcję masy wyprasek,
- prowadzi do otrzymywania wyprasek sztywnych bez zapadnięć i zniekształceń powierzchni zewnętrzne
- zoptymalizowany prowadzi do skrócenia czasu cyklu wtryskiwania,
- wpływa korzystnie na środowisko poprzez zmniejszenie ilości tworzywa poddawanego recyklingowi,
- technologia umożliwiająca otrzymywanie wyrobów zarówno cienko – jak i grubościennych,
- daje możliwość wytwarzania wyprasek o dużym przekroju kanału gazowego,
- zastosowanie gazu pozwala zmniejszyć możliwość przegrzania przetwarzanego tworzywa.

Do wad tej technologii można zaliczyć:

- wysokie koszty zakupu urządzeń dodatkowych takich jak, sterownik przepływu gazu, kompresor, butle i/lub wytwornica azotu,
- wysoki koszt zakupu lub przeróbki form wtryskowych,
- konieczność zwiększenia precyzji wykonania narzędzi (form wtryskowych) związany z koniecznością ich uszczelnienia,
- nierównomierny rozkład grubości ścianek gotowego wyrobu,
- możliwość występowania anomalii powierzchniowych związanych z przełączaniem fazy wtrysku tworzywa na fazę wtrysku gazu.

Proces wtryskiwania wspomaganego gazem jest cykliczny oraz do pewnego momentu zbieżny z procesem wtryskiwania konwencjonalnego. Przebiega on w następujących etapach (rys. 1).



Rys. 1. Wtryskiwanie wspomaganie gazem z doprowadzaniem gazu do wnętrza wypraski; a - d – kolejne etapy procesu: 1 – tworzywo ciekłe, 2 – warstwa tworzywa zestalonego, 3 – forma wtryskowa, 4 – front strumienia tworzywa z zaznaczonym przepływem poprzecznym, 5 – kanał utworzony podczas wtrysku gazu, 6 – wypraska, g – grubość ścianki wypraski

Cykl procesu wtryskiwania wspomaganego gazem

Pierwszym etapem cyklu jest wprowadzenie (wtrysk) płynnego tworzywa do gniazda formującego (rys. 1a), należy zauważyć, że gniazdo formujące w wielu rozwiązaniach technologicznych nie jest wypełniane całkowicie płynnym tworzywem, istnieją jednak rozwiązania w których gniazdo formujące jest całkowicie wypełniane płynnym polimerem a po rozpoczęciu procesu wtrysku gazu jego nadmiar jest transportowany do gniazda pomocniczego.

Etap drugi to wtrysnięcie gazu (rys. 1b). Gaz wprowadzany jest do wnętrza płynnego jeszcze tworzywa po czasie opóźnienia, jest to czas zaledwie kilku sekund, umożliwiającą wytworzenie się litego naskórka na powierzchni styku tworzywa oraz gniazda formującego. Czas opóźnienia wpływa znacząco na ilość płynnego jeszcze polimeru oraz na grubość warstwy zestalonej. Im czas ten jest krótszy tym naskórek jest cieńszy.

Trzecim etap procesu wtryskiwania wspomaganego gazem jest zwiększanie ciśnienia gazu wprowadzanego do wypraski (rys. 1c). Łagodne i stopniowe zwiększanie ciśnienia gazu zapobiega przerwaniu warstwy tworzywa na froncie strumienia a co za tym idzie powstaniu wad wypraski. Wprowadzany gaz prowadzi do ostatecznego uformowania wyrobu.

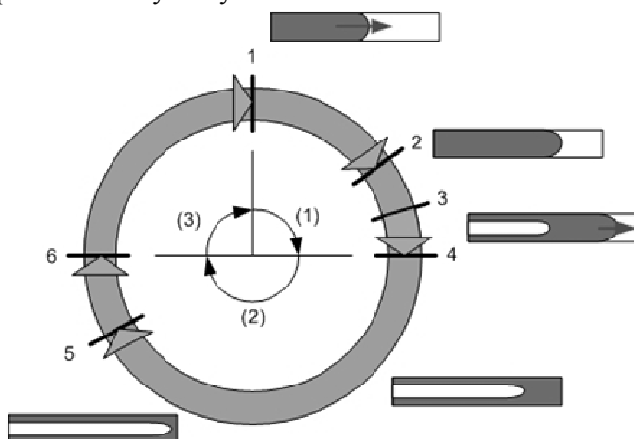
Ostatnim etapem procesu jest docisk (rys. 1d). Faza ta jest realizowana poprzez zastosowanie wysokiego ciśnienia gazu znajdującego się we wnętrzu wypraski. Gaz zapobiega powstawaniu zapadnięć a ścianka wypraski osiąga końcową grubość.

Podczas procesu stosowanym gazem jest azot (gaz obojętny, tani). Ponadto z przemysłowego i technologicznego punktu widzenia nie wpływa negatywnie na jakość otrzymywanych wyprasek, nie powoduje przypaleń oraz zmian składu chemicznego produkowanych detali. W celu wprowadzenia gazu w odpowiednim punkcie procesu oraz pod właściwym ciśnieniem stosowany jest odpowiedni profil, wprowadzany przed rozpoczęciem procesu do sterownika przepływu gazu komunikującego się ze sterownikiem wtryskarki oraz innych urządzeń peryferyjnych. Gaz może zostać wprowadzony do wnętrza wypraski na kilka sposobów, może się to odbywać bezpośrednio przez dyszę wtryskarki w większości jednak przypadków stosuje się w tym celu specjalne dysze umieszczone w formie wtryskowej. Po wprowadzeniu płynnego tworzywa do gniazda formującego (z uwzględnieniem czasu opóźnienia) do wnętrza wypraski wprowadzany jest gaz. Ciśnieni gazu zmieniające się zgodnie z wprowadzonym wcześniej profilem powoduje jego przemieszczanie. Proces ten odbywa się w kierunku w którym gaz napotyka najmniejszy opór, czyli w kierunku frontu strumienia tworzywa, na czole frontu strumienia tworzywa panuje najniższe ciśnienie. Ponadto znajdujący się pod ciśnieniem gaz, powoduje przemieszczanie się płynnego jeszcze tworzywa we wnętrzu gniazda formującego, w kierunku ścianek gniazda, co umożliwia uzyskanie wyprasek dokładnie odwzorowujących kształt gniazda.

Wprowadzany do wnętrza wypraski gaz powoduje znacznie dokładniejsze wypełnienie gniazda formującego, ponadto jego zastosowanie pozwala zastąpić fazę docisku. Realizując proces wtryskiwania konwencjonalnego, faza docisku jest przeprowadzana poprzez wprowadzenie niewielkiej ilości tworzywa do gniazda formującego już po zakończeniu fazy wypełniania gniazda formującego, w procesie wtryskiwania wspomaganego gazem faza docisku realizowana jest poprzez zastosowanie i utrzymanie określonego ciśnienia gazu wprowadzonego do wnętrza wypraski.

Rozpoczęcie fazy docisku jest również początkiem fazy chłodzenia detalu. Podczas fazy chłodzenia następuje zestalenie pozostałego płynnego tworzywa. Na długość fazy chłodzenia wpływa znacząco grubość zestalonego naskórka determinowana przez czas opóźnienia i przełączania, im naskórek jest grubszy tym czas chłodzenia jest dłuższy, jest to związane ze słabym przewodnictwem cieplnym zestalonych warstw tworzywa.

Przed zakończeniem cyklu wtryskiwania gaz jest usuwany z wnętrza wypraski i może zostać poddany procesowi oczyszczania w celu zastosowania w kolejnym cyklu procesu. Po usunięciu gazu z wnętrza wypraski, jest ona usuwana z gniazda formującego. Schemat cyklu procesu wtryskiwania wspomaganego gazem został przedstawiony na rysunku 2.



I - wypełnianie gniazda

1 : rozpoczęcie cyklu

1 – 2 : wtrysk tworzywa

2 – 3 : czas między zakończeniem wtrysku tworzywa i rozpoczęciem wtrysku gazu

3 – 4 : zakończenie etapu wypełniania gniazda

II – zabiegi po wypełnieniu gniazda

4 – 5 : utrzymywanie ciśnienia gazu w gnieździe

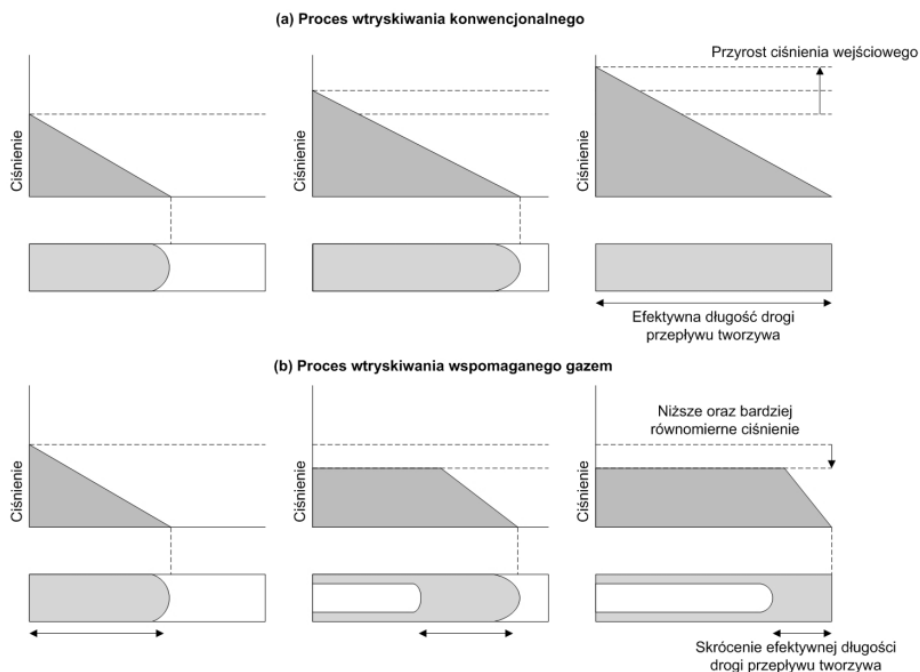
5 : redukcja ciśnienie gazu

6 : otwarcie formy

III – zabiegi przy otwartej formie

Rys. 2. Poszczególne etapy procesu wtryskiwania wspomaganego gazem

W odniesieniu do całego cyklu wtryskiwania, faza wtrysku tworzywa jest relatywnie krótka, jednakże decyduje ona o przebiegu całego procesu oraz determinuje właściwości gotowego wyrobu, zarówno pod kątem właściwości mechanicznych jak i geometrii wypraski oraz właściwości jakościowych. Powstawanie pułapek powietrznych, wyblyszczenia na powierzchni detalu, przebicie tworzywa strumieniem gazu oraz niecałkowite wypełnieni gniazda formującego z tym związane jest obserwowane na tym etapie procesu.



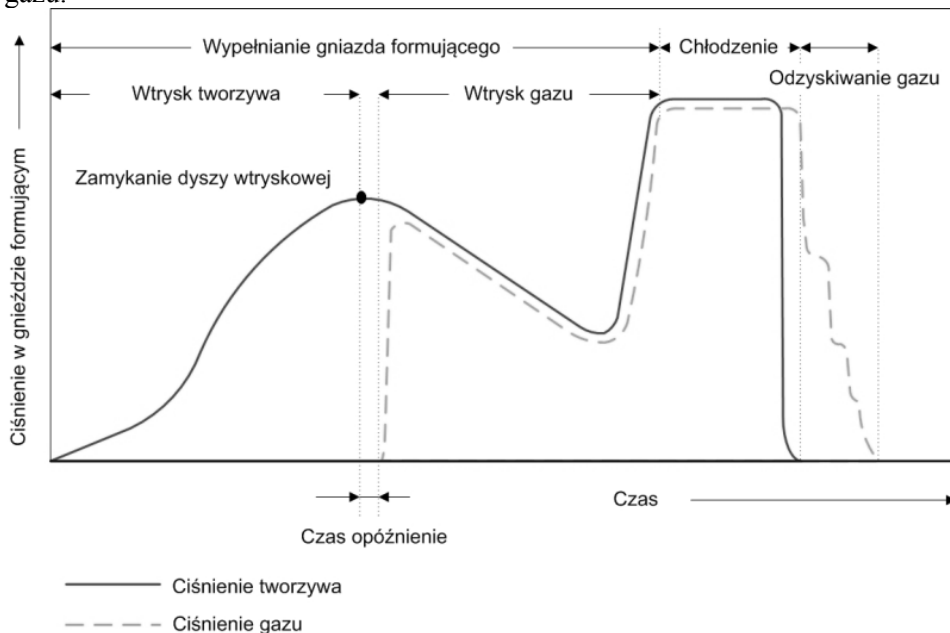
Rys. 3. Porównanie rozkładu ciśnienia tworzywa w procesie wtryskiwania konwencjonalnego (a), oraz procesie wtryskiwania wspomaganego gazem (b)

Ciśnienie wprowadzanego gazu a ciśnienie hydrauliczne

Rysunek 3 schematycznie przedstawia rozkład ciśnienia tworzywa podczas wtryskiwania konwencjonalnego (a) oraz wtryskiwania wspomaganego gazem (b). To proste porównanie pozwala zaobserwować znaczne różnice między tymi procesami. Bardziej jednorodny rozkład wartości ciśnienia we wnętrzu gniazda jak również jego niższe wartości występują dla procesu wtryskiwania wspomaganego gazem. Znaczny wzrost wartości ciśnienia w procesie wtryskiwania konwencjonalnego jest zauważalny w obszarze przewężki. Jest to związane z oporami przepływu panującymi w gnieździe formującym związanymi z jego całkowitym wypełnieniem wtryskiwanym tworzywem.

W procesie wtryskiwania wspomaganego gazem (rys. 3b), jedynie w pierwszym etapie procesu ciśnienie ma taką samą wartość jak podczas wtryskiwania

konwencjonalnego. W kolejnych fazach procesu do gniazda formującego nie jest wprowadzana kolejna porcja tworzywa, lecz wtryskiwany jest znajdujący się pod ciśnieniem gaz. Jego wprowadzenie powoduje przemieszczanie się tworzywa we wnętrzu gniazda formującego. Niecałkowite wypełnienie gniazda formującego oraz wprowadzenie gazu do wnętrza płynnego jeszcze tworzywa pozwala na stosowanie niższych wartości ciśnień, niż ma to miejsce w procesie wtryskiwania konwencjonalnego. Ponadto rozkład ciśnienia jest bardziej równomierny, co przekłada się na występowanie mniejszych naprężeń własnych. Ponadto otrzymane w procesie wtryskiwania wspomaganego gazem wypraski charakteryzują się mniejszym skurczem przetwórczym oraz możliwością stosowania maszyn o mniejszej sile zwarcia, co jest związane z zastosowaniem niższego ciśnienia gazu. W celu uniknięcia wad powierzchni wyprasek (głównie zapadnięć), podczas fazy docisku stosuje się stałą wartość ciśnienia wprowadzanego gazu.



Rys. 4. Wykres przebiegu zmian ciśnienia w gnieździe formującym podczas procesu wtryskiwania wspomaganego gazem

Rysunek 4 obrazuje przebieg zmian ciśnienia jakie panuje w gnieździe formującym podczas procesu wtryskiwania wspomaganego gazem. Schemat prezentuje przebieg ciśnienia z uwzględnieniem poszczególnych faz procesu, począwszy od fazy wtrysku tworzywa (gwałtowne narastanie wartości ciśnienia), poprzez czas przełączania (następuje chwilowy spadek wartości ciśnienia panującego w gnieździe formującym, dysza wtryskowa zostaje zamknięta, natomiast dysze wprowadzające gaz jeszcze nie zostały otwarte), wtrysk gazu (dysze

wprowadzające gaz zostają otwarte i gaz pod ciśnieniem zostaje wprowadzony do wnętrza wypraski), etap docisku i chłodzenia (następuje wzrost wartości ciśnienia gazu a następnie utrzymanie tej wartości podczas całej fazy chłodzenia wypraski), po zakończeniu fazy chłodzenia następuje gwałtowne zmniejszenie wartości ciśnienia oraz odprowadzenie gazu z wnętrza wypraski.

Stosowane materiały

W procesie wtryskiwania wspomaganego gazem podobnie jak w procesie wtryskiwania konwencjonalnego stosuje się szeroką gamę tworzyw sztucznych termoplastycznych (poliolefiny, poliamidy, PBT, mieszaniny tworzyw itp.). Technologia ta umożliwia również przetwarzanie termoutwardzalnego poliuretanu jak również stosowanie podczas procesu proszków metali oraz materiałów ceramicznych. Rodzaj stosowanego materiału oraz ewentualnych napełniaczy oraz środków pomocniczych lub barwiących jest determinowany przez wymagania jakie są stawiane gotowym wyrobom (takim jak wytrzymałość mechaniczna, odporność chemiczna, temperatura pracy, sztywność, barwa, połysk itp.).

Stosowane urządzenia

Poniższy przykład powstał w oparciu o zastosowanie wtryskarki hydraulicznej firmy Haitian HTF300X, wyposażonej w sterownika gazu firmy Cinpres PPC3000SF (rys. 5).

Zastosowany sterownik umożliwia precyzyjne ustalenie profilu ciśnienia przez czasu wtrysku gazu. W celu zapewnienia odpowiedniego ciśnienia dozowanego gazu wykorzystywany jest kompresor firmy HiCom. Kompresor tego typu wyposażony został w dodatkowy układ filtrowania , który zapobiega przedostawaniu się zanieczyszczeń do sprężanego gazu a następnie do wnętrza wypraski. Stosowanym podczas procesu gazem jest azot.

a)



b)



c)



Rys. 5. Schemat stanowiska do wtryskiwania wspomaganego gazem (a), sterownik przepływu oraz ciśnienia gazu (b), wytwornica azotu wraz z butlą (c).

Odmiany wtryskiwania wspomaganego gazem

Niejednokrotnie wymaga się aby wypraski o większych wymiarach, które nie przenoszą dużych obciążeń charakteryzowały się małą masą. W takich przypadkach stosuje się metodę wtryskiwania wspomaganego gazem, w której najczęściej wytwarza się wypraski puste. Metoda jest stale rozwijana. Opracowywane są nowe jej odmiany takie jak wtryskiwanie [1-4]:

- z doprowadzeniem gazu do gniazda formującego,
- z doprowadzeniem gazu przez dyszę wtryskarki,
- z przepływem gazu przez gniazdo formujące podczas całej fazy ochładzania wypraski,
- wspomagane gazem krążącym w obiegu zamkniętym (RGIM)
- z zastosowaniem ruchomych rdzeni,
- z przepływem nadmiaru tworzywa do układu uplastyczniającego,
- z przepływem nadmiaru tworzywa do dodatkowego gniazda,
- z doprowadzeniem gazu na zewnątrz wypraski,
- wieloskładnikowe,

Wtryskiwanie z doprowadzeniem gazu do gniazda formującego

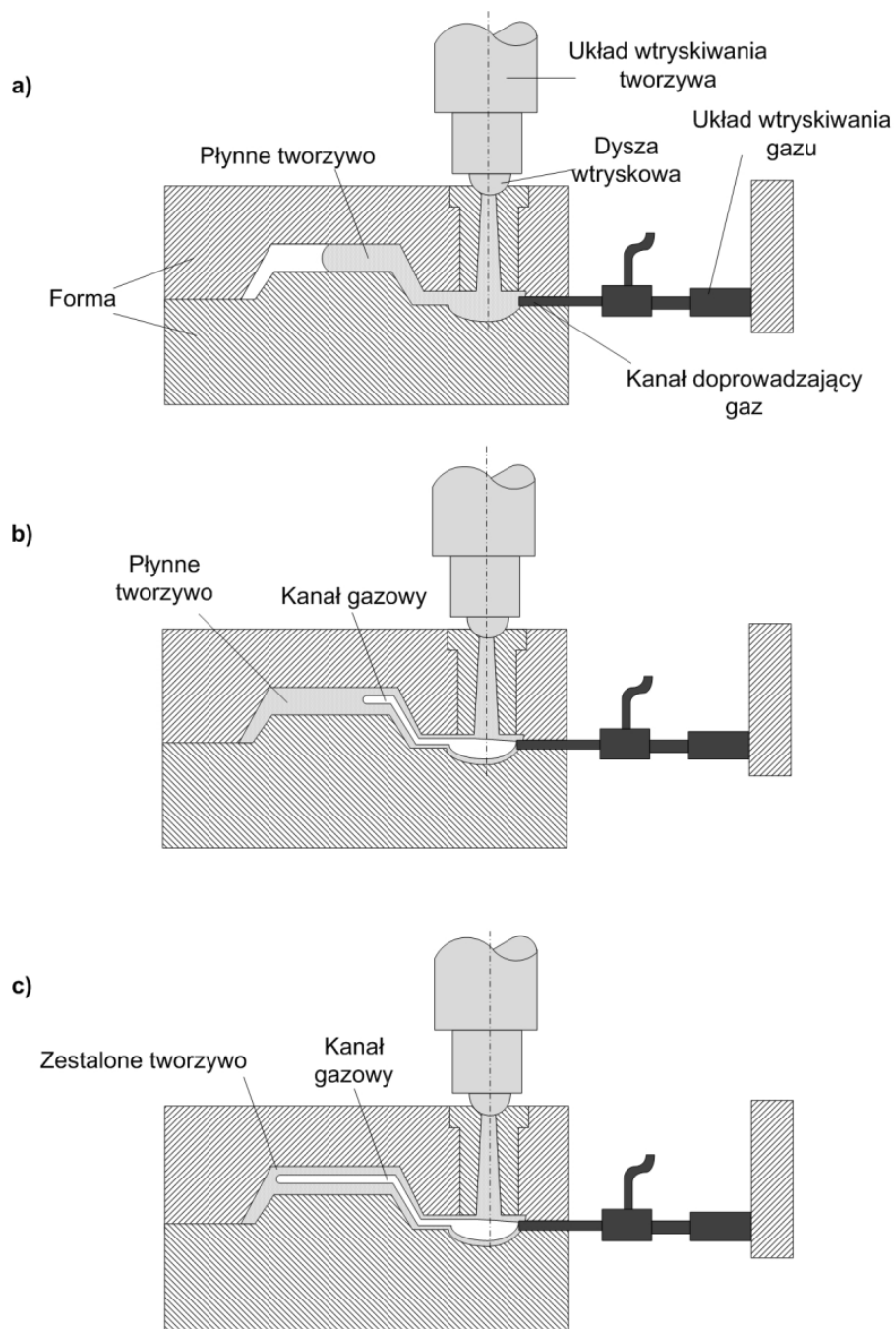
Metoda wtryskiwania z doprowadzeniem gazu do gniazda formującego jest rozwiązaniem bardzo często stosowanym w praktyce przemysłowej. Jest łatwa do wprowadzenia i adaptacji w istniejących już zastosowaniach technologicznych. W procesie tym następuje częściowe wypełnienie gniazda formującego płynnym tworzywem które jest wprowadzane do gniazda formującego poprzez dyszę wtryskową.

Po zakończeniu fazy wtrysku tworzywa następuje faza opóźnienia, która determinuje grubość zestalonej warstwy tworzywa stykającej się z zimnymi ściankami gniazda formującego. Grubość tej warstwy wpływa jednocześnie na czas fazy chłodzenia. Im jest ona grubsza tym faza chłodzenia jest dłuższa, co wiąże się z małą przewodnością cieplną tworzywa.

Następnie do tworzywa jest wprowadzany sprężony gaz, za pomocą oddzielnego wtryskiwacza znajdującego się w obudowie formy wtryskowej (rys 6b). Elastyczność tej metody jest związana z możliwością dowolnego projektowania kanałów gazowych oraz punktów doprowadzenia gazu do wypraski. Zwiększa to koszt formy wtryskowej, ale prowadzi do optymalnego wykorzystania zalet procesu.

Ciśnienie gazu zmienia się według określonego profilu, wprowadzonego do sterownika przepływu gazu. Dobierane jest w taki sposób, by w początkowej fazie procesu nie było zbyt wysokie i nie powodowało uszkodzenia wypraski przez przerwanie czoła strumienia płynnego tworzywa.

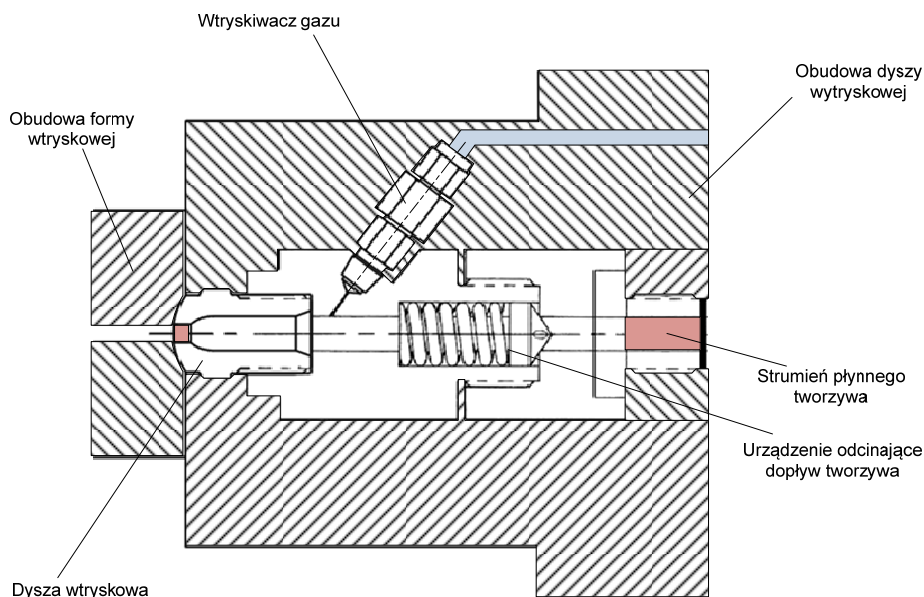
Wtryskiwany sprężony gaz powoduje przemieszczanie się płynnego tworzywa we wnętrzu gniazda formującego w kierunku jego ścianek (rys. 6c). W procesie tym gaz jest stosowany również w celu przeprowadzenia fazy docisku. W fazie docisku poziom ciśnienia jest utrzymywany na jednakowym poziomie, co sprawia, że jest ono równomierne w całym wnętrzu wypraski. Sprężony gaz dociska tworzywo do ścianek gniazda formującego, co pozwala uniknąć zapadnięć i wad powierzchni wyprasek. Faza docisku przebiega równocześnie z fazą chłodzenia wypraski. Wprowadzony do wnętrza wypraski gaz pozwala na skrócenie czasu chłodzenia, odbierając ciepło od tworzywa. Po zakończeniu fazy chłodzenia ciśnienie gazu zostaje zredukowane, a gaz jest odprowadzany z wypraski. Gaz po uprzednim oczyszczeniu zostaje użyty w kolejnym cyklu wtryskiwania. Metoda ta jest z powodzeniem stosowana do wytwarzania części dla przemysłu samochodowego, elektrycznego, AGD/RTV [1, 2, 16, 22–25].



Rys. 6. Schemat wtryskiwania z doprowadzeniem gazu do gniazda formującego; a) wtrysk tworzywa, b) rozpoczęcie fazy wtrysku gazu, c) faza docisku gazem i chłodzenia

Wtryskiwanie z doprowadzeniem gazu przez dyszę wtryskarki

W procesie wtryskiwania z doprowadzeniem gazu przez dyszę wtryskarki w początkowym etapie gniazdo formujące jest częściowo wypełniane tworzywem ciekłym, po czym do wnętrza uplastycznionego tworzywa zostaje wtrysnięty gaz poprzez dyszę wtryskową (rys. 7). Ciśnienie gazu jest prawie stałe podczas całej fazy ochładzania wypraski. Po jej zakończeniu gaz zostaje odprowadzony z wypraski i następuje otwarcie formy.



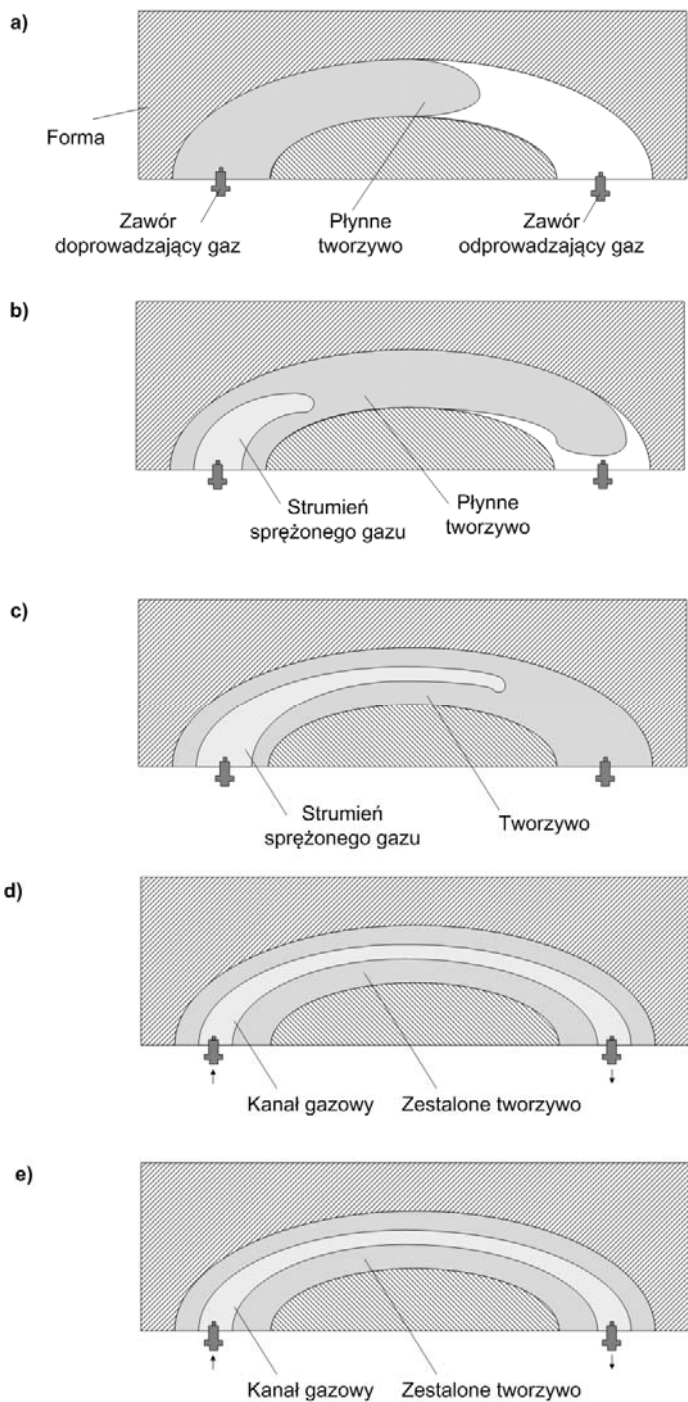
Rys. 7. Schemat wtryskiwania z doprowadzeniem gazu przez dyszę wtryskarki

Metoda ta umożliwia wytwarzanie wyprasek w formach o prostej budowie, stosowanych w procesie wtryskiwania konwencjonalnego, po przystosowaniu ich do wtryskiwania gazu. Proces można prowadzić przy użyciu typowych wtryskarek, zapewniających dokładne dozowanie tworzywa. Do wtryskarek należy przyłączyć instalację doprowadzającą gaz, a w dyszy wtryskarki zamontować wtryskiwacz gazu.

Wtryskiwanie z przepływem gazu przez gniazdo formujące podczas całej fazy ochładzania

Schemat procesu wtryskiwania wspomaganego gazem z przepływem gazu przez gniazdo formujące w całej fazie ochładzania wypraski pokazano na rys. 8.

W pierwszej fazie procesu (rys. 8 a) następuje wprowadzenie ciekłego tworzywa do gniazda formy. Gniazdo zostaje wypełnione tworzywem w około 70%. Po zakończeniu fazy wypełniania rozpoczyna się faza wprowadzania gazu.



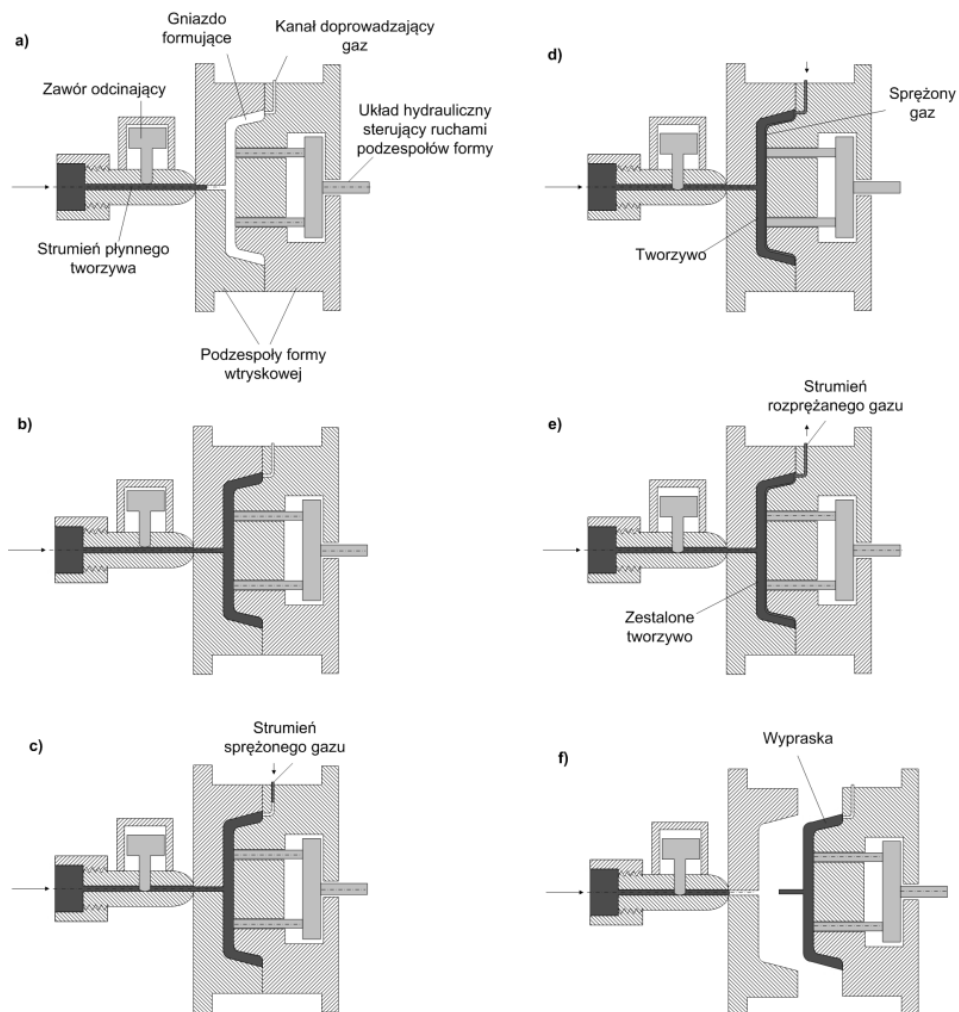
Rys. 8. Fazy procesu wtryskiwania z przepływem gazu przez gniazdo-formujące w całej fazie ochładzania wypraski [5]

Gaz może zostać wprowadzony dyszą mechaniczną lub przez dyszę specjalną za pomocą iglicy. Wprowadzenie gazu powoduje przepływ tworzywa w kierunku ścianek gniazda formującego (rys.). Wzrost ciśnienia gazu powoduje powstanie kanału gazowego (rys. 8 c) i przepływ gazu przez wypraskę w obiegu zamkniętym (rys. 8). Po zakończeniu procesu gaz jest usuwany z wypraski (rys.). Gaz może być dodatkowo ochładzany, co powoduje skrócenie całego cyklu wtryskiwania. Według badań przeprowadzanych dla tej metody najlepsze rezultaty otrzymuje się przy temperaturze gazu wynoszącej – 25°C [71]. Na rysunku 9 pokazano schemat urządzenia do wtryskiwania z przepływem gazu przez gniazdo formujące w całej fazie chłodzenia. Wadą tego typu rozwiązania jest bardziej złożona budowa formy ze względu na stosowanie dwóch wtryskiwaczy gazu oraz konieczność zainstalowania dodatkowych urządzeń takich jak wymiennik ciepła oraz filtry, które umożliwiają wyłapywanie zanieczyszczeń z gazu. Natomiast zaletą jest wydajne skrócenie czasu cyklu wtryskiwania. Gaz przepływając przez gniazdo formujące aż do zakończenia fazy ochładzania wypraski odbiera ciepło z tworzywa oraz umożliwia dokładne odwzorowanie kształtu gniazda formującego. Otrzymywane wypraski charakteryzują się dobrą jakością powierzchni zewnętrznej oraz dużą sztywnością

Wtryskiwanie z doprowadzeniem gazu na zewnątrz wypraski

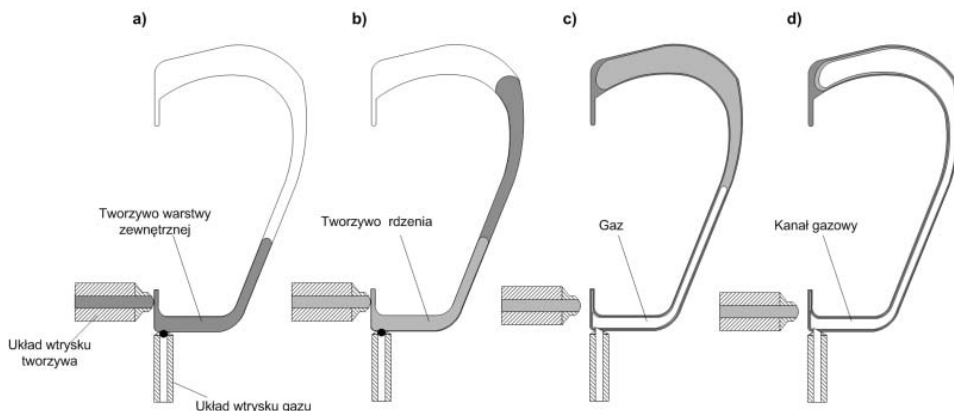
W odróżnieniu od wyprasek otrzymywanych metodami przedstawionymi powyżej wypraski otrzymywane tą metodą są pełne. W procesie tym gaz pełni funkcję czynnika dociskającego tworzywo do jednej ścianek gniazda formującego. Schemat wtryskiwania z doprowadzeniem gazu na zewnątrz wypraski pokazano na rysunku 9.

W początkowej fazie procesu gniazdo formy jest wypełniane tworzywem (gniazdo nie jest wypełniane całkowicie). Następnie rozpoczyna się wtrysk gazu. Wzrost ciśnienia gazu powoduje powstanie cienkiego filmu gazu pomiędzy tworzywem a przeciwległą ścianką formy. Zastosowanie tej metody pozwala na uzyskanie wyprasek, w których jedna powierzchnia charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami jakościowymi. Dokładnie odwzorowuje kształt formy oraz jest pozbawiona zapadnięć. Wadą tego rozwiązania jest skomplikowana konstrukcja formy oraz konieczność jej uszczelnienia. Z wykorzystaniem tej metody wykonywane są obudowy sprzętu elektronicznego, telewizorów, komputerów [1, 6-11, 19-25].



Rys.9. Wtryskiwanie z doprowadzeniem gazu na zewnątrz wypraski; a) zamykanie formy, b) wtryskiwanie tworzywa do gniazda formującego, c) wtryskiwanie gazu na powierzchnię zewnętrzną wypraski, d) faza docisku gazem, e) usuwanie gazu, f) otwarcie formy i usunięcie wypraski [8]

Wtryskiwanie wieloskładnikowe



Rys. 10. Etapy wtryskiwania wieloskładnikowego wspomaganego gazem, a) wtrysk tworzywa warstwy zewnętrznej wypraski, b) wtrysk tworzywa rdzenia, c) wtrysk gazu, d) chłodzenie wypraski [15]

W procesie wtryskiwania wieloskładnikowego są wtryskiwane co najmniej dwa tworzywa. Schemat wtryskiwania wieloskładnikowego pokazano na rysunku 10. W przypadku najprostszym tzn. zastosowaniu dwóch tworzyw proces rozpoczyna się od wprowadzenia do formy pierwszego tworzywa stanowiącego warstwę zewnętrzną wypraski. Następnie wtryskuje się tworzywo rdzenia, po czym do wnętrza wypraski jest wprowadzany gaz. Pozostaje on w wyprasce przez całą fazę jej chłodzenia. Otrzymywane wypraski są lekkie oraz sztywne. Dzięki zastosowaniu różnych tworzyw można uzyskać wypraski charakteryzujące się estetyczną warstwą zewnętrzną oraz wytrzymałą warstwą wewnętrzną [1, 13-15, 17-19, 21].

Podsumowanie

Wtryskiwanie wspomagane gazem jest technologią nową i dynamicznie się rozwijającą. Wypraski otrzymywane tą metodą charakteryzują się małą masą, dużą sztywnością oraz dobrymi właściwościami użytkowymi. Ze względu na zalety tej metody podejmuje się próby znalezienia nowych odmian procesu, w których stosuje się różne sposoby wprowadzania gazu do polimeru.

Należy zauważyć, iż metoda ta jest stosowana na szeroką skalę. Można nią wytwarzać elementy o kształcie zbliżonym do rur, takie jak wieszaki, poręcze, podłokietniki oraz wyroby płaskie, o dużej powierzchni, na przykład meble ogrodowe, obudowy maszyn biurowych, panele samochodowe. Do zalet wtryskiwania wspomaganego gazem można zaliczyć możliwość wytwarzania wyrobów lekkich, sztywnych, bez pęcherzy i zapadnięć. Ważną zaletą jest też zmniejszenie ciężaru wypraski i zużycia tworzywa. Ponadto czas chłodzenia wypraski zostaje skrócony ze względu na to, iż rdzeń wypraski jest pusty.

Zwiększa to wydajność procesu. Jak każda metoda tak i tak posiada swoje wady. Główną z nich jest konieczność stosowania drogiego oprzyrządowania oraz bardziej złożonych form wtryskowych, które muszą być wyposażone w kanały doprowadzające gaz. Wadą jest również ograniczony wpływ na grubość ścianek wypraski oraz trudności w uniknięciu różnic w kolejnych cyklach wtryskiwania. Podczas procesu mogą też wystąpić anomalie powierzchniowe wyprasek oraz porowata struktura ich warstwy wewnętrznej.

Wypraski puste wytwarza się metodami wtryskiwania z rozdmuchiwaniami oraz otryskiwania rdzeni traconych wytapianych lub rozpuszczanych. Zastosowanie procesu wtryskiwania z rozdmuchiwaniami jest jednak ograniczone do wytwarzania głównie pojemników. Z kolei otryskiwanie rdzeni traconych jest procesem wieloetapowym, związanym z wysokimi kosztami maszyn i urządzeń niezbędnych do realizacji wszystkich etapów procesu (wtryskiwanie, wytwarzanie rdzeni, wytapianie lub rozpuszczanie rdzeni). Te ograniczenia obydwu metod wytwarzania wyprasek pustych powodują coraz szersze wykorzystanie wtryskiwania wspomaganego gazem.

Z ekologicznego punktu widzenia proces wtryskiwania wspomaganego gazem jest korzystny pod względem ilości zużywanej energii oraz stosowanego materiału. Wpływa to na ilość tworzywa poddawanego recyklingowi, ilość tworzywa która niekiedy może zostać zmniejszona nawet o 50%.

Wypraski o zmniejszonej masie uzyskuje się również w procesach wtryskiwania porującego oraz mikroporującego. Jednak wypraski o strukturze porowatej charakteryzują się gorszą jakością powierzchni (głównie większą chropowatością powierzchni, mniejszym połyskiem) niż wypraski wytworzone w procesie wtryskiwania wspomaganego gazem.

Bibliografia:

- [1] Bociąga E., *Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych*, WNT, Warszawa 2008.
- [2] Han S.Y., Kwag J.K., Kim C.J., Park T.W., Jeong Y.D. *A new process of gas-assisted injection molding for faster cooling*, Journal of Materials Processing Technology 2004, vol. 155–156, s. 1201–1206.
- [3] Osswald T.A., Turng L.S., Gramann P.J., *Injection molding handbook*, Carl Hanser Verlag, Inc., Munich, 2008.
- [4] Soares E.J., Carvalho M.S., Souza Mendes P.R., *Gas-displacement of non-Newtonian liquids in capillary tubes*, International Journal of Heat and Fluid Flow 2006, vol. 27, s. 95–104.
- [5] United State Patent, *Gas injection moulding method and apparatus*, Patent Number. US 2005/0133945 A1, 2005.
- [6] External Gas Molding Squeezes Out Sinks <http://www.ptonline.com/articles/200111fa3.html>.

- [7] Gas assisted injection moulding http://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Processes/Injection_Moulded_Gas_Assisted.aspx.
- [8] Materiały dotyczące wtryskiwania z rozdmuchiwaniem <http://www.scribd.com/doc/4238123/Blow-Molding-Basics>.
- [9] Soares E.J., Carvalho M.S., Souza Mendes P.R., *Gas-displacement of non-Newtonian liquids in capillary tubes*, International Journal of Heat and Fluid Flow 2006, 27, s. 95–104.
- [10] Szostak M., *Przegląd metod wtryskiwania tworzyw sztucznych wspomaganych gazem* (Gas Assisted Injection Moulding – GAIM), Plastics Review, nr. 8 (21), 2002.
- [11] United State Patent, *Gas assist injection molding apparatus and method with multiple temperature gas supply*, Patent number 5/728/325, 1998.
- [12] United State Patent, *Gas assisted injection molding combining internal and external gas pressure*, United States Patent, Patent Number 5/716/560, 1998.
- [13] Bociąga E.: *Niekonwencjonalne metody wtryskiwania*. IX Profesorskie Warsztaty Naukowe pt. Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych. Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin - Dziwnówek 2004, s. 47–48.
- [14] *Gas pin assembly, gas assisted injection molding apparatus and method employing same*, International Publication Number WO 02/014048 A1, 2002.
- [15] Michaeli W., Lettowsky C., Grönlund O., *Advances in Gas- and Water Injection Technique*, PPS Yamgata, Japan 2006.
- [16] Sanchez-Soto M., Gordillo A., Arasanz B., Aurrekoetxea J., Aretxabaleta L., *Optimising the gas-injection moulding of an automobile plastic cover using an experimental design procedure*, Journal of Materials Processing Technology 2006, 178, s. 369–378.
- [17] Bociąga E., *Niekonwencjonalne metody wtryskiwania*, Polimery 2005, 50, nr 1, s. 10-19.
- [18] Bociąga E., Stachowiak T., *Wybrane właściwości wyprasek wytwarzanych metodą wtryskiwania wspomaganego gazem*, Czasopismo Techniczne Mechanika, Wyd. Politechniki Krakowskiej, 1-M/2009, zeszyt 3, s. 23–29.
- [19] Bociąga E., *Wtryskiwanie tworzyw polimerowych wspomagane wodą oraz układem gaz + woda*, Polimery 2007, 52, nr 2, s. 88–93.
- [20] Dimakopoulos Y., Tsamopoulos J., *Gas-Assisted Injection Molding In Straight And Constricted Tubes*, Polymer. Engeneering . Science, 2006, 46, s. 47–68.
- [21] Heng-Yi Su, Shih-Chih Nian, Ming-Shyan Huang, *Reducing ghost-marks in injection-molded plastic parts by using external gas-assisted holding pressure*, International Communications in Heat and Mass Transfer 66 (2015) 1–10.

- [22] Shih-Chih Nian, Ming-Hung Li, Ming-Shyan Huang, *Warpage control of headlight lampshades fabricated using external gas-assisted injection molding*, International Journal of Heat and Mass Transfer 86 (2015) s. 358–368.
- [23] Han S.Y., Kwag J.K., Kim C.J., Park T.W., Jeong Y.D. *A new process of gas-assisted injection molding for faster cooling*, Journal of Materials Processing Technology 2004, 155–156, s. 1201–1206.
- [24] Heim H.P., *A Discussion of Experimental Studies on Gas-Assisted Injection Molding*, PPS 18, Guimaraes, Portugal 2002.
- [25] Heim H.P., *Gas Assisted Injection Moulding – Principles for the Robust Layout of Process and Moulding*, PPS 19, Melbourne, Australia 2003.

3. Barwienie tworzyw polimerowych oraz metody pomiaru barwy i połysku

Środki barwiące

W procesie polimeryzacji lub podczas procesu przetwórczego do polimerów wprowadza się różnego rodzaju składniki dodatkowe, które wywierają bardzo duży wpływ na kształtowanie właściwości tworzyw polimerowych [42]. Najczęściej pozwalają one na lepsze przetwórstwo materiałów oraz oddziałują na właściwości użytkowe wytworów z nich uzyskanych [32]. Składniki dodatkowe mogą wpływać na zmniejszenie chłonności wody przez kompozyty polimerowe, obniżają współczynnik rozszerzalności cieplnej, podwyższają temperaturę odporności na deformację pod obciążeniem, zwiększają udarność czy moduł sprężystości [12]. Modyfikacja polimerów składnikami dodatkowymi znacząco wpłynęła na zainteresowanie się tymi materiałami oraz poszerzenie możliwości ich wykorzystywania [11]. Stosowane substancje dodatkowe dzieli się na [21, 32, 40]:

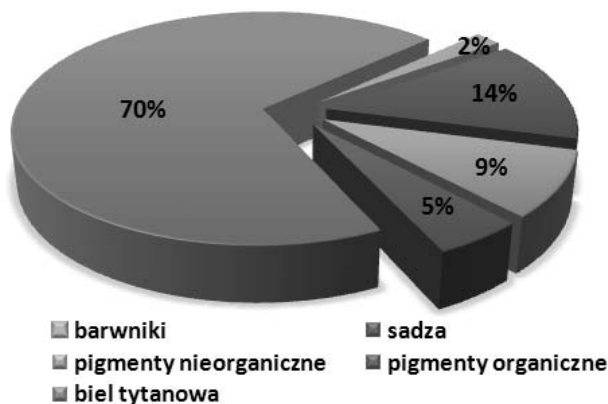
- wypełniacze (lub napelniacze): proszkowe (np. węglan wapnia, sadza, grafit, talk, mikrosfery z popiołów lotnych), płatowe (np. tkaniny, maty, arkusze papieru), włókniste (np. włókna szklane, włókna karbonizowane węglowe i grafitowe, włókna z poliamidów aromatycznych), materiały monokrystaliczne (whiskersy) i mikrowłókna.
- środki pomocnicze (modyfikujące): stabilizatory, dezaktywatory metali, plastyfikatory (zmiękczacze), środki smarujące, opóźniacze palenia (antypireny), porofory, antystatyki, modyfikatory polimeryzacji, środki utwardzające, rozcieńczalniki, biocydy, środki zapachowe, środki barwiące.

Polimery w większości przypadków są transparentne lub barwy białej. Aby osiągnąć zamierzony efekt marketingowy, wizualny oraz dekoracyjny nadaje się im barwę [11, 13]. W celu wybarwienia wytworów z tworzyw bądź ich rozjaśniania stosuje się środki barwiące [8]. Środki barwiące dzieli się na dwie grupy: rozpuszczalne i nierozpuszczalne w wodzie [11]. Jednakże w literaturze oraz ogólnej świadomości przyjął się podział środków barwiących na rozpuszczalne barwniki i nierozpuszczalne pigmenty.

Środki barwiące mogą występować w różnej postaci, m.in.: proszku, past, koncentratów tzw. *masterbatchy* [8].

Środki barwiące powinny wyróżniać się dobrą odpornością na długotrwałe działanie światła oraz podwyższonej temperatury. Poza tym powinna je charakteryzować zdolność do jednorodnego rozprowadzenia czy trwałego łączenia ze wszystkimi składnikami tworzywa – przede wszystkim ze stabilizatorami [17]. Największy udział w barwieniu tworzyw ma biel tytanowa (około 70%), nato-

miast najmniejszy rozpuszczalne barwniki (około 2%), co przedstawiono na rysunku 1 [33].



Rysunek 1. Udział środków barwiących wykorzystywanych w technologii barwienia materiałów polimerowych [33]

Barwniki

Barwniki są związkami organicznymi, które w zależności od budowy ulegają rozpuszczeniu w ośrodkach stosowania np. w wodzie, rozpuszczalnikach organicznych czy polimerach tworząc z nimi wiązania chemiczne [11, 21, 42]. W swoich cząsteczkach zawierają grupy chromoforowe nadające im kolor oraz grupy auksochromowe (o charakterze kwaśnym lub zasadowym), dzięki którym cząsteczka barwnika wiąże się na stałe z barwionym materiałem (są one odpowiedzialne za zdolność barwienia).

Barwniki można klasyfikować w zależności od ich budowy chemicznej (azowe, chinoidowe, di- i triarylometanowe, nitrowe i nitrozowe, azynowe, indygidowe, antrachinonowe, pironowe, polienowe) oraz przeznaczenia (barwniki o takich samych układach chromoforowych). Barwniki mogą być używane do różnych celów i odwrotnie – barwniki o całkowicie odmiennej budowie chemicznej mogą być stosowane do tego samego celu [34]. Najczęściej stosuje się je do barwienia tworzyw transparentnych np. PC lub PS [11].

Pigmenty

Pigmenty są związkami barwiącymi, nierozpuszczalnymi w środowisku stosowania (np. woda, rozpuszczalniki, żywice, polimery). Nie wchodzą w reakcje chemiczne z polimerami, natomiast tworzą w nich subtelną zawiesinę. Stąd wynika konieczność odpowiedniego zdyspergowania cząsteczek pigmentu w polimerze [11, 32]. Związki te mogą powodować powierzchniowe odbicie światła albo je absorbować, co zależy od budowy chemicznej, struktury krystalicznej i stopnia rozdrobnienia pigmentu [34]. Dodaje się je w ilości od 0,01% do 7%

(w przypadku koncentratów barwiących) [11, 14, 33, 40]. W praktyce przemysłowej pigmenty stosuje się najczęściej w postaci koncentratów (o stężeniu pigmentu w koncentracie do 80%) w ilości nieprzekraczającej 5% dla bieli tytanowej i 3% dla pozostałych pigmentów.

Pigmenty od dawna stosowane są do barwienia m. in. tworzyw, ale w ostatnim czasie coraz większego znaczenia nabierają inne ich właściwości. Przede wszystkim obejmuje to ochronę przed promieniowaniem UV oraz ochronę przed korozją [35]. Do pigmentów zalicza się zarówno związki nieorganiczne, jak i organiczne [42]. Cechą charakterystyczną tych związków jest nierozpuszczalność w ośrodku stosowania – wodzie, rozpuszczalnikach organicznych czy polimerach. Ponadto pigmenty powinny cechować się dużą odpornością na światło, dużą siłą tinktorialną (intensywnością barwy), żywością barwy, nietoksycznością, odpornością na działanie wysokiej temperatury oraz na migrację z barwionego materiału [11]. Dwie ostatnie z wymienionych cech mają szczególne znaczenie w przypadku tworzyw polimerowych. Pod wpływem temperatury pigment może dyfundować w tworzywie, a po jego schłodzeniu gromadzić się na powierzchni polimeru, co można zaobserwować, jako jego zabrudzenie [11, 38]. W tabeli 1 przedstawiono wybrane związki chemiczne przeznaczone do barwienia polimerów.

Rozmiary cząsteczek pigmentów nie przekraczają na ogół 1000 nm [21]. Uzyskany w procesie barwienia kolor polimeru stanowi wypadkową dwóch zjawisk – absorpcji (powstawanie koloru) i rozpraszania (nieprzezroczystość). Rozpraszanie zależy bezpośrednio od wielkości cząstek pigmentu. Ze wzrostem różnicy pomiędzy współczynnikiem załamania światła pigmentu i ośrodka, zwiększa się intensywność rozpraszania [38].

Ze względu na budowę chemiczną pigmenty dzieli się na [11, 33]:

- organiczne – pozyskiwane z zasobów naturalnych, o dużej sile tinktorialnej, jednak o stosunkowo małej odporności termicznej; do tej grupy zalicza się także laki – powstające poprzez wytrącanie pigmentu z roztworu,
- nieorganiczne – cechujące się mniejszą siłą tinktorialną i żywością odcieni, jednak odporniejsze termicznie. Do tej grupy należą pigmenty mineralne (pozyskiwane poprzez oczyszczanie skał i minerałów) i syntetyczne (produkowane metodami chemicznymi), w tym również metaliczne (proszki metali żelaznych i nieżelaznych) oraz perłowe (produkowane na bazie płytek miki odpowiedzialnej za efekt „mienienia się”).

Pigmenty organiczne wyróżniają się mniejszą odpornością cieplną w porównaniu do pigmentów nieorganicznych. Ich cechą charakterystyczną jest szeroki zakres oraz duża jaskrawość barw. Z tego względu ich udział w całkowitej masie tworzywa jest znacznie mniejszy i nie przekracza 0,1–0,2% [42]. Pigmenty organiczne stosowane do barwienia tworzyw polimerowych charakteryzują się budową chemiczną zbliżoną do barwników. Pigmenty te w zależności od grupy chromoforowej dzieli się na nitrowe, nitrozowe, azowe, trifenylometanowe,

antrachinonowe, siarkowe czy ftalocyjaninowe [34]. Najczęściej stosowanymi pigmentami organicznymi są związki azowe (czerwień, oranże, żółcienie) oraz pigmenty ftalocyjanianowe (zieleń, błękit) [42].

Tabela 1. Ważniejsze grupy związków chemicznych znajdujące zastosowanie do barwienia tworzyw [33]

Pigmenty	Nieorganiczne	Organiczne
biel	dwutlenek tytanu tlenki i siarczki cynku	– –
żółcienie	żółcień kadmowa żółcień chromowa żółcień żelazowa	pigmenty monoazowe pochodne antrachinonu pochodne izoindolinowe
czerwień	czerwień kadmowa czerwień molibdenowa czerwień żelazowa	pigmenty dwuazowe pochodne kwasu perytenotetrakarbonylowe pochodne izoindotizowe
fiolet	fiolet manganowy	fiolet dwuokzynowy pochodne tioindyge
błękit	ultramaryna błękit kobaltowy	błękit ftalocyjaninowy pochodne antrachinonu
zieleń	zieleń chromowa zieleń kobaltowa	zieleń ftalocyjananowa
brunat	brunat żelazowy	pigmenty dioksazyny
czerń	sadza czerń żelazowa czerń antymonowa	czerń anilinowa

Pigmenty nieorganiczne są związkami charakteryzującymi się dużą odpornością cieplną, a ich udział w całkowitej masie tworzywa wynosi najczęściej 0,5–4%. Największym znaczeniem w tej grupie pigmentów wyróżnia się dwutlenek tytanu (TiO_2), który stosowany jest głównie jako tzw. wybielacz optyczny (rozjaśniacz) [42]. Poza tym do pigmentów białych zalicza się jeszcze biel cynkową (ZnO), litopon ($\text{BaSO}_4 + \text{ZnS}$), biel ołowiową siarczanową (PbSO_4) i biel ołowiową węglanową ($2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$).

Poza pigmentami białymi w tej grupie duże znaczenie mają sadze –pigmenty czarne. Sadze powstają w wyniku częściowego spalania lub pirolizy gazów ziemnych, olejów lub benzenu. Charakteryzują się odpornością na wysoką temperaturę, nie wykazują tendencji do migracji, a także mają korzystny wpływ na właściwości i trwałość polimeru, w którym są zdyspergowane. Jako pigmenty stosuje się cząstki o wielkości 5–50 μm .

Ponadto w grupie pigmentów nieorganicznych znajdują się między innymi żółcień kadmowa ($\text{CdS} + \text{BaSO}_4$), żółcień chromowa (PbCrO_4), żółcień żelazowa ($\text{FeO}(\text{OH})$), czerwień kadmowa ($\text{CdS} + \text{CdSe}$), cynober (HgS), glejta (PbO), minia (Pb_3O_4), czerwień żelazowa (Fe_2O_3), realgar (As_2S_3), umbry (mieszanina tlenków żelaza i manganu), ochra (mieszanina tlenków żelaza, manganu, glinu i krzemu), zieleń szwajnfurcka, ultramaryna, lazur miedziowy, brąz glinowy czy tlenki chromu (barwią na kolor zielony) [34, 42].

W procesie barwienia tworzyw polimerowych największą rolę odgrywają pigmenty z grupy azowej, które charakteryzują się stosunkowo niską ceną, odpornością na odbarwienia, dobrą stabilnością w wysokiej temperaturze, odpornością na światło oraz dużą siłą tinktorialną [38]. Chromoforem, czyli grupą funkcyjną nadającą barwę związkowi organicznemu, w przypadku barwników azowych jest grupa azowa. Grupa funkcyjna jest odpowiedzialna za absorpcję promieniowania w zakresie widzialnym, a sama grupa azowa zaliczana jest (pod względem chemicznym) do silnych chromoforów. Pigmenty azowe znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle. Wykorzystuje się je między innymi do barwienia elementów w branży odzieżowej, papierniczej czy fotograficznej. Wynika to przede wszystkim z łatwości przebiegu reakcji łączenia pigmentu z polimerem czy uzyskiwanie nieograniczonej różnorodności barw poprzez stosowanie kombinacji soli diazoniowych, amin i fenoli. W przemyśle chemicznym w zakresie barwników azowych produkuje się przede wszystkim żółcień, oranże, czerwienie i bordo [11] m.in. chryzoidynę (pomarańczowy barwnik do papieru i skóry), oranż II (barwnik do włókien białkowych – wełna, jedwab), czerwień para (barwnik wytwarzany bezpośrednio na tkaninach), oranż metylowy (stosowany jako chemiczny wskaźnik pH) oraz czerwień Kongo (używana jako wskaźnik pH) [23]. Organiczne pigmenty azowe stosowane są głównie do barwienia wiskozy oraz wyrobu farb poligraficznych. Tylko nieliczne z nich mogą być stosowane do barwienia tworzyw polimerowych i gumy [11].

Sposoby barwienia tworzyw polimerowych

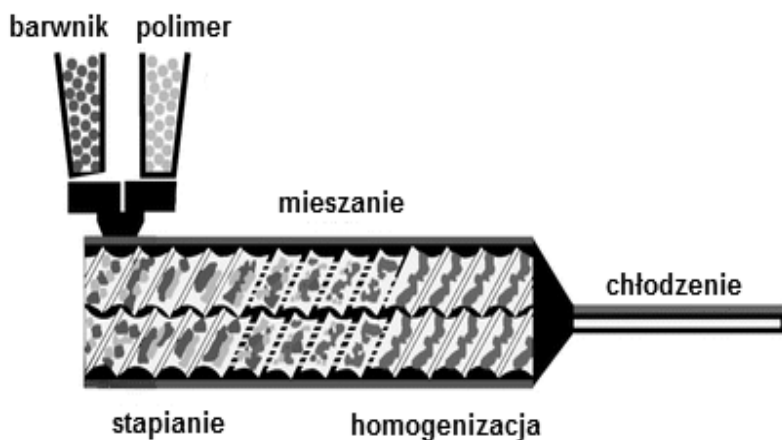
Jakość barwienia tworzyw polimerowych zależy głównie od grubości wytworu, ilości i metody dozowania środka barwiącego oraz parametrów procesu przetworstwa [11, 13].

Barwienie tworzyw polimerowych jest ważnym zabiegiem technologicznym wynikającym przede wszystkim z określonych potrzeb odbiorcy oraz wymagań częstych zmian kolorystycznych [22, 33]. Proces barwienia polimerów można przeprowadzać różnymi sposobami [11, 33, 39, 42]:

- a) w masie:
 - pośrednie – polega na wstępnym wymieszaniu tworzywa z pigmentem/barwnikiem i środkami pomocniczymi, który następnie przetwarza się np. w wyciśnarkach i granuluje; otrzymany w ten sposób granulat, służący

cy do barwienia wyrobów, charakteryzuje się dobrą dyspersją środka barwiącego i równomiernością wybarwień,

- bezpośrednie – polega na mieszaniu tworzywa polimerowego z pigmentem/barwnikiem i środkami pomocniczymi, który następnie jest przetwarzany na wyrób finalny (rys. 2),
- b) za pomocą koncentratów barwiących – polega na wymieszaniu tworzywa z pastą/koncentratem o dużym stężeniu środka barwiącego przy udziale środków pomocniczych,
- c) barwienie powierzchniowe – polega na zanurzeniu gotowego wyrobu w kąpeli będącej roztworem lub zawiesiną pigmentu/barwnika, w określonej temperaturze i czasie,
- malowanie – polega na nakładaniu na odpowiednio przygotowaną powierzchnię warstwy lakieru, we wstępnej fazie malowania rozpuszczalniki zawarte w lakierach reagują z tworzywem polimerowym, a następnie odparowują pozostawiając warstwę lakieru na stałe związaną z podłożem,
- drukowanie – podobnie jak malowanie, polega na nakładaniu na barwioną powierzchnię powłoki, jednak w tym przypadku nie reaguje ona z podłożem, a funkcję wiążącą pełni najczęściej tworzywo rozpuszczone np. w farbie.



Rysunek 2. Technologia barwienia polimerów – metoda mieszania bezpośredniego [7]

Korzystne efekty barwienia tworzyw polimerowych uzyskuje się przy dobrym zdyspergowaniu środków barwiących [1, 11, 14, 27, 28]. Znanych jest wiele metod dyspergowania pigmentów w tworzywach polimerowych w zależności od stanu skupienia fazy rozpraszającej w temperaturze pokojowej. Możliwe jest między innymi sporządzenie stężonych past pigmentowych, które rozprowadza się w roztworach polimerów (emalii i farb). Konglomeraty pigmentów

rozdrabnia się przez zmielenie lub ścinanie w specjalnych urządzeniach. W celu uzyskania dyspersji stosuje się młyny trójrolkowe, mieszadła łopatkowe w kształcie litery Z lub młyny kulowe. W przypadku prowadzenia procesu ciągłego stosuje się młynki koloidalne, mieszarki masy formierskiej oraz mieszadła kawitacyjne. Niezależnie od rodzaju i budowy chemicznej wybrany pigment dodaje się do cieczy nośnej otrzymując dość sztywną masę, ale na tyle płynną by można ją było rozcierać w młynku. Mazistą mieszkankę rozciera się kilkakrotnie do uzyskania właściwości zgodnych z normami. Przy produkcji pasty pigmentowej ważną jej wielkością charakterystyczną jest liczba olejowa, która wyraża w procentach najmniejszą ilość spoiwa, jaka jest potrzebna do zwilżenia wszystkich cząstek pigmentu.

W przypadku mieszania pigmentów ze stałymi polimerami konieczne jest ich wprowadzenie wraz z innymi dodatkami (np. stabilizatorami, środkami wulkanizującymi, smarami, napelniaczami). Pigmenty miesza się z polimerami w mieszarce bębnowej szybkoobrotowej lub w młynie kulowym, po czym wytwarza się granulaty przy zastosowaniu wyciśkarki jedno- lub dwuślimakowej bądź homogenizuje na gorąco w mieszarce zamkniętej lub na walcach. Mieszanie pigmentów z polimerami można również prowadzić w ogrzewanej mieszarce zamkniętej typu Banbury albo w ogrzewanej walcierce dwurolkowej [34]

Metody określania barwy i połysku wyrobów z tworzyw polimerowych

Barwa

Barwa i połysk pełnią istotną rolę w ocenie stanu powierzchni wytworów z tworzyw polimerowych, gdyż decydują o ich dekoracyjności [4, 9, 14, 16, 24, 27]. Przy ocenie jakości tych wyrobów bardzo ważny element stanowi pomiar oraz kontrola barwy. Nowoczesne programy komputerowe służące do projektowania, poza kształtem geometrycznym oraz funkcjonalnością wyrobu, umożliwiają także ustalenie ich koloru. Właściwe barwy można określić przy minimalnej liczbie prób i błędów, a dodatkowo możliwe jest szybkie reagowanie na zmienne wymagania zgłaszane przez klientów czy spełnienie tych wymagań przez rynek środków barwiących. Barwę danego wyrobu można kontrolować na każdym etapie jego wytwarzania [4, 9, 14, 24, 31].

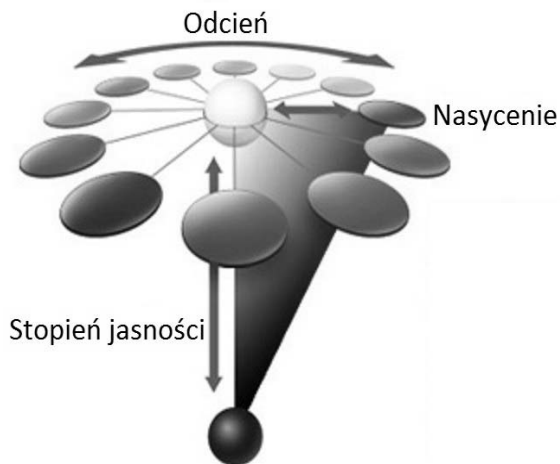
Pojęcia „kolor” i „barwa” uznawane są za synonimy, jednak w wielu dziedzinach np. malarstwie czy poligrafii, dochodzi do zasadniczego rozróżnienia tych dwóch terminów. Barwa oznacza doznanie wzrokowe, zjawisko psychofizyczne, natomiast kolor jest terminem technicznym, cechą materiału i np. w wyniku nałożenia farby, w danym kolorze, na dwa zupełnie inne podłoża, można odnieść wrażenie widzenia dwóch odmiennych barw [37].

Samo pojęcie barwy można tłumaczyć na wiele sposobów, jednocześnie zdając sobie sprawę z tego, że barwa to w istocie światło widzialne. Światło widzialne jest wycinkiem promieniowania elektromagnetycznego o zakresie

400 - 800 nm, a barwa to wynik selektywnej absorpcji promieniowania z tego zakresu. Pochłonięcie fragmentu promieniowania o określonej długości fali ze światła białego powoduje, że pozostała część promieniowania dochodząca do oka wywołuje wrażenie barwy dopełniającej [19].

Barwa stanowi niepowtarzalne, indywidualne doświadczenie człowieka, które nie może być mierzone. W tym przypadku można dokonywać jedynie pomiarów właściwości transmisyjno – refleksyjnych materiału, czyli ilości światła o danej spektralnej charakterystyce, która jest odbijana bądź przepuszczana przez materiał w określonych warunkach. Prowadzona obecnie kontrola barwy opiera się na instrumentalnych pomiarach właściwości odbijająco – przepuszczalnych materiałów oraz na przekształcaniu uzyskanych wyników w tak zwane dane barwometryczne, czyli liczby (najczęściej trzy) bezpośrednio wiążące wrażenie barwy obserwatora w danym oświetleniu [33].

W innym ujęciu barwa jest widmem fal elektromagnetycznych z zakresu od 380 nm (fiolet) do 780 nm (czerwień), które ma swoje odwzorowanie w matematycznych modelach, w postaci trójwymiarowych przestrzeni barw. Barwa jest wrażeniem wzrokowym wywołanym w mózgu człowieka przez promieniowanie, które pada na receptory oka. Barwę opisują jej trzy atrybuty – odcień, nasycenie i stopień jasności (rys. 3) [4, 9, 15, 24].

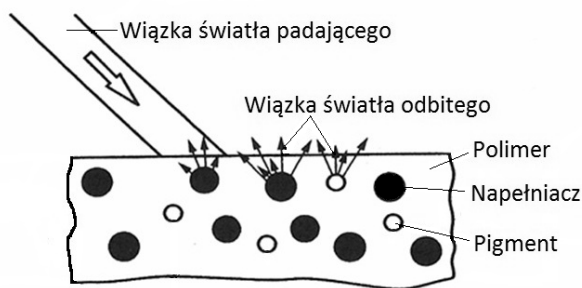


Rysunek 3. Atrybuty barwy w przestrzeni HSL [24]

Należy jednak pamiętać, że barwa nie jest cechą bezwzględną, ponieważ zależy od wielu czynników np. stanu powierzchni badanych wytworów czy samopoczucia obserwatora [5, 6, 11, 33].

Gdy światło pada na domeny rozpraszające np. pigmenty, dochodzi do rozproszenia światła odbitego (rys. 4). Na wartość światła odbitego składa się ilość

światła odbitego od powierzchni oraz od warstw wewnętrznych badanego wyrobu. W efekcie można obserwować barwę nadaną przez pigment [13].



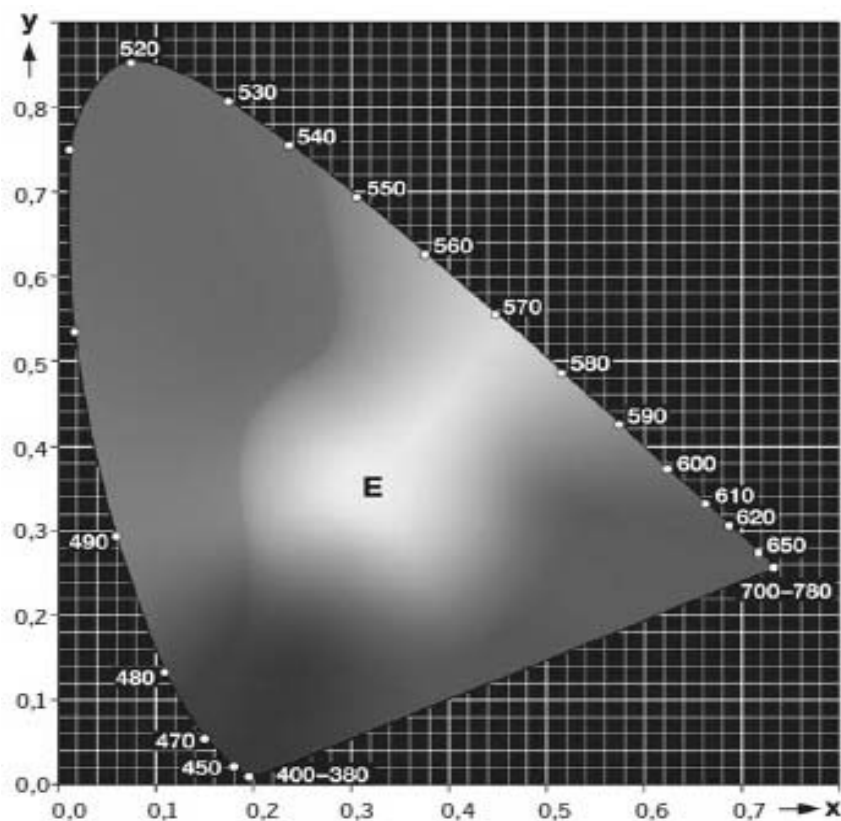
Rysunek 4. Schemat wewnętrznego rozproszonego odbijania światła [13]

Metody pomiaru barwy

Według normy PN – 90/E – 01005 [29] barwa jest to właściwość percepcji wzrokowej, która jest kombinacją cech chromatycznych i achromatycznych. Barwa może być opisana nazwami barw chromatycznych (żółta, czerwona, zielona) lub achromatycznych (biała, szara, czarna), jak również przymiotnikami (np. jaskrawa, przyćmiona, jasna) [9].

Najważniejsze przestrzenie barw zostały ujęte w normach międzynarodowych, które stosuje się w różnych dziedzinach produkcyjnych, np. w przemyśle farb i lakierów, przemyśle spożywczym czy w medycynie. Za standard przyjęty został układ kolorymetryczny CIE – skrót od nazwy Commission Internationale de l'Eclairage [15]. Obecnie większość stosowanych systemów pomiaru barwy sprowadza się do wyznaczania matematycznych modeli barwy – podstawowych składowych trójkromatycznych barwy X, Y, Z [10]. Ze względów praktycznych z kartezjańskiego układu współrzędnych XYZ wyprowadzono współrzędne chromatyczności x i y (określające barwę badanego wytworu) oraz wartość jasności Y. Dokładny opis wspomnianego przekształcenia można znaleźć w literaturze, m.in. w pracy [15]. Każda barwa może zostać jednoznacznie opisana trzema współrzędnymi. Barwy o takiej samej jasności Y mogą być przedstawione za pomocą dwóch współrzędnych na jednej płaszczyźnie.

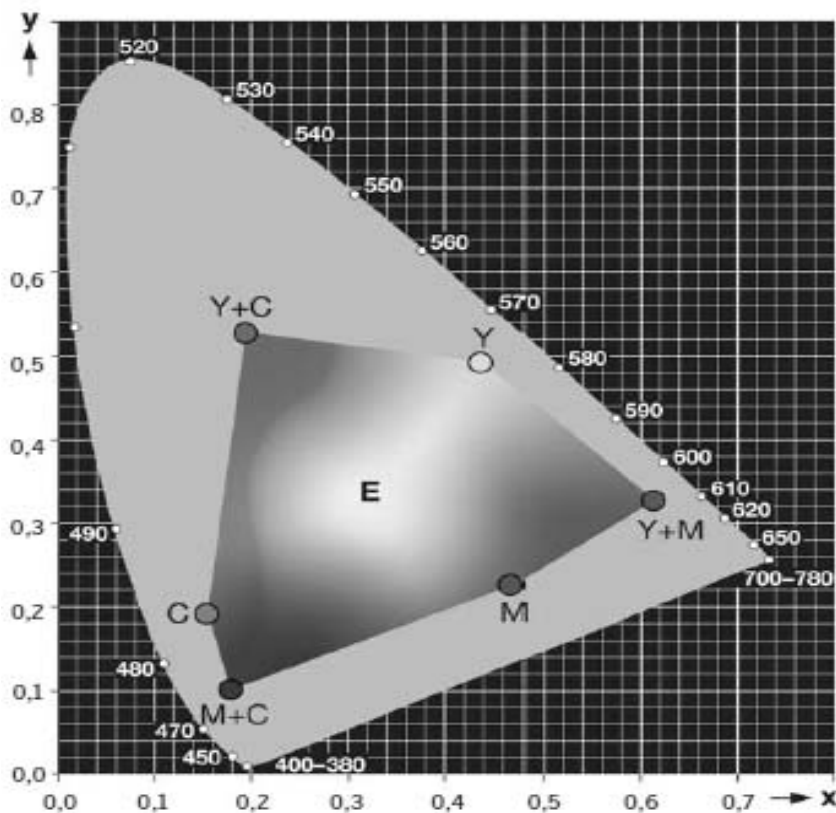
Przekrój przestrzeni barw CIE względem danej jasności tworzy płaską powierzchnię chromatyczności CIE (rys. 5). Barwy widmowe są barwami o największym stopniu nasycenia, które można uzyskać z poszczególnych odcieni barw (długości fal) – są one usytuowane na obrzeżach płaskiego wykresu chromatyczności CIE.



Rysunek 5. Wizualne postrzeganie barw w płaszczyźnie o danej jasności przestrzeni barw CIE (płaski wykres chromatyczności, tzw. „podeszwa”) [15]

Na rysunku 5 ciąg barw opisany jest długościami fal (w nm), które odpowiadają danej barwie. Tak zwana linia purpury na wspomnianym wykresie jest to linia łącząca punkty, które odpowiadają długości 380 i 780 nm. Współrzędne układu trójkromatycznego wszystkich barw, które powstają w wyniku addytywnego łączenia barw widmowych, zawarte są wewnątrz powierzchni zamkniętej ciągiem barw widmowych i linią purpury. Punkt środkowy posiada współrzędne $x = 0,333$ i $y = 0,333$. Dla pierwotnych źródeł światła punkt ten oznaczony jest literą E (widmo równoenergetyczne lub ekwienergetyczne) lub (czasami) literą U – dla obiektów odbijających promieniowanie. Nasycenie wszystkich barw wzrasta począwszy od punktu środkowego w kierunku barw widmowych [15].

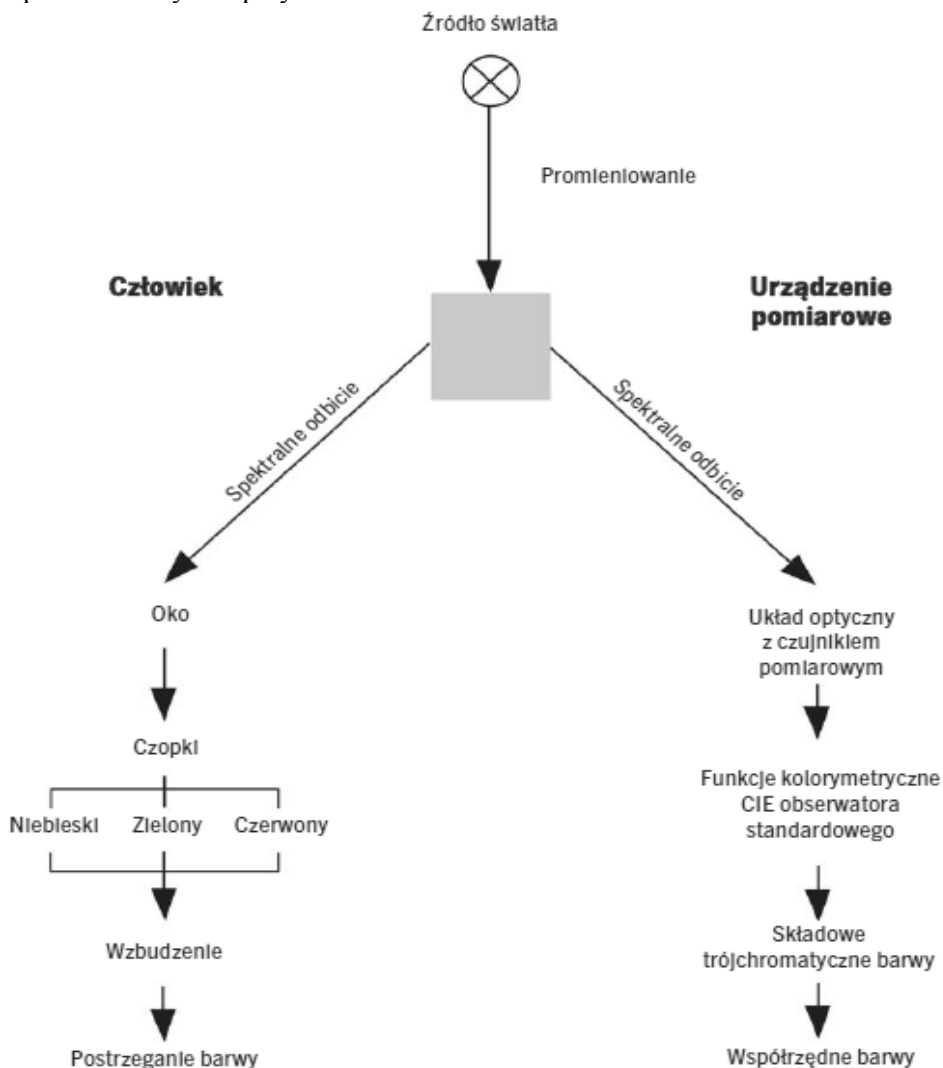
W skali europejskiej DIN 16539 (rys. 6) zdefiniowane są pozycje barw farb offsetowych: cyjanowej, purpurowej i żółtej, do drukowania trój- i czterobarwnego. Poza tym określone są również pozycje drugorzędowych barw: czerwonej, zielonej i niebieskiej, które powstały z subtraktywnego tworzenia barw [15].



Rysunek 6. Odtwarzalny obszar barw według skali europejskiej – DIN 16539 [15]

Jak już wspomniano, do jednoznacznego oznaczenia barwy wymagane są trzy wielkości liczbowe [15]. Kolorymetria (dział metrologii zajmujący się ilościowym opisem i pomiarem barw [20]) opisuje, jak te liczby ustalić oraz określa zależności pomiędzy nimi. Barwę mierzy się za pomocą kolorymetrów bądź spektrofotometrów, które pozwalają uzyskać wartości liczbowe umożliwiające zlokalizowanie danego koloru w konkretnej przestrzeni barw. Zasada działania tych urządzeń naśladuje model postrzegania barw przez człowieka (rys. 7) [15]. Spektrofotometry, tak jak ludzkie oko, są w stanie zidentyfikować kolor danego elementu za pomocą filtrów interferencyjnych znajdujących się wewnątrz urządzenia. Na próbkę umieszczoną w polu pomiarowym emitowane jest znormalizowane światło białe (jako zawierające wszystkie składowe światła widzialnego), które odbija się od badanej powierzchni. Należy zwrócić uwagę, że odbiciu ulega tylko fala o określonej długości - barwie danego wyrobu, pozostałe fale są absorbowane przez materiał. Odbita fala pada na system filtrów, odpowiedzialnych za szczytywanie fal o określonej długości. Po przetworzeniu odebranego sygnału na impuls elektryczny przez urządzenie, na jego wyświetlaczu pojawia

się wynik pomiaru w postaci składowych wybranego modelu przestrzeni barw np. CIE *Lab*. Istotny jest fakt, że spektrofotometry są przeznaczone do badania próbek niewykazujących wyraźnej tekstury. Pomiaru barwy można dokonywać za pomocą urządzeń o geometrii, czyli kącie padania światła na badaną powierzchnię, 45/0 i sferycznej [30]. Pomiary na urządzeniach z geometrią sferyczną można wykonywać w dwóch wariantach: spin (ang. *specular included* SCI) – pomiar barwy wraz z połyskiem oraz spex (ang. *specular excluded* SCE) – pomiar barwy bez połysku.



Rys. 7. Postrzeganie barwy przez człowieka oraz zasada działania urządzeń do pomiaru barwy [15]

Ze względu na istnienie wielu definicji, nie zawsze kompatybilnych, barwę opisuje się nie tylko poprzez określenie jej widma, ale przede wszystkim za pomocą modeli, które można porównać do mechanizmu odbierania barw przez oko ludzkie. Spośród wielu modeli są takie, które obejmują cały zakres widma fal elektromagnetycznych (od 380 do 780 nm), np. CIE *Lab*, jak i te, które zawierają tylko część tego widma, np. RGB [4, 6, 9, 15, 19].

Do określania barw korzysta się z wielu modeli. Jest to związane z brakiem możliwości wykorzystania jednej przestrzeni barw we wszystkich praktycznych zastosowaniach. Modele te można podzielić następująco [4]:

- niezależne np. CIE XYZ, CIE *Lab*, CIE *Luv*,
- związane z użytkownikiem np. HLS, HSV,
- związane ze sprzętem np. CMY, CMYK, RGB.

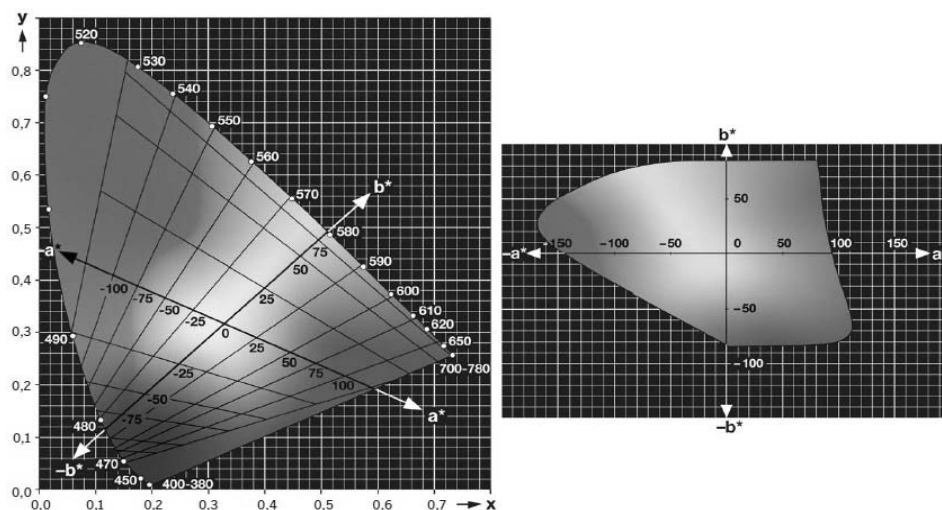
Wymienione przestrzenie barw wywodzą się z przestrzeni CIEXYZ i powstały w celu pełniejszego uwzględnienia pewnych cech psychofizjologii widzenia, np. metameryzmu czy równomierności rozkładu barw [4, 9, 11, 15, 19].

Wyróżnia się wiele innych przestrzeni barw, np. HSL czy CMY, jednak wśród najczęściej stosowanych przestrzeni barw stosuje się model niezależny CIE *Lab*, CIE *Luv* oraz model zależny RGB. W Stanach Zjednoczonych stosowane są również inne przestrzenie barw, np. system CMC oraz przestrzeń barw Munsell'a [15].

Przestrzeń barw CIE *Lab* najczęściej stosowana jest do pomiaru barwy ciał nieświejących (rys. 8). Model CIE *Lab* jest matematyczną transformacją przestrzeni CIE XYZ. Kształt poszczególnych płaszczyzn jasności zmienia się w zależności od jasności L [15].

Przestrzeń CIE *Lab* została wprowadzona jako wynik badań nad percepcją przez oko ludzkie różnicy między barwami. W modelu tym barwy znajdujące się w takiej samej odległości od siebie postrzegane są jako analogicznie różne. Oko ludzkie, w zależności od barwy, wykazuje różną wrażliwość na różnice występujące w jej obrębie. Stąd przestrzeń CIE XYZ została zmodyfikowana do przestrzeni CIE *Lab* w ten sposób, aby można było adaptować ją do postrzegania i oceny barwy przez człowieka. W modelu CIE *Lab* poszczególne litery oznaczają: L – luminancję (jasność), jako własność achromatyczną, (gdzie do kolorów achromatycznych zalicza się czerń, biel i odcienie szarości), a – składową chromatyczną od zielonej do czerwonej i b – składową chromatyczną od niebieskiej do żółtej [4, 9, 15].

CIE *Luv* to model utworzony również przez transformację przestrzeni barw CIE, ale według innych wzorców niż przy transformacji CIE *Lab*. W tym przypadku współrzędne trzech osi oznaczone są przez L , u i v . CIE *Luv* stosuje się często do oceny barwy światła na monitorach (np. skanerów lub komputerów) [15].



Rysunek 8. Położenie osi a i b przestrzeni barw CIE Lab na wykresie chromatyczności x, y (z lewej) i płaszczyzna przekroju przestrzeni barw CIE Lab dla barw ciał nieświejących o jasności $L=50$ (z prawej) [15]

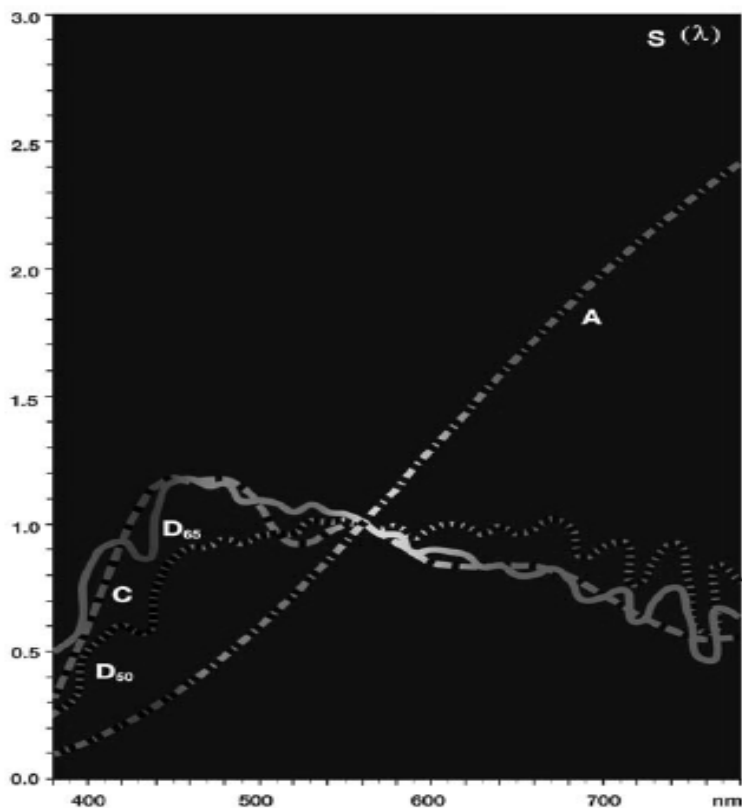
W urządzeniach do przetwarzania obrazu stosuje się przede wszystkim model RGB. Przestrzeń tę przedstawia się za pomocą trzech współrzędnych: R, G, B (Red, Green, Blue). Model RGB opisuje wszystkie barwy, jakie można uzyskać przy pomocy urządzeń wejścia (np. skanerów, aparatów cyfrowych) i wyjścia (np. monitorów, drukarek). Poszczególne urządzenia interpretują przestrzeń RGB w konkretnym, właściwym sobie, zakresie (tzw. colour gamut czyli paleta barw) [4, 9, 15, 19].

Pomiary barwy należy przeprowadzać w znormalizowanych warunkach. Zazwyczaj wielkości kolorymetryczne wyznaczane są w stosunku do umownie przyjętej wartości „idealnej bieli” [15]. Do pomiarów barwy zdefiniowane zostały standardowe źródła światła, spośród których najpopularniejszymi są [26]:

- standardowy iluminat normalny D50 – odpowiada naturalnemu światłu dziennemu w południe,
- standardowy iluminat normalny D65 – odpowiada naturalnemu światłu dziennemu (uśrednione nieba północnego) w temperaturze barwowej najbliższej 6500 K,
- standardowy iluminat normalny C – odpowiada naturalnemu światłu dziennemu w temperaturze barwowej najbliższej 6744 K (średnie światło dzienne, sztuczne światło dzienne), rozkład widmowy nie jest tak zbliżony do naturalnego światła dziennego jak iluminata D65 – szczególnie w zakresie ultrafioletu,

- standardowy iluminat normalny A – światło żarowej lampy wolframowej, posiadający rozkład widmowy ciała doskonale czarnego w temperaturze 2856 K,
- standardowy iluminat F2 i F7 – reprezentujący światło białe fluorescencyjne.

Rozkłady spektralne części wspomnianych źródeł światła pokazano na rysunku 9.



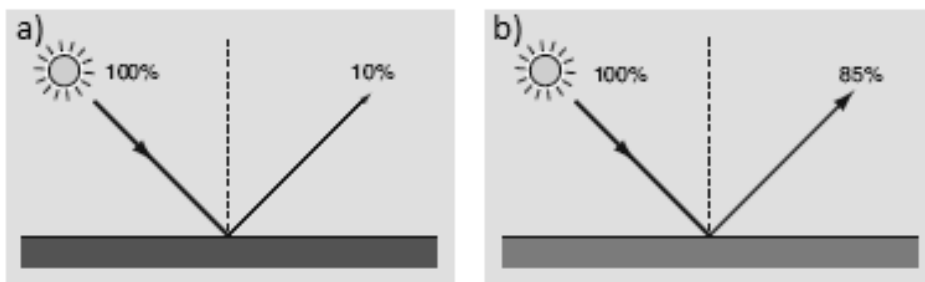
Rysunek 9. Rozkłady spektralne wybranych źródeł światła: A, C, D₅₀ i D₆₅ [15]

Połysk

Równie istotne znaczenie ma połysk wytworów z tworzyw polimerowych. Połysk jest to cecha wizualna przedmiotu determinująca jego właściwości dekoracyjne oraz użytkowe [30, 36, 41]. Stanowi przede wszystkim wrażenie optyczne powstające na skutek odbicia i rozproszenia światła na powierzchni ciał stałych i cieczy lub bezpośrednio nad nią. Połysk można też określić jako intensywność światła odbitego pod tym samym kątem, co światło padające na badaną powierzchnię [5, 18]. Wartość połysku zależy od rodzaju oświetlenia oraz jego absorpcji, współczynnika załamania światła, transparentności barwy, po-

wierzchni wytworu (w tym morfologii, chropowatości i położenia badanej płaszczyzny) [13, 18].

Ilość światła odbitego zależy również od rodzaju badanego materiału. Dla niemetalu np. tworzywa polimerowych, ilość światła odbitego wzrasta wraz ze wzrostem kąta padania światła na badaną powierzchnię. Światło, które nie ulega odbiciu wnika w materiał, gdzie ulega absorpcji lub rozproszonemu odbiciu (w zależności od barwy). Natomiast dla metali intensywność odbicia jest zdecydowanie silniejsza i nie tak uzależniona od kąta padania światła. Sposób odbijania światła przez niemetały i metale przedstawiono na rysunku 10.

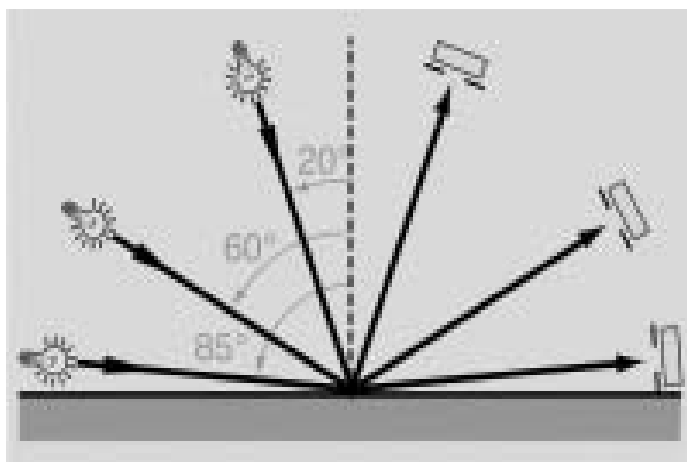


Rysunek 10. Odbijanie światła przez a) niemetały oraz b) metale [35]

Metody pomiaru połysku

Pomiary połysku powierzchni polimerowych wykonuje się zgodnie z normą PN – EN ISO 2813 [30], z wykorzystaniem specjalnych urządzeń – połyskomierzy. Urządzenie emituje na badaną powierzchnię strumień białego, niespolaryzowanego światła pod określonym kątem α (kąt między prostą prostopadłą do analizowanej płaszczyzny, a prostą równoległą do wiązki promieniowania). Badanie to polega na zmierzeniu intensywności odbitego i rozproszonego światła w wąskim zakresie kąta odbicia. Intensywność światła odbitego zależy w głównej mierze od rodzaju materiału oraz kąta padania światła. Wyniki pomiaru połysku wyraża się w jednostkach połysku GU (ang. *Gloss Units*). Wysoki połysk charakteryzuje duża wartość GU (do 100), a mała wartość wskazuje na matowość powierzchni (brak połysku) [2]. Wartości kąta padania światła stosowane przy badaniu połysku oraz zakresy wartości Gloss Units różnych materiałów przedstawiono w tabeli 2.

Połyskomierzami bada się połysk przy różnej geometrii (kącie padania światła na badaną powierzchnię): 20°, 45°, 60°, 75°, 85° (rys. 11) – najczęściej stosuje się dwa kąty 20° (zalecany dla powierzchni o dużym połysku) oraz 60° (zalecany dla powierzchni o średnim połysku) [2].



Rysunek 11. Pomiar połysku przy różnych kątach padania światła [36]

W przypadku tworzyw polimerowych wstępne badania połysku wykonuje się przy kącie padania światła 60° . Gdy wartość połysku jest mniejsza niż 10 GU lub większa niż 70 GU wówczas wykonuje się dodatkowe pomiary przy innym kącie padania światła (tab. 2) [30].

Tabela 2. Wartości kąta padania światła stosowane przy badaniu połysku [30]

Stopień połysku	Wartość GU zmierzona przy kącie padania światła 60°	Kąt, przy którym należy wykonywać pomiar
średni	$10 \div 70$	60°
wysoki	> 70	20°
mat	< 10	85°
Zastosowania specjalne		
ceramika		45°
papier, produkty winylowe		75°

Czynnikiem mającym istotny wpływ na połysk wyrobów polimerowych jest tzw. anizotropia optyczna, związana z przechodzeniem lub odbijaniem światła przez warstwy wewnętrzne polimeru, a zależna od usytuowania badanej przestrzeni względem źródła światła. W przypadku tworzyw polimerowych anizotropia optyczna jest związana z orientacją makrocząsteczek polimeru, które

w różnym stopniu pochłaniają padające na wytwór światło, co przyczynia się do powstawania zjawiska dichroizmu (dwubarwności) [13, 25].

Literatura:

- [1] Acierno S., Carotenuto C., Pecce M.: *Compressive and thermal properties of recycled EPS foams*, Polymer Plastic Technology and Engineering, 2010, 49, s. 13–19.
- [2] Ariño I., Kleist U., Rigdahl M.: *Effect of gloss and texture on the color of injection molded pigmented plastics*, Polymer Engineering and Science, 2005, 45, s. 733–743.
- [3] Białecka – Floriańczyk E., Włostowska J.: *Chemia organiczna*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2003.
- [4] Bociąga E., Trzaskalska M., Wróż K.: *Wykorzystanie modeli przestrzeni barw w badaniach barwy wyprasek z tworzywa ABS bez oraz z dodatkiem środków barwiących*, Przetwórstwo Tworzyw, 2011, 6, s. 427.
- [5] Brown R.: *Handbook of polymer testing physical methods*, Marcel Dekker Inc., New York, 1999.
- [6] Charvat R.A., *Coloring of plastics. Fundamental*. Second edition, Wiley – Interscience, New York, 2003.
- [7] Ciardelli F., Ruggeri G., Pucci A.: Dye – containing polymers: methods for preparation of mechanochromic materials, Chemical Society Reviews, 2013, 42, s. 857–870.
- [8] Class H., Schmid H., Winnemann D.: *Jakie są możliwości tworzyw sztucznych?*, Rynek Tworzyw, 2008, 1, s. 22–23.
- [9] Fraser B., Murphy C., Bunting F.: *Profesjonalne zarządzanie barwą*, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2008.
- [10] Gajdzicki B., Gniotek K.: *Pomiar barwy powierzchni płaskich wyrobów włókienniczych*, Pomiary. Automatyka. Kontrola, 2007, 9, s. 573.
- [11] Garda Cz., Kacprzak F.: *Barwienie tworzyw sztucznych*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1972.
- [12] Gnatowski A., Suberlak O., Koszkuł J.: *Wpływ parametrów przetwórstwa na właściwości fizyczne kompozytów polipropylen/poliamid z zastosowaniem jako napelniacza poliwinylpirolidonu*, Kompozyty, 2006, 4, s. 66–67.
- [13] Grellman W., Sediler S.: *Polymer Testing*, Carl Hanser Verlag, Munich, 2007.
- [14] Guide Colouring plastics with masterbatch, <http://www.colourtone-masterbatch.co.uk/pages/technical.html>, dn. 10.02.2012r.
- [15] Heidelberger Druckmaschinen AG: *Barwa i jakość. Przewodnik*, Heidelberg, 2006.

- [16] Hunger K.: *The effect of crystal structure on colour application properties of organic pigments*, Review of Progress in Coloration and Related Topics, 1999, 29, s. 71.
- [17] Hyla I.: *Tworzywa sztuczne. Własności – Przetwórstwo – Zastosowanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
- [18] Ignell S., Kleist U., Rigdahl M.: *Visual perception and measurements of texture and gloss of injection – molded plastics*, Polymer Engineering and Science, 2009, 49, s. 344–353.
- [19] Jaworski R.: *Multimedia i grafika komputerowa*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 2009.
- [20] Kolorymetria, <http://sjp.pwn.pl/slownik/2563933/kolorymetria>, z dnia 08.02.2013r.
- [21] Koszcul J.: *Materiały polimerowe*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 1999.
- [22] Kotowicz R.: Technologia barwienia tworzyw, <http://tworzywa.com.pl/Wiadomo%C5%9Bci/Technologia-barwienia-tworzyw-20833.html>, z dnia 15.01.2013r.
- [23] Mastalerz P.: *Chemia organiczna*, Wydawnictwo Chemiczne, Wrocław, 2000
- [24] Materiały szkoleniowe firmy X – rite, z dnia 25.05.2012r.
- [25] Meyer – Arendt J. R.: *Wstęp do optyki*, PWN, Warszawa 1977.
- [26] Mielicki J.: *Zarys wiadomości o barwie*, Wydawnictwo Fundacji Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź, 1997
- [27] Müller A.: *Coloring of plastics. Fundamentals – Colorants – Preparations*, Carl Hanser Verlag, Munich, 2003
- [28] Murray R.E., Weller J., Kumar V.: *Solid – state microcellular acrylonitrile – butadiene – styrene foams*, Cellular Polymers, 2000, 19, 6, s. 413.
- [29] Norma PN – 90/E – 01005: Technika świetlna. Terminologia.
- [30] Norma PN – EN ISO 2813:2001: Farby i lakiery -- Oznaczanie połysku zwierciadlanego niemetalicznych powłok lakierowych pod kątem 20 stopni, 60 stopni i 85 stopni.
- [31] Norma PN-EN ISO 1133:2006: Tworzywa sztuczne. Oznaczanie masowego wskaźnika szybkości płynięcia (MFR) i objętościowego wskaźnika szybkości płynięcia (MVR) tworzyw termoplastycznych.
- [32] Osiecka E.: *Materiały budowlane. Tworzywa sztuczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005
- [33] Piekarska E.: Wybrane zagadnienia barwienia tworzyw, Przetwórstwo Tworzyw, 2009, 15, 3, s. 98–101.
- [34] Pielichowski J., Puszyński A.: *Technologia tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa, 2003
- [35] Pigmenty i barwniki, Tworzywa, 2011, 4, s. 31.
- [36] Pomiar połysku, <http://www.eurotom.pl/produkty.php?ProductID=64&MID=0>, z dnia 01.02.2013r.

- [37] Suwalski R., Krajewska K.: *Zmienna natura koloru*, http://www.tworzywa.org/artykuly,6534,1,Zmienna_natura_koloru, z dnia 16.01.2013r.
- [38] Trzaskalska M., Kwiatkowski D.: *Badania właściwości fizycznych ABS z dodatkiem pigmentu*, *Przetwórstwo Tworzyw*, 2011, 17, 3, s. 234–237.
- [39] Wielgórski Z.: *Barwienie tworzyw sztucznych*, *Chemia praktyczna*, 1987, 2, s. 52–54.
- [40] Wilczyński K.: *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*, praca zbiorowa pod redakcją K. Wilczyńskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
- [41] Zalewska A., Kowalik J.: *Badania właściwości fizykomechanicznych powłok ochronnych utworzonych z wodorozcieńczalnych kompozycji akrylowych*, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 2012, 5, s. 270.
- [42] Żenkiewicz M.: *Tworzywa wielkocząsteczkowe. Polimeryzacja – właściwości – badania*, Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz, 2002

4. Barwa wyprasek wtryskowych otrzymywanych z tworzywa wielokrotnie przetwarzanego

Wprowadzenie

Zawracanie do przetwórstwa technologicznych odpadów tworzyw, zwanych też odpadami przetwórczymi, nazywane jest recykulacją tworzywa. Najczęściej odbywa się w obrębie pierwotnego układu przetwórczego. Tworzywo polimerowe będące co najmniej drugi raz w obiegu materiałowym, czyli takie, które co najmniej jeden raz podlegało procesowi recykulacji nazywane jest tworzywem wtórnym. Recykulacja jest jedną z najczęściej stosowanych metod utylizacji odpadów tworzyw. Utylizacja obejmuje bowiem szersze działania powodujące ponowne użyteczne wykorzystanie bądź unieszkodliwienie odpadów technologicznych powstający podczas przetwórstwa tworzyw oraz odpadów tworzyw poużytkowych [13].

Wykorzystanie tworzywa pochodzącego z odpadów poużytkowych (poeksploatacyjnych) i pochodzących z niego substancji, materiałów oraz energii nazywane jest natomiast recyklingiem tworzyw [sikora].

Wyróżnia się trzy główne sposoby ponownego wykorzystania tworzyw polimerowych: recykling materiałowy, surowcowy i energetyczny.

Recykling materiałowy, który ze względów ekologicznych jak i ekonomicznych powinien być najczęściej stosowany, polega się na ponownym wykorzystaniu tworzywa odpadowego do procesu przetwórstwa. Jednak wielokrotne przetwarzanie tworzyw polimerowych wtórnych wiąże się najczęściej z pogorszeniem ich właściwości, co było przedmiotem wielu prac badawczych [1, 2, 4, 6, 10, 11].

Celem prezentowanych badań było określenie wpływu wielokrotnego przetwórstwa polipropylenu metodą wtryskiwania na barwę otrzymywanych wyprasek. Wypraski wytworzone z tworzywa pierwotnego zostały poddane wielokrotnemu przetwarzaniu, które obejmowało ich rozdrobnienie i ponowne wtryskiwanie uzyskanego z nich tworzywa wtórnego. Wypraski uzyskane w kolejnych powtórzeniach cyklu przetwórczego były poddawane pomiarom barwy za pomocą spektrofotometru.

Stanowiska badawcze

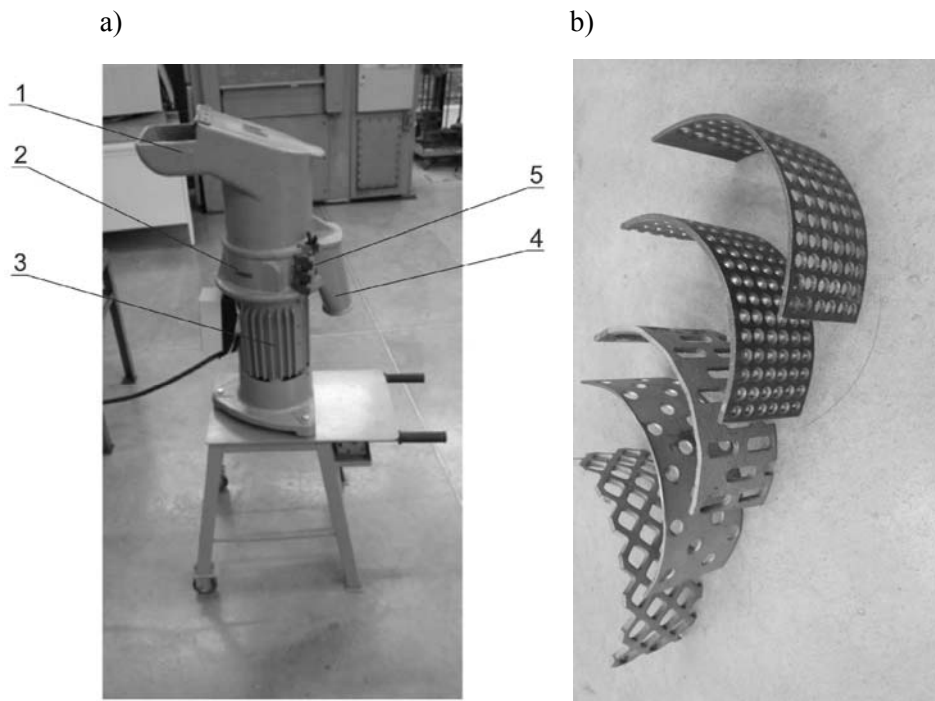
Proces wielokrotnego przetwórstwa przeprowadzono z wykorzystaniem wtryskarki ślimakowej ARBURG model ALLROUNDER 320C [7] z formą wtryskową dwugniazdową do wytwarzania próbek w kształcie wiosełek (rys. 1). Zastosowana forma miała układ przepływowy z zimnymi kanałami.

Tworzywo wtórne do kolejnych powtórzeń cyklu wtryskiwania uzyskiwano przez rozdrobnienie wyprasek wtryskowych przy użyciu młyna granulacyjnego typu SRSE RAPID-2a (rys. 2) wyposażonego w wirnik dwunożowy o prędkości obrotowej 750 obr/min, współpracujący z dwoma nożami nieruchomymi o długości części roboczej 65 mm (rys. 3). Rozdrabnianie próbek przeprowadzono z zastosowaniem sita z otworami okrągłymi o średnicy 8 mm.

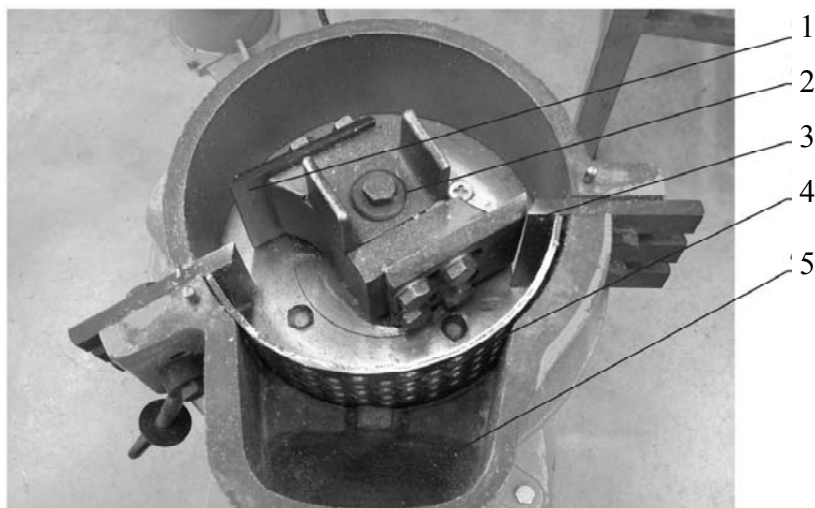
Pomiary barwy otrzymywanych w kolejnych cyklach przetwórczych wyprasek wtryskowych przeprowadzono z zastosowaniem stanowiska badawczego ze spektrofotometrem X - Rite Ci4200 (rys. 4) oraz oprogramowania komputerowego X – Rite Color iQC. Zastosowany spektrofotometr umożliwia wykonywanie pomiarów barwy na powierzchni próbki o średnicy 8 mm z powtarzalnością $0.05 \Delta E^*ab$, przy zgodności pomiarowej $0.2 \Delta E^*ab$ w zakresie spektralnym 400-700nm przy rozdzielczość pomiaru 10nm.



Rys. 1. Wygląd a) wtryskarki ślimakowej ARBURG ALLROUNDER 320C b) gniazda formy wtryskowej do wytwarzania próbek w kształcie wioselek.



Rys. 2. Wygląd a) młyna granulacyjnego RAPID-2a, b) sit wymiennych o różnym kształcie i wymiarach otworów: 1 – otwór zasypowy, 2 – korpus, 3 – silnik napędowy, 4 – dysza odprowadzająca rozdrobnione tworzywo, 5 – mocowanie noży nieruchomych



Rys. 3. Komora robocza młyna granulacyjnego: 1 – nóż ruchomy, 2 – wirnik, 3 – nóż nieruchomy, 4 – sito, 5 – dysza odprowadzająca rozdrobnione tworzywo



Rys. 4. Stanowisko do pomiaru barwy ze spektrofotometrem X-Rite Ci4200 i zestawem kalibracyjnym

Charakterystyka badań

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem polipropylenu o nazwie handlowej Moplen RP 2380 wyprodukowanego w postaci granulatu przez firmę Basell Polyolefins. Tworzywo to jest kopolimerem randomicznym przeznaczonym do wtryskiwania, w swoim składzie zawiera środek nukleujący oraz antystatyczny. Według producenta ze względu na swoje właściwości może być stosowany do wytwarzania cienkościennej opasek o wysokiej przezroczystości, artykułów sportowych, sprzętu rekreacyjnego, zabawek, artykułów gospodarstwa domowego [8].

Badania rozpoczęto do wtryskiwania z tworzywa pierwotnego próbek w postaci wiosełek stosowanych do statycznej próby rozciągania. Proces wtryskiwania przeprowadzono w warunkach przedstawionych w tabeli 1. Z wytworzonych próbek odłożono 5 sztuk w celu zbadania ich barwy, a pozostałe rozdrobniono za pomocą młyna nożowego. Uzyskane w ten sposób tworzywo wtórne ponownie wtryskiwano. Proces przetwórczy obejmujący rozdrabnianie tworzywa oraz jego ponowne wtryskiwanie powtórzono 14 krotnie pobierając po każdym z powtórzeń z wytworzonej partii wyprasek po 5 próbek do pomiarów barwy.

Barwę otrzymanych próbek badano w najszerszym ich miejscu zawsze po tej samej stronie – przeciwnej do wypychacza formy. Wyznaczano parametry opisujące barwę zgodnie z systemem CIELab wykorzystującym do jej opisu w przestrzeni trójwymiarowej L^* , a^* , b^* [9]. Parametr a opisuje barwę od zielonej (wartości ujemne) do czerwonej (wartości dodatnie), parametr b – barwę od niebieskiej (wartości ujemne) do żółtej (wartości dodatnie), natomiast parametr

L to luminacja - jasność, opisujący barwę od czerni do bieli (zmienia się w zakresie od 0 dla barwy czarnej do 100 dla barwy białej) [12].

Tabela 1. Warunki przetwórcze procesu wtryskiwania

Wielkość	Jednostka	Wartość
Ciśnienie wtrysku	bar	700
Ciśnienie docisku	bar	600
Czas docisku	s	6
Czas chłodzenia w formie	s	20
Czas wtrysku	s	2,66
Czas całego cyklu	s	34,34
Siła zwierania formy	kN	500
Szybkość wtrysku	cm ³ /s	10
Temperatura układu uplastyczniającego		
Strefa zasypu	°C	30
I strefa	°C	200
II strefa	°C	210
III strefa	°C	230
IV strefa	°C	250
V strefa	°C	260

Różnice barwy próbek wytworzonych w kolejnych cyklach przetwórczych zostały określone na podstawie wyznaczonej wartości ΔE , który jest odległością euklidesową między dwoma punktami w przestrzeni trójwymiarowej Lab opisującej barwę. Odległość tą można zapisać w postać zależności:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

gdzie: $\Delta L = L_1 - L_2$; $\Delta a = a_1 - a_2$; $\Delta b = b_1 - b_2$ oznacza odpowiednio różnicę parametrów barwy między próbką oznaczaną indeksem 1 oraz próbką oznaczaną indeksem 2.

Przedziały wartości parametru ΔE odpowiadające rozpoznawalności różnicy barwy jakie są przyjmowane w literaturze [3, 5] przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Przedziały wartości parametru ΔE odpowiadające rozpoznawalności różnicy barwy [3]

Zakres zmienności	Różnica barwy
$0 < \Delta E < 1$	niewidoczne różnice barwy
$1 < \Delta E < 2$	bardzo małe różnice barwy, rozpoznawalne tylko przez doświadczonego obserwatora
$2 < \Delta E < 3,5$	średnie różnice barwy, rozpoznawalne przez niedoświadczonego obserwatora
$3,5 < \Delta E < 5$	wyraźne różnice barwy
$\Delta E > 5$	duże różnice barwy.

Wyniki badań

Uzyskane wyniki pomiarów barwy próbek wytworzonych w kolejnych cyklach przetwórczych zostały przedstawione na rysunkach 5–7. Zaprezentowano na nich w postaci graficznej wyznaczone wartości średnie parametrów opisujących barwę L , a oraz b . W wyniku wielokrotnego przetwarzania luminancja-jasność badanego polipropylenu ulega zmniejszeniu, otrzymywane wypraski szarzeją. Największe obniżenie L wynoszące 0,85 występuje po pierwszym powtórzeniu cyklu przetwórczego. W wyniku kolejnych powtórzeń dalsze zmiany luminancji była już mniejsze i zawierały się w zakresie 0,17–0,67. Całkowita różnica luminacji między wypraską otrzymaną z tworzywa pierwotnego oraz otrzymaną z tworzywa wtórnego poddanego 15 krotnemu powtórzeniu cyklu przetwórczego wyniosła 6,85. Biorąc pod uwagę tylko parametr L rozpoznawalna przez niedoświadczonego obserwatora zmiana barwy wyprasek występuje po czwartym powtórzeniu cyklu przetwórczego.

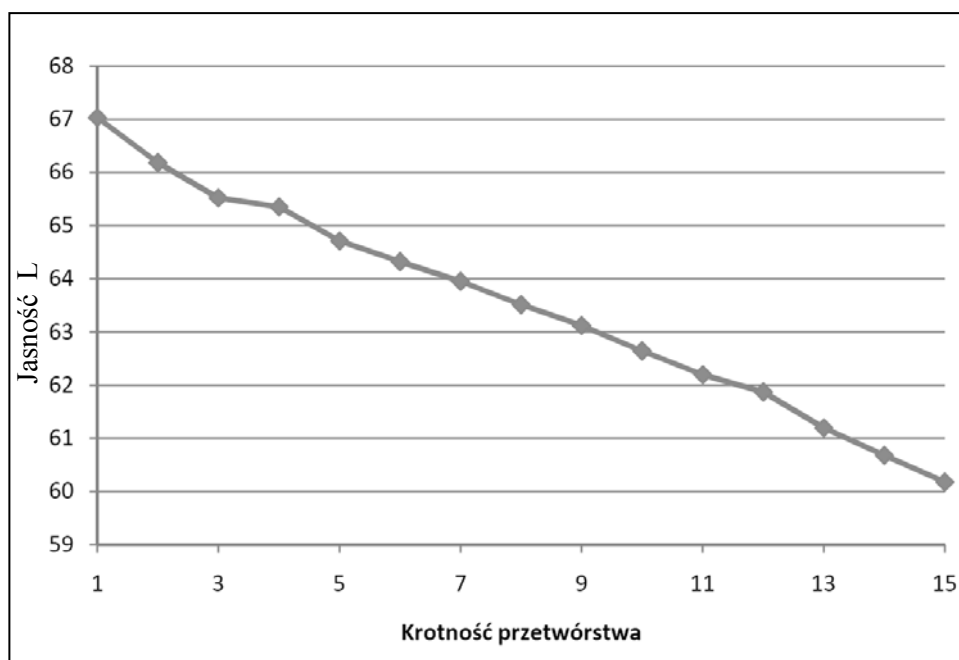
Wielokrotne przetwórstwo badanego polipropylenu nie miało natomiast znaczącego wpływu na parametr a , opisujący barwę otrzymywanych wyprasek (rys. 6). Występujące zmiany tego parametru maksymalnie wynosiły 0,19 i nie jest dostrzegalna przez ludzkie oko.

W przypadku parametru b w wyniku wielokrotnego przetwarzania następuje wzrost jego wartości, co świadczy o zmianie barwy w kierunku odcieni żółtego. Żółknięcie tworzywa może być wywołane m.in. długotrwałym oddziaływaniem podwyższonej temperatury w cylindrze układu uplastyczniającego wtryskarki. Zjawisko to występuje nawet wówczas, gdy temperatura cylindra jest niższa od temperatury rozkładu tworzywa [14]. Również w tym przypadku największa zmiana wartości tego parametru występuje po pierwszym powtórzeniu cyklu

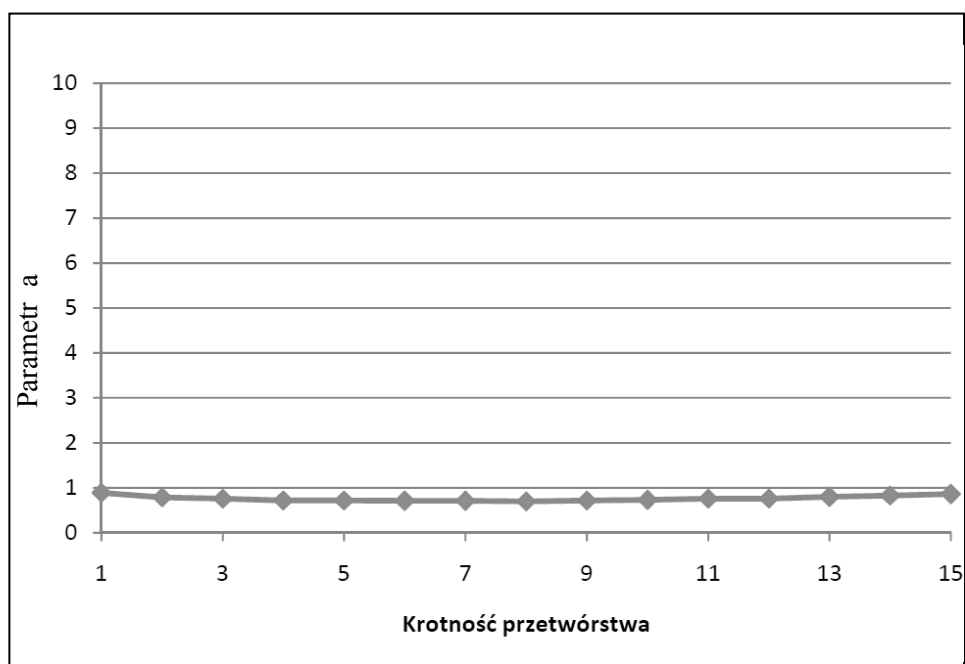
przetwórczego i wynosi 0,92. Wraz z kolejnymi powtórzeniami przyrost wartości jest mniejszy 0,16–0,71.

Tabela 3. Różnice parametrów barwy między próbką z tworzywa pierwotnego oraz próbkami otrzymanymi z tworzywa wtórnego w wyniku wielokrotnego przetwórstwa.

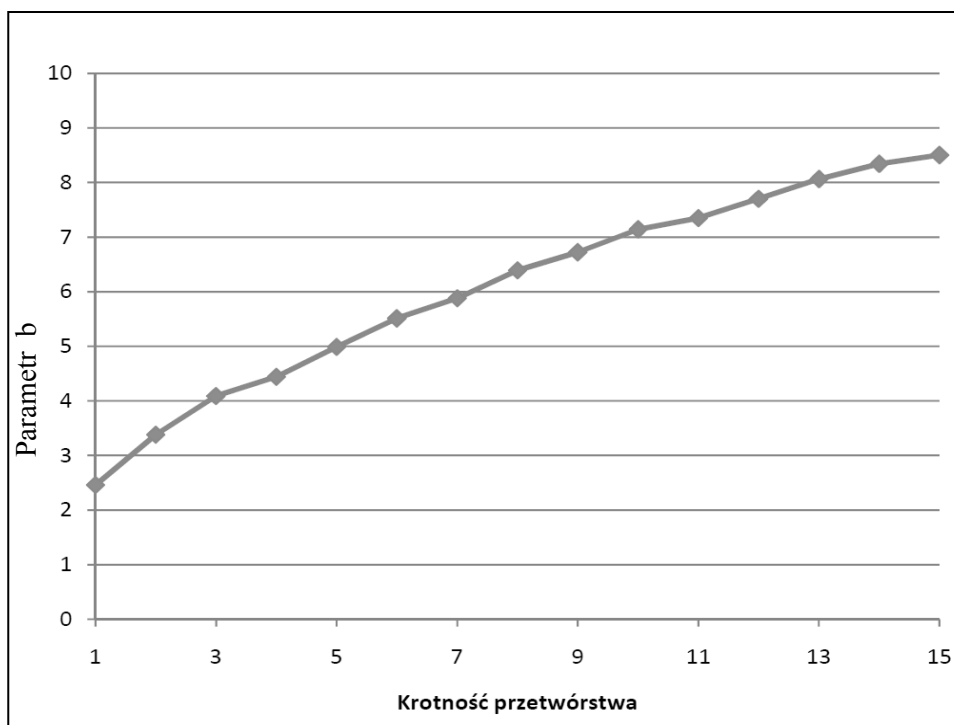
Krotność przetwórstwa	ΔL	Δa	Δb	ΔE
1	0,85	0,10	-0,92	1,26
2	1,51	0,13	-1,63	2,23
3	1,68	0,17	-1,98	2,60
4	2,32	0,17	-2,53	3,44
5	2,71	0,18	-3,05	4,08
6	3,08	0,18	-3,42	4,61
7	3,52	0,19	-3,93	5,28
8	3,91	0,17	-4,26	5,78
9	4,39	0,16	-4,68	6,42
10	4,83	0,13	-4,89	6,87
11	5,16	0,13	-5,24	7,36
12	5,83	0,09	-5,60	8,08
13	6,35	0,06	-5,88	8,65
14	6,85	0,03	-6,04	9,13



Rys. 5. Zależność luminancji L badanego polipropylenu od krotności jego przetwórstwa



Rys. 6. Zależność parametru barwy a badanego polipropylenu od krotności jego przetwórstwa



Rys. 7. Zależność parametru barwy b badanego polipropylenu od krotności jego przetworstwa

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że wielokrotne przetwarzanie polipropylenu metoda wtryskiwania ma wpływ na barwę otrzymywanych wytworów. Porównując wyznaczone wartości ΔE odległość między punktami w przestrzeni opisującej barwę wyprasek otrzymanych w wyniku kolejnych powtórzeń cyklu przetwórczego (tabela 3) z przyjmowanymi w literaturze kryteriami rozpoznawalności różnicy barwy (tabela 2), można stwierdzić, że: Już po pierwszym ponownym przetworzeniu badanego polipropylenu doświadczony obserwator jest w stanie dostrzec różnice barwy między wypraską wytworzoną z tworzywa pierwotnego i z tworzywa wtórnego. Zmiana barwy wyprasek otrzymywanych w kolejnych powtórzeniach cyklu przetwórczego jest rozpoznawalna także przez niedoświadczonego obserwatora, a po pięciu jego powtórzeniach występują już wyraźne różnice barwy. Wypraski otrzymane z tworzywa które było poprzednio przetwarzane już siedmiokrotnie i więcej razy odznaczają się dużymi różnicami barwy w porównaniu do próbek z tworzywa pierwotnego.

Przedstawione wyniki badań mogą być pomocne przy określaniu liczby krotności przetworstwa polipropylenu przetwarzanego metodą wtryskiwania.

Literatura

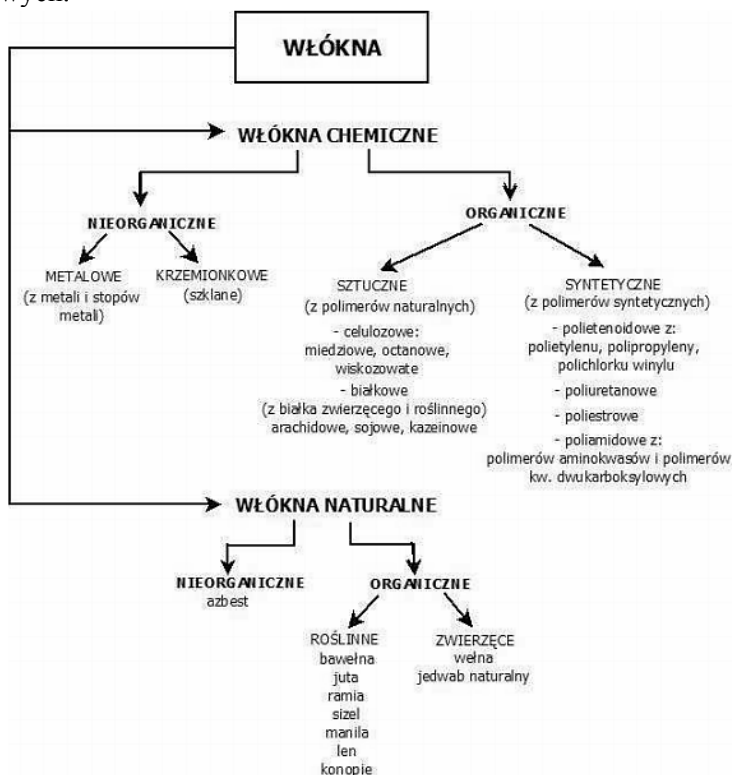
- [1] Baranowski W.: *Wpływ tworzywa wtórnego na wybrane właściwości rur z polietyleny do przesyłania gazu*. Przetwórstwo Tworzyw 2011, 1, s. 22–28.
- [2] Bociąga E., Magaczewski P.: *Wpływ wielokrotnego przetwarzania tworzyw ABS oraz PP na ich właściwości reologiczne i użytkowe*. Przetwórstwo Tworzyw 2006, 2, s. 45–52.
- [3] Bociąga E., Trzaskalska M., Wróż K.: *Wykorzystanie modeli przestrzeni barw w badaniach barwy wyprasek z tworzywa ABS bez oraz z dodatkiem środków barwiących*, Przetwórstwo Tworzyw 2011, 6, s. 427–431.
- [4] Bociąga E., Palutkiewicz P.: *Wpływ wielokrotnego przetwórstwa na właściwości i strukturę wyprasek z PE-HD z dodatkiem poroforu*. Przetwórstwo Tworzyw 2012, 3, s. 136–142.
- [5] Brown R.: *Handbook of polymer testing physical methods*, Marcel Dekker Inc., New York 1999.
- [6] Heneczkowski M.: *Symulacja wtryskiwania wielokrotnie przetwarzanych wybranych termoplastów*. Polimery 2001, 46, s. 359–367.
- [7] http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/technische_date/arburg_allrounder_320c_golden_edition_td_523871_en_gb.pdf (dostęp 5.01.2016).
- [8] http://www.basellorlen.pl/assets/produkty/produkty/Moplen_RP2380_TDS_201410_PL.pdf, (dostęp 5.01.2016).
- [9] <http://xrite.reprograf.com.pl/xrite-przemysl/urzadzenia-stacjonarne/ci4200-ci4200uv,3,90>, (dostęp 5.01.2016).
- [10] Koszkuł J., Kwiatkowski D., Postawa P., Magaczewski P.: *Badania wybranych właściwości wytworów z ABS i PP poddanych wielokrotnemu przetwarzaniu*. Praca zbiorowa pt. Przetwórstwo materiałów polimerowych. CWA Regina Poloniae, Częstochowa 2008, str. 59–68.
- [11] Margol M., Sikora J.: *Granulowanie i mikrogranulowanie tworzyw polimerowych*. Przetwórstwo Tworzyw 2012, 1, s. 5–11.
- [12] Piekarska E.: *Wybrane zagadnienia barwienia tworzyw*, Przetwórstwo Tworzyw 2009, nr 3, s. 98–107.
- [13] Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
- [14] Smorawiński A.: *Technologia wtrysku*, WNT, Warszawa 1989.

5. Przędzalnictwo polimerów włóknotwórczych

Wstęp

Włókno jest podstawowym elementem struktury wielu materiałów. Charakteryzuje się dużym wymiarem długości w stosunku do niewielkich wymiarów przekroju poprzecznego – długość jest minimum 100 razy większa od jego średnicy [5, 15, 34].

Wyróżnia się trzy najważniejsze grupy włókien – naturalne, sztuczne i syntetyczne (rys. 1). Włókna syntetyczne określane są często mianem włókien polimerowych.



Rys. 1 Schemat podziału włókien w zależności od ich pochodzenia [33]

Szacuje się, że włókna polimerowe stanowią ponad 80% wszystkich włókien będących półproduktem do produkcji wyrobów o charakterze włókienniczym, przeznaczonym do zastosowań w wielu gałęziach przemysłu [3, 6].

Fundamentalnym kryterium powstawania wszystkich rodzajów włókien jest liniowy charakter cząsteczki związany z ich budową chemiczną. Przykładem jest występowanie grup polarnych w włóknach syntetycznych – poliamidy. Istniejące tam grupy $\text{-NH}_2\text{-COOH}$ umożliwiają zabarwienie włókien poliamidowych barwnikami kwasowymi i zasadowymi [15, 16, 21, 23, 24, 27, 34–36].

Włókna polimerowe otrzymywane są ze związków wielkocząsteczkowych o właściwościach włóknotwórczych. Charakteryzują się wieloma cechami pozwalającymi na ich szerokie zastosowanie we współczesnej gospodarce. Jedną z nich jest zdolność do uzyskiwania trwałej, dużej orientacji prowadzącej do istotnej poprawy właściwości mechanicznych materiału. Duża sztywność i wytrzymałość na zerwanie włókien polimerowych wynika z występujących wiązań kowalencyjnych ułożonych wzdłuż kierunku orientacji makrocząsteczek [5, 37]. Grupy końcowe włókien zwiększają swoje powinowactwo do barwnika. Właściwości fizykochemiczne warunkowane są przez ukształtowanie łańcucha głównego, rozmieszczenie grup bocznych łańcucha głównego, sekwencję ogniw merowych w łańcuchu, wielkość makrocząsteczki oraz wiązania międzycząsteczkowe. Wielkość makrocząsteczki ma wpływ na zdolność polimeru do formowania włókna, krystaliczność włókna, a tym samym na higroskopijność, wybarwialność, przewodność elektryczną, cieplną. Wzrost stopnia polimeryzacji wpływa również na wytrzymałość włókien na rozciąganie, zmiana temperatury topnienia, mięknięcia, rośnie odporność chemiczna włókna, zmniejsza się zdolność wiązania wody oraz barwników.

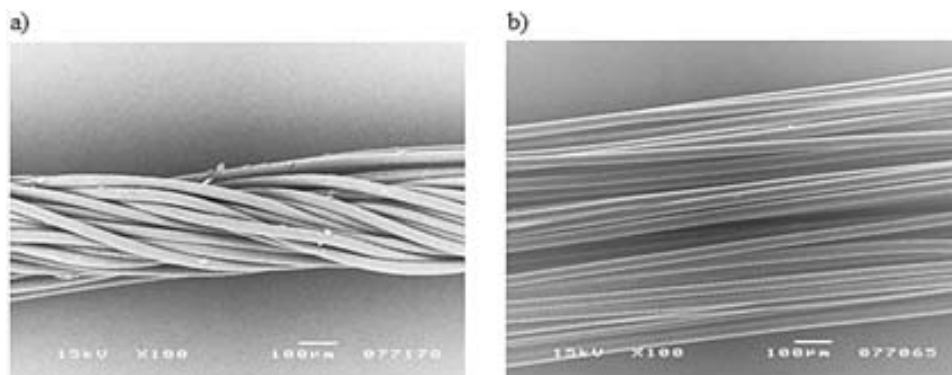
Włókna polimerowe mają wyjątkowe znaczenie zarówno dla gospodarki jak i codziennego życia człowieka. Dzięki dużemu postępowi technologicznemu włókna te mogą w obecnej sytuacji zastąpić z powodzeniem większość włókien naturalnych, ponadto wykazują właściwości korzystniejsze niż włókna naturalne lub właściwości dotąd niespotykane. Skala produkcji włókien polimerowych jest również znaczna: w skali globalnej na włókna przerabiane jest rocznie około 30 mln ton różnych polimerów. Wartość rynkowa wytworzonych włókien przekracza corocznie 60 mld dolarów [9].

W ostatnich latach technologia przędzenia jest coraz szerzej rozwijana przez ośrodki badawcze i uczelnie wyższe. Powstają nowe gatunki włókien na bazie polimerów włóknotwórczych, które w niedalekiej przyszłości zastąpią stosowane dotąd włókna sztuczne i naturalne. Pozwoli to na możliwość produkcji innowacyjnych materiałów włókienniczych o szczególnych właściwościach i przeznaczeniu.

Charakterystyka procesu przędzenia

Proces przędzenia polimerów włóknotwórczych znany jest od wielu lat i jest jednym z wielu szybciej rozwijających się specjalistycznych metod przetwórstwa. Technologia ta pozwala na wytworzenie włókien, które w dalszym etapie przerabiane są na przędzę – nitkę utworzoną z włókien ciągłych skręconych lub

nieskręconych nadających się do bezpośredniego przerobu na wyrób włókienniczy (rys. 2).



Rys. 2. Struktura przędzy włókienniczej: a) przędza skręcona, b) przędza nieskręcona [opracowano na podstawie 16]

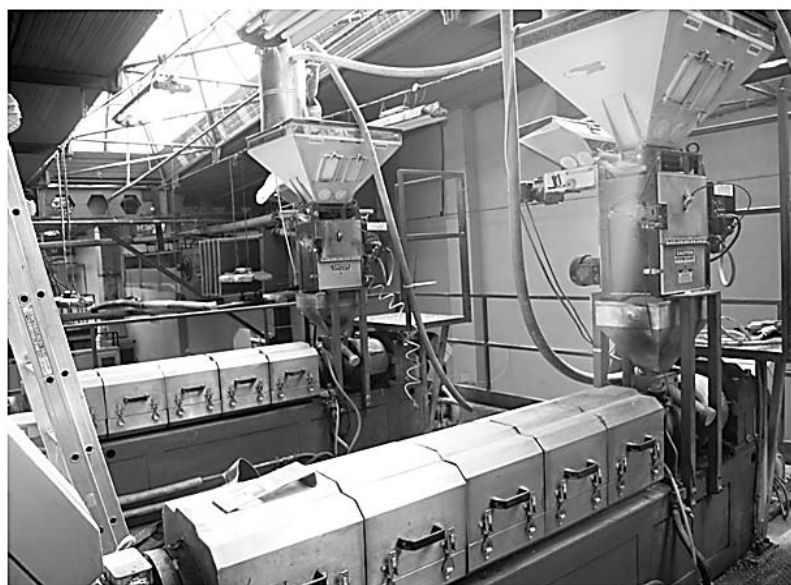
Stosuje się także przędze oplotową składającą się z dwóch składników: wewnętrznego, który jest rdzeniem przędzy i innych włókien przędzonych, które są owinięte wokół rdzenia po całej długości. Przędza oplotowa produkowana jest na maszynach rotorowych poprzez rotację rozciągliwych włókien przędzy podstawowej lub nie elastycznych ciągłych filamentów albo poprzez wprowadzenie rozciągliwych włókien w niedoprzęd. Skręt przędzy nadawany jest w końcowym etapie jej produkcji bądź przy użyciu skręciarek podczas zabiegów wykańczalniczych.

Przędzenie polimerów włóknotwórczych odbywa się przy użyciu konwencjonalnych wyłaczarek ze ślimakowym układem uplastyczniającym sprzężonym z zespołem przędzalniczym (wałki kalandrujące, nawijarka do przędzy) (rys. 3), w którym następuje przeprowadzenie tworzywa polimerowego w stan stopiony (rys. 4). Gwarantuje to pracę obydwu urządzeń w sposób równomierny i ciągły.

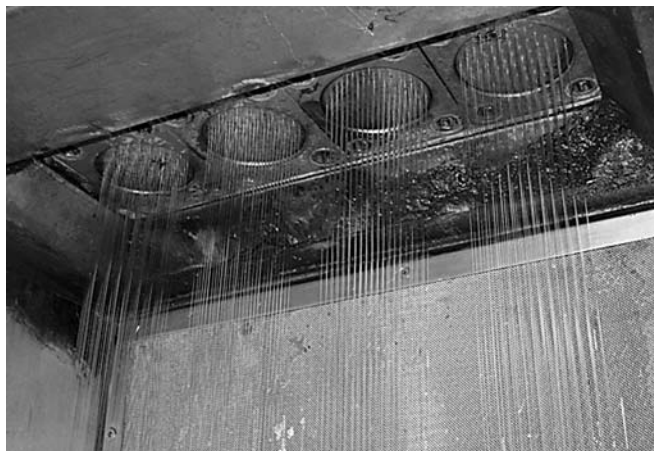
Stopiony polimer włóknotwórczy przechodzi przez otwory w kształcie kulistym znajdujące się w dyszy przędzalniczej zwanej filierą. Ilość otworów w dyszy i ich kształt zależy od masy liniowej przędzy i jej przeznaczenia (rys. 5).



Rys. 3. Widok ogólny stanowiska do produkcji przędzy na bazie polimerów włóknotwórczych [14]: 1 – ślimakowy układ uplastyczniający, 2 – dysza przędzalnicza, 3 – zespół wałków kalandrujących

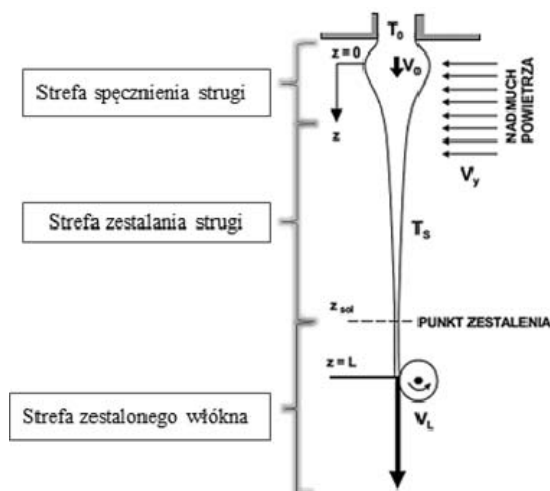


Rys. 4. Strefa dozowania i uplastyczniania mieszaniny tworzywa polimerowego – do leja zasypowego doprowadzone jest tworzywo w postaci granulatu polimerowego, po czym zostaje ono uplastycznione w ślimakowym układzie uplastyczniającym wytłaczarki połączonej z elementem przędzalniczym [14]



Rys. 5. Polimer włóknotwórczy przed procesem zestalania [14]

Bezpośrednio po wyjściu z otworów dyszy przędzalniczej niezestaloną jeszcze polimer włóknotwórczy przechodzi przez chłodzącą komorę powietrza przybierając formę strugi, która ulega spęczeniu wskutek relaksacji naprężeń ścinających. Poniżej strefy spęczenia występuje przepływ rozciągający z monotonicznym zwężaniem się strugi polimeru (rys. 6).

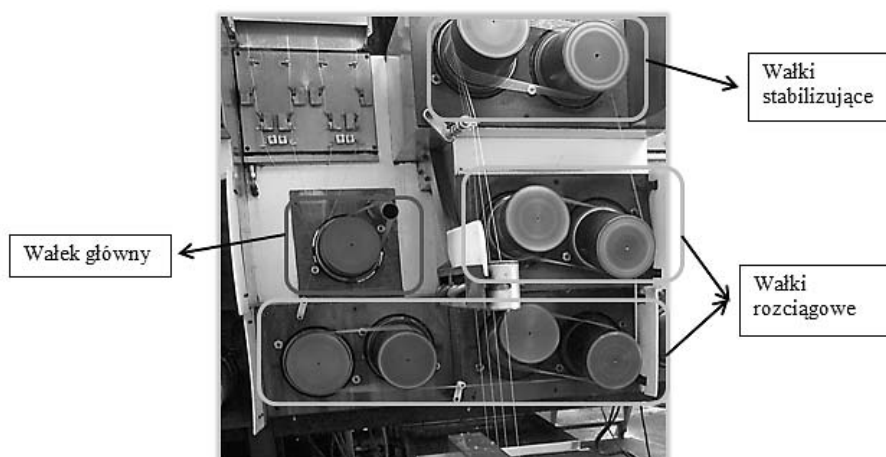


Rys. 6. Zmiana grubości strugi przy suchym formowaniu włókna w obszarze pozafilierowym: T_0 , V_0 – temperatura i prędkość początkowa, V_L – prędkość odbioru, T_s – temperatura powietrza, V_y – prędkość poprzecznego nadmuchu powietrza, L – długość osi przędzenia [opracowano na podstawie 18]

Po wyjściu z układu uplastyczniającego i filiiy zestalone już włókna mają bardzo wysoką temperaturę, dlatego też stosuje się ich ochłodzenie w celu umocnienia struktury molekularnej i cząsteczkowej. Temperatura powietrza nie przekracza 22 °C [16, 36].

Proces zestalenia się stopionej strugi polimeru we włókno następuje w wyniku zeszklenia lub krystalizacji polimeru włóknotwórczego w punkcie między punktami wypływu polimeru i odbioru włókna, wskutek intensywnej wymiany ciepła między formowaną strugą a ośrodkiem chłodzącym – najczęściej jest nim powietrze o temperaturze pokojowej [21, 24, 35].

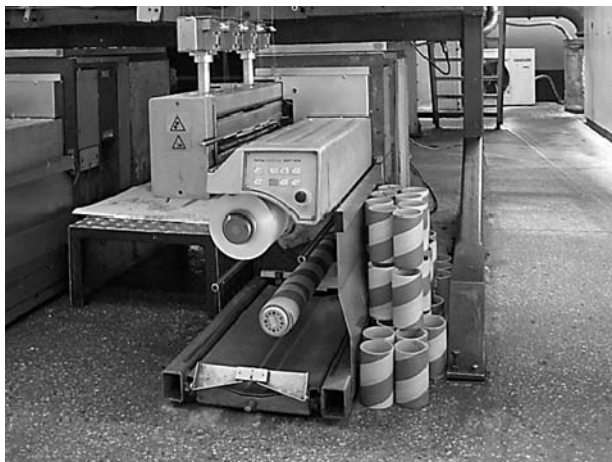
Wyciągnięcie plastycznego już włókna w górnej części komory klimatyzowanej zachodzi pod wpływem siły wywieranej przez układ wałków, szpuli odbierającej i siły ciężkości. Etap ten prowadzi do bardzo dużej orientacji makrocząsteczek włókien wzdłuż kierunku wyciągania, co sprzyja powstawaniu struktury częściowo krystalicznej. Orientacja makrocząsteczek rośnie wraz z prędkością wyciągania a maleje z grubością włókna. Definiuje to tzw. współczynnik rozciągu R . Poniżej obszaru wyciągania, włókna zostają nawilżone substancją preparującą poprawiającą chwyt włókien, a następnie w celu stabilizacji długości przechodzą przez zespół wałków stabilizujących i rozciągowych (rys. 7).



Rys. 7. Zespół wykańczalniczy [14]

Proces rozciągania powoduje kilkukrotne zwiększenie wytrzymałości względnej włókna. Uzyskanie optymalnych cech danego rodzaju surowca w głównej mierze zależy od dobrania odpowiednich parametrów rozciągania.

W końcowym etapie procesu przędzenia włókna zwijane są na szpule odbierające (rys. 8).



Rys. 8. Ostatecznym etapem jest nawinięcie powstałej przędzy przy użyciu nawijarek na szpule odbierające [14]

W zależności od rodzaju filtrowanego medium tak powstała przędza z włókien ciągłych może być jeszcze poddana obróbce wykańczalniczej: apreturowaniu, barwieniu, ponownemu skręcaniu, itp. Ważnym jest fakt, iż tak powstała przędza wymaga jednej obowiązkowej operacji wykańczalniczej – skręcaniu, ponieważ im wyższy skręt przędzy tym powstały w późniejszym etapie wyrób włókienniczy ma bardzo dobre właściwości użytkowe [5, 16, 35].

Metody przędzenia

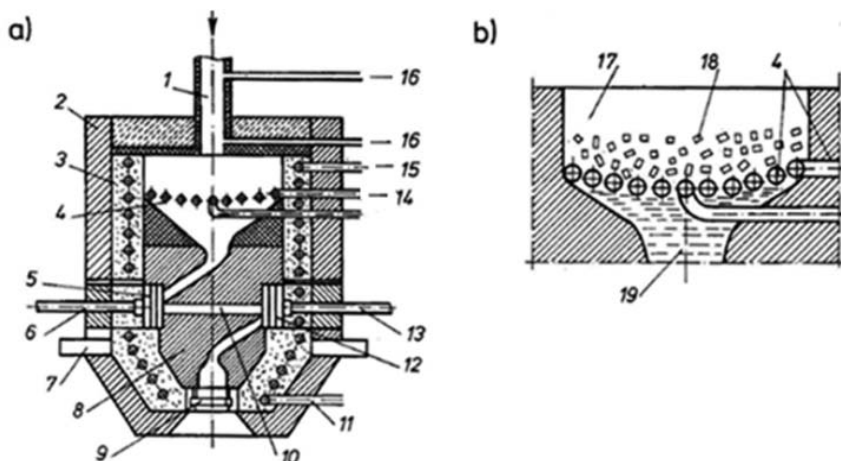
Ze względu na różnice w sposobie zestawiania włókna wyodrębnia się następujące rodzaje przędzenia [8, 15, 18]:

- ze stopionej masy polimeru,
- z roztworu polimeru.

Metoda przędzenia ze stopionej masy polimeru odbywa się w atmosferze gazu obojętnego – N_2 lub CO_2 przy ciągłym wykorzystaniu narzędzia stapiającego (stapiacza) ogrzewanego prądem elektrycznym, w którym pełni on rolę jednego z elementów głowicy przędzalniczej (rys. 9). Stapiacz będący w kształcie zwiniętej spiralnie rurki ma za zadanie ciągle uplastycznianie tworzywa i doprowadzanie go do głowicy przędzalniczej [5, 8, 15].

Pod stapiaczem znajduje się układ pompek zębatach: podającej i dozującej stopione tworzywo do zestawu przędzalniczego. Zestaw przędzalniczy składa się z filtru, płyty perforowanej i filiery. Filtr zabezpiecza przed zatkanie dyszy a płyta perforowana odpowiedzialna jest za równomierne rozprowadzenie stopionego tworzywa do dyszy. Dysze przędzalnicze wykonane są ze stali stopowej w kształcie kołowym, o grubości od kilku do kilkunastu milimetrów. Stapianie tworzywa może zachodzić w jednym stapiaczu, po czym tworzywo jest rozpro-

wadzone kolektorami rozdzielczymi do kilku zestawów przędzalniczych. Takie rozwiązanie stosuje się wtedy, gdy rolę stapiacza spełnia wytłaczarka ślimakowa [7].



Rys. 9. Głowica przędzalnicza ze stapiaczem: a) przekrój wzdłużny, b) fragment ilustrujący działanie stapiacza; 1 – doprowadzenie tworzywa, 2 – izolacja cieplna, 3 – ściana grzejna, 4 – ruszt, 5 – pompa podająca, 6 – wałek napędu pompy podającej, 7 – łapy mocujące, 8 – korpus, 9 – zestaw przędzalniczy, 10 – kanał międzypompkowy, 11 – odprowadzenie czynnika grzejącego od ścianki, 12 – pompa dozująca, 13 – wałek napędu pompy dozującej, 14 – doprowadzenie i odprowadzenie czynnika grzejącego do rusztu, 15 – doprowadzenie czynnika grzejącego do ścianki, 16 – doprowadzenie i odprowadzenie gazu obojętnego, 17 – gaz obojętny, 18 – tworzywo rozdrobione, 19 – tworzywo stopione [5, 16]

Przepływ tworzywa przez dyszę przędzalniczą odbywa się z bardzo dużą szybkością ścinania rzędu $10^3 \div 3 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Po opuszczeniu kanalików, na odcinku strużki o długości od kilku do kilkudziesięciu milimetrów występuje efekt Barusa. Podłużny gradient prędkości rozciągania przyjmuje wartości ujemne i następuje dezorientacja częściowo uporządkowanych makrocząsteczek w czasie przepływu przez dyszę. Wzrost prędkości przepływu tworzywa i lepkości tworzywa powoduje rozszerzenie strużki polimeru. Na dłuższym odcinku strużki liczącym do 1 metra, pod wpływem siły ciężkości oraz siły pochodzącej od układu rolek i szpuli odbierającej, następuje zmniejszenie pola przekroju strużki, narastanie jej prędkości i obniżanie temperatury z jednoczesnym wzrostem gęstości, lepkości, naprężenia rozciągającego i orientacji makrocząsteczkowej. Szybkość ścinania rośnie a po osiągnięciu maksimum, kiedy rozpoczyna się proces zestalania, maleje do zera. Wtedy też następuje zestalenie strużki i jej przejście we włókno. Zestalone włókno na drodze do szpuli odbierającej nie zmienia swoich wymiarów i jest poddawane procesowi preparacji, niezbędnej do dalszej obróbki włókienniczej i późniejszego zastosowania. Końcowym etapem jest zwijanie włókna na szpulę odbierającą i poddawanie dalszym obróbkom

włókienniczym – najczęściej wydłużaniu [24]. Przędzenie włókien syntetycznych ze stopionej masy polimeru odbywa się w warunkach silnie nieizotermicznych, z szybkością chłodzenia rzędu tysięcy stopni na sekundę [2].

Odrębnym sposobem wytworzenia włókien jest przędzenie z roztworu polimeru. Rozróżnia się tutaj przędzenie mokre oraz przędzenie suche. Sposób przędzenia na mokro pozwala na przeprowadzenie strumyczków płynu przędzalniczego przez kąpiel koagulacyjną będącą środkiem zestalającym włókna polimerowe. W przypadku przędzenia na sucho wytłoczony roztwór polimeru przeprowadza się przez komorę odparowującą rozpuszczalnik.

Aktualnie to właśnie przędzenie ze stopionej masy polimeru stanowi dominującą metodę przetwórstwa włókien.

Przędzenie włókien niepalnych

Produkcja włókien niepalnych jest w ostatnich latach coraz częściej rozpowszechniona ze względu na swoje rosnące zainteresowanie w przemyśle. Wiązki włókien zawierających co najmniej 85% akrylonitrylu wytwarza się w procesie trójfazowej stabilizacji termicznej, podczas której włókna podlegają przebudowie molekularnej i nadmolekularnej, na którą składają się procesy oksydacji, cyklizacji, sieciowania, degradacji oraz zmiany struktury krystaliczno – amorficznej włókna. W pierwszej fazie procesu trójfazowej stabilizacji termicznej wiązki włókien ogrzewa się w temperaturze wyższej od temperatury maksymalnego skurczu entropowego włókna i niższej od temperatury maksymalnego skurczu chemicznego, w strumieniu powietrza atmosferycznego bądź w strumieniu mieszaniny tlenu, azotu i argonu o łącznej zawartości gazu obojętnego $79 \div 90\%$ o zawartości wilgoci nie większej niż $0,01 \text{ kg/m}^3$. W drugim etapie wiązki włókien poddane są ogrzewaniu w temperaturze wyższej niż maksymalna temperatura uzyskana w pierwszej fazie i niższej od temperatury $250 \div 280^\circ\text{C}$, w strumieniu powietrza atmosferycznego bądź w strumieniu mieszaniny tlenu, azotu i argonu o łącznej zawartości gazu obojętnego $79 \div 85\%$ również o zawartości wilgoci nie większej niż $0,01 \text{ kg/m}^3$. W ostatniej fazie procesu stabilizacji termicznej wiązki włókien ogrzewane się w temperaturze wzrastającej wzdłuż drogi włókien (od temperatury co najmniej 220°C do 500°C), pod stałym naprężeniem $0,2 \div 0,8 \text{ cN/tex}$, w strumieniu mieszaniny gazu obojętnego – najczęściej azotu. Strumień tego gazu przebiega w kierunku przeciwnym do przesuwu włókien powyżej temperatury $250 \div 280^\circ\text{C}$ i w kierunku zgodnym poniżej tej temperatury. Tak powstałe włókna niepalne z włókien poliakrylonitrylowych charakteryzują się dużym wydłużeniem, dużą wytrzymałością na zerwanie w pętli i oprócz rzeczywistej cechy niepalności posiadają stabilność termiczną określaną małym ubytkiem masy w wysokiej temperaturze. Niepalne włókna poliakrylonitrylowe mają szerokie zastosowanie do wytwarzania tekstyliów stosowanych w warunkach bezpośredniego zagrożenia ogniem i poddawanych działaniu wysokiej temperatury. Wytwarza się z nich termoodporną odzież odporną dla hut-

nictwai pożarnictwa, koce przeciwpożarowe, elementy niepalne, wkłady filtracyjne oraz przegrody ogniowe [5, 7].

Przędzenie aramidów

Innowacyjną technologię produkcji włókien polimerowych zastosowano do produkcji włókien aramidowych [10]. Włókna aramidowe można otrzymywać sposobem konwencjonalnym jednostopniowym oraz dwuetapowym. W pierwszym sposobie przędzę bezpośrednio po uprzedzeniu przepuszcza się w temperaturze 450°C przez piec. Czas przebywania przędzy w piecu jest regulowany szybkością przebiegu przędzy (zwykle jest to od 20 sekund do 5 minut) pod kontrolowanym naprężeniem między $0,2 \div 1$ cN/tex. Z kolei metoda dwuetapowa polega na wstępnym rozciąganiu przędzy do 120% (przędzę na szpuli umieszcza się w piecu na 30 minut), po czym następują etapy wymywania i suszenia przędzy. Dalej przeprowadza się obróbkę cieplną w temperaturze $320 \div 350^\circ\text{C}$ i dalsze rozciąganie przędzy w temperaturze $360 \div 420^\circ\text{C}$ celem zwiększenia wydłużenia o $1 \div 3\%$. Jednak ten sposób otrzymywania przędzy aramidowej uniemożliwia kontrolę procesu rozciągania przędzy, a czasy obróbki cieplnej różnych warstw przędzy na szpuli będą się różnić ze względu na różny czas przewodzenia ciepła przez warstwy przędzy. W pracy [26] opisano metodę rozciągania przędzy na gorąco. Podczas nawijania przędzy na szpulę ogrzewano włókna przędzy i dodatkowo szpulę z przędzą ogrzewano w strefie ogrzewania (piec). Jednak sposób ten niekorzystnie wpływał na właściwości przędzy. W patencie [19] opisano dwuetapową technologię otrzymywania przędzy aramidowej o dodatkowo polepszonej wytrzymałości na rozciąganie, podpartą przykładami. Technologia ta składa się z dwóch różnych etapów ogrzewania w dwóch różnych strefach grzejnych (dwa zestawy urządzeń grzejnych – piece lub jeden piec), w którym występuje gradient temperatury. W pierwszym etapie przędza jest rozciągana wstępnie pod naprężeniem korzystnym 3 cN/tex w temperaturze $240 \div 330^\circ\text{C}$, a w drugim etapie w temperaturze $400 \div 470^\circ\text{C}$ pod naprężeniem $<0,2$ cN/tex. Między tymi etapami nie prowadzi się procesu zwijania i rozwijania przędzy. Przez stosowanie specjalnego urządzenia jakim jest taśma transportowa naprężenia są rzędu 0 cN/tex (tzw. brak naprężenia). Przędza aramidowa jest przeprowadzana przez strefy grzania z szybkością od $5 \div 20$ sekund. Technologia ta daje w końcowym etapie tzw. multifilamentową przędzę aramidową o wytrzymałości na rozciąganie co najmniej 25 cN/tex.

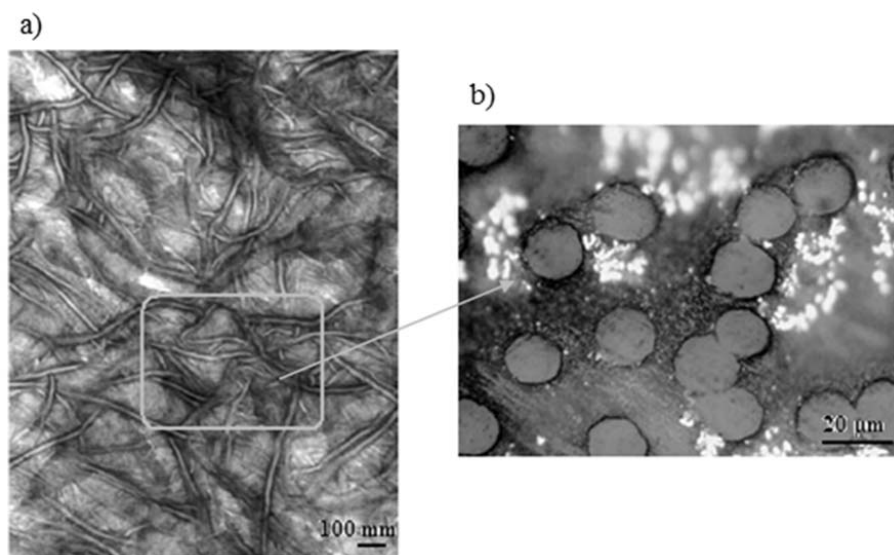
Przędza multifilamentowa zawiera co najmniej dwa włókna ciągłe (filamenty). W przędzy wielofilamentowej najkorzystniejsza jest obecność 25 filamentów. Przędza aramidowa jest wytworem z poliamidów włóknotwórczych.

Cechą charakterystyczną przędzy aramidowej jest występowanie w łańcuchach głównych ugrupowań aromatycznych. Czym więcej w strukturze ugrupowań aromatycznych, tym większa odporność mechaniczna i termiczna. Spada natomiast rozpuszczalność, co sprawia, że przędza aramidowa jest materiałem

nieporównywalnie trudniejszym do przetwarzania. Obecność sztywnych łańcuchów polimeru powoduje, że aramidy łatwiej krystalizują i porządkują się w trakcie przędzenia. Włókna aramidowe mają uporządkowaną mikrostrukturę oraz znacznie większą wytrzymałość na rozciąganie niż pozostałe poliamidy. Włókna aramidowe występują również w postaci włókien krótkich, między innymi jako pulpa. Pulpa aramidowa jest wysoko sfibrylizowaną postacią włókna, która może być dyspergowana w wielu systemach polimerowych. O bardzo wysokim stopniu fibrylizacji tych włókien świadczy fakt, że powierzchnia 1 g włókien pochodzących z pulpy wynosi $7 \div 10 \text{ m}^2$ [10].

Przędzenie włókien PE-UHMW z żelu

W ostatnich latach coraz większego znaczenia nabiera technologia przędzenia włókien polimerowych z żelu, stosowana głównie do wytwarzania ultra wytrzymałych włókien z polietylenu o bardzo dużym ciężarze cząsteczkowym, określanych jako włókna PE-UHMW [10]. Strukturę mikroskopową włókien PE-UHMW przedstawiono na rysunku 10.



Rys 10. Obraz mikroskopowy włókien polietylenowych PE-UHMW [32]: a) widoczne obszary amorficzne i krystaliczne (lamelle), b) przekrój poprzeczny włókien

Konsekwencją ultra dużego ciężaru cząsteczkowego włókien PE-UHMW jest duża liczba splątań, w których uczestniczy pojedynczy łańcuch oraz bardzo wysoka lepkość tworzywa ciekłego i praktycznie niemożliwe przetwórstwo w stanie stopionym. Aby umożliwić proces przędzenia i ułatwić późniejsze rozciąganie uformowanych włókien, Smith i Lemstra opracowali w 1980 r. technologię przędzenia ultra wytrzymałych włókien PE-UHMW z żelu. W tej technolo-

gii włókna są formowane ze skoncentrowanego roztworu ($2 \div 15\%$) polietylenu o ciężarze cząsteczkowym $M_w \sim (2 \div 6) \times 10^6$. Struga roztworu po opuszczeniu filiiery jest chłodzona w powietrzu. Po jej ochłodzeniu do odpowiedniej temperatury następuje termodynamiczna przemiana do stanu żelu o spistości i wytrzymałości wystarczającej w dalszych etapach obróbki technologicznej. Powstały żel jest poddawany rozciąganiu. Następnie rozciągnięta struga żelu trafia do kąpieli n-heksanu, w której następuje ekstrakcja rozpuszczalnika i krystalizacja polietylenu. Po usunięciu rozpuszczalnika skryształizowane włókno jest podgrzewane i poddawane dalszemu rozciąganiu. Mała liczba splątania łańcuchów w żelu zachowana w strukturze włókna po usunięciu rozpuszczalnika, pozwala na jego znaczne rozciąganie, aż do bardzo dużych stopni rozciągu, rzędu $\lambda \approx 30 \div 100$, oraz uzyskanie bardzo dużej orientacji molekularnej, wysokiego modułu sprężystości i wytrzymałości na zerwanie włókna [11, 12]. Właściwości fizyczne i mechaniczne ultra wytrzymałych włókien PE-UHMW porównano z właściwościami włókien PE-HD i zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości fizyczne i mechaniczne włókien PE-HD i PE-UHMW [4]

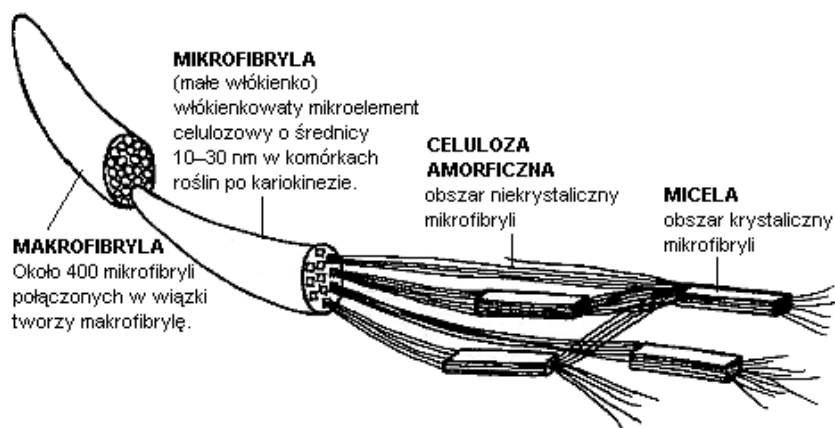
Właściwość	PE-HD	PE-UHMW
Ciężar cząsteczkowy [kg/mol]	50 ÷ 250	2000 ÷ 6000
Temperatura topnienia [°C]	130 ÷ 137	125 ÷ 138
Współczynnik Poissona	0,40	0,46
Gęstość [kg/m ³]	952 ÷ 965	932 ÷ 945
Moduł sprężystości przy rozciąganiu [GPa]*	0,4 ÷ 4,0	0,8 ÷ 1,6
Wytrzymałość na rozciąganie σ_M [MPa]*	21 ÷ 28	26 ÷ 33
Wytrzymałość na zerwanie σ_B [MPa]*	22 ÷ 31	39 ÷ 48
Wydłużenie przy rozciąganiu ϵ_M [%]*	10 ÷ 1200	350 ÷ 525
Udarność wg Izoda [J/m]*	21 ÷ 214	>1070

*badania wykonywane w temperaturze 23°C

Przędzenie włókien z polimerów naturalnych

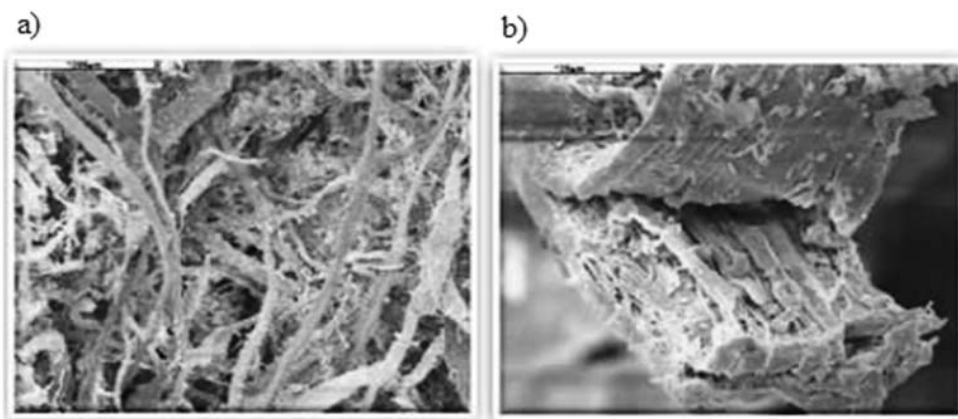
Poza włóknami polimerowymi dużą rolę w technologiach produkcji odzieży odgrywają także włókna, które wytwarza się w procesach technologii chemicznej z naturalnych biopolimerów (celuloza, białko), czego przykładem są włókna wiskozowe otrzymywane z celulozy. Cząsteczki celulozy, w liczbie ok. 2000, połączone są równoległe łańcuchami o długości 7µm zwanymi mikrofibrylami, w których wyróżnia się obszary krystaliczne - micle i niekrystaliczne (amor-

ficzne). Mikrofibryle, w liczbie ok. 400, tworzą makrofibryle [28]. Schemat struktury fibryli celulozowych przedstawiono na rysunku 11.



Rys 11. Schemat struktury fibryli celulozowych [29]

Na rysunku 12 zilustrowano obraz mikroskopowy wiązki włókien celulozowych oraz pojedynczego włókna celulozy.



Rys 12. Obraz mikroskopowy włókien celulozowych: a) widoczne micelle i obszary amorficzne, b) przekrój pojedynczego włókna celulozy [28]

Celulozę poddaje się procesowi merceryzacji czyli działaniu stężonego ługu sodowego. (merceryzacja zwiększa wytrzymałość na rozerwanie, ułatwia barwienie oraz nadaje charakterystyczny połysk), a następnie siarczku węgla (IV), w wyniku czego powstaje związek zwany celulozoksantogenianem sodu. Związek ten, po rozpuszczeniu w rozcieńczonym ługu sodowym, daje płyn przędzalniczy zwany wiskozą. Wiskoza przetłoczona przez dyszę przędzalniczą do kąpeli zawierającej H_2SO_4 , Na_2SO_4 i $ZnSO_4$ tworzy włókna jedwabiu wiskozowego [13].

Wpływ wielkości ładunków elektrostatycznych na włóknach na przebieg technologicznego procesu przędzenia

Technologiczny proces przędzenia włókien, na który składają się etapy mieszania, rozdzielania i rozciągania włókien sprzyja powstawaniu ładunków elektrostatycznych na wytworzonych włóknach. Zjawisko to wpływa niekorzystnie na proces produkcyjny poprzez zwiększenie ilości odpadków i nierównomierności produktu oraz zwiększeniem ilości postojów maszyny i jest szczególnie istotne na etapie rozciągania włókien w aparatach rozciągowych [1, 17, 22].

Występujące w aparatach rozciągowych bardzo silna elektryzacja włókien objawia się nadmiernym owijaniem wałków rozciągowych przerabianymi włóknami. Przechodzące pomiędzy parą wałków włókna kontaktują bezpośrednio ze sobą oraz z wałkami. Prowadzi to do dwóch zjawisk:

- naładowywania się włókien i wałków rozciągowych różnoimiennie powodując przyciąganie włókien do wałków,
- ładowanie włókien jednoimiennie i wzajemne odpychanie się włókien.

Zjawisko elektryzacji włókien jest szczególnie niebezpieczne na przędzarkach obręczkowych. Już niewielka ilość włókien owiniętych na wałkach powoduje zryw przędzy, co w konsekwencji powoduje zmniejszenie wydajności pracy maszyny i utrudnia także jej obsługę (rys. 13).

Zjawisko elektryzacji włókien znajduje także swoje pozytywne zastosowanie, między innymi w celu polepszenia procesu rozciągania. Uzasadnia to fakt, iż dla zajścia prawidłowego procesu rozciągania potrzebne są większe siły tarcia występujące między włóknami. Można to osiągnąć poprzez zwiększenie nacisku wałków rozciągowych bądź poprzez sam rozciąg.

Wielkość ładunku elektrostatycznego, który powstaje w elementach maszyn przędzalniczych zależy od powierzchni kontaktu włókien z elementami maszyny F , siły powstającej pomiędzy elementami maszyny i włóknami P , czasu tarcia włókien t , współczynnika elektryzacji włókien ξ a także wilgotności względnej powietrza φ :

$$\Theta = f(P \cdot F \cdot t \cdot \xi \cdot \varphi)$$

gdzie:

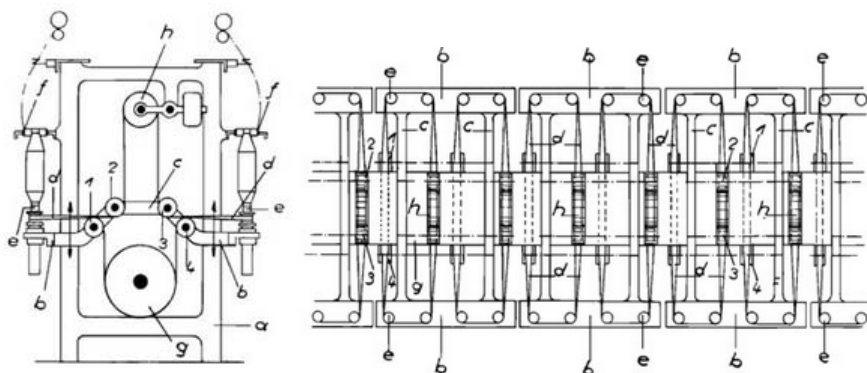
Θ – wielkość ładunku włókien [C],

F – powierzchnia kontaktu włókien z elementami maszyny [m²],

P – siła powstająca pomiędzy elementami maszyny i włóknami [N],

t – czas tarcia włókien [s]

φ – wilgotności względnej powietrza [%].



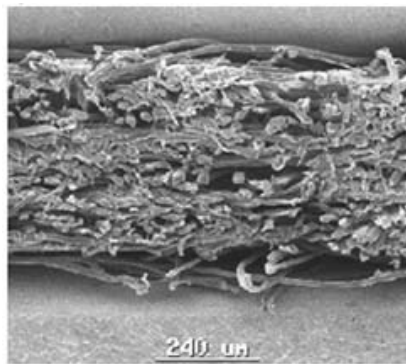
Rys. 13. Przykład przędzarki obrączkowej [30]

Przędzenie włóknin

Technologia produkcji polimerów włóknotwórczych pozwala na uzyskanie materiałów włókienniczych nie tylko w postaci ogólnodostępnych tkanin i dzianin ale także włóknin, które w ostatnich latach zyskują coraz większe zainteresowanie.

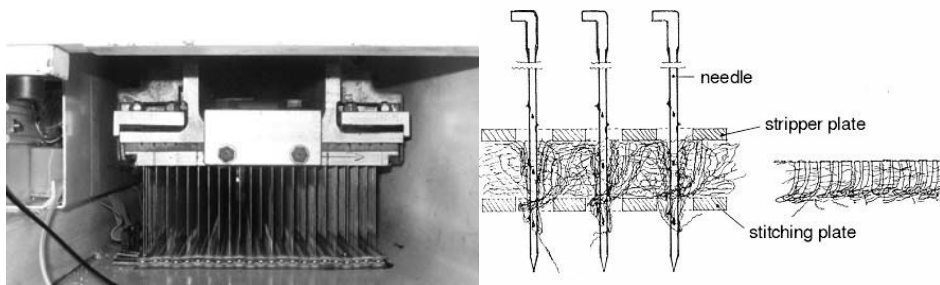
Włókniny filtracyjne to nietkane materiały wysokoporowate o strukturze siatki przestrzennej z losowo ułożonymi i spletanymi ze sobą cienkimi włókna-

mi (głównie syntetycznymi) o masie liniowej powyżej 1 dtex tworzącymi przestrzenny szkielet obejmujący siatkę mikroporów (rys. 14) [15, 22].



Rys. 14. Przekrój poprzeczny włókniny [20]

Technologia produkcji włóknin przebiega identycznie jak produkcja wyżej wymienionych materiałów – metodą przędzenia ze stopionej masy polimeru. Różnica polega na końcowym procesie produkcyjnym (odbiór włókienek w postaci runa i jego mechaniczne formowanie, które zależy jest od rodzaju produkowanej włókniny) oraz technologii łączenia włókien (mechaniczne lub środkami wiążącymi). W przypadku włóknin łączonych mechanicznie – igłowanych przeciąganie włókien następuje za pomocą igieł o wielokierunkowych nacięciach. Pod wpływem działania nacięć igieł przetykających następuje przesuwanie się włókien w kierunku poprzecznym do płaszczyzny runa i związanie ze sobą w ten sposób poszczególnych warstw (rys. 15).



Rys. 11. Przykład maszyny igłującej [31]

Podczas przesuwania włókien w runie następuje ich wzajemne spętnienie powodujące zwiększenie jego masy właściwej i uzyskanie trójwymiarowej struktury runa. Dodatkowo w końcowym etapie można przeprowadzić zabieg termiczno-mechaniczny: wykurczanie i prasowanie, co pozwala na uzyskanie w ten sposób włóknin wykurczanych [17, 22].

W przypadku włóknin klejonych środkami wiążącymi spoina klejowa powstaje w momencie, gdy środek wiążący zamienia się w stałą wytrzymałą błonę klejową. W przypadku sklejanego cieplem środkiem wiążącym spoina wytwarza się przez odparowanie ośrodka dyspergującego (wody) w procesie suszenia. Podczas procesu dogrzewania następuje zjawisko sieciowania powodujące wzrost adhezji i sił kohezji w strefie błonki środka wiążącego. W warunkach sklejanego włóknin stałym środkiem wiążącym stała spoina klejowa powstaje poprzez zestalenie w momencie ochłodzenia stopionego polimeru poniżej jego temperatury mięknienia [1, 22].

Niezależnie od rodzaju produkowanej włókniny wszystkie zostają poddane zabiegowi kalandrowania.

Część doświadczalna

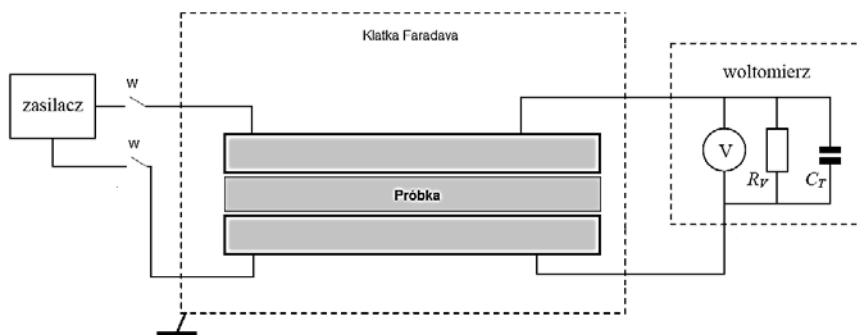
Obecnie, w dziedzinie włóknin wytwarzanych metodami mechanicznymi wydatny wzrost i znaczny rozwój doskonalenia metod produkcji zaznacza się w odniesieniu do włóknin igłowanych po procesie wykurczania i klejonych. Popularność włóknin igłowanych wynika z wysokich właściwości przetwórczych surowca w technologii produkcyjnej tego typu włókien: niski ciężar cząsteczkowy, niska molekularność i właściwości hydrofobowe. Szczególnie do produkcji tego rodzaju włókien stosuje się polipropylen, którego przetwórstwo dzięki wysokiemu wskaźnikowi szybkości płynięcia MFR pozwala na produkcję włóknin do zastosowań o wymaganych dużych parametrach skuteczności – szczególnie ma to miejsce w medycynie, dlatego też włókniny te wykorzystuje się do celów filtracyjnych (skuteczność filtracji rzędu 99,99%) [25]. Równie dużym zainteresowaniem cieszą się włókniny klejone, dlatego też zostały obiektem poniższych badań.

Materiał badawczy stanowiły dwie włókniny filtracyjne firmy Zelmer w kolorze białym:

- igłowana - wykurczana o wymiarach: 197 x 255 mm – mikrofiltr usuwający z zassanego powietrza nawet najmniejsze cząsteczki kurzu, pyłu, odchodów roztoczy oraz zarodniki pleśni. Produkt zapewnia ochronę zdrowia i jest szczególnie zalecany dla alergików.
- klejona o wymiarach: 125 x 308 mm – filtr silnikowy zatrzymujący cząsteczki kurzu, drobne zanieczyszczenia oraz przykre zapachy, które nie osiadły w worku urządzenia filtrującego.

Wyżej opisane włókniny poddano analizie strukturalnej i badaniu technicznemu określającemu czas połowicznego zaniku ładunku elektrostatycznego, który wykonano dwiema metodami (rys. 16):

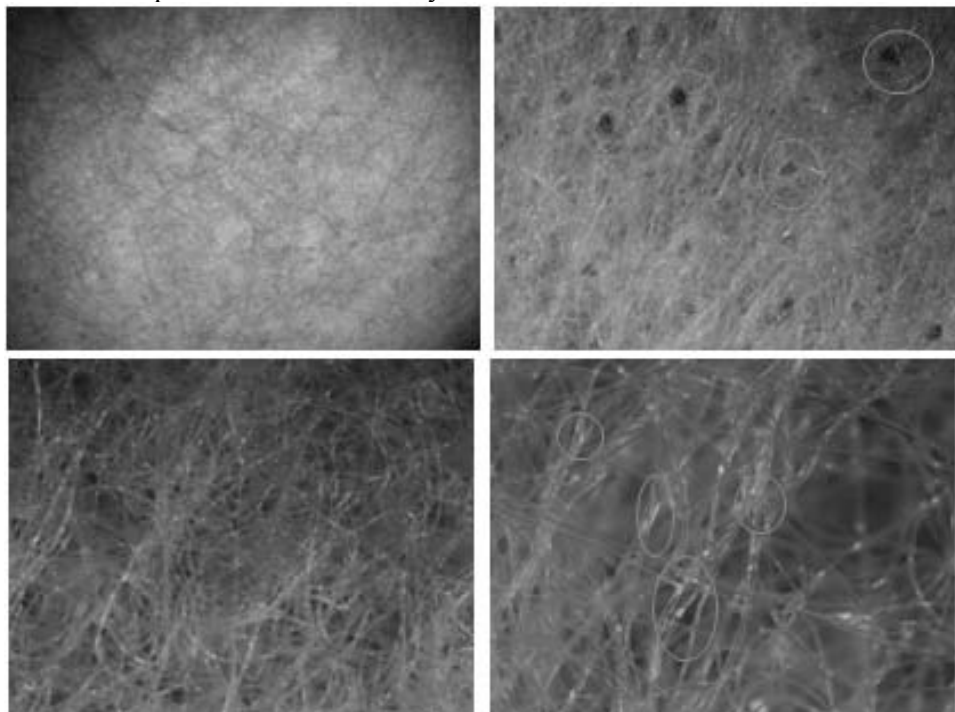
- za pomocą elektryzacji przez indukcję napięciem DC,
- za pomocą elektryzacji pod wpływem przepływu powietrza.



Rys. 16. Układ do pomiaru charakterystyk zaniku ładunku próbki: RV, CT – zastępcze, (rezystancja i pojemność wejściowa elektrometru) [9]

Wyniki badań

Morfologię badanych włókien obserwowano w świetle przechodzącym spolaryzowanym za pomocą mikroskopu optycznego SMZ800 firmy Nikon Instruments BV Japan i zobrazowano na rysunku 17.



Rys. 17. Morfologia badanych włókien filtracyjnych: a) i b) włókna igłowo – wykurczana (pow. 10x i 30x), c) i d) włókna klejona (pow. 10x i 30x) [foto: opracowanie własne]

Przeprowadzona analiza mikrostrukturalna ukazała różnice w strukturze badanych włókien, które są wynikiem zastosowania różnych technologii ich wytwarzania. Duże znaczenie ma sposób łączenia włókien.

Ładowanie próbki przez indukcję napięciem DC 100 V następowało przez czas 10 minut. Rozładowanie przez obwód pomiarowy elektrometru Keithley 6514a RV >200TΩ w równoległym połączeniu z CT 20pF. Dla każdej z tkanin filtracyjnych wykonano 10 pomiarów przy zmianie polaryzacji (5(+) i 5(-)) (rys. 18).

W badaniu elektryzacji pod wpływem przepływu powietrza wykorzystano wentylator o parametrach: średnica 200 mm, moc znamionowa 150 W, wydajność teoretyczna 950 m³/h. Na rysunku 19 a) i b) punktem A oznaczono moment załączenia wentylatora, natomiast punktem B chwilę jego wyłączenia.

Wyniki uśrednionych wartości pomiaru półzaniku ładunku badanych dla tkanin filtracyjnych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości pomiaru półzaniku ładunku elektrostatycznego dla badanej włókniny igłowo-wykurczanej i klejonej

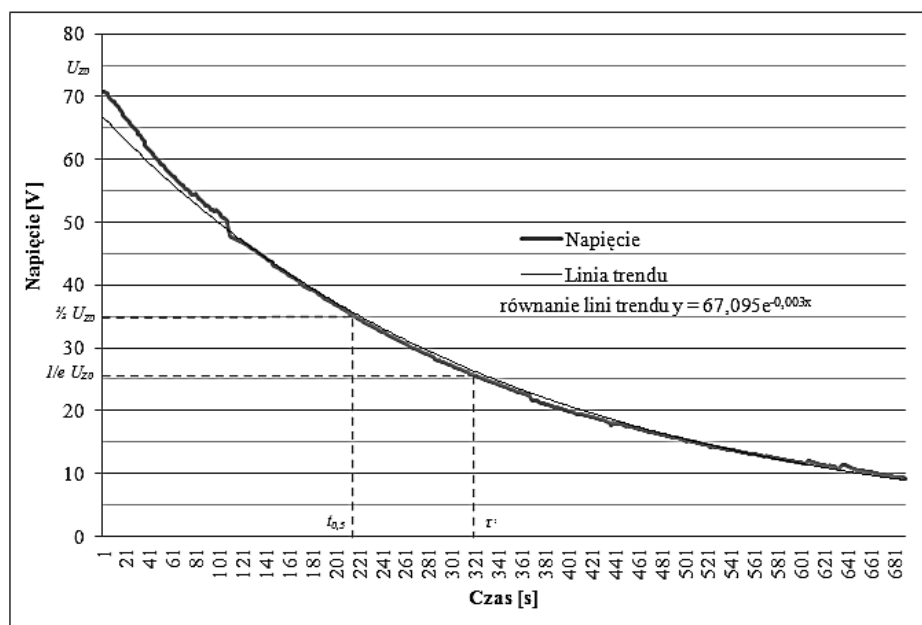
Rodzaj tkaniny	Parametr				
	$U_{z0}[V]$	$\frac{1}{2} U_{z0}[V]$	$1/e U_{z0}[V]$	$t_{0,5}[s]$	$\tau[s]$
Igłowo - wykurczana	70,8	35,4	26,1	214	315
Klejona	70,8	35,4	26,1	44	58

Analiza wyników badań

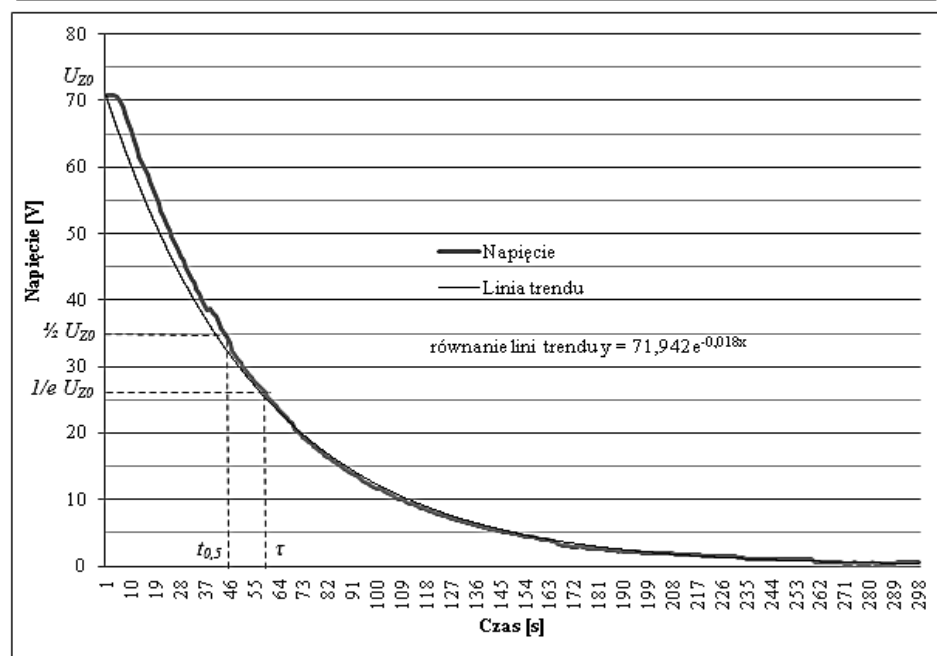
W włókninie igłowo-wykurczanej połączenie włókien za pomocą kilku tysięcy ułożonych na płycie maszyny igłującej igieł umożliwia uzyskanie spójności włókien. Igły podczas igłowania wytwarzają dostateczny opór włókien mający na celu ich wyciągnięcie z materiału oraz ich niejednokrotne przesunięcie do granic wytrzymałości na rozciąganie dzięki wzmożonemu tarcia w miejscach kontaktu [37]. W włókninach tych zachodzi proces zespajania pęczkami włókien, które wiążą runo przez ukośne bądź prostopadłe ułożenie włókien do płaszczyzny formowania runa. Widoczna jest również duża ilość prześwitów włókiennych o różnych rozmiarach (rys 4a). Zabieg wykurczania włókniny powoduje w końcowym jego etapie zwiększenie ich grubości oraz przemieszczenie się pojedynczych włókienek prowadząc do większego zestalenia wcześniej połączonych włókien runa. Tego typu włókniny najczęściej występują z podkładką tkaninową lub z luźno połączonych włókien.

W przypadku włókien klejonych znaczna część środka wiążącego wypełnia materiał w postaci blokowej struktury sklejeń (rys 11b), dzięki czemu włóknina charakteryzuje się dużą sztywnością i wysokim stopniem unieruchomienia włókien.

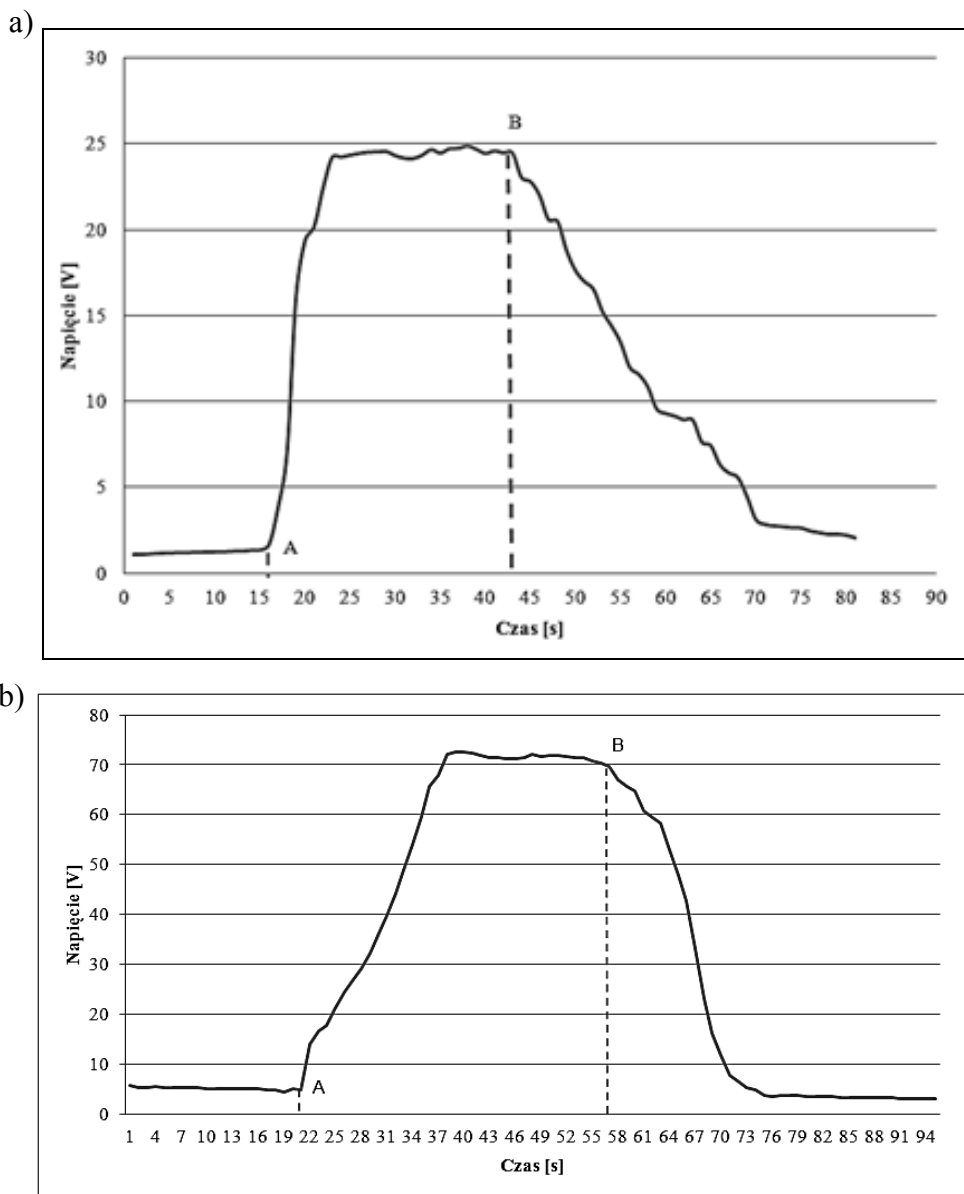
a)



b)



Rys. 18. Przebieg charakterystyki zaniku ładunku w badanych włókninach z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi: a) igłowano-wykurczanej, b) klejonej



Rys. 19. Przebieg charakterystyki naładowania badanych włókien pod wpływem przepływu powietrza: a) igłowo-wykurczanej, b) klejonej

Badane włókniny naelektryzowano do wartości 70 V, jednak czas elektryzowania oraz rozelektryzowania jest różny. Ze względu na mniejszą gęstość włókniny igłowo-wykurczanej wykazuje ona mniejszą podatność na elektryzowanie pod wpływem przepływu powietrza, uzyskując niższe wartości potencjału (maksymalnie ok. 25 V). Czas rozładowania tej włókniny jest dłuższy niż ma to

miejsce w przypadku włókniny klejonej. Tempo ładowania podczas przepływu powietrza dla włókniny klejonej jest zbliżone do włókniny igłowano-wykurczanej i wynosi ok. 2,5 V/s. Włóknina ta uzyskuje także wyższy poziom potencjału (ok. 70 V).

Na właściwości elektrostatyczne materiału mają wpływ nie tylko jego skład, ale i sposób układu włókien oraz ich zagęszczenie.

Technologia igłowania z późniejszym wykurczaniem oraz technologia klejenia znalazły szerokie zainteresowanie w sektorze filtracyjnym. Włókniny produkowane technologią igłowania do niedawna były poddawane tylko ocenie jakości podczas procesu produkcji na wycinanych elementach próbek a ich analiza była oparta na pomiarze wytrzymałości na rozciąganie. Obecna analiza strukturalna pozwala ocenić sposób wiązania włókien, gęstość ich upakowania, co przekłada się na ich efektywność.

Produkcja włóknin klejonych środkami wiążącymi daje szerokie spektrum zastosowań rodzaju spoiwa w postaci polimerów termoplastycznych oraz dodatków pomocniczych (włókno, przędza, proszek). Tak szeroka gama produktów pozwala dokładnie analizować proces produkcyjny, co przejawia się w efektywniejszym wytwarzaniu produktów.

Skłonność do generowania i kumulowania ładunku elektrostatycznego przez włókniny filtracyjne determinować może zakłócenia procesów produkcyjnych i funkcji pomiarowych urządzeń elektronicznych a także wpływać na obniżenie jakości i trwałości użytkowej wyrobów. Poprzez odpowiednio dobraną technologię produkcji można w sposób elastyczny dostosować metodę do aktualnych potrzeb i kontrolować właściwości produkowanych wyrobów włókienniczych.

Podsumowanie

Gwałtowny rozwój produkcji włókien, głównie syntetycznych, przy jednoczesnym niewielkim wzroście podaży na włókna naturalne to główny czynnik warunkujący zmianę kryteriów gospodarowania bazą surowcową. Efekt ten w niedalekiej przyszłości może mieć wpływ na spadek produkcji wyrobów z włókien naturalnych na rzecz produkcji wyrobów z mieszanek wieloskładnikowych.

Literatura

- [1] Beuth B.: *Materialoznawstwo włókiennicze*. WPL, Warszawa 1956.
- [2] Boryniec A., Skwarski T.: *Technologia włókien sztucznych*. Warszawa 1982.
- [3] Brochocka A.: *Characteristics of Melt – Blown Filter Materials Produced by Simultaneous Blowing of Polymer Melt from Two Extruders*. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2001, 9, 4, s. 66–69.

- [4] Edidin A. A., Kutrz S. M.: *The influence of mechanical behavior on the wear of for clinically relevant polymeric biomaterials in a hip simulator*, The Journal of Arthroplasty, 2000, 15, 3, s. 321–331.
- [5] Fourné F.: *Synthetische Fasern*. Konradin Verlag, Stuttgart 1953.
- [6] George J., Forna R., Cravero T.: *Air Filtration with Fine Polymeric Fibers*. 16th Annual Technical Conference and Exposition 2003 Technical Sessions Papers. Reno-Nevada, June 17 – 20, 2003.
- [7] Habaj W.: *Technologia kompozytów polimerowych wzmacnianych krótkim włóknem aramidowym wykonanych metodą RTM*, Problemy Techniki Uzbrojenia, 2008, 105, 6, s. 61–73.
- [8] Jarecki L., Ziabicki A., Blim A.: *Dynamics of hot-tube spinning from crystallizing polymer melts*. Computational and Theoretical Polymer Science, 1998, 8, 1 – 2, s. 63–72.
- [9] Kunugi T.: *Oriented Polymer Materials* pod redakcją Fakirov S., Huthig Verlag 1996.
- [10] Kutrz S. M.: *The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement*. Academic Press 2004.
- [11] Kurtz S., Pruitt L., Jewett Ch., Crawford R., Crane D., Edidin A.: *The yielding, plastic flow, and fracture behavior of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements*. Biomaterials 1998, 19, s. 1989–2003.
- [12] Kurtz S., Rimnac C., Bartel D.: *Predictive Model for Tensile True Stress-Strain Behavior of Chemically and Mechanically Degraded Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene*. Journal Biomedical Materials Research (Appl. Biomater) 1998, 43, s. 241–248.
- [13] Marczak E., Marczak P.: *Sztuczne włókna celulozowe*. www.edupress.pl z dnia 6.06.2012 r.
- [14] Materiały pozyskane z firmy STRADOM S.A.
- [15] Margol M.: *Metody wytwarzania wybranych włókien polimerowych*. Przetwórstwo Tworzyw, 2012, 5, s. 463–467.
- [16] Margol M., Madejski R., Kwiatkowski D.: *Zautomatyzowany proces wytwarzania przędzy na bazie polimerów włóknotwórczych do produkcji tkanin filtracyjnych*. Przegląd Włókienniczy, 2015, 5, s. 25–27.
- [17] Jarecki L., Ziabicki A., Blim A.: *Dynamics of hot-tube spinning from crystallizing polymer melts*. “Computational and Theoretical Polymer Science” 1998, 8, 1 – 2, s. 63–72.
- [18] Ołdak E.: *Efekty masy cząsteczkowej w modelowaniu procesów formowania włókien ze stopionego polimeru*. Praca doktorska. Pracownia Fizyki Polimerów Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2005.
- [19] Patent europejski PL/EP 2094890 – Sposób otrzymywania przędzy aramidowej o dużej wytrzymałości na rozciąganie.

- [20] Podsiadła – Balsa Z.: *Włókniste materiały filtracyjne. Analiza i symulacja struktur nieuporządkowanych*. Archiwum Motoryzacji, 2007, 4, s. 349–360.
- [21] Praca zbiorowa pod redakcją Bailey J.: *Processing and Finishing of Polymeric Materials*. Editorial Staff. Vol. 1. A John Wiley & sons, Inc., Publications, New Jersey 2011.
- [22] Praca zbiorowa: *Poradnik inżyniera. Włókiennictwo*. Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 1988.
- [23] Praca zbiorowa: *The Theory of Polymer Dynamics*. Clarendon Press, Oxford 1986.
- [24] Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej, Warszawa 1993.
- [25] Tien C.: *Principles of Filtration*. Elsevier, Amsterdam 2012.
- [26] Sugak V. N., Kiya–Oglu V. N., Goloburdina L. L.: *Fabrication of fibres from sulfuric acid solutions of copolyamides containing polyamide – Benzimidazole units and their heat treatment*. Chemistry and Technology of Chemical Fibres, 1999, 31, 1, s. 8–13.
- [27] <http://www.castor-studio.pl/Produkcja-wlokna,76.html>
- [28] <http://www.iglobud.com/dokumenty/ekofiber.pdf>
- [29] <http://medycyna.linia.pl/celuloza.html>
- [30] <http://www.msv.com.pl>
- [31] <http://www.ska-polska.pl/pl/projekty/wlokniny>
- [32] <http://web.archive.org/web/20060927232646/http://www-lgm2b.iut.u-bordeaux1.fr/publi/PE+fibres.pdf>
- [33] http://zz.inf.sgsp.edu.pl/uczelnia/kdrg/zsitp/materialy_zsz/palnosc_pionowo.pdf
- [34] Włodarski G.: *Włókna chemiczne. Poradnik inżyniera i technika*. Warszawa 1977.
- [35] Zhang D.: *Advances in filament yarn spinning of textiles and polymers*. Published by Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute, Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, United Kingdom 2014.
- [36] Ziabicki A.: *Fundamentals of Fiber Formation*. J. Wiley, London 1976.
- [37] Ziabicki A.: *Fizyka polimerów formowania włókien*. Warszawa, WNT, 1970.

6. Aspekty technologiczne rozdzielania ciepłego polistyrenu porowatego XPS

Wprowadzenie

Tworzywa o strukturze komórkowej są otrzymywane w procesie porowania, polegającym na utworzeniu struktury komórkowej w wyniku rozprężenia gazu wewnątrz uplastycznionego lub ciekłego tworzywa, które następnie została się [13]. Wprowadza się wówczas do tworzywa gazy obojętne lub też gaz wydziela się w wyniku rozkładu wprowadzanych cieczy niskowrzących lub ciał stałych [6, 15, 20]. Związki te nazywa się poroforami. Największe znaczenie spośród wytwarzanych tworzyw porowatych ma polistyren porowaty, który ze względu na małą gęstość pozorną, małe przewodnictwo cieplne oraz odporność na działanie wilgoci jest szeroko stosowany w budownictwie i chłodnictwie jako materiał izolacyjny i dźwiękochłonny. Tworzywa porowate są stosowane również jako wypełnienia tapicerskie, elementy opakowań oraz jako elementy dekoracyjne w budownictwie i reklamie. Ze względu na swoje zalety są także przedmiotem licznych badań [1, 12, 16–19].

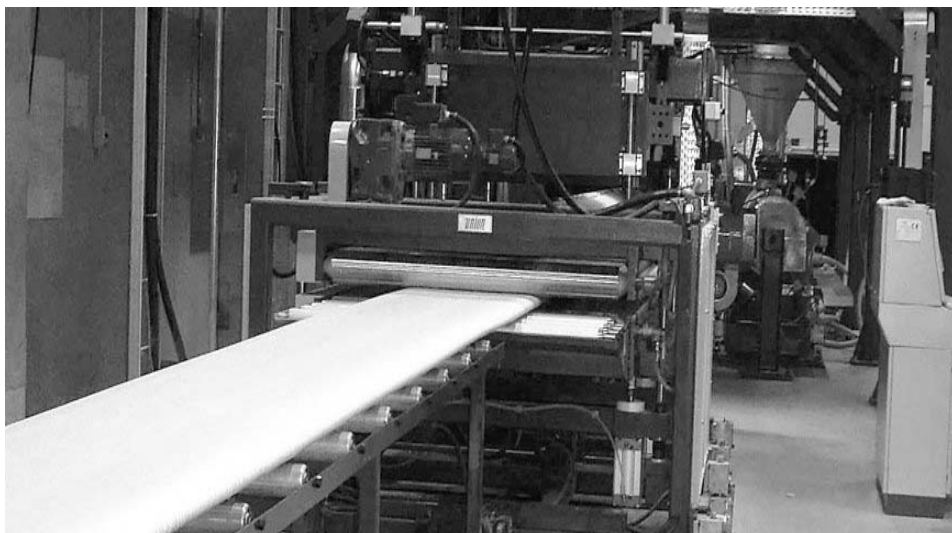
Polistyren porowaty dzieli się na porowaty integralnie (EPS) nazywany powszechnie styropianem oraz porowaty strukturalnie (XPS) [5, 14].

Styropian EPS otrzymywany jest w procesie formowania rozrostowego, w którym w podwyższonej temperaturze zachodzi rozrastanie wstępne granulek tworzywa zawierającego środek porujący, ich suszenie i sezonowanie, a następnie formowanie ostateczne wytworu poprzez ich ograniczone rozrastanie w gnieździe formującym formy rozrostowej.

Polistyren XPS jest natomiast otrzymywany w procesie wytłaczania (rys. 1). Jego porowanie następuje w wyniku rozprężania się gazu w wytłoczynie opuszczającej dyszę głowicy wytaczarskiej. Gaz powstaje w czasie uplastyczniania w następstwie rozkładu poroforu zawartego w przetwarzanym tworzywie [2, 3, 7]. Zaletą i zarazem cechą charakterystyczną polistyrenu porowatego strukturalnie jest występowanie gładkiej litej warstwy wierzchniej o niewielkiej grubości oraz porowatego rdzenia zbudowanego z małych zamkniętych porów [4, 8]. Brak osłabień pomiędzy poszczególnymi porami powoduje większą wytrzymałość mechaniczną oraz lepsze właściwości termoizolacyjne, dzięki temu XPS jest także twardszy i mniej nasiąkliwy od polistyrenu EPS - styropianu. Pomimo lepszych właściwości jest jednak rzadziej stosowana ze względu na wyższe koszty wytwarzania.

Otrzymany w procesie wytłaczania XPS ma najczęściej postać płyt, które są dzielone na mniejsze arkusze jak również ich krawędzie są odpowiednio kształ-

owane dla uzyskania połączeń zakładkowych lub pióro-wpust. Z płyt są również wycinane odpowiednie kształtki m.in. stosowane w reklamie przestrzenne litery, znaki graficzne jak również elementy dekoracyjne oraz modele. Odbywa się to metodą rozdzielania cieplnego, polegającą na oddziaływaniu cieplno-mechanicznym napiętego i nagrzanego rezystancyjnie drutu wprowadzanego pod naciskiem w tworzywo porowate, które stapia się w miejscu zetknięcia z drutem (rys. 2) [11].



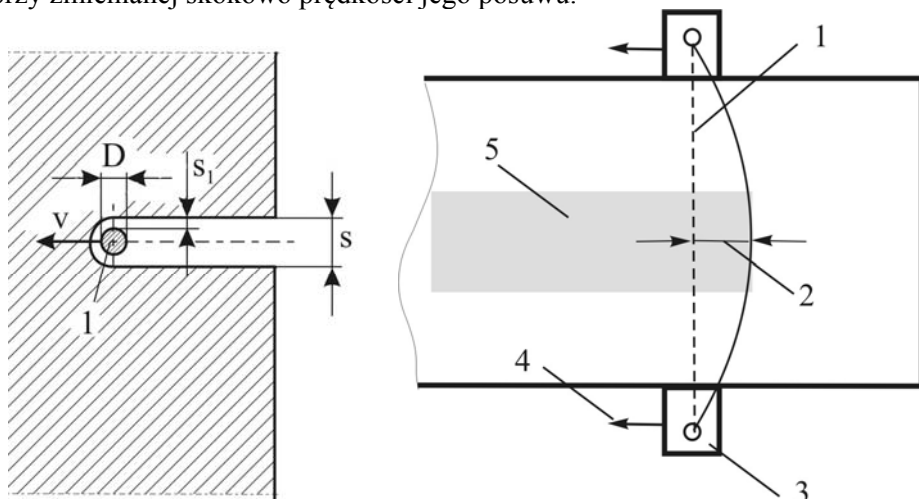
Rys. 1. Wygląd części linii produkcyjnej wytłaczania płyt z polistyrenu XPS [9]

W procesie rozdzielania dąży się do jak najdokładniejszego odwzorowania wycinanego kształtu, poprzez minimalizowanie szerokości szczeliny cięcia oraz strzałki ugięcia drutu rezystancyjnego, przy możliwie dużej prędkości jego posuwu. Dobierając warunki przebiegu procesu należy uwzględnić m.in. takie czynniki jak właściwości mechaniczne i cieplne materiału ciętego, a także natężenie i napięcie prądu przepływającego przez drut, materiał drutu i jego wymiary, jak również prędkość jego posuwu.

Rozdzielanie cieplne tworzyw porowatych dzięki licznym zaletom oraz coraz powszechniejszemu stosowaniu przecinarek cieplnych sterowanych numerycznie znajduje coraz szersze zastosowanie. Odznacza się m.in. brakiem wiórów i zapylenia, niskimi kosztami eksploatacji i stosunkowo prostą budową stosowanych urządzeń w odróżnieniu od metod obróbki mechanicznej, głównie frezowania. Wadą metody jest wydzielanie się z ciętych tworzyw szkodliwych substancji lotnych, których ilość jest uzależniona w dużej mierze od warunków prowadzenia procesu.

Celem badań było określenie wpływu parametrów elektrycznych prądu zasilającego drut oporowy oraz prędkości jego posuwu na strzałkę ugięcia drutu oraz

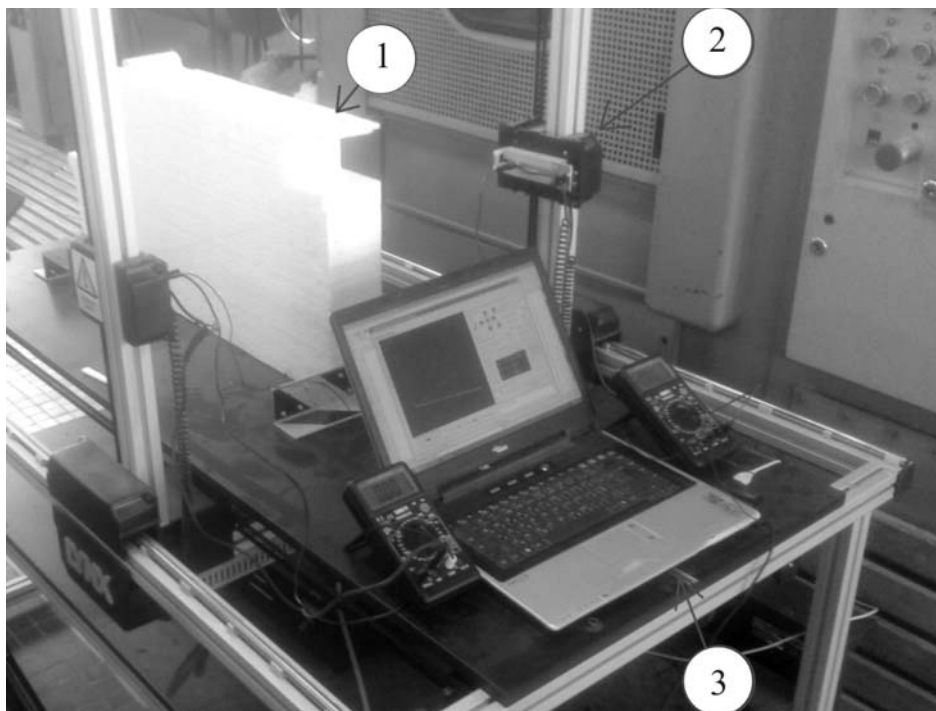
szerokość szczeliny rozdzielania powstającej podczas cięcia polistyrenu porowatego XPS. W postaci wykresów przedstawiono zależności szerokości szczeliny cięcia oraz strzałki ugięcia drutu od mocy prądu zasilającego drut otrzymane przy zmienianej skokowo prędkości jego posuwu.



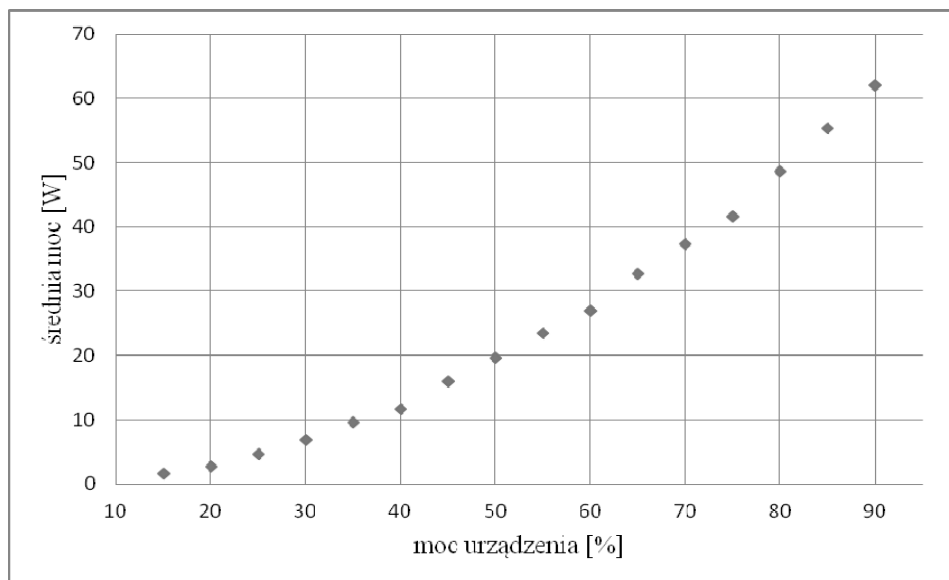
Rys. 2. Schemat rozdzielania cieplnego tworzywa porowatego: 1 – drut rezystancyjny, 2- strzałka ugięcia drutu, 3 – uchwyty mocujące drut, 4 – kierunek ruchu uchwytów, 5 – rozdzielany materiał, v – prędkość nacierania drutu, D – średnica drutu, s – szerokość szczeliny rozdzielania, s_1 – szerokość względna szczeliny rozdzielania

Stanowisko badawcze

Proces rozdzielania cieplnego płyt XPS przeprowadzono za pomocą sterowanej numerycznie przecinarki cieplnej typu Lynx T1/60 (rys. 3) produkcji firmy Lynx sp. z o.o. Zastosowano drut oporowy o średnicy 0,24 mm i długości czynnej 600 mm wykonany ze stopu Kanthal D. Stop ten charakteryzującego się dużym oporem właściwym (wg producenta $1,39 \Omega \text{ m}^2/\text{m}$) oraz temperaturą użytkowania do 1150°C i jest stosowany do produkcji drutów oporowych i elementów grzejnych. Stanowisko jest sterowane za pomocą dedykowanego oprogramowania komputerowego. Moc nagrzewania drutu oraz prędkość jego posuwu w oprogramowaniu jest nastawiana bezstopniowo: moc w zakresie 0–100%, natomiast prędkość posuwu drutu 100–3000 mm/min. W celu wyznaczenia rzeczywistej wartości mocy prądu zasilającego drut oporowy przeprowadzono pomiary natężenia i napięcia prądu przy kolejnych zadanych wartościach co 5% w zakresie 15%–90%. W związku z tym, że sterowanie nagrzewaniem drutu odbywa się z wykorzystaniem układu PWM (phase wave modulation) do pomiarów zastosowano multimetr cyfrowy umożliwiający pomiar wartości skutecznych (True RMS). Wyznaczona charakterystykę mocy przedstawiono na rysunku 4. Szerokości szczeliny cięcia mierzono metodą bezstykową za pomocą optycznego mikroskopu warsztatowego typu MWDC produkcji PZO Warszawa.



Rys. 3. Wygląd przecinarki cieplnej Lynx T1/60: 1 – cięty materiał, 2 – uchwyt mocujący drut rezystancyjny, 3 – komputer z oprogramowaniem sterującym pracą przecinarki



Rys. 4. Zależność mocy prądu zasilającego drut oporowy w [W] od wartości mocy nastawianej w oprogramowaniu sterującym podawanej w [%]

Charakterystyka badań

Badania wykonano z użyciem próbek polistyrenu XPS w postaci płyt o symbolu XPS CARBON PROF 300 wyprodukowanych przez firmę Technonicol. Płyty te są stosowane głównie jako materiał termoizolacyjny w budownictwie do termoizolacji fundamentów, podłóg, piwnic od strony gruntu oraz dachów. Płyty są oznaczone zgodnie deklaracją właściwości użytkowych jako XPS/004/CE/2014, według normy EN13164, zastosowanie jako „płyty termoizolacyjne stosowane w budownictwie”. Kod oznaczenia wyrobu: E-XPS-EN 13164-T1-CS(10)300-DS(TH)-WL(T)0,7-WD(V)3. Wyjaśnienie oznaczeń zestawiono w tabeli 1.

Zamocowaną na stole przecinarki cieplnej płytę XPS poddawano nacinaniu rozgrzanym drutem w jej głąb na 30 mm – wartość przesunięcia uchwytów mocujących drut. Pomiary były powtarzane pięciokrotnie dla każdej z nastawianych wartości mocy nagrzania ciągną i wartości posuwu.

Tabela 1. Zestawienie oznaczeń kodowych materiału XPS CARBON PROF. 300 oraz niektórych charakterystycznych właściwości [10]

Właściwość	Oznaczenie	Wartość
Tolerancja grubości	T1	$\pm 1 \text{ mm}$
Stabilności wymiarowa w 70°C i 90% wilgotności względnej	DS(TH)	$\leq 5\%$
Poziom naprężen ściskających przy 10% odkształceniu względnym	CS(10)300	$\geq 300 \text{ kPa}$
Absorpcja wody przy długotrwałej dyfuzji	WD(V)3	$\leq 3\%$
Długotrwała nasiąkliwość wodą przez zanurzenie	WL(T)0,7	$\leq 0,7\%$
Reakcja na ogień	RtF	klasa E
Deklarowany współczynnik przewodzenia ciepła	λ_D	$0,34 \text{ W/m}^2$
Opór cieplny	R_D	$1,41 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Zakres temperatury użytkowania	-	$-70 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+75 \text{ }^\circ\text{C}$

Pomiary wykonano przy trzech wartościach posuwu drutu 150, 1500, 3000 mm/min. Wartości najniższej stosowanej mocy prądu zasilającego drut dla

każdego z badanych posuwów dobrano tak, aby możliwe było nadtapianie tworzywa i nie dochodziło do zerwania drutu. Po ustaleniu spełniającej ten warunek wartości mocy prądu, kolejne cztery jego wartości były wyższe z rozstępem 5% – wartość nastawiana w oprogramowaniu sterującym. Dalsze zwiększanie mocy w większości przypadków nie było uzasadnione z uwagi na możliwość nadmiernego nadtapiania tworzywa prowadzącego do wydzielania szkodliwych dla zdrowia związków lotnych. Badane warunki posuwu i odpowiadające im wartości mocy nagrzewania przedstawiono w tabeli 2.

Po wykonaniu próbek przeprowadzono pomiary szerokości szczeliny s poszczególnych nacięć za pomocą mikroskopu warsztatowego oraz głębokości powstałych nacięć za pomocą liniału. Strzałkę ugięcia drutu, która jest następstwem zarówno rozszerzalności cieplnej drutu jak i jego rozciągania mechanicznego wyznaczono poprzez odjęcie rzeczywistej głębokości uzyskanego nacięcia od założonej jego wielkości 30 mm – odpowiadającej przemieszczeniu uchwytów drutu.

Tabela. 2. Badane parametry procesu rozdzielania cieplnego

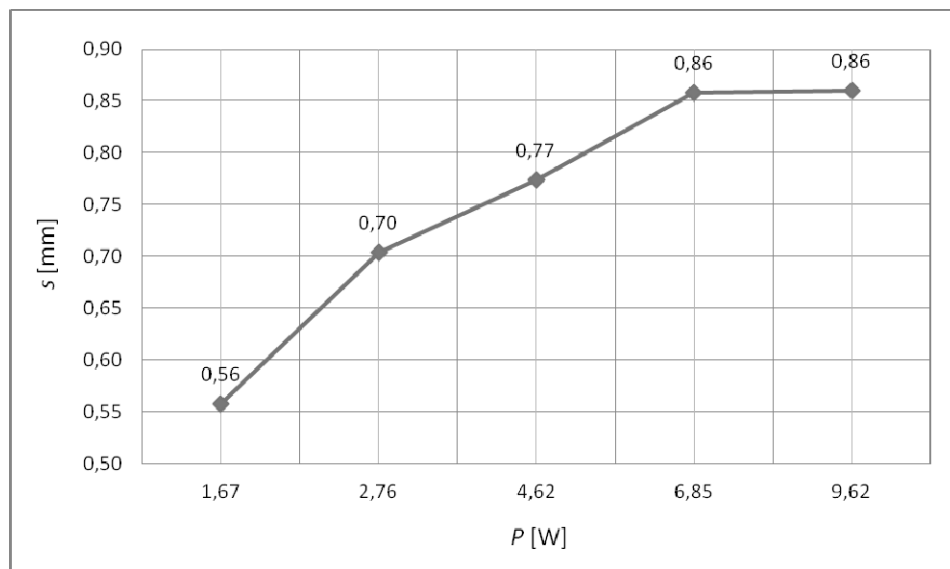
Prędkość posuwu [mm/min]	Moc nastawiana w oprogramowaniu [%]	Mocy prądu zasilającego drut [W]
150	15	1,67
	20	2,76
	25	4,62
	30	6,85
	35	9,62
1500	50	19,58
	55	23,52
	60	27,08
	65	32,77
	70	37,32
3000	70	37,32
	75	41,74
	80	48,73
	85	55,48
	90	62,12

Wyniki badań

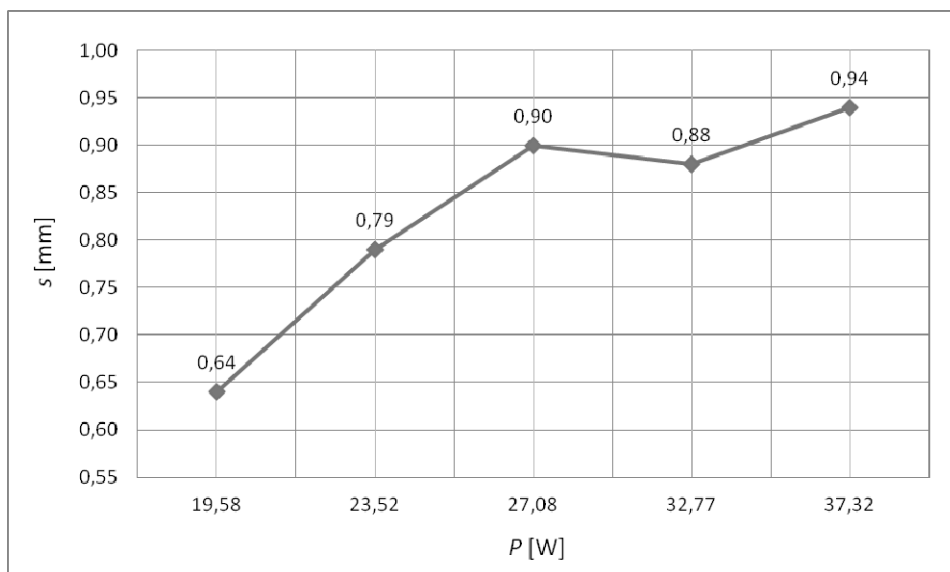
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów których wyniki przedstawiono na rys. 4–7 stwierdzono, do głównych czynników determinujących szerokość szczeliny cięcia s , a tym samym na dokładność odwzorowania wycinanego metodą rozdzielania cieplnego kształtu w polistyrenie porowatym XPS, należą prędkość posuwu roboczego drutu rezystancyjnego oraz moc prądu zasilającego drut.

Uzyskane krzywe świadczą o tym, że zwiększanie mocy nagrzewania drutu przy niezmiennych pozostałych warunkach rozdzielania powodowało zwiększenie szerokości szczeliny cięcia. Wzrost ten zmniejszał się znacznie wraz z prędkością posuwu drutu. W przypadku najmniejszej prędkości posuwu zwiększenie mocy nagrzewania drutu o 7,95 W (z 1,67 W do 9,62 W) powodowało zwiększenie szerokości szczeliny cięcia o 0,3 mm (rys. 4) natomiast przy prędkości posuwu 1500 mm/min (rys 5) taki sam wzrost szerokości szczeliny uzyskano po zwiększeniu mocy o 17,7 W. Przy największej badanej wartości posuwu 3000 mm/min (rys. 6), zwiększenie mocy o 24,8 W spowodowało wzrost szerokości szczeliny cięcia już tylko o 0,18 mm.

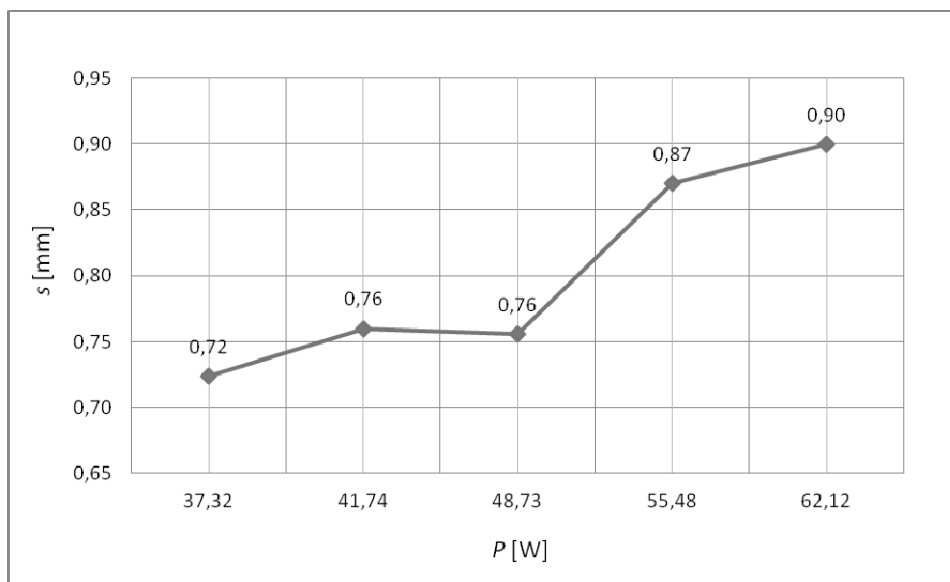
Podobny charakter zmian zaobserwowano w przypadku strzałki ugięcia drutu, której wartość zmniejsza się wraz ze wzrostem mocy nagrzewania a tym samym szerokości szczeliny cięcia. Przy prędkości posuwu 150 mm/min zwiększenie mocy w badanym zakresie spowodowało zmniejszenie się strzałki ugięcia o 6,6 mm. Natomiast przy większych szybkościach posuwu 1500 i 3000 mm/min zastosowany znacznie większy wzrost mocy powodował mniejsze zmiany w jej wartości odpowiednio o 3,4 oraz 5,4 mm.



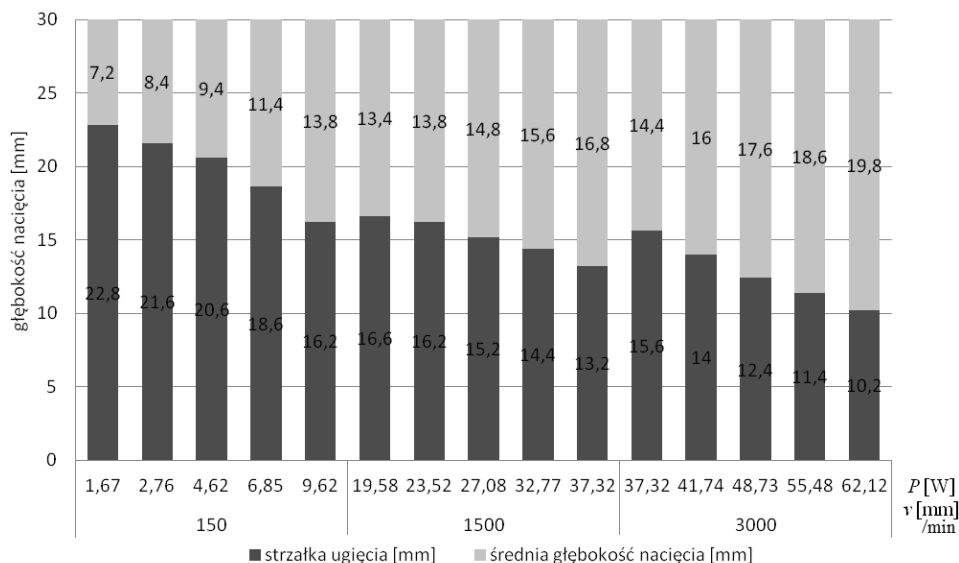
Rys. 4. Średnia szerokość szczeliny rozdzielania s , w zależności od mocy prądu zasilającego drut P przy prędkości posuwu 150 mm/min



Rys. 5. Średnia szerokość szczeliny rozdzielania s , w zależności od mocy prądu zasilającego drut P przy prędkości posuwu 1500 mm/min



Rys. 6. Średnia szerokość szczeliny rozdzielania s , w zależności od mocy prądu zasilającego drut P przy prędkości posuwu 3000 mm/min



Rys. 7. Zależność strzałki ugięcia drutu podczas rozdzielania cieplnego dla poszczególnych wartości mocy prądu zasilającego i posuwu drutu.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że szerokość powstającej w czasie rozdzielania szczeliny w obrabianym tworzywie, zwiększa się wraz ze wzrostem mocy prądu zasilającego drut oporowy, w wyniku zwiększenia się temperatury w obrębie wprowadzanego narzędzia, skutkując jego większym nadtapianiem.

W wyniku zwiększania prędkości posuwu roboczego dochodzi natomiast do skracania czasu kontaktu drutu z tworzywem, czego efektem jest zmniejszenie powstającej szerokości szczeliny cięcia.

Zwiększanie się powstającej szczeliny wraz ze wzrostem mocy prądu zasilającego drut jest zależne od prędkości posuwu, tj. przy większych wartościach prędkości posuwu wpływ zmiany mocy prądu zasilającego drut na powstającą szczelinę cięcia jest mniejszy.

Wraz ze zwiększaniem prędkości posuwu, zaobserwowano mniejszą zmienność szerokości powstających szczelin dla poszczególnych wartości mocy prądu zasilającego drut.

Zmierzone wartości strzałki ugięcia drutu wskazują, że ze względu na dokładność odwzorowania wycinanego kształtu jak i bezpieczeństwo zerwania drutu, uzasadnione jest prowadzenie rozdzielania cieplnego XPS przy większych wartościach mocy prądu zasilającego drut rezystancyjny. Występujące wówczas zmniejszenie powstającej podczas cięcia strzałki ugięcia drutu związane jest jednak z równoczesnym powiększeniem powstałej szerokości szczeliny cięcia.

Najlepszą efektywność rozdzielania cieplnego odnotowano przy zastosowaniu posuwu 3000 mm/min i mocy prądu zasilającego ciągnio 62W (90%). W takich warunkach rozdzielania drut rezystancyjny miał wówczas najmniejszą średnią strzałkę ugięcia wynoszącą 10,2 mm, natomiast powstająca szczelina miała średnią szerokość 0,9 mm.

Najmniejszą efektywność cięcia odnotowano dla posuwu 150 mm/min i mocy prądu zasilającego ciągnio 9,6W (35%) uzyskując zbliżoną średnią szerokość szczeliny rozdzielania 0,86 mm oraz większą strzałkę ugięcia 16,2 mm.

Literatura

- [15] Bajera K., Stasiak A., *Charakterystyka mieszanin PE-LD i PE – LD/EVA porowanych chemicznie*, Przetwórstwo Tworzyw, 2010, 6, s. 302–307
- [16] Chang D. H., Villarnizar C. A., *Studies on structural foam processing I. The rheology of foam extrusion*, Polymer Engineering and Science. 1978, 18, s. 687.
- [17] Chang D. H., Villarnizar C. A., *Studies on structural foam processing II. Bubble dynamics in foam injection molding*, Polymer Engineering and Science 1978, 18, s. 699.
- [18] Chang D. H., Hee J. Y., *Studies on structural foam processing. IV. bubble growth during mould filling*, Polymer Engineering and Science 1981, 21, s. 518.
- [19] Dobrzański L.A., *Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo*, WNT, Warszawa 2002 r.
- [20] Garbacz T., Tor A., *Wpływ zawartości środka porującego na właściwości użytkowe zewnętrznych powłok kabli wytwarzanych metodą wytłaczania porującego*, Polimery 2007, 52, nr 4, s. 286–293.
- [21] Garbacz T., Samujło B., *Wybrane właściwości geometrycznej struktury powierzchni wytworów porowatych otrzymanych z polietylenu*, Polimery 2008, 53, s. 471–476.
- [22] Han X. i in., *Extrusion of polystyrene nanocomposite foams with supercritical CO₂*, Polymer Engineering and Science 2003, 43, s. 1261.
- [23] http://www.ipmtc.com.pl/UNION_Linie_do_plyt_spienianych_XPS.html (dostęp dn. 19.07.2016r.)
- [24] http://www.technicol.pl/images/stories/karty_techiczne/20160622/KT%20Technicol%20Carbon%20Prof%20300.pdf (dostęp dn. 19.07.2016r.)
- [25] Praca zbiorowa pod redakcją R. Sikory, *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006 r.
- [26] Raszewska – Kaczor A., Stasiak A., Janczak K., *Chemically crosslinked polyethylene foams of limited flammability*, Polimery, 2015, 4, 60, s. 283–285

- [27] Sikora J.W., Samujło B., Kowalska B., *Otrzymywanie wytworów z polistyrenu porowatego strukturalnie*, Przetwórstwo Tworzyw 2006, 12, nr 1, s. 4–11.
- [28] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993 r.
- [29] Stasiek A., Dzwonkowski J., *Badanie właściwości wytłaczanego polietyleny spienionego*, Przemysł Chemiczny 2005, 84, nr 1, s. 22–24.
- [30] Stasiek A., Łubkowski D., Dzwonkowski J., Szumski Zb., *Badania właściwości wytłaczanego porowatego poli(chlorku winylu)*, Przetwórstwo Tworzyw, 2005, 5, s.11
- [31] Stasiek A., Raszkowska-Kaczor A., Bajer K., *Wpływ obecności środka wspomagającego sieciowanie oraz zawartości środka porującego na właściwości polietylenowych pianek chemicznie sieciowanie*, Przemysł chemiczny, 2013, 6, s. 1038–1041
- [32] Stasiek A., Raszkowska – Kaczor A., Janczak K., *Spienianie polilaktydu*, Przemysł Chemiczny 2014, 93, 1, s. 117–119
- [33] Stasiek A., Raszkowska-Kaczor A., Janczak K., *Spienianie polilaktydu modyfikowanego*, Przemysł Chemiczny, 2014, 93, 2, s. 217–219
- [34] Tor-Swiątek A., Samujło B., *Use of thermo vision research to analyze the thermal stability of microcellular extrusion process of poly(vinyl chloride)* Eksploatacja i Niezawodność 2013, 15, s. 58–61.

7. Projekt formy oraz sposobu wytwarzania półokrągłych płyt z laminatów z włókna węglowego metodami PRM i TSF

Wstęp

Metoda wytwarzania laminatów poprzez prasowanie tkaniny z włókna i sproszkowanej żywicy, czyli PRM, wprowadziła zupełnie nowe możliwości jeśli chodzi o prowadzenie produkcji cienkościennych elementów kompozytowych. Ta nowatorska metoda, a właściwie opracowanie samej żywicy, która pociągnęło za sobą powstanie metody jej przetwarzania, jest stosunkowo nowa, bo wprowadzona na rynek w 2014 roku. Od tamtej pory żywica ta jest znana pod nazwą A.S.SET. Dokładny skład proszku nie jest powszechnie znany, z uwagi na nowość technologii, która jest objęta jeszcze prawami ochronnymi, ale wiadomo że ASSET jest jednoskładnikową żywicą epoksydową, która może być przechowywana w temperaturze pokojowej. Poddana oddziaływaniu podwyższonej temperatury ulega twardnieniu poprzez termiczną aktywację środków sieciujących. Żywica występuje w trzech wariantach kolorystycznych (rys. 1), które zależne są od zastosowanego środka sieciującego, a co za tym idzie posiadają odmienne właściwości fizyczne. Do głównych zalet żywicy ASSET w porównaniu do żywic tradycyjnych zlicza się wspomnianą wcześniej jednoskładnikowość i możliwość składowania w temperaturze pokojowej nawet do 12 miesięcy bez utraty właściwości. Dla porównania tradycyjne płynne żywice muszą być przechowywane w lodówkach, a przed nałożeniem ich na tkaniny z włókna należało je wymieszać z utwardzaczem. Kolejnymi zaletami są krótki i prosty cykl utwardzania i łatwość formowania przy pomocy autoklawu, prasy hydraulicznej, a nawet prasy ręcznej. Niskie temperatury topnienia (ok. 45°C) oraz sieciowania od 120 do 140°C. Dobra jakość powierzchni już bezpośrednio po procesie formowania. Wyroby z ASSETu posiadają także bardzo dobre właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach i w warunkach dużej wilgotności, dzięki niewielkiej absorpcji wody [3, 4, 5, 6].

Materiały typu CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) z wykorzystaniem ASSETu oraz gotowe elementy kompozytowe można wytwarzać w dwóch różnych procesach formowania, które pozornie nie różnią się od siebie, gdyż oba polegają na podgrzaniu i sprasowaniu włókien węglowych z żywicą. Różnica polega na temperaturze nagrzewania i w pewnym sensie na dualistycznej naturze opisywanego materiału [1].



Rys. 1. Trzy warianty kolorystyczne ASSETu uwarunkowane zastosowanym środkiem sieciującym [2]

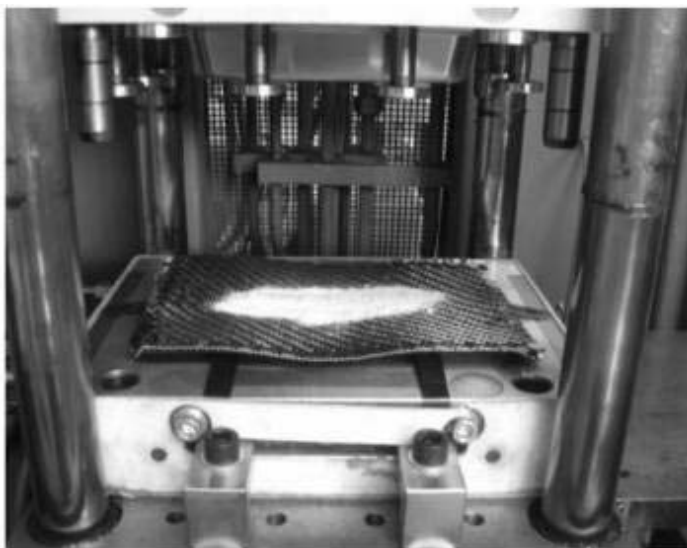
Procesy formowania

Wspomniana powyżej dualistyczna natura ASSETu związana jest z występowaniem pewnej temperatury granicznej (ok. 85–95°C), poniżej której żywica zachowuje się w pewnym sensie jak termoplast. Oznacza to, że może być nagrzewana do temperatury nieco poniżej granicznej, w której ulega uplastycznieniu, a po ochłodzeniu – zestaleniu. Gdy ponownie nagrzemy żywicę do temperatury poniżej granicznej, znów ulegnie ona uplastycznieniu. Jednak po przekroczeniu temperatury granicznej żywica zachowuje się jak duroplast, czyli dochodzi do pełnej aktywacji środka sieciującego i rozpoczyna się nieodwracalny proces utwardzania żywicy [1,7].

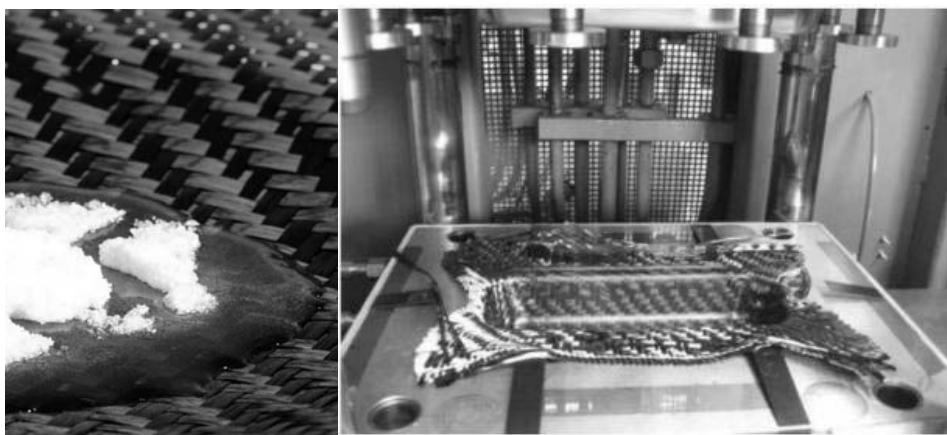


Rys. 2. Nanoszenie Odpowiedniej ilości żywicy pomiędzy tkaniny węglowe [1, 2]

Wymieniony w tytule tej pracy proces PRM (rys. 2–4) wykorzystuje od razu zjawisko bezpowrotnego utwardzania żywicy. Produkcja elementów kompozytowych tą metodą polega na ułożeniu warstwami arkuszy tkaniny z włókna węglowego w dowolnej ilości oraz o dowolnej orientacji włókien. Pomiedzy arkuszami umieszcza się sproszkowaną żywicę o masie stanowiącej ok. 70% masy arkusza z tkaniny węglowej. Tak przygotowany wsad umieszcza się w formie kształtującej prasy lub autoklawu przez kilka minut. Parametry prasowania przedstawiono w tabeli 1. Po zakończeniu prasowania gotowy element jest wyciągany i poddawany obróbce wykańczającej w postaci okrawania naddatku włókna węglowego i ewentualnemu szlifowaniu krawędzi [1, 2].



Rys. 3. Umieszczanie wsadu w formie kształtującej prasy hydraulicznej [1]

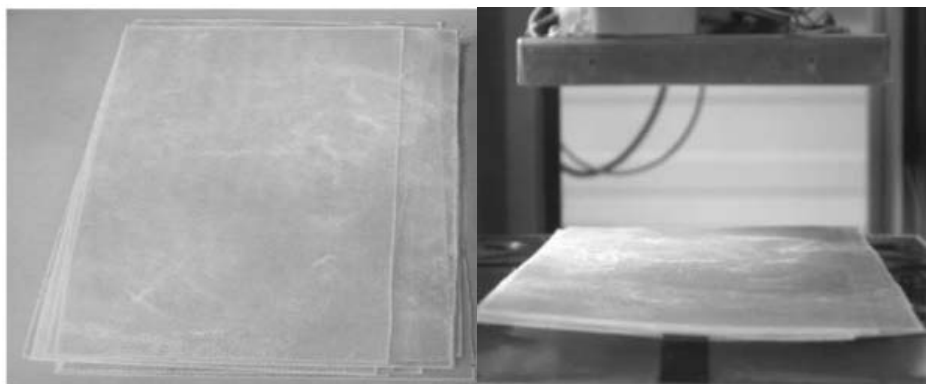


Rys. 4. Nagrzewanie oraz prasowanie laminatu [1, 2]

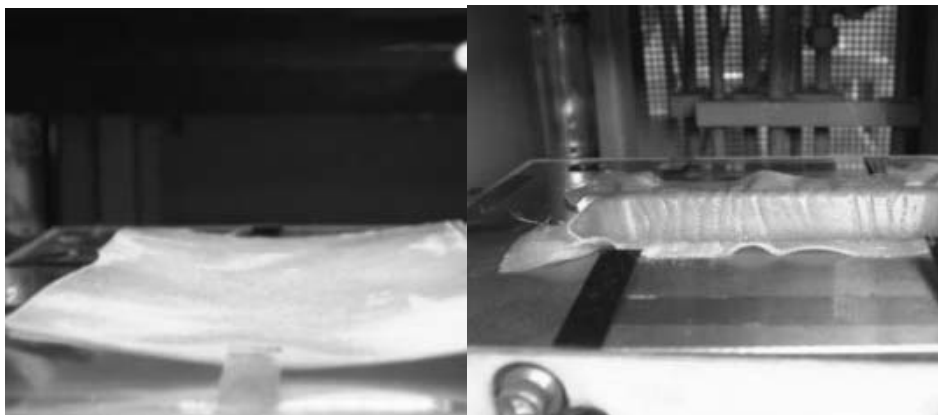
Tabela 1. Parametry procesu prasowania metodą PRM [1, 3]

Parametr	Wartość
Ciśnienie	3–6 bar
Temperatura utwardzania	120–140 °C
Czas procesu	10–15 min
Czas utwardzania	6–8 min
Próżnia	opcjonalnie

Jako drugi w tytule został wymieniony proces TSF (rys. 5–6). W odróżnieniu od PRM w drodze do wytworzenia gotowego wyrobu należy przeprowadzić proces prasowania dwukrotnie. W pierwszym kroku wytwarza się produkt pośredni w postaci cienkich elastycznych płyt (tzw. ASSET SHEETS), parametry prasowania wstępnego przedstawiono w tabeli 2.2, po ostygnięciu mogą być przechowywane w temperaturze pokojowej przez 12 miesięcy bez pogorszenia właściwości. Gotowe płyty mogą zostać poddane właściwemu prasowaniu. Ilość płyt dobierana jest w zależności od wymaganej grubości finalnego wyrobu i oczekiwanej wytrzymałości. Zachowanie pewnej elastyczności płyt umożliwia ułożenie ich w formie kształtującej. Parametry właściwego prasowania pokrywają się z tymi z tabeli 2. Po wyjęciu gotowego wyrobu z formy, tak jak to było w przypadku PRM, należy poddać go obróbce wykańczającej aby usunąć naddatek włókna (na rysunkach 5 i 6 akurat włókno szklane) i wypolerować krawędzie [1, 2].



Rys. 5. Prasowanie wstępne arkuszy włókna szklanego z żywicą ASSET [1]



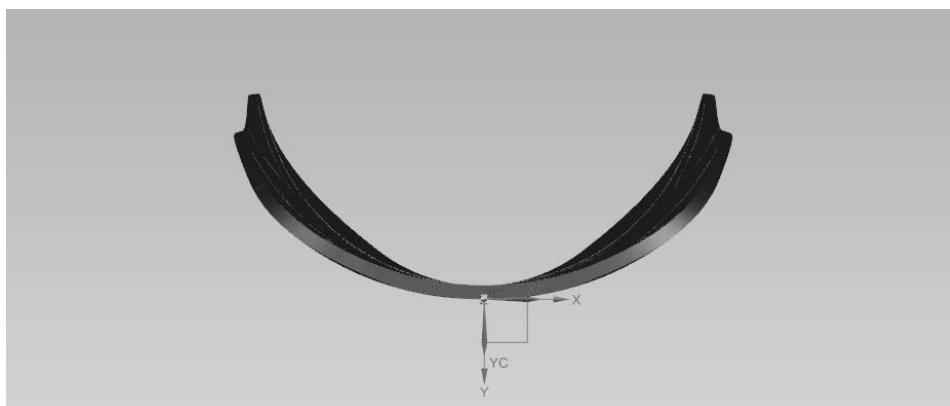
Rys. 6. Nagrzewania oraz właściwe prasowanie przygotowanych wcześniej ASSET SHEETS [1]

Tabela 2. Parametry prasowania wstępnego ASSET SHEETS [1, 3]

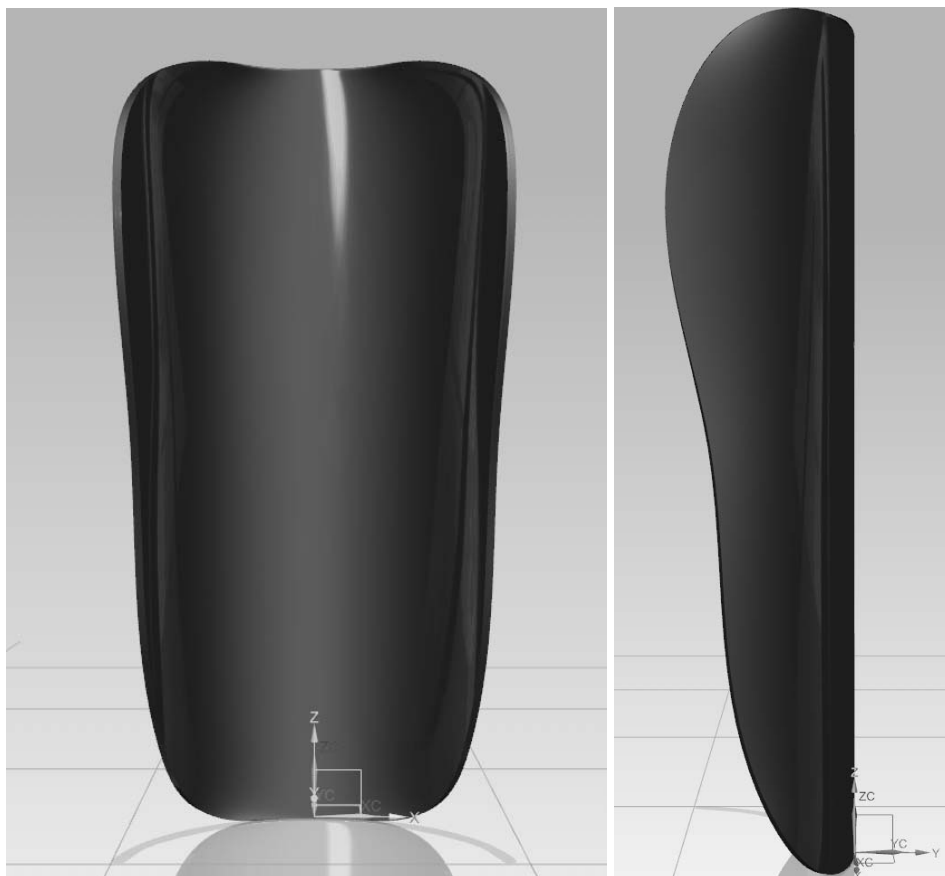
Parametr	Wartość
Temperatura prasowania	Do 85 °C
Ciśnienie	Do 40 kPa
Czas procesu	Ok. 8 min

Projekt wkładki do ochraniaczy piłkarskich

W ramach projektu wykonano model ochraniacza w programie NX 9.0 o wysokości 170 mm i największej szerokości 70 mm. Planowana grubość ochraniacza po procesie prasowania to 2,5 mm. Na rysunkach 7–8 przedstawiono model wkładki w trzech rzutach – z góry, od frontu i z boku.



Rys. 7. Model wkładki do ochraniacza w widoku z góry



Rys. 8. Model wkładki do ochraniacza w widoku od frontu i z boku

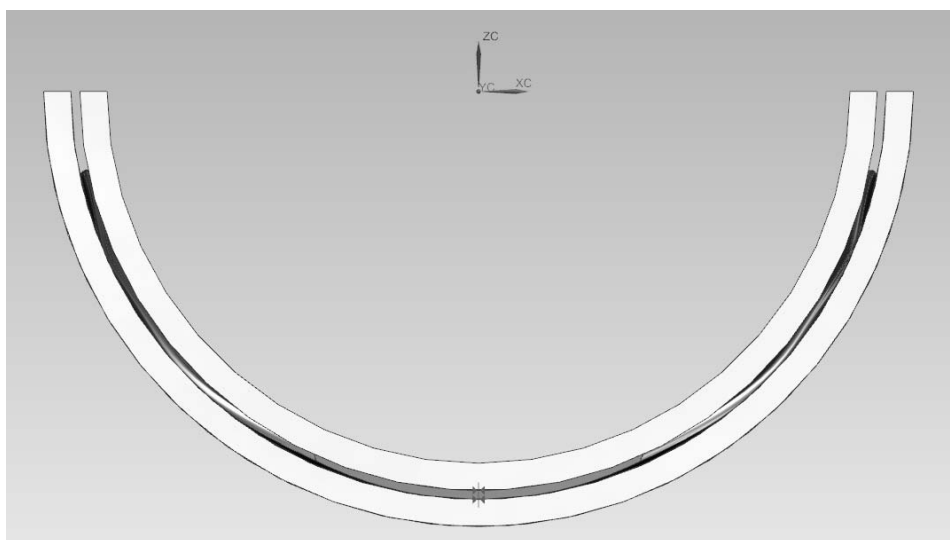
Kolejnym krokiem było zamodelowanie części górnej i dolnej formy kształtującej odpowiadającej geometrii zaprojektowanej wkładce. Na rysunkach 9–10 przedstawiono dopasowanie górnej i dolnej części formy.

Do prasowania laminatów przebrojono prasę ręczną (rys. 3.5), wyposażoną w stół z szynami do mocowania dodatkowych narzędzi, ramę nieruchomą zamontowaną na dwóch pionowych kolumnach i ramę ruchomą przesuwającą się po wymienionych wyżej kolumnach. Rama ruchoma połączona jest z pokrętle ślimakowym przy pomocy łożyska, w którym końcówka pokrętła obraca się swobodnie, ale zablokowany jest jej ruch w płaszczyźnie pionowej. W ramie nieruchomej znajduje się otwór gwintowany przez który przechodzi pionowa część gwintowana pokrętła, które poprzez obrót steruje położeniem stołu ruchomego. W dolnej części stołu ruchomego przykręcona jest głowica wyposażona w śruby, które służą do przykręcania dodatkowego oprzyrządowania – takiego jak widoczne na rysunku dwie płyty aluminiowe. Płyty te są drążone

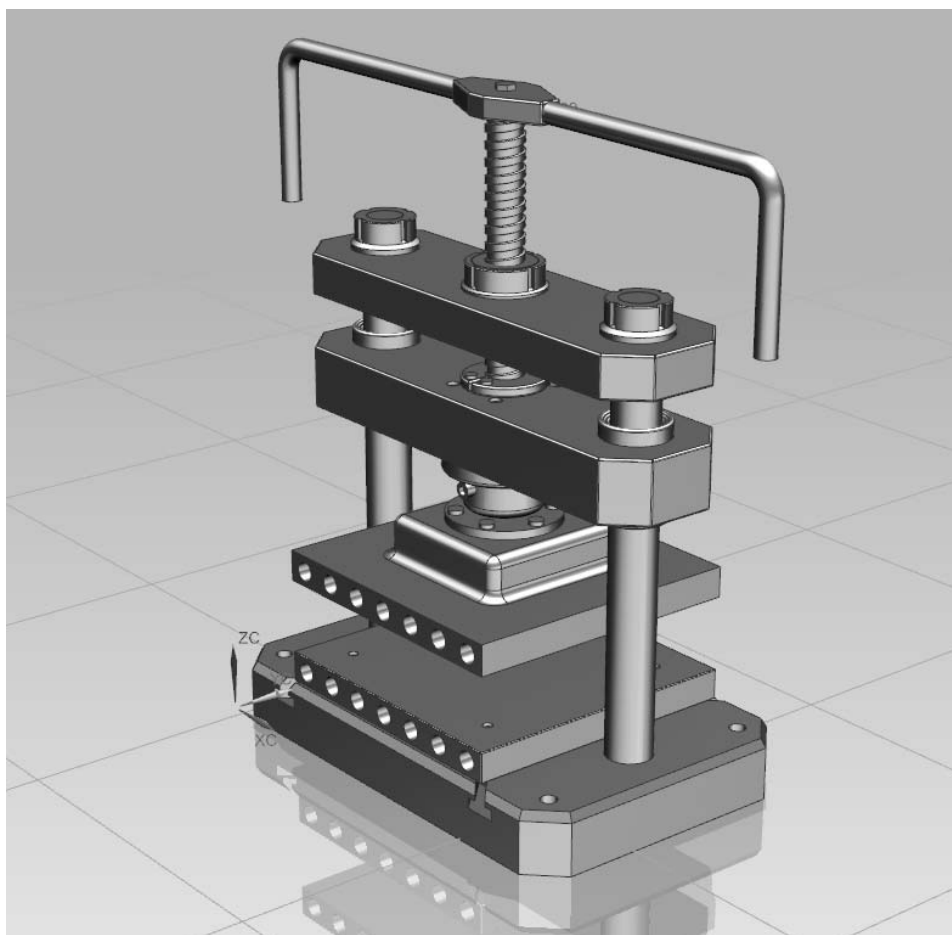
wzdłuż a w powstałych otworach umieszczono grzałki, które mogą rozgrzać powierzchnie płyt nawet do 200°C.



Rys. 9. Schemat górnej i dolnej części formy

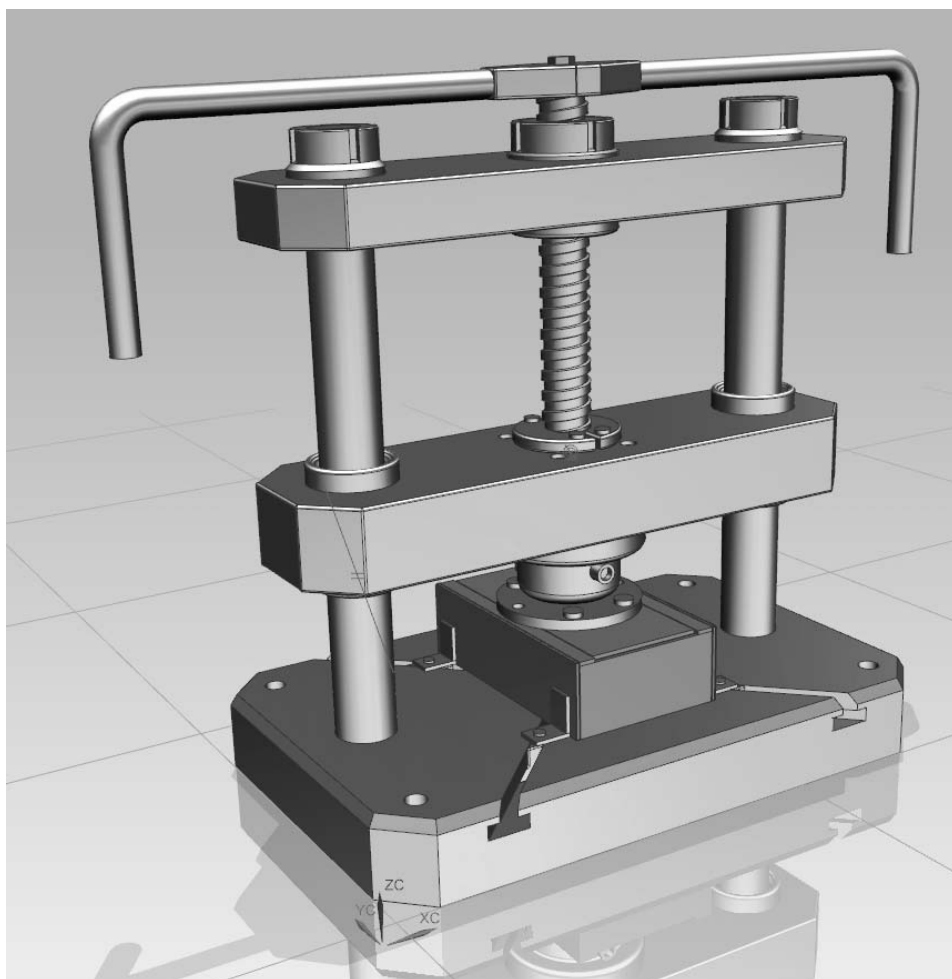


Rys. 10. Schemat przedstawiający dopasowanie modelu wkładki do obu części formy



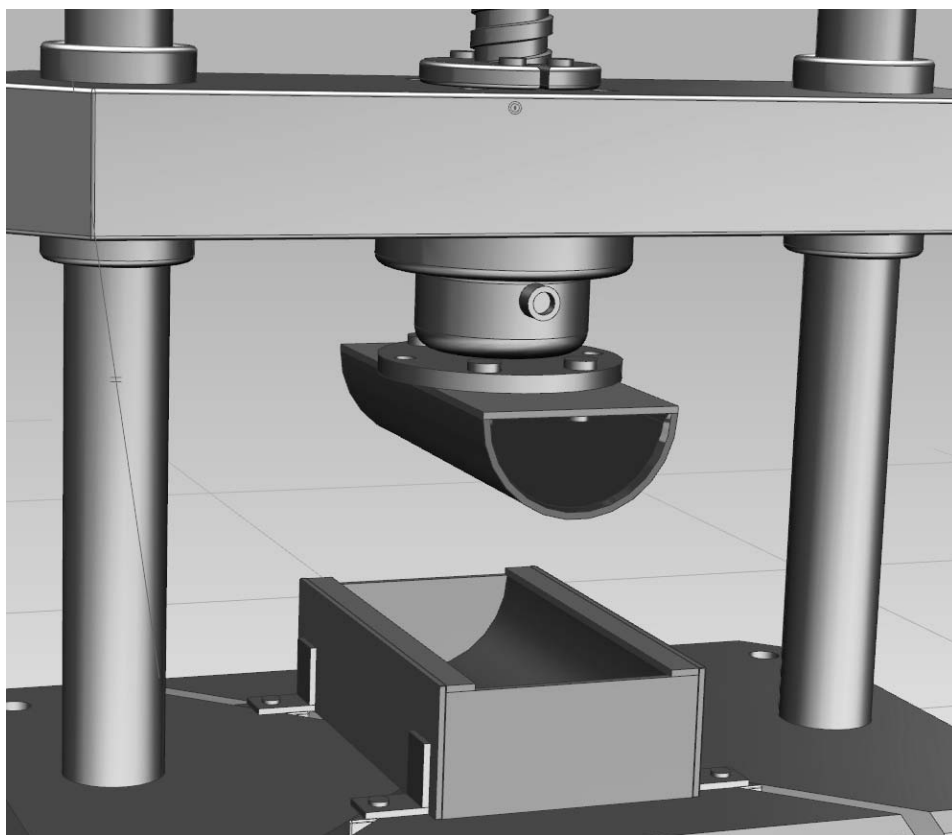
Rys. 11. Widok ogólny prasy ręcznej

Przymocowane do prasy płyty umożliwiają jedynie prasowanie płaskich laminatów, dlatego należało zaprojektować zespoły mocujące dla górnej i dolnej formy kształtującej widocznej na rysunku 9. Wybrane rozwiązanie konstrukcyjne zakładało skonstruowanie dla obu części formy obudowy, częściowo spawane, a częściowo skręcane od wewnątrz, które będą umożliwiały przykręcenie ich do szyn w podstawie prasy oraz do głowicy mocującej stołu ruchomego prasy. Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono projekt gotowej formy przykręconej do struktur mocujących prasy w stanie zwartym oraz rozwartym.

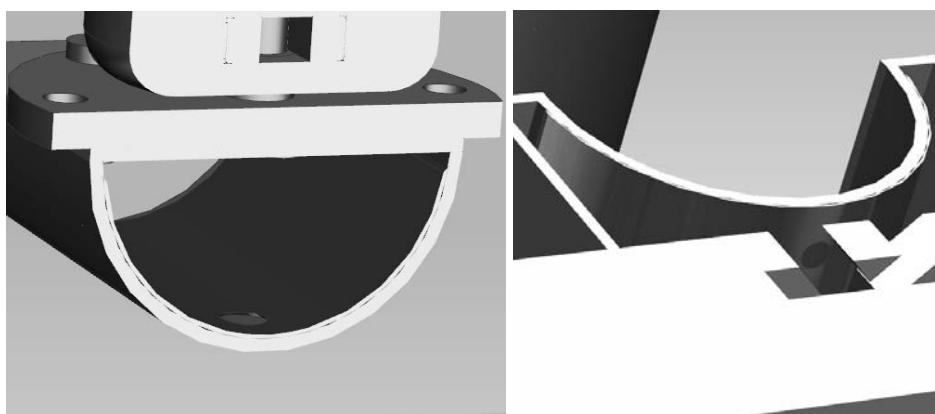


Rys. 12. Model gotowej formy przymocowanej do prasy w stanie zwartym

Problem nagrzewania formy rozwiązano poprzez zastosowanie silikonowych mat grzewczych, które mogą osiągać temperaturę nawet 250°C . Na środku maty znajduje się mały otwór, który stanowi lokalizację przytwierdzenia termopary, która umożliwi dokładne kontrolowanie temperatury prasowania, co z uwagi na właściwości fizykochemiczne zastosowanej żywicy jest bardzo istotne. Na rysunku 14 widoczny jest sposób ułożenia silikonowych mat grzewczych wraz z lokalizacją otworów do pomiaru temperatury.



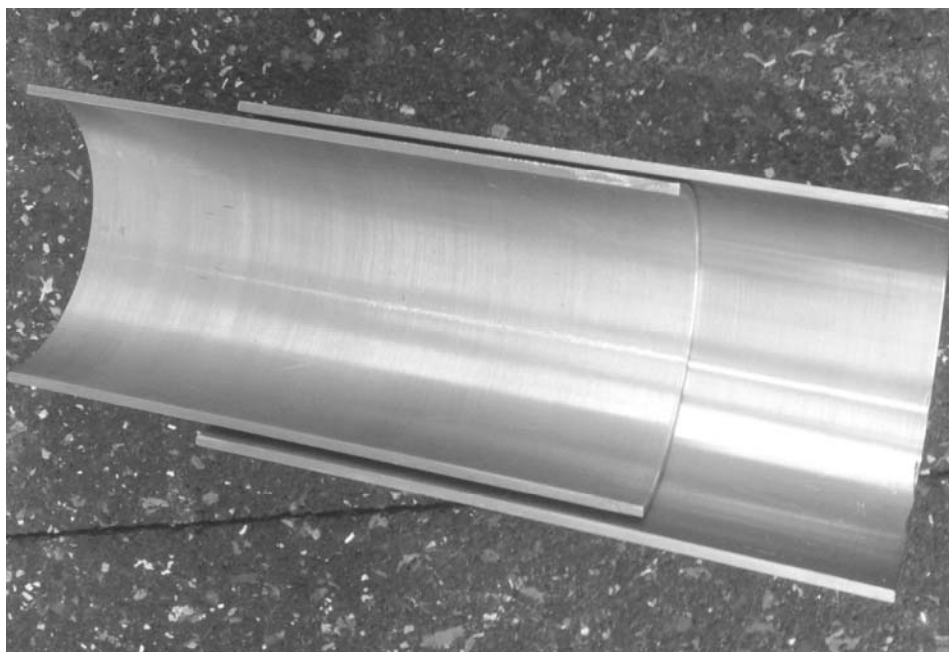
Rys. 13. Model gotowej formy przytwierdzonej do prasy w stanie rozwartym



Rys. 14. Przekrój poprzeczny przez górną i dolną część formy, widoczne ułożenie silikonowych mat grzewczych

Wykonanie elementów rzeczywistych

Zgodnie z założonym modelem wykonano wszystkie niezbędne elementy formy. W narzędziowni wyfrezowano stalowe części formujące formy oraz wykonano obudowę ze stalowych płytek i kątowników z otworami umożliwiającymi sztywne zamontowanie formy na prasie. Rysunek 15 przedstawia gotowe części robocze formy z odpowiednio wypolerowaną powierzchnią, przygotowane do umieszczenia w obudowie i zamocowania na prasie.



Rys. 15. Gotowe do użytku części robocze formy

Do wykonywania laminatów założono stałą gramaturę materiałów. W każdej próbie wykorzystywano 4 warstwy tkaniny węglowej o kierunkach włókien 0/90 i żywicę proszkową ASSET POWDER 01 w ilości 70% masy tkaniny węglowej na każdą stronę. Prasowanie trwało 12 min w temperaturze 120°C. Pierwsze próby prasowania półokrągłych laminatów metodą PRM zakończyły się niestety niepowodzeniem (rys. 16). Główną niedogodnością była trudność w równomiernym rozprowadzeniu żywicy po zakrzywionej płaszczyźnie formy (proszek obсыpywał się do środka). W momencie prasowania górna część formy musiała przetłoczyć prawie całą żywicę z dna formy ku górze. Ukierunkowany przepływ takiej ilości żywicy powodował rozsuwanie się włókien węglowych w obrębie tkaniny. Ponadto czas przebywania żywicy w obrębie górnej części formy był zbyt krótki aby prawidłowo przeinfiltrować włókna węglowe. W rezultacie otrzymane laminaty ulegały rozwarstwianiu, powierzchnia była nieestetyczna

i wykruszała się, a w dolnej części przywarła do powierzchni formy pomimo zastosowania środków rozdzielających.

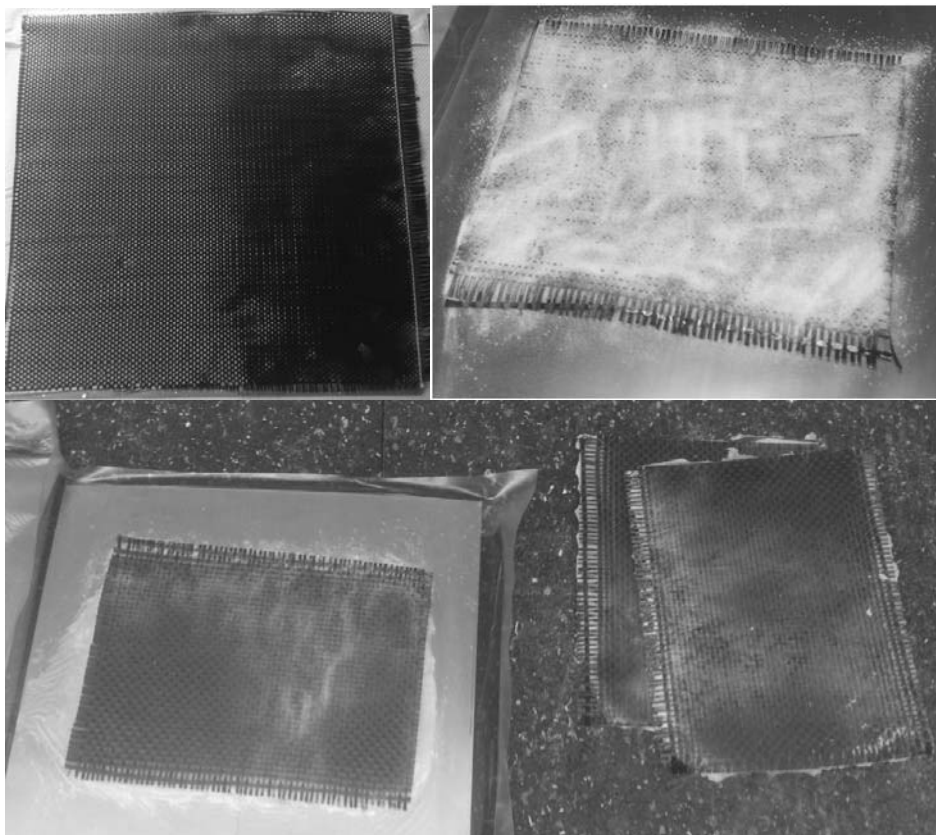


Rys. 16. Efekty Prasowania półokrągłych laminatów metodą PRM

Z uwagi na pierwsze niepowodzenia zmieniono metodę wytwarzania na TSF. W pierwszej kolejności przeprowadzono prasowanie wstępne w celu wytworzenia ASSET SHEETS. Przygotowano do tego celu aluminiowe kwadratowe płyty, które wykładano specjalną folią separacyjną zapobiegającą przywieraniu żywicy. Na folię rozsypywano żywicę, na niej układano arkusz włókna węglowego, zasypywano żywicą i od góry przykrywano ponownie folią i płytą aluminiową. Całość prasowano przez 8 min w temperaturze 80°C. Prasę należało ponownie przebroić do stanu widocznego na rysunku 11. Proces przedstawiono na rysunku 17.

Gotowe ASSET SHEETS wykorzystano następnie w procesie prasowania właściwego. Cztery sztuki wyprasowanych ASSET SHEETS ułożono w formie kształtującej wyłożonej folią separacyjną. SHEETS miały wystarczającą elastyczność aby dokładnie ułożyć je w formie. Proces prasowania przeprowadzono tak dla poprzedniej metody 12min/120°C. Efekt końcowy był zdecydowanie lepszy niż w przypadku stosowania metody PRM. Żywica była równomiernie rozłożona na całej powierzchni formy, dzięki czemu możliwe było jej całkowite zamknięcie już w momencie rozpoczęcia procesu (brak nagromadzenia proszku na dnie formy). W procesie prasowania wstępnego żywica zdążyła już częściowo przeinfiltrować włókna węglowe, a podczas drugiego procesu prasowania

zdażyła wypełnić wszystkie nierówności, w rezultacie dając dobrą jakość powierzchni. Na rysunku 4.4 przedstawiono otrzymane laminaty.



Rys. 17. Schemat przedstawiający wykorzystany arkusz tkaniny węglowej, proces zasypywania tkaniny żywicą w proszku oraz gotowe ASSET SHEETS

Laminaty otrzymywane po procesie prasowania właściwego okazały się być trudne do przeprowadzania procesów obróbki ubytkowej i wykańczającej w celu nadawania ostatecznego kształtu. Dlatego później zdecydowano się na kształtowanie płaskich ASSET SHEETS, a dokładniej na wycinanie z nich pożądanego kształtu (rys. 18 dół). Tak przygotowane elementy poddawano prasowaniu właściwemu i otrzymywano od razu elementy o odpowiadającym kształtem finalnemu produktowi.



Rys. 18. Półokrągłe laminaty kompozytowe otrzymane w procesie TSF

Podsumowanie

Opracowanie proszkowej żywicy epoksydowej zawierającej od razu w swoim składzie aktywowane termicznie środki sieciujące stworzyło zupełnie nowe możliwości dla wytwarzania laminatów. Proste w użytkowaniu i przygotowaniu materiały wsadowe, nieskomplikowana metoda przetwórstwa i proste narzędzia sprawiają, że metody PRM i TSF wytwarzania laminatów z żywic proszkowych nadają się idealnie do uruchamiania niskonakładowych produkcji, prototypowania, ale także wytwarzania seryjnego elementów o nieskomplikowanej geometrii.

Wytwarzanie elementów kompozytowych o zakrzywionej płaszczyźnie, takich jak półokrągłe płyty kompozytowe, metodą PRM sprawia wiele trudności na prasach o niewielkiej sile nacisku, jak prasa ręczna wykorzystana w tym projekcie. Wprowadzenie prasowania wstępnego TSF w celu wytworzenia ASSET SHEETS jest bardziej czasochłonne, ale efekty są nieporównywalnie lepsze w porównaniu. Otrzymuje się włókna bardzo dobrze przeinfiltrowane, poszczególne warstwy tkaniny są silnie ze sobą związane, nie dochodzi do przesuwania włókien węglowych, a otrzymana powierzchnia jest gładka, pozbawiona nierówności i nie odpryskuje. Te wszystkie cechy i aspekty procesu wytwarzania przekładają się na późniejszą trwałość, estetykę i wytrzymałość wytwarzanych elementów.

Literatura

- [1] Hufenbach W., Gude M., Czulak A., Pilawka R., Gajda T., Przybyszewski B., Hilse H.: *Application of novel A.S.SET epoxy resin in batch manufacturing process of CFRP*. Maj 2014. <http://www.as-set.eu/>
- [2] Lee H., Neville K.: *Epoxy resins: Their applications and technology*. Literary Licesing, LLC, 2012.
- [3] New Era Materials – Composite Technology, materiały marketingowe producenta A.S.SET.
- [4] New Era Materials – karta produktu ASSET POWDER 01
- [5] Pascault J.P., Williams R. J. J.: *Epoxy polymers: New materials and innovations*, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co., 2010.
- [6] Pilawka R., Mąka H.: Zgłoszenie patentowe P403260, 2013.
- [7] Pilawka R., Mąka H., Czulak A.: *Badanie procesu sieciowania jednoskładnikowych żywic epoksydowych ASSET*. Przetwórstwo Tworzyw, 6, 2014, s. 517–521.

8. Badania wybranych właściwości mechanicznych kompozytowych odlewów polimerowych

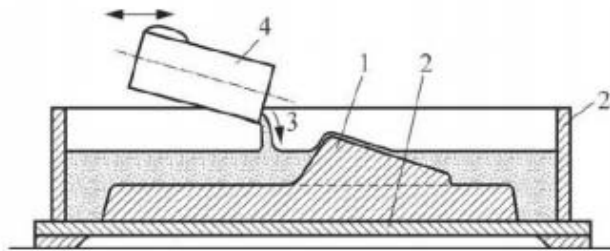
Wprowadzenie

Odlewanie jest procesem przetwórczym, w wyniku którego następuje przeprowadzenie tworzywa ze stanu ciekłego lub plastycznego w stan stały przy użyciu narzędzia zwanego formą odlewniczą. W gnieździe formującym formy odlewniczej tworzywo zestala się lub utwardza na skutek zjawisk fizyczno-chemicznych, bez stosowania ciśnienia lub pod niewielkim ciśnieniem (zwykle nie przekraczającym 0,3MPa), w efekcie czego powstaje przedmiot nazywany odlewem. Kształt otrzymanego odlewu odzwierciedla kształt gniazda formującego narzędzia. Forma odlewnicza może mieć gniazdo formujące otwarte lub zamknięte. Proces odlewania może być przeprowadzany w temperaturze otoczenia lub temperaturze podwyższonej i może zachodzić w sposób ciągły lub cykliczny [3, 7].

Odlewanie normalne

Wśród różnych metod odlewania, których klasyfikację można znaleźć z literaturze [3, 7], odlewanie normalne jest odmianą historycznie najstarszą i mającą stosunkowo niewielki udział wśród innych metod przetwórstwa tworzyw polimerowych. Odlewanie normalne stosuje się najczęściej w przypadku tworzyw chemoutwardzalnych znajdujących się w temperaturze otoczenia w stanie ciekłym lub plastycznym. Mieszaninę odlewniczą przygotowuje się bezpośrednio przed wykonaniem procesem odlewania. Przygotowanie tworzywa do odlewania polega na zmieszaniu, zwykle przeprowadzanym w sposób mechaniczny, w odpowiednich proporcjach: żywicy, utwardzacza, rozcieńczalnika, napelnacza, środka barwiącego, przyspieszacza i innych środków pomocniczych, zależnie od rodzaju tworzywa, oczekiwanych właściwości przetwórczych oraz właściwości i struktury odlewu po utwardzeniu. W czasie mieszania składników często dochodzi do przedostania się do mieszaniny odlewniczej powietrza, które należy usunąć np. w komorze próżniowej [2, 7]. Po przygotowaniu tworzywa do odlewania w przypadku odlewania normalnego następuje wprowadzenie tworzywa do narzędzia w postaci formy odlewniczej w sposób swobodny, pod działaniem siły grawitacji lub pod nieznacznym ciśnieniem. W formie odlewniczej tworzywo ulega zestaleniu, po czym zostaje usunięte z formy i niekiedy jest poddawane dodatkowej obróbce wykańczającej, na przykład usunięciu nadlewów przy pomocy obróbki skrawaniem. Schemat odlewania normalnego został pokazany na

rys. 1, a przykład odlewu i dwuczęściowej formy elastycznej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Schemat procesu odlewania normalnego grawitacyjnego:
1 – model odlewniczy, 2 – płyta i rama, 3 – wlewane tworzywo,
4 – naczynie z tworzywem przygotowanym do odlewania [3]

Właściwości odlewu zależą głównie od przebiegu procesu wypełniania gniazda i sposobu utwardzania [3, 7]. Wpływa się na nie poprzez:

- kinematykę wypełniania gniazda formującego: jeżeli gniazdo wypełniane jest bezpośrednio tworzywem, zachodzi wówczas odlewanie bezciśnieniowe i formy są zazwyczaj otwarte. W sytuacji, kiedy tworzywo jest wlewane przez kanał odlewniczy, czyli pośrednio, zachodzi odlewanie ciśnieniowe i formy są zamknięte. Odlewanie ciśnieniowe zapewnia lepsze właściwości wyrobu i w dużym stopniu ogranicza emisję do atmosfery ubocznych produktów procesu utwardzania, np. w przypadku odlewania tworzyw poliestrowych [3, 7].
- temperaturę formy: forma może mieć temperaturę normalną lub zbliżoną do normalnej, ewentualnie podwyższoną, wyższą o $120\div 180^{\circ}\text{C}$ od temperatury tworzywa wlewanego.
- sposób ochładzania odlewu: ochładzanie odlewu wpływa na jego właściwości i strukturę. Przeważnie odlew ochładzany jest razem z formą lub wyjmowany z gniazda, a następnie umieszczany w specjalnej komorze albo chłodzony na wolnym powietrzu. W odlewach wykonanych w formach ochładzanych występują mniejsze naprężenia własne, w efekcie czego uzyskuje się mniejsze odkształcenia odlewów [3, 7].



Rys. 2. Przykład gotowego odlewu wykonanego za pomocą dwuczęściowej formy elastycznej [11]

Podczas procesu utwardzania tworzyw chemoutwardzalnych, w szczególności epoksydowych, mogą występować reakcje egzotermiczne o znacznym nasileniu. Intensywność wydzielania ciepła zależy od jakości i ilości stosowanego utwardzacza [3, 7]. Jeśli odlewanie jest przeprowadzane w formie nieogrzewanej, to po wypełnieniu gniazda proces utwardzania jest intensywniejszy we wnętrzu odlewu, gdzie panuje najwyższa temperatura i na skutek ochładzania w kierunku ścianki formy jego intensywność spada. Odlew utwardza się zawsze w warunkach określonej szybkości chłodzenia. W przypadku formy ogrzewanej proces utwardzania jest intensywniejszy w obrębie tworzywa przylegającego do gniazda, gdyż tam występuje temperatura najwyższa i coraz mniej intensywny w kierunku wnętrza odlewu, gdzie temperatura jest najniższa. Ochładzanie odlewu praktycznie rozpoczyna się w momencie wypełniania gniazda formującego i trwa do chwili wyjęcia go z gorącej formy bądź chłodzenia razem z formą. Budowa formy i związany z tym sposób chłodzenia wpływają na właściwości i strukturę odlewów - w odlewach z form ogrzewanych występują mniejsze naprężenia własne i związane z nimi odkształcenia odlewów. Konstrukcja form do odlewania normalnego jest bardzo różnorodna i zależy od wielkości i kształtu odlewu. Zwykle są to formy jednogniazdowe, najczęściej wykonywane ze stopów żelaza lub metali lekkich, a w przypadku wytwarzania niedużych serii bądź pojedynczych odlewów można wykonywać je także z tworzyw, drewna lub gipsu [3, 7].

Kompozyty polimerowe

Zgodnie z ogólną definicją, kompozyt jest to materiał utworzony z co najmniej dwóch innych składników (faz) o różnych właściwościach, połączonych ze sobą w taki sposób, że materiał wynikowy ma właściwości lepsze w porównaniu z właściwościami użytych składników, a niekiedy nabiera jeszcze dodatkowych, nowych właściwości, których nie mają substancje składowe. Kompozyt jest materiałem zewnętrznym monolitycznym, jednakże z widocznymi granicami między komponentami [5], co oznacza, że tworzą go fazy rozdzielne, od których właściwości oraz ich stosunków ilościowych zależą właściwości i zakres użytkowania kompozytu. Faza nadająca kształt i wygląd wyrobu oraz jego zewnętrznie monolityczny charakter jest nazywana fazą ciągłą, określaną również jako matryca lub osnowa. Druga faza jest fazą rozproszoną, nazywaną również wzmocnieniem, wnoszącą określone cechy, determinujące finalne właściwości kompozytu. Faza ciągła ma za zadanie łączenie cząstek fazy rozproszonej. Jedną z podstawowych zalet wynikających z fazowej budowy materiałów kompozytowych jest fakt, że przez dobór składników, ich stosunków ilościowych oraz struktury można w szerokim zakresie planować właściwości wytwarzanego kompozytu, na przykład pod kątem anizotropii właściwości mechanicznych, wynikających z kierunkowości ułożenia włókien wzmocnienia [1, 4, 12].

Pośród kompozytów polimerowych można wyróżnić, z punktu widzenia właściwości i obszaru zastosowań, dwa typy: kompozyty funkcjonalne oraz kompozyty konstrukcyjne. Kompozyty funkcjonalne cechują bardzo specyficzne właściwości, np. elektryczne, magnetyczne, optyczne, ślizgowe, przeciwożniowe, barierowe, antybakteryjne itp. Te specjalne właściwości powodują, że materiały te mają bardzo określone, wąskie zastosowania, często wręcz niszowe. Kompozyty konstrukcyjne są materiałami o bardzo szerokim zastosowaniu i wyróżniających je wysokich właściwościach wytrzymałościowych. Służą one do wytwarzania bardzo różnych elementów konstrukcyjnych poczynając od części i obudów maszyn, przedmiotów codziennego użytku, elementów i konstrukcji budowlanych, karoserii samochodowych i wagonów kolejowych, samolotów, szybowców, wirników śmigłowców i elektrowni wiatrowych, wież latarni morskich, morskich, łodzi, motorówek, jachtów, kutrów, okrętów wojennych, sprzętu sportowego i wojskowego, konstrukcji mostowych, rur, obudów kanałów, zbiorników i cystern, aparatury chemicznej, a kończąc na rakietach i urządzeniach kosmicznych. Wymiary wyrobów kompozytowych wahają się w szerokich granicach, od kilku milimetrów i masie kilku gramów (elementy elektroniczne hermetyzowane żywicami), do bardzo dużych, liczonych w metrach i masie wielu ton (skrzydła elektrowni wiatrowych i kadłuby łodzi i okrętów) [4]. Podział kompozytów na dwa typy – funkcjonalne i konstrukcyjne – nie jest wyrażenie zaznaczony, gdyż wiele wyrobów z kompozytów konstrukcyjnych może dysponować dodatkowo właściwościami specyficznymi dla kompozytów funk-

cjonalnych, takimi jak: antyelektrostatyczność, przewodnictwo elektryczne, zmniejszony współczynnik tarcia, obniżona palność, barierowość [4, 5].

Materiały stosowane na osnowę i wzmocnienie w odlewach kompozytowych

W kompozytach fazę rozproszoną stanowią napelniacze ziarniste i włókna wzmacniające, które stosowane mogą być razem lub osobno. Z uwagi na temat niniejszego opracowania nie omawiano napelniaczy ziarnistych ani szczegółowej klasyfikacji włókien wzmacniających, skupiając się na ogólnym przedstawieniu napelniaczy włóknistych wykonanych z włókna szklanego, związanych z omówionymi dalej badaniami doświadczalnymi. Podstawowy podział materiałów kompozytowych, wynikający z występującej w nich fazy rozproszonej, został pokazany na rys. 3.



Rys. 3. Podział kompozytów z uwzględnieniem typu fazy rozproszonej [6]

Materiały kompozytowe wzmacniane włóknami najczęściej są stosowane w celu zapewnienia zwiększonej wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej, w tym wytrzymałości właściwej oraz sztywności, co uzyskuje się przez wprowadzenie włókien wytrzymałych, sztywnych, lecz zwykle kruchych, do stosunkowo miękkiej, ciągliwej matrycy. Matryca przekazuje przyłożone obciążenie do włókien, które w większości je przenoszą, to ona umożliwia nadanie wyrobom odpowiedniego kształtu oraz determinuje większość fizycznych oraz chemicznych właściwości materiału [1, 4, 12]. Matrycę mogą stanowić polimery termoutwardzalne (żywice epoksydowe i poliestrowe) oraz polimery termoplastyczne (poliamidy). W tabeli 1 przedstawiono ogólną charakterystykę najczęściej stosowanych tworzyw polimerowych stanowiących osnowę w kompozytach polimerowych.

Tabela 1. Tworzywa polimerowe wykorzystywane na osnowę (matrycę) [4]

Grupy materiałów polimerowych matrycy kompozytowej	Charakterystyka
Żywice poliestrowe	Stosowane najpowszechniej, trudno palne, samogasnące, dogodne w zastosowaniach mechanicznych, elektrycznych i ogólnych, specjalne gatunki odporne chemicznie.
Żywice epoksydowe	Najbardziej odpowiednie do zastosowań w ośrodkach aktywnych chemicznie oraz przy wymaganiu dużej odporności na zużycie.
Żywice fenolowe	Niski koszt, najodpowiedniejsza technika formowania to prasowanie przetłoczone, odpowiednie do formowania ręcznego i prasowania, a także nawijania włókien i prasowania ciągłego, trudno palne przy małej emisji dymu, szczególnie atrakcyjne do zastosowania w środkach transportu publicznego.
Silikony	Stosowane z matami głównie szklanymi, mała higroskopijność, podwyższona odporność na łuk elektryczny.
Furany	Wysoka odporność na procesy biologiczne.
Melamina	Elektroprzewodzenie, wysoka wytrzymałość, odporność ogniowa i na odczynniki alkaliczne.
Poliimidy	Wysoka wytrzymałość w podwyższonej temperaturze.

Włókna wzmacniające wywierają decydujący wpływ na właściwości konstrukcyjne kompozytów polimerowych. Właściwe dobranie ich rodzaju, typu i postaci stanowić może o sukcesie wytwarzanej konstrukcji kompozytowej. Jako wzmocnienie w kompozytach polimerowych stosowane są najczęściej włókna: szklane, karbonizowane (węglowe i grafitowe), z poliamidów aromatycznych (aramidowe), polietylenowe i z innych polimerów syntetycznych, bazaltowe, kwarcowe, włókna roślinne różnego pochodzenia oraz włókna specjalne. Przez zmianę udziału, rozmiaru, kształtu, rozkładu i orientacji elementów wzmacniających można w bardzo szerokim zakresie kształtować właściwości materiałów kompozytowych, między innymi uwzględniając fakt, że moduł sprężystości wzdłużnej włókien stosowanych jako wzmocnienie może być ponad trzydziestokrotnie większy niż polimerów użytych jako osnowa [12].

Włókna szklane są podstawowym, powszechnie stosowanym i bardzo dobrym wzmocnieniem szerokiej gamy kompozytów polimerowych. Ten stan spowodowany jest faktem, że technologia wytwarzania włókien szklanych jest znana od lat i dobrze rozwinięta, zapewniając produkcję bardzo zróżnicowanych

włókien o odmiennej charakterystyce i wysokich właściwościach, a jednocześnie stosunkowo tanich. Również metody przetwarzania tych włókien w liczne półprodukty o różnej postaci, takich jak wełna, przędza, wiązki oraz wyroby tkane i dziane na ogół nie nastęrczają trudności, co pozwala na realizację wielu technologii wytwarzania polimerowych wyrobów kompozytowych o bardzo zróżnicowanym przeznaczeniu, w których wzmocnieniem są włókna szklane [4]. Jednym z mających największe znaczenie typów półproduktów z włókien szklanych stosowanych do wzmacniania polimerów są pasma lub wiązki, nazywane powszechnie rowingiem, które stanowią zespół wielu włókien elementarnych bez skrętu i są dostarczane w postaci odwijanych z wewnątrz lub z zewnątrz dużych nawojów o ciężarze do kilkunastu kilogramów [4].

Jak u każdego z materiałów konstrukcyjnych, także w kompozytach wzmocnionych włóknami można wyróżnić zalety i wady. Podstawowe zalety to [9]: mała gęstość, możliwość kształtowania w temperaturze pokojowej, wysoka odporność antykorozyjna i chemiczna, izolacyjne własności cieplne i elektryczne, przenikalność dla fal elektromagnetycznych, możliwość klejenia, otrzymywanie elementów o wysokiej gładkości powierzchni i estetycznym wyglądzie zewnętrznym oraz możliwość stosowania w produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Wśród wad kompozytów zbrojonych włóknami można wskazać stosunkowo niską odporność cieplną (do ok. 220°C), brak powtórnego zastosowania ze względu na kruchość włókien, długi czas formowania wyrobów, łatwość uszkodzenia powierzchni oraz jednostkowy koszt materiału wyższy niż przy zastosowaniu czystych polimerów konstrukcyjnych [9].

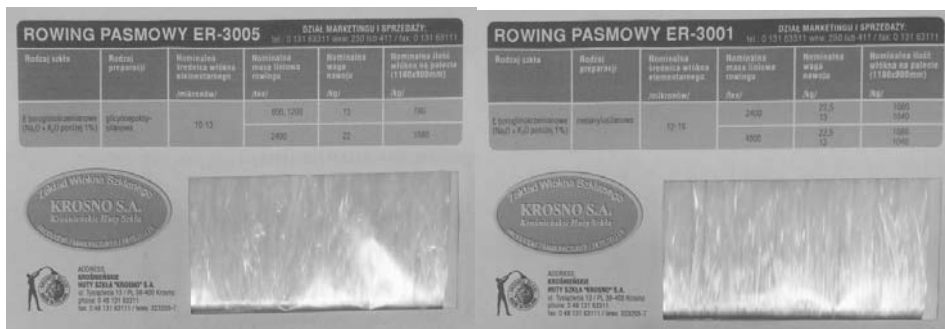
Przedmiot badań

Przedmiotem badań były odlewy wykonane z dwuskładnikowej żywicy poliuretanowej oraz dwuskładnikowej żywicy epoksydowej. Jako napełniacz zastosowano włókno szklane w postaci rowingu ciętego oraz rowingu pasmowego. Próbkę została wykonana metodą odlewania normalnego w otwartym gnieździe formującym. Odlewy zostały wykonane z dwóch rodzajów żywic:

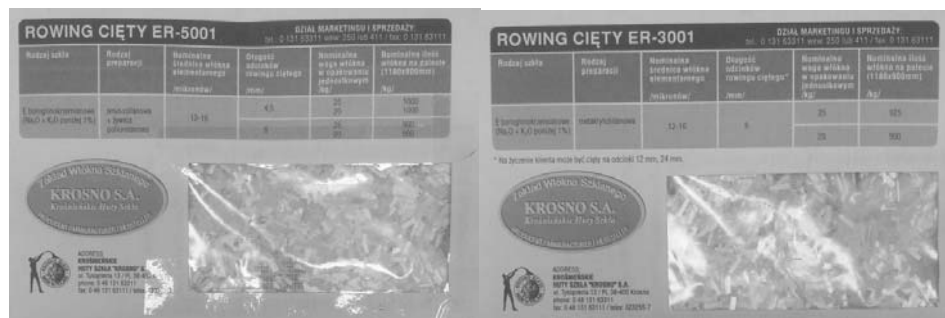
- żywicy dwuskładnikowej poliuretanowej F19 AXSON Technologies [8],
- żywicy dwuskładnikowej epoksydowej LP 470 Primson Composites [10].

Do badań doświadczalnych użyto włókien szklanych produkcji Krośnieńskich Hut Szkła „Krosno S.A.” w Krośnie. Rowing pasmowy to pasma ciągle wielu włókien elementarnych bez skrętu. Wykorzystano dwa rodzaje włókien szklanych w postaci rowingu pasmowego: typ ER-3005 oraz typ ER-3001 (rys. 4).

Rowing cięty stanowią pasma włókien szklanych ciętych na odcinki o długości w zakresie od kilku do kilkunastu milimetrów. Do badań użyto dwa rodzaje włókien szklanych w formie rowingu ciętego: typ ER-3001 cięty na odcinki o długości 6 mm oraz typ ER-5001 cięty na odcinki o długości 4,5mm (rys. 5).



Rys. 4. Opakowania rowingu pasmowego: po lewej – typ ER-3005, po prawej – typ ER-3001



Rys. 5. Opakowania rowingu ciętego: po lewej – typ ER-5001, po prawej – typ ER-3001

Charakterystykę włókien szklanych w poszczególnych typach rowingu zamieszczono w tabeli 2.

Żywicę poliuretanową F19 firmy AXSON Technologies wykorzystuje się do wykonywania modeli odlewniczych (krótkie serie), modeli negatywowych, modeli wzorcowych i makiet z użyciem żywicy czystej lub napełnionej napełniaczem. Żywica poliuretanowa F19 cechuje się bardzo małym skurczem przetwórczym, niską lepkością, prostą proporcją mieszania jej składników (1:1) oraz możliwością dodania do niej dużej ilości napełniacza. Dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy z dwuskładnikową żywicą poliuretanową należy zapewnić dobrą wentylację. Mieszanie obu jej składników należy wykonywać w temperaturze pokojowej powyżej 18°C z zachowaniem proporcji znajdujących się w kartach technologicznych [8].

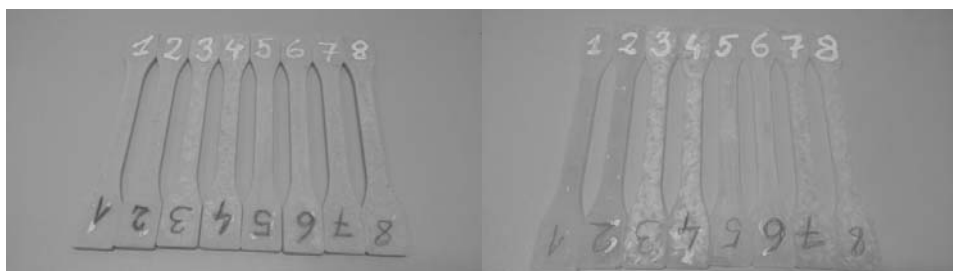
Żywica epoksydowa LP 470 jest to żywica o niskiej lepkości oparta na bisfenolu A i epichlorohydrynie, jej lepkość wynosi 700mPa·s/25°C. Żywica ta nie zawiera rozpuszczalników organicznych, jest bezbarwna, bezwonna i nie wydziela toksycznych oparów. Zawiera modyfikatory zwiększające adhezję do metali i tworzyw sztucznych. Utwardza się całkowicie w temperaturze pokojowej i tworzy sprężyste, elastyczne laminaty uzyskując odporność cieplną do temperatury 55–60°C. Istnieje możliwość uzyskania wyższej odporności ciepl-

nej do 120°C, w tym celu żywicę podczas zestalania należy wygrzać. Utwardzacz HP 343, przeznaczony dla żywicy LP 470, to cykloalifatyczny, niskolotny utwardzacz o małej lepkości z dodatkami dotwardzającymi. Umożliwia wykonywanie elementów w temperaturze pokojowej bez następującego dotwardzania na ciepło. Umożliwia pracę przy dużej wilgotności powietrza i niskiej temperaturze bez groźby wystąpienia nalotu na tworzywie. Doskonale sprawdza się przy laminowaniu ręcznym niewielkich elementów lub przy naprawach miejscowych, kiedy wymagany jest szybki czas utwardzania produktu. Czas życia przygotowanej żywicy w temperaturze 23°C wynosi 25÷35 minut [11].

Tabela 2. Charakterystyka włókien szklanych

Rodzaj włókna	Typ	Rodzaj szkła	Rodzaj preparacji	Nominalna średnica włókna elementarnego (μm)	Długość odcinków rowingu ciętego (mm)
Rowing pasmowy	ER-3005	E boroglinokrzemianowe (Na ₂ O + K ₂ O poniżej 1%)	glicydoepoksylanowa	10÷13	—
Rowing pasmowy	ER-3001	E boroglinokrzemianowe (Na ₂ O + K ₂ O poniżej 1%)	metakrylosilanowa	12÷16	—
Rowing cięty	ER-3001	E boroglinokrzemianowe (Na ₂ O + K ₂ O poniżej 1%)	metakrylosilanowa	12÷16	6
Rowing cięty	ER-5001	E boroglinokrzemianowe (Na ₂ O + K ₂ O poniżej 1%)	aminosilanowa + żywica poliuretanowa	13÷16	4,5

Do przygotowania odlewów wykorzystano elastyczne formy odlewnicze z otwartymi gniazdami formującymi. Gniazda formujące form odlewniczych miały kształt zgodny z kształtem próbek do badania wytrzymałości na rozciąganie, popularnie zwanych wiosełkami, opisanymi w normie PN-EN ISO 527-2. Zastosowanie próbek w kształcie wiosełek zapobiega przede wszystkim wyślizgiwaniu się ich ze szczęk maszyny wytrzymałościowej oraz zrywaniu próbek w obrębie szczęki lub przy szczęcie, poza odcinkiem pomiarowym. Przykłady próbek z poszczególnych rodzajów żywic pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Otrzymane próbki do badań: po lewej – z żywicy poliuretanowej F19, po prawej – z żywicy epoksydowej LP 470

Tabela 3 przedstawia średnią wartość udziału masowy napelniacza w postaci włókien szklanych dla próbek wykonanych z żywicy poliuretanowej F19.

Tabela 3. Wartości średniego udziału masowego napelniacza w próbkach z żywicy poliuretanowej F19

Rodzaj próbki	Średnia masa napelniacza [g]	Średnia masa próbki [g]	Średni udział masowy [%]
F19 / bez napelniacza	0	8,5485	0,00%
F19 / RP ER-3005	1,680	10,639	15,79%
F19 / RP ER-3001	1,684	10,772	15,63%
F19 / RC ER-3001	1,681	10,025	16,77%
F19 / RC ER-5001	1,684	9,8125	17,16%
RP – rowing pasmowy, RC – rowing cięty			

W tabeli 4 podano wartości średniego udziału masowego napelniacza w postaci włókien szklanych w próbkach wykonanych z żywicy epoksydowej LP 470.

Otrzymane próbki zostały poddane klimatyzacji w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ oraz wilgotności względnej $65 \pm 5\%$, w czasie dłuższym niż 16 godzin [3].

Tabela 4. Wartości średniego udziału masowego napelniacza w próbkach z żywicy poliuretanowej LP 470

Rodzaj próbki	Średnia masa napelniacza [g]	Średnia masa próbki [g]	Średni udział masowy [%]
LP 470 / bez napelniacza	0	8,743	0,00%
LP 470 / RP ER-3005	1,647	10,428	15,79%
LP 470 / RP ER-3001	1,684	10,645	15,82%
LP 470 / RC ER-3001	1,655	11,659	14,20%
LP 470 / RC ER-5001	1,686	10,86	15,52%
RP – rowing pasmowy, RC – rowing cięty			

Program badań i metodyka pomiarów

Przeprowadzono pomiary twardości metodą wciskania kulki za pomocą twardościomierza Brinella, wytrzymałości na zginanie za pomocą aparatu Dynstat oraz wytrzymałości na rozciąganie na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z010.

Czynnikami zmiennymi były: rodzaj żywicy dwuskładnikowej oraz rodzaj włókna szklanego zastosowanego na wzmocnienie.

Za czynniki stałe przyjęto warunki wykonywania pomiarów, zgodne z wymaganiem podanymi w odpowiednich normach przedmiotowych (PN, EN, ISO), charakterystykę geometryczną gniazd formujących w formie odlewniczej oraz wielkości chemiczne i fizyczne charakteryzujące właściwości składników poszczególnych żywic przed przygotowaniem mieszaniny odlewniczej.

Czynnikami zakłócające to nieznaczne zmiany wilgotności i temperatury w pomieszczeniu laboratoryjnym oraz nierównomierność napięcia zasilającego aparaturę pomiarową, przy czym przyjęto, że ich wpływ na otrzymane wyniki pomiarów można pominąć.

Wyniki badań

Dla poszczególnych rodzajów odlewów kompozytowych otrzymano wyniki twardości, wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na rozciąganie, modułu sprężystości wzdłużnej oraz wydłużenia względnego. Wyniki zostały zebrane w tabelach od 5 do 10 oraz przedstawione w postaci graficznej na rysunkach od 7 do 11.

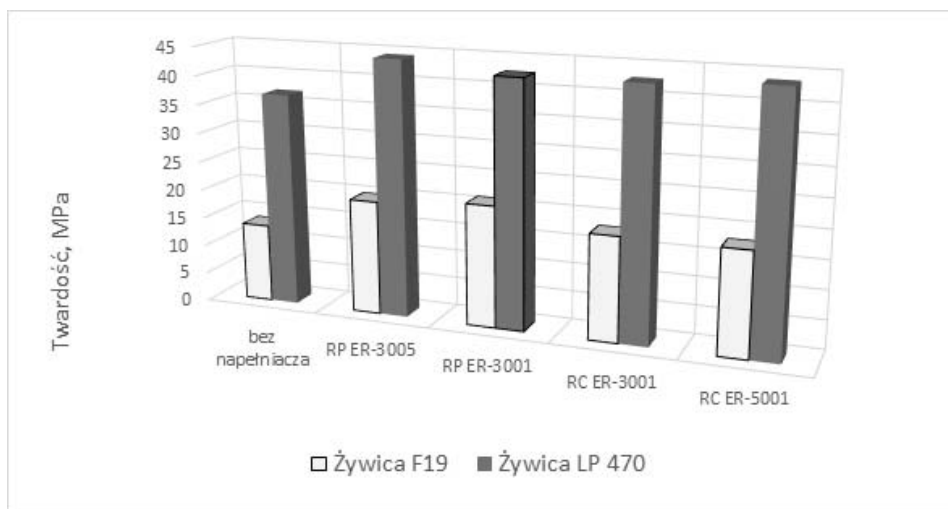
Tabela 5. Wyniki pomiarów twardości odlewów kompozytowych z żywicy poliuretanowej F19

Rodzaj próbki	Średnia twardość HB [MPa]	Odchylenie standardowe
F19 / bez napelniacza	13,55	0,71
F19 / RP ER-3005	19,77	3,11
F19 / RP ER-3001	21,02	2,65
F19 / RC ER-3001	18,03	2,12
F19 / RC ER-5001	17,95	2,67
RP – rowing pasmowy, RC – rowing cięty		

Tabela 6. Wyniki pomiarów twardości odlewów kompozytowych z żywicy epoksydowej LP 470

Rodzaj próbki	Średnia twardość HB [MPa]	Odchylenie standardowe
LP 470 / bez napelniacza	36,93	1,19
LP 470 / RP ER-3005	44,22	3,48
LP 470 / RP ER-3001	42,45	2,01
LP 470 / RC ER-3001	42,73	5,6
LP 470 / RC ER-5001	43,63	3,25
RP – rowing pasmowy, RC – rowing cięty		

Porównanie średniej twardości odlewów kompozytowych wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego pokazano na rys. 7. Przeprowadzone badania twardości odlewów wykazały, że żywica poliuretanowa różni się znacznie twardością od żywicy epoksydowej, a za pomocą dodawania do żywicy wzmocnienia z włókna szklanego w formie rowingu można korzystnie wpływać na zmianę twardości odlewów żywicznych.



Rys. 7. Porównanie średniej wartości wyników pomiarów twardości próbek wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego

Analizując wyniki pomiarów twardości można zauważyć, że zarówno w przypadku żywicy poliuretanowej F19 jak o żywicy epoksydowej LP 470 dodatek wzmocnienia, jakim było włókno szklane w postaci rowingu pasmowego i rowingu ciętego spowodowało wyraźną zmianę twardości otrzymanych odlewów kompozytowych w porównaniu z twardością odlewów wykonanych z czystej żywicy, natomiast zmiana twardości była większa w przypadku odlewów z napełnionej żywicy epoksydowej. Zmiana twardości odlewów z żywicy poliuretanowej F19 z napełniaczem w porównaniu z twardości czystej żywicy wynosiła od 33% w przypadku rowingu ciętego do 51% w przypadku rowingu pasmowego. W przypadku żywicy epoksydowej LP 470 wpływ napełniacza na zwiększenie się twardości był mniejszy i wynosił średnio około 18%, a rodzaj rowingu nie miał w tym przypadku znaczenia, co można tłumaczyć tym, że wynika to z dużej twardości samej żywicy epoksydowej, przez co zmiana rodzaju włókien nie wpływa znacząco na zmianę twardości.

Tabela 7. Wyniki pomiarów z próby rozciągania statycznego odlewów kompozytowych z żywicy poliuretanowej F19

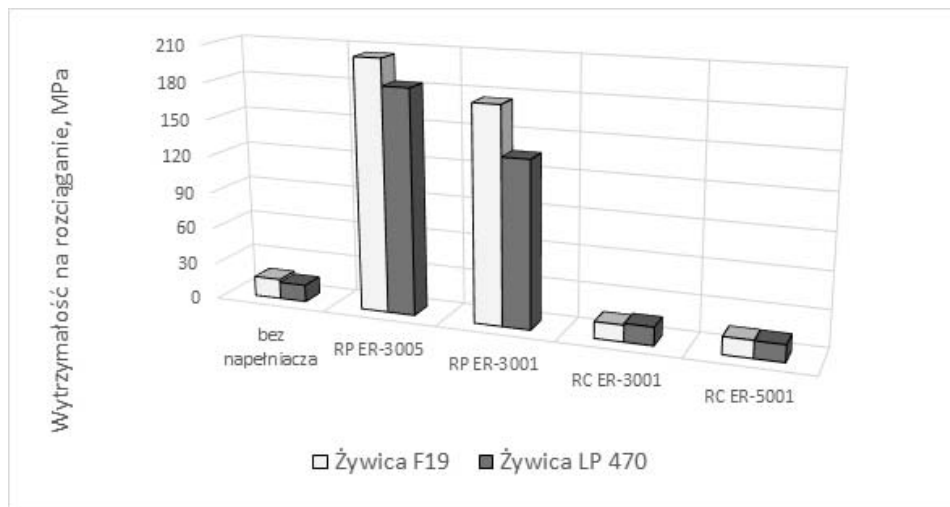
Rodzaj próbki	Średnie naprężenia rozciągające σ_m [MPa]	Średnie wydłużenie względne ε_m [%]	Średni moduł sprężystości wzdłużnej E [MPa]
F19 / bez napelniacza	16,25	1,9	955
F19 / RP ER-3005	204,5	5,4	2495
F19 / RP ER-3001	175	5	2080
F19 / RC ER-3001	13,45	0,99	1530
F19 / RC ER-5001	14,15	1,075	1650
RP – rowing pasmowy, RC – rowing cięty			

Tabela 8. Wyniki pomiarów z próby rozciągania statycznego odlewów kompozytowych z żywicy epoksydowej LP 470

Rodzaj próbki	Średnie naprężenia rozciągające σ_m [MPa]	Średnie wydłużenie względne ε_m [%]	Średni moduł sprężystości wzdłużnej E [MPa]
LP 470 / bez napelniacza	13,8	0,73	1950
LP 470 / RP ER-3005	183	3,85	3490
LP 470 / RP ER-3001	135	3,85	2375
LP 470 / RC ER-3001	14,8	0,615	2170
LP 470 / RC ER-5001	13,8	0,825	2155
RP – rowing pasmowy, RC – rowing cięty			

Zarówno w przypadku odlewów kompozytowych wykonanych z żywicy poliuretanowej jak i epoksydowej oraz odlewów wykonanych z żywicy bez napelniacza w próbie zrywania otrzymano przełom kruchy, bez wyraźnej granicy plastyczności.

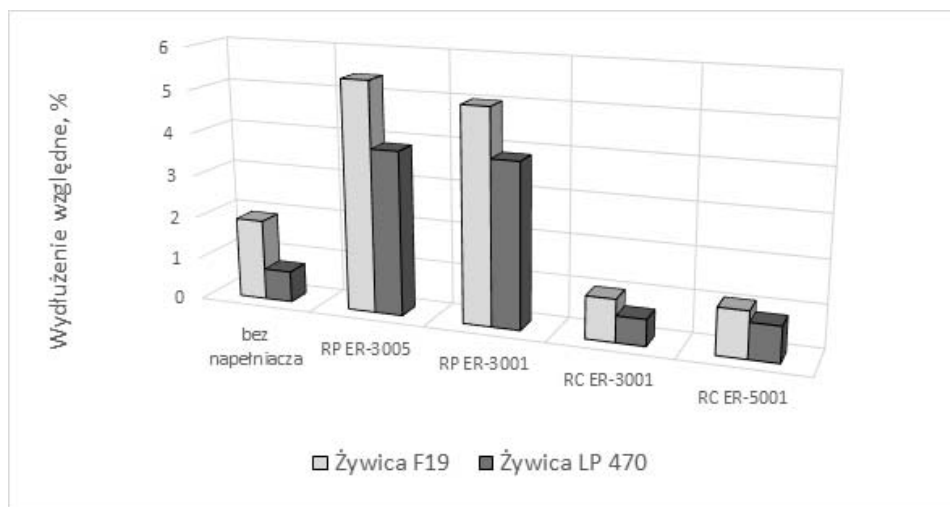
Porównanie średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie odlewów kompozytowych wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Porównanie średniej wartości wyników pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego

Różnica w wytrzymałości na rozciąganie obu rodzajów badanych żywic w postaci czystej jest nieznaczna i przekracza nieco 10%. Dodatek napelnacza w formie rowingu ciętego właściwie nie zmienił wytrzymałości na rozciąganie otrzymanych odlewów kompozytowych, co można tłumaczyć niezbyt dobrym zwilżaniem włókien szklanych przez zastosowane rodzaje żywicy. Ułożone w sposób nieuporządkowany krótkie włókna szklane nie spowodowały zmiany w wytrzymałości na rozciąganie wykonanych odlewów. Odmienne efekty otrzymano w przypadku napelnienia mieszaniny odlewniczej rowingiem pasmowym, ułożonym w kierunku wzdłużnym, gdzie uzyskano bardzo wyraźne zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie. Lepszy efekt wzmocnienia dało zastosowanie rowingu pasmowego ER-3005, który dla żywicy poliuretanowej oraz epoksydowej spowodował przeciętnie dwunastokrotny wzrost wytrzymałości na rozciąganie, natomiast rowing pasmowy ER-3001 skutkował zwiększeniem się badanej wielkości około osiem razy. Otrzymane wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie były zgodne z założeniami początkowymi, bowiem wytrzymałość włókien szklanych jest dużo wyższa, gdy obciążenie działa w osi tych włókien. Wynika z tego, że ułożenie włókien długich równoległe do działających sił zdecydowanie poprawia właściwości odlewów kompozytowych w zakresie wytrzymałości na rozciąganie w porównaniu z przypadkiem, gdzie jako wzmocnienie

nia użyto włókien krótkich ułożonych nieregularnie, skutkiem czego siły wynikające z działającego obciążenia oddziałują na osie włókien pod różnym kątem.



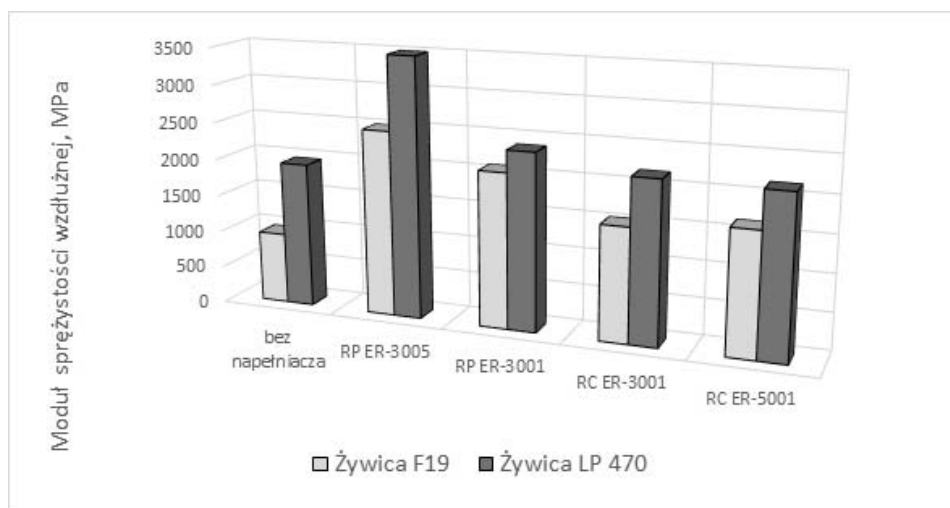
Rys. 9. Porównanie średniej wartości wyników pomiarów wydłużenia względnego próbek wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego

Porównanie średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie odlewów kompozytowych wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego pokazano na rys. 9.

Różnica w wartości wydłużenia względnego obu rodzajów badanych żywic w postaci czystej jest wyraźna, bowiem osiągnięte wydłużenie żywicy poliuretanowej F19 było ponad dwukrotnie większe od wydłużenia próbek wykonanych z żywicy epoksydowej LP 470. Wynika to między innymi ze znacznie większej twardości próbek z żywicy epoksydowej, mniej podatnej na rozciąganie. Dodatek napelnacza w formie rowingu ciętego właściwie nie zmienił wydłużenia względnego odlewów otrzymanych z żywicy epoksydowej, natomiast pogorszył o kilkadziesiąt procent wydłużenie próbek wykonanych z żywicy poliuretanowej F19. Można to tłumaczyć wzmacniającym działaniem losowo ułożonych włókien krótkich, które spowodowały zwiększenie sztywności i kruchości próbki (wykazane w dalszej części pracy przy analizie wytrzymałości na rozciąganie), jednakże efekt ten jest nieznaczny. Ponadto wcześniej, przy analizie wyników wytrzymałości na rozciąganie zauważono, że dodatek losowo ułożonych krótkich włókien szklanych rowingu ciętego w przypadku żywicy F19 nie spowodował wzrostu wytrzymałości na rozciąganie. W przypadku wzmocnienia w formie rowingu pasmowego zarówno w przypadku żywicy poliuretanowej jak i epoksydowej uzyskano wzrost wydłużenia względnego, które nie różniło się

w zależności od rodzaju zastosowanego rowingu pasmowego, dla żywicy poliuretanowej F19 rosnąc ponad dwukrotnie, natomiast w przypadku żywicy epoksydowej LP470 wzrost wartości wydłużenia względnego był ponad pięciokrotny.

Porównanie średniej wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej (modułu Younga) odlewów kompozytowych wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Porównanie średniej wartości wyników pomiarów modułu sprężystości wzdłużnej próbek wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego

Moduł Younga, określający sprężystość materiału, podobnie jak w przypadku badań wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia względnego, jest zależny od ułożenia włókien i kierunku działającej na niej siły. Różnica w wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej obu rodzajów badanych żywic w postaci czystej jest wyraźna, wyższą wartość tego współczynnika, ponad dwukrotną w porównaniu z żywica poliuretanową F19, ma żywica epoksydowa LP 470. Zastosowanie wzmocnienia w postaci włókna szklanego spowodowało wzmocnienie odlewów kompozytowych, zarówno w przypadku rowingu ciętego jak i rowingu pasmowego. W przypadku rowingu ciętego, niezależnie od jego odmiany, efekt wzrostu modułu Younga był korzystniejszy dla żywicy poliuretanowej F19, wynosząc średnio 66%, natomiast dla żywicy epoksydowej LP 470 zwiększenie wartości modułu Younga było nieznaczne i wyniosło tylko 11%. Zastosowanie rowingu pasmowego, zgodnie z oczekiwaniami i potwierdzając inne wyniki badań, dało wyraźny efekt zwiększenia się wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej, z tym, że wyraźnie dał się zauważyć wpływ odmiany rowingu. Rowing pasmowy ER-3005 miał lepszy efekt wzmacniający, bowiem moduł Yo-

unga u żywicy F19 zwiększył się o 160%, a u żywicy LP 470 o 79%. W przypadku rowingu pasmowego ER-3001 zwiększenie się wartości modułu Younga było mniejsze, wynosząc odpowiednio 118% dla żywicy poliuretanowej F19 oraz 22% dla żywicy epoksydowej LP 470. Otrzymane wyniki badań właściwości wytrzymałościowych wykazały wyraźny wpływ zastosowanego wzmocnienia w postaci różnych rodzajów włókna szklanego na ich poprawę.

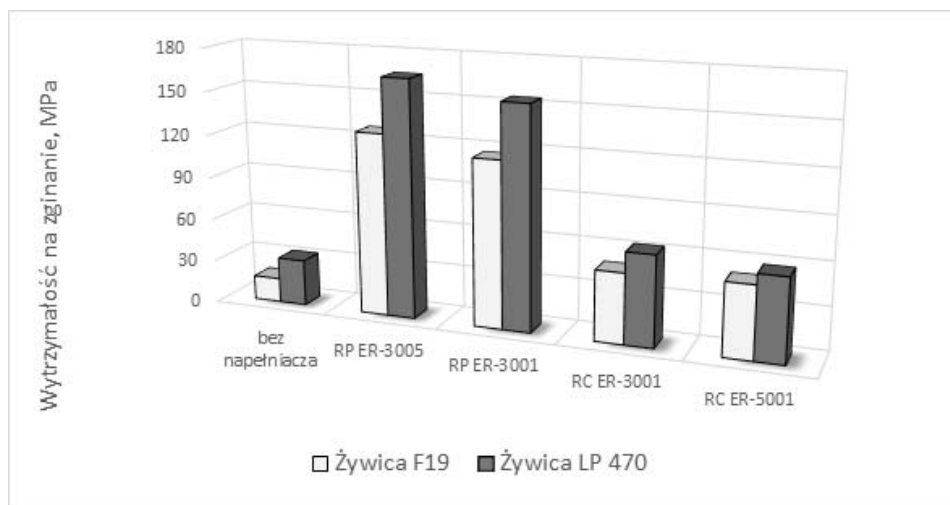
Tabela 9. Wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie odlewów kompozytowych z żywicy poliuretanowej F19

Rodzaj próbki	Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa]	Odchylenie standardowe
F19 / bez napelniacza	16,79	3,73
F19 / RP ER-3005	126,98	13,91
F19 / RP ER-3001	115,84	7,42
F19 / RC ER-3001	48,65	6,16
F19 / RC ER-5001	50,32	5,90
RP – rowing pasmowy, RC – rowing cięty		

Tabela 10. Wyniki pomiarów wytrzymałości na zginanie odlewów kompozytowych z żywicy epoksydowej LP 470

Rodzaj próbki	Średnia wytrzymałość na zginanie [MPa]	Odchylenie standardowe
LP 470 / bez napelniacza	32,06	1,57
LP 470 / RP ER-3005	165,22	2,96
LP 470 / RP ER-3001	154,16	16,86
LP 470 / RC ER-3001	62,88	11,77
LP 470 / RC ER-5001	57,70	14,95
RP – rowing pasmowy, RC – rowing cięty		

Porównanie średniej wytrzymałości na zginanie odlewów kompozytowych wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Porównanie średniej wartości wyników pomiarów wytrzymałości na zginanie próbek wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 i epoksydowej LP 470 zawierających różne rodzaje wzmocnienia z włókna szklanego

Różnica w wartości wytrzymałości na zginanie obu rodzajów badanych żywic w postaci czystej jest wyraźna, bowiem wyznaczona wytrzymałość na zginanie żywicy poliuretanowej F19 było ponad dwukrotnie mniejsza od wytrzymałości na zginanie próbek z żywicy epoksydowej LP 470.

Zastosowanie wzmocnienia w postaci włókna szklanego spowodowało znaczne wzmocnienie odlewów kompozytowych, zarówno przy użyciu rowingu ciętego jak i rowingu pasmowego. W przypadku rowingu ciętego, niezależnie od jego odmiany, efekt wzrostu wytrzymałości na rozciąganie był korzystniejszy dla żywicy poliuretanowej F19, rosnąc prawie trzykrotnie, natomiast dla żywicy epoksydowej LP 470 wzrost wytrzymałości na zginanie był niespełny dwukrotny. Zastosowanie rowingu pasmowego, podobnie jak w przypadku badań wytrzymałości na rozciąganie przyniosło oczekiwane efekty, bowiem wytrzymałość na zginanie uległa znacznemu zwiększeniu, różniąc się w zależności od odmiany rowingu pasmowego. Rowing pasmowy ER-3005 dał większy efekt wzmocnienia, bowiem wytrzymałość na zginanie żywicy F19 zwiększyła się blisko ośmiokrotnie, a żywicy LP 470 pięciokrotnie. W przypadku rowingu pasmowego ER-3001 wzrost wytrzymałości na rozciąganie był mniejszy, wynosząc odpowiednio około 7 razy dla żywicy poliuretanowej F19 oraz blisko pięciokrotnie dla żywicy epoksydowej LP 470. Porównując wartości wytrzymałości na zginanie poszczególnych grup pomiarowych próbki z czystej żywicy były

znacząco słabsze od tych, w których zastosowano napelniacze. Próbkki napelnio-
ne rowingiem cietym notowaly okolo dwukrotne zwiekszenie wartosci wytrzy-
malosci na zginanie, a probkki napelnione rowingiem pasmowym charakteryzo-
waly sie ponad dwukrotnie wieksza wytrzymaloscia niz analogiczne probkki wy-
konane z uziem rowingu cietygo.

Podsumowanie

Wlasciwosci materialow polimerowych mozna modyfikowac stosujac rozne-
go rodzaju napelniacze, glownie w postaci proszkowej lub wloknistej. Dodanie
napelniaczy do tworzyw skutkuje zmianą ich wlasciwosci fizycznych, takich jak
twardosc, udarnosc, wytrzymalosc na rozciaganie, wytrzymalosc na zginanie
i wielu innych. Zastosowanie napelniaczy powoduje ponadto obnizenie kosztow
produkcji, gdyz zwykle napelniaz jest tanszy od wiekszosci stosowanych mate-
rialow polimerowych. Niekiedy powoduje to nieznaczne pogorszenie wlasciwos-
ci fizycznych koncowego produktu, wykonanego z polimeru zawierajacego
napelniaz. W przypadku napelniaczy pelniacych role wzmacnienia ich stoso-
wanie ma na celu przede wszystkim wyrazne poprawienie wlasciwosci wytrzy-
malosciowych, a aspekt ekonomiczny jest odsunety na dalszy plan.

Odlewanie tworzyw polimerowych jest metoda przetworstwa, ktorej znacze-
nie jest zdecydowanie mniejsze niz wtryskiwania badz wytlaczenia, niemniej
jednak jest to nadal stosowana metoda przetworstwa, niezastapiona przy wytwa-
rzaniu przedmiotow z tworzyw polimerowych o duzych wymiarach lub w pro-
dukcji jednostkowej lub maloseryjnej, kiedy wykonywanie drogich narzedzi
(przykladem moze byc forma wtryskowa) jest ekonomicznie calkowicie nieuza-
sadnione. Roznnorodnosc wspolczesnie wystepujacych zywic, zarowno termo-
jak i chemoutwardzalnych powoduje, ze ich wlasciwosci zmieniaja sie w szer-
okim zakresie. Zakres ten ponadto mozna modyfikowac, dodajac do nich napel-
niacze, ktore moga nie zmieniać wlasciwosci przygotowanej na ich podstawie
mieszaniny odlewniczej, ale usprawniaja przebieg procesu, obnizaja koszt jed-
nostkowy wyrobu lub poszerzaja wlasciwosci uzytkowe finalnego wyrobu (na
przyklad srodki uniepalniajace). Napelniacze pelniace role wzmacnienia w zna-
czacym stopniu poprawiaja wlasciwosci wytrzymalosciowe, a spehlenie tych
wymogow moze powodowac skomplikowanie przebiegu procesu technologicz-
nego, wymagac zmodernizowania maszyny lub narzedzia badz wiaczac sie z ko-
niecznoscia stosowania materialow konstrukcyjnych o wysokiej cenie.

Wprowadzanie do zywic odlewniczych napelniacza, ktorym bylo wlokn-
o szklane w roznych odmianach spowodowalo znaczna poprawe wlasciwosci wy-
trzymalosciowych otrzymanych odlewow. Wykorzystana do badan zywica poli-
uretanowa F19 w czystej postaci miala nizsze wlasciwosci wytrzymalosciowe
niz porownywana z nia zywica epoksydowa LP470. Zastosowanie wlokn-
a szklanego jako wzmacnienia w ogolnym ujeciu zwiekszylo wytrzymalosc odle-
wow kompozytowych, w odmiennym stopniu dla wlokn-
a cietygo oraz wlokn-
a

w postaci pasm. Wprawdzie badane właściwości wytrzymałościowe odlewów kompozytowych wykonanych z żywicy poliuretanowej F19 wartościowo były niższe od odpowiadających im właściwości odlewów z żywicy epoksydowej LP 470, natomiast należy wskazać, że procentowa poprawa tych właściwości była wyraźniejsza w przypadku żywicy poliuretanowej – jej właściwości rosły w większym stopniu w porównaniu do właściwości czystej żywicy. Żywica epoksydowa, w stanie czystym będąca materiałem o lepszych właściwościach, po dodaniu wzmocnienia z włókna szklanego stawała się materiałem kompozytowym o porównawczo najwyższych parametrach wytrzymałościowych, aczkolwiek stopień wzrostu tych cech był mniej intensywny niż miało to miejsce w przypadku żywicy poliuretanowej.

Przeprowadzone badania doświadczalne wykonano dla próbek mających bardzo zbliżoną zawartość napelnacza, na średnim poziomie 15%. Przy zastosowaniu innych metod przetwórstwa, na przykład laminowania lub pultruzji, można zwiększyć udział procentowy wzmocnienia do kilkudziesięciu procent i w ten sposób uzyskać jeszcze wyraźniejsze polepszenie się właściwości wytrzymałościowych otrzymanych wytworów. W przypadku wykonywania odlewów kompozytowych można zwiększyć procent dodawanego włókna szklanego w postaci rowingu ciętego, w celu jeszcze większego poprawienia cech wytrzymałościowych bez wystąpienia problemów technologicznych, związanych na przykład z rozprowadzeniem włókna w masie odlewniczej. Zwiększenie udziału procentowego włókien długich nie będzie aż tak znaczące, bo należy brać pod uwagę zarówno problemy z ułożeniem pasm rowingu jak i utrudnienia w przesączaniu ich żywicą, które nie występują w przypadku swobodnie układających się w masie odlewu włókien krótkich.

Wykazanie, że stosunkowo niewielki, kilkunastoprocentowy dodatek włókna szklanego powoduje znaczącą poprawę właściwości wytrzymałościowych, w szczególności wytrzymałości na rozciąganie oraz wytrzymałości na zginanie, wskazuje, że uzasadnione jest prowadzenie dalszych badań dotyczących zwiększenia procentowej zawartości włókien szklanych w postaci rowingu cienkiego w mieszaninach odlewniczych wykonanych z żywicy poliuretanowej oraz żywicy epoksydowej, z ewentualnym rozszerzeniem wykorzystania włókien węglowych oraz włókien pochodzenia roślinnego.

Literatura

- [1] Barton J., Niemczyk A.: *Kompozyty, biokompozyty i nanokompozyty polimerowe. Otrzymywanie, skład, właściwości i kierunki zastosowań*. Chemik 2014, 4, s. 280–287.
- [2] Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.

- [3] Jachowicz T., Klepka T.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Ćwiczenia laboratoryjne*. Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
- [4] Królikowski W.: *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe 2012.
- [5] Oczóś K.E.: *Kompozyty włókniste - właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa*. Mechanik 2008, 7, s. 579–592.
- [6] Rajczyk M.: *Współczesne materiały kompozytowe – wybrane kierunki rozwoju nowych technologii*. Politechnika Częstochowska 2011, s. 202–211.
- [7] Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne Żak, Warszawa 1993.
- [8] Strona internetowa TR Solution (www.amod.com) (dostęp 2016.01.18).
- [9] Strona internetowa Baltazar Kompozyty (www.baltazarkompozyty.pl) (dostęp 2016.10.10)
- [10] Strona internetowa Polymer Development Corp. (www.polytek.com) (dostęp 2016.11.07)
- [11] Strona internetowa Primson Composites (www.primson-composites.pl) (dostęp 2016.01.18)
- [12] Wang H. Ku., Pattarachaiyakoop H.N, Trada M.: *A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites*. Composites Part B 2011, 42, s. 856–873.
- [13] Żuchowska D.: *Polimery konstrukcyjne. Przetwórstwo i właściwości*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław

9. Wybrane nowe trendy i uwarunkowania w zakresie efektywności energetycznej w sektorze przetwórstwa tworzyw

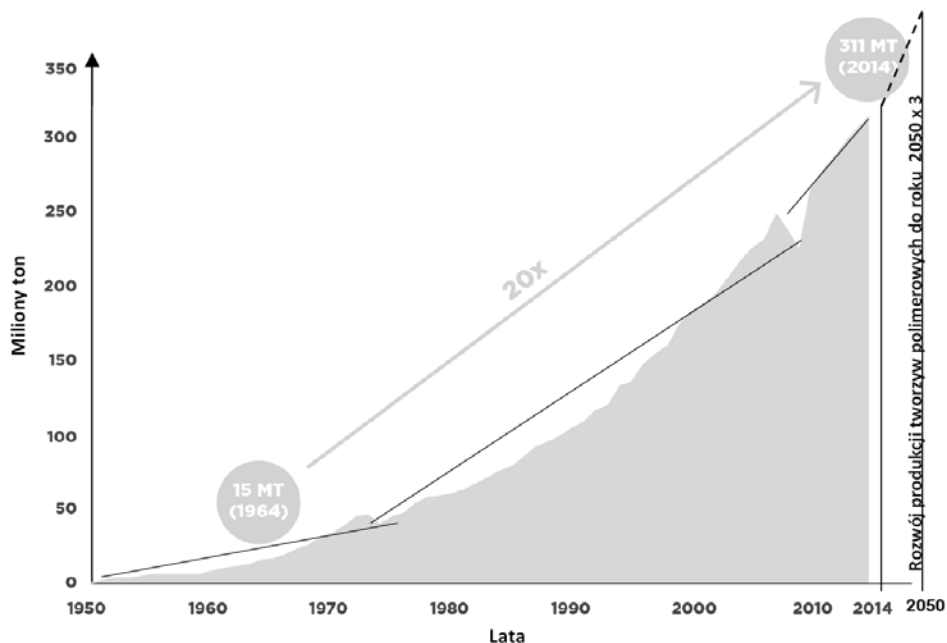
Rozważania wstępne

Współczesne ceny dostaw energii elektrycznej zmuszają niejednokrotnie przedsiębiorstwa zajmujące się przetwórstwem tworzyw polimerowych do zwiększenia efektywności energetycznej realizowanych procesów w celu zredukowania wydatków. Dla rozwoju różnorodnych technik w przetwórstwie tworzyw sztucznych nie bez znaczenia są wymagania rynku odnośnie niskich cen, niezawodności produktów, innowacyjności czy konkurencyjności. Przedsiębiorca, który chce posiadać umocnioną pozycję na rynku i osiągać z tego tytułu relatywne korzyści musi obniżać koszty produkcji, maksymalizować jej wydajność i ulepszać jakość swoich produktów. Dzięki takim wymaganiom ma się do czynienia z innowacyjnością przetwarzanych materiałów (standardowe surowce zastępowane tysiącami odmian i mieszanek) jak i z rozwojem nowych technologii. Przetwórstwo tworzyw sztucznych jest branżą interdyscyplinarną. Składają się na nią: mechanika, chemia polimerów, sterowanie i regulacja, techniki komputerowe i obróbka metali i inne. Za sprawą współdziałania synergii tak wielu dziedzin obecna produkcja tworzyw sztucznych na świecie dwukrotnie przewyższa produkcję stali [3] i rok rocznie rośnie [8], a do roku 2050 wzrośnie trzykrotnie (rys. 1) [31]. Także przetwórstwo tworzyw polimerowych w Polsce wykazuje tendencję wzrostową średnio rok rocznie o około 4,5%. Stan taki jednoznacznie oznaczać będzie wzrost zapotrzebowania energetycznego dla sektora przetwórstwa tworzyw przy jednoczesnym trendzie jednostkowego zmniejszania zużycia energii na wytwarzany produkt.

W odniesieniu do krajów europejskich całkowita wartość konsumowanej energii w roku 2008 wynosiła 68 TWh (infrastruktura budynków + maszyny + produkt). Jedna trzecia specyficznego zużycia energii przez maszyny jest stała i wykorzystywana na podgrzewanie i uplastycznianie tworzyw polimerowych (entalpia). Tę wartość trudno będzie zmienić z uwagi na naturę fizyczną tego procesu [7, 12, 29].

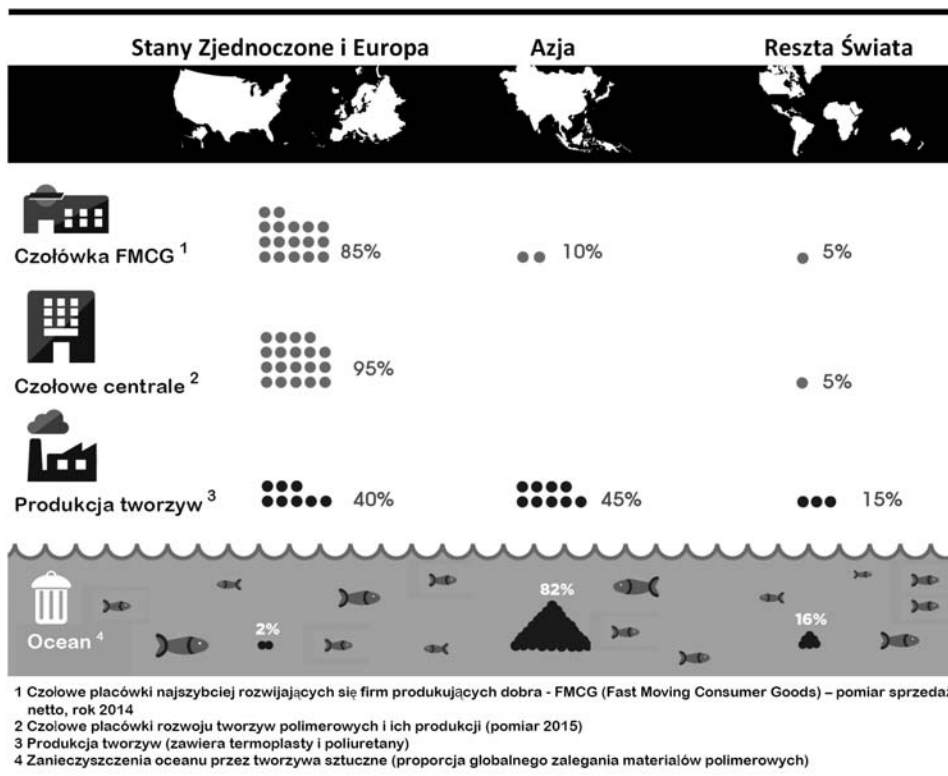
Dostępne dane wskazujące na szybkie tempo rozwoju sektora przetwórstwa tworzyw w Europie, Ameryce, Azji i reszcie krajów świata uwydatniają, że najszybszy rozwój poszczególnych sektorów w wytwarzaniu polimerowych dóbr konsumenckich oraz liczebności przetwarzanych tworzyw polimerach posiada najwyższą alokację na dwóch pierwszych kontynentach (Stany Zjednoczone i Europa) (rys. 3). Wybrane kraje Azjatyckie będą z kolei generować stosunkowo dużo odpadów polimerowych które będą bezpowrotnie trafiać na obszary wód oceanicznych. Dwa czołowe kontynenty świata będą wykazy-

wały wysoką tendencję do podejmowania działań w zakresie minimalizacji zużycia energii czy pozyskiwania jej z nowych źródeł będących rezultatem realizacji nowych idei recyklingowych przy rosnącej produkcji wytworów polimerowych [32].



Rys 1. Rozwój produkcji tworzyw polimerowych na świecie ze źródeł nieodnawialnych wraz z prognozą produkcji tworzyw do roku 2050 [31]

Pojęcie zarządzania energią jest stosunkowo nowym zagadnieniem w przemyśle przetwarzania tworzyw polimerowych [9]. Obecnie zagadnienie to nasila się na zaznaczeniu ze względu na wzrosty kosztów energii i rosnącej niepewności dostaw w przyszłości. Kilkanaście lat temu, zarządzanie energią było zagadnieniem mniejszościowym, mało znaczącym, a skupienie zainteresowania branży przemysłu przetwórstwa tworzyw sztucznych w tej kwestii, nie było obszarem zbyt wielu zainteresowań. Obecnie dla wielu przedsiębiorstw zarządzanie energią jest prawdziwym zagadnieniem poszukiwania znaczących oszczędności. Koszty energii reprezentują trzeci największy zmienny koszt (po tworzywach i bezpośrednich nakładach robocizny) [12, 17]. Efektywność energetyczna i zarządzanie energią nigdy wcześniej nie był przedmiotem tak szczególnego zainteresowania, jak ma to miejsce dzisiaj. Zużycie energii elektrycznej przez maszyny do przetwórstwa tworzyw i peryferia stanowi największą część rachunku za prąd oraz ma znaczący udział w całkowitych kosztach funkcjonowania przedsiębiorstwa.



Rys. 3. Czołowe lokalizacje światowe jednostek i firm odpowiedzialnych za globalny rozwój produkcji tworzyw, dóbr konsumenckich oraz generowanie odpadów bezpowrotnie niemożliwych do odzyskania (ocean) [32]

Z tego powodu u wielu producentów maszyn od lat można zaobserwować wzmoczenie działań mających na celu zoptymalizowanie zużycia energii podczas cyklu pracy maszyny. Zważywszy na wzrastające ceny energii, zarządzanie energią i środowiskiem coraz częściej figurują wysoko na liście priorytetów dla wielu wiodących przedsiębiorstw europejskich [3, 6]. Coraz częściej spotyka się znaczące publikacje analizujące kwestie podejścia do zużycia energii w przetwórstwie tworzyw oraz tak zwanej „czystszej produkcji” [1, 2] czy podejścia do tworzenia modeli symulacyjnych prognozujących zużycie energii w przetwórstwie na podstawie danych wejściowych do produkcji [3]. Znaczącą oszczędność energii uzyskuje się poprzez działania z zakresu efektywności energetycznej, które dotyczą: optymalizacji wytwarzania, dostaw i zużycia sprężonego powietrza, monitoring i pomiar wszelakich możliwych parametrów, minimalizacja strat cieplnych czy też stosowanie właściwego oświetlenia. Wybrane możliwości podwyższenia efektywności energetycznej, poprzez wdrożenie właściwego zarządzania, przy niskich nakładach lub realizacji działań bez kosztowych, są jednych z kluczowych działań.

Wysokie ceny energii oraz niejednokrotnie silna globalnie konkurencyjność stymulują efektywność energetyczną w przemyśle tworzyw sztucznych z uwagi, iż energia stanowi istotny element struktury kosztów przemysłu. Ze względu na zróżnicowany charakter przemysłu tworzyw sztucznych najlepsze praktyki skupiają się bardziej na typowych działaniach z zakresu efektywności energetycznej niż na specyficznych działaniach z zakresu usprawnień procesu. Jest wiele powodów dla minimalizacji kosztów zużycia energii, jakkolwiek, najważniejszy powód w przemyśle przetwarzania tworzyw sztucznych, dotyczy tego, iż zużycie energii wpływa na zyski przedsiębiorstwa. W sytuacji rosnących kosztów energii, cen surowca oraz negatywnych zmian klimatu, potrzeby monitorowania i zmniejszenia konsumpcji energii stają się ważniejsze niż kiedykolwiek wcześniej.

Niemniej jednak, potencjał dla poprawy efektywności energetycznej pozostaje bez zmian, szczególnie tam, gdzie zużycie energii nie zawsze jest postrzegane (kraje rozwijające się), jako główny czynnik generujący koszty ani też nie jest identyfikowane, jako priorytet [32]. Dlatego też za istotne przyjmuje się wskazanie możliwych dróg wypełnienia luk pomiędzy potencjalnymi możliwościami a obecną praktyką przetwarzania tworzyw sztucznych.

Ocena, analiza i kierunki działań w zakresie zużycia energii w przedsiębiorstwie

W wielu przedsiębiorstwach przemysłu przetwórstwa tworzyw sztucznych, priorytetem jest wyprodukowanie tysiąca, setek tysięcy produktów wysokiej jakości, tak szybko jak to tylko możliwe. Jest to skutek produkcji po części opartej na konkurencyjności. Nawet w przedsiębiorstwach wysoce konkurencyjnych, gdzie dopuszczalne są marginesy produkcji, skupiając się na dodatkowych kosztach, dotyczą one prawdopodobne wydajności pracowników i kosztów zakupu towarów. Energia często traktowana jest jako koszt niezależny, ogólny lub określany stosunkowo niskim priorytetem.

W rzeczywistości efektywne wykorzystanie energii powinno być kluczem do wydajnej produktywności. W przypadku, kiedy system zarządzania energią jest skutecznie zintegrowany w przedsiębiorstwie, staje się istotną częścią dobrego zarządzania [13, 19]. Zarządzanie energią, którego celem jest poprawa efektywności energetycznej i redukcja kosztów, oznacza ciągłą analizę zużycia energii oraz kosztów energii (tzw. benchmarking energetyczny). W związku z tym, benchmarking powinien być wdrożony w strukturze organizacji przedsiębiorstwa oraz powinien stanowić integralną część codziennego zarządzania i działalności przedsiębiorstwa [14]. Przykładowym sposobem osiągnięcia powyższego celu jest zintegrowana praca z określonym programem zarządzania energią. Należy pamiętać, iż wyszukane i drogie zautomatyzowane systemy nie są wymagane, aby zastosować w przedsiębiorstwie proces zarządzania energią. Punkt początkowy może stanowić lista kontrolna dla przeglądu miejsc, w których korzy-

sta się w jakikolwiek sposób z zasobów energii. W prosty sposób zgromadzone i zobrazowane dane zużycia energii [9] mogą szybko wskazać obszary, gdzie koszty zużycia są największe. W początkowym przygotowaniu oceny istotne jest udzielenie odpowiedzi na kluczowe pytania [29]:

- „Gdzie jest zużywana energia”
- „Kiedy jest zużywana energia”?
- „Dlaczego jest zużywana energia”?
- „Jak dużo energii jest zużywane”?

Po zebraniu powyższych informacji i zidentyfikowaniu obszarów, gdzie oszczędności lub ewentualne modernizacje mogłyby zostać wykonane, należy wskazać, które zmiany i poprawy dostarczą największych oszczędności. Zasadniczą kwestią w wprowadzeniu i realizacji programu zarządzania energią jest zaangażowanie ze strony zarządu firmy i kluczowego personelu przedsiębiorstwa w zarządzanie zarówno użytkowaniem energii jak i kosztami energii w ciągłym procesie. Można osiągnąć to jedynie przy wykorzystaniu odpowiedniego programu zarządzania energią wdrożonego w pełni w codziennym zarządzaniu i działalności przedsiębiorstwa [29]. W obecnych czasach w Polsce dużo mówi się o szeroko rozumianej jakości wytworów z tworzyw, jednakże o zarządzaniu zasobami energetycznymi niewiele.

Nawet w najmniejszych przedsiębiorstwach warto wyznaczyć osobę odpowiedzialną za zarządzanie energią. Osoba będąca odpowiedzialna za monitorowanie zużycia energii powinna wskazać krytyczną ocenę użytkowania energii, taryf celnych i planu dla zmniejszania konsumpcji energii. Oczekuje się właściwego zarządzania zasobami ludzkimi, ponieważ pracownicy często są zwaną główną zaletą przedsiębiorstwa, jakkolwiek, ze zwiększaniem kosztów energii jest podobnie, gdyż energia może stanowić zasób surowcowy o największym koszcie zakupu. Dla niektórych przedsiębiorstw może być to koszt dużo droższy niż koszty roboczogodzin [19].

Na początku podjęcia jakiejkolwiek inicjatywy zarządzania energią ważne jest określenie aktualnej sytuacji i określenie rzeczywistych kosztów zużycia energii. Następnie możliwe jest ustalenie celów i priorytetów dla przyszłej poprawy funkcjonowania tegoż systemu [14]. Przegląd miejsc strategicznych w przedsiębiorstwie rozpoczyna się od stworzenia listy kontrolnej dostosowanej do sytuacji na terenie zakładu, za pomocą której możliwe jest: zidentyfikowanie nadmiernego użycia energii oraz wskazanie miejsc, w których można uzyskać potencjalne oszczędności. Istotne jest aby miejsca strategiczne monitorować w różnych porach dnia, dla uzyskania pełnej obrazowości stanu faktycznego. Te informacje dostarczą wiedzę gdzie energia może być nieefektywnie wykorzystywana - marnotrawiona. Większość przedsiębiorstw zużywa energię nawet wtedy, kiedy nie ma żadnej produkcji. Może to być forma ogrzewania pomieszczeń, nie wyłączanie maszyn podczas przerw w pracy, pomp wodnych, czy oświetlenia wewnątrz budynków. Ten koszt energii jest nadwyżką właściwego

zużycia, która jest obecna bez względu na poziomy produkcji. Taka nadwyżka zużycia energii powinna zostać założona, jednak należy poddać ją krytycznej analizie [29].

Kiedy główne obszary użycia energii zostaną zidentyfikowane, następnym krokiem jest konkretne obliczenie kosztu zużycia energii poprzez dane jednostki na obszarze przedsiębiorstwa przy użyciu danych z rachunków za energię. Jest to niezbędne, aby oszacować przybliżone poziomy straty w każdym obszarze i obliczyć potencjalne finansowe korzyści z wprowadzenia systematycznego systemu zarządzania energią [19]. Niewątpliwie powyższe obliczenia wskażą zużycie energii w poszczególnych obszarach oraz ujawnią miejsca i okresy marnowania energii z wskazaniem potencjału dla popraw i redukcji jej zużycia. Doskonalenie procesu zarządzania energią umożliwia także mierzenie konsumpcji energii na bardziej dokładnym poziomie [29].

Analiza kosztów na podstawie miesięcznych danych oraz wstępna ich ocena może również zostać wykorzystana do oceny postępu efektywności energetycznej przedsiębiorstwa po wprowadzeniu procesu zarządzania energią [17]. Przygotowując się do oceny zużycia energii warto przyjąć założenie o przewidzianym zużyciu energii w całym przedsiębiorstwie, a następnie porównać wyniki z faktycznym zużyciem energii. Takie obliczenia umożliwiają określenie właściwego zarządzania energią w przedsiębiorstwie, jeśli faktyczne użytkowanie energii jest większe niż przewidziane użytkowaniem lub okaże się mniejsze niż zakładano. Proste gromadzenie danych wskazane w pozycji [9] może zostać użyte, by rozważać aktualne użycie energii dla całego przedsiębiorstwa i dla procesu produkcji. Metoda ta daje nie tylko wgląd w działania, ale również dostarcza narzędzi do oceny i przyszłego planowania budżetu kosztów energii [19]. Ustalanie kierunków działań prowadzących do oszczędności energii wymaga systematycznego podejścia. Punktami wyjściowymi są określone wskaźniki wydajności energii oraz informacje dotyczące użytkowania energii i kosztów energii uzyskane w poprzednim etapie. Cele muszą być wymierne, możliwe do osiągnięcia. Aby określić wykonalne cele, należy oszacować zakres oszczędności energii, określić usprawnienia techniczne, które są możliwe do wdrożenia w istniejących instalacjach i urządzeniach oraz przeprowadzić „burzę mózgów” w różnych działach zakładu i z różnymi osobami w przedsiębiorstwie tak aby ustalić, w jaki sposób poszczególne osoby mogą wnieść własny wkład w realizację oszczędności energii [13].

Wyznaczenie celów dobrego gospodarowania dotyczy metod, które koncentrują się na wykorzystaniu i prowadzeniu istniejących instalacji w sposób najbardziej efektywny. Obejmują także poprawę w zakresie zakupu energii oraz kontrolę rachunków za energię. Wdrażanie programu organizacji i zarządzania energią zalecane jest od rozpoczęcia działań z zakresu dobrego gospodarowania [13, 29]. Dla lepszego zobrazowania powyższych wskazań zaproponowano kartę podstawowych czynności prowadzących do zwiększenia efektywności racjonalnego wykorzystania energii w przedsiębiorstwie, którą można wykorzystać roz-

poczynając działania objęte procesem zarządzania energią. Jej fragment zobrazowano w tablicy 1, gdzie zebrano wybrane czynności związane z dobrymi praktykami gospodarowania, na płaszczyźnie ogólnej praktyki eksploatacyjnej zakładu przemysłowego, obsługi instalacji technologicznej, ogrzewanie, wentylacja, klimatyzacja i oświetlenie budynków, instalacja sprężonego powietrza, chłodzenie, silniki elektryczne [19, 29].

Tablica 1. Wybrane elementy proponowanej karty podstawowych czynności prowadzących do zwiększenia efektywności zarządzania energią w przetwórstwie tworzyw [19, 29]

PODSTAWOWA CZYNNOŚĆ	DATA/stan /wartość
Przeprowadzenie kontroli księgowości rachunków za energię	
Przeprowadzenie przeglądu kamerami termowizyjnymi aktualnych strat ciepła w budynkach	
Zainstalowanie energooszczędnego oświetlenia LED zastępującego lub odnawiającego egzystujące, starsze systemy	
Budując nowe budynki, hale, należy rozważyć skuteczne projektowanie uwzględniając naturalne systemy oświetlenia, bierne ogrzewanie słoneczne, bierną wentylację, sprawdzając metody oszczędności energii, takie jak izolacja cieplna oraz zewnętrzne zacienienie	
Rozważenie zainstalowania automatycznego systemu zarządzania energią, aby kontrolując koszty energii nie polegać na pracownikach, by ustawić układy sterowania poprawnie	
Rozważenie zainstalowania podwieszanych sufitów w wysokich pomieszczeniach lub użycia dmuchaw przenoszących gorące powietrze od przestrzeni dachu z powrotem w dół w obszarze roboczym	
Sprawdzenie czy konieczne jest ogrzewanie niekompletnie zajętych magazynów	
Sprawdzenie czy wykonuje się regularne prace konserwacyjne urządzeń technologicznych oraz urządzeń energetycznych i użytkowych oraz czy procedury konserwacyjne są udokumentowane w instrukcjach obsługi i konserwacji	
Sprawdzenie czy określono minimalne wymogi grzewcze dla poszczególnych stref w budynkach, czy termostaty pracują w pomieszczeniach według zadanych wartości dla regulacji cieplnej (ogrzewanie, chłodzenie, nawilżanie)	
Sprawdzenie czy oświetlenie zewnętrzne miejsc nieuczęszczanych utrzymuje się na poziomie minimalnym. Tam, gdzie znajdują zastosowanie należy zastosować czujniki ruchu do takiego oświetlenia	
Sprawdzenie czy wyłącza się zbędne wentylatory, pompy itp. oraz czy bada się możliwość zastosowania „łagodnego startu” do urządzeń często uruchamianych celem uniknięcia niepotrzebnych mocy szczytowych.	

Cele dobrego gospodarowania pozwolą także na wyprowadzenie celów opłacalności, koncentrujących się na modyfikacji procesów lub urządzeń, które można zrealizować przy zachowaniu akceptowalnej stopy zwrotu z inwestycji. Kryterium ekonomicznym często stosowanym przy inwestycjach tego rodzaju jest minimalna stopa zwrotu z inwestycji (IRR). Zazwyczaj przedsiębiorstwa przyjmują 15% (po opodatkowaniu) IRR lub wyższą w przypadku inwestycji energetycznych. Cele zwrotu z inwestycji mogą obejmować montaż silników energooszczędnych. Te rozwiązania wdraża się, aby uzyskać dodatkową oszczędność energii już po udanym zastosowaniu działań z zakresu dobrego gospodarowania, które przyniosły oczekiwane oszczędności energetyczne [12].

Jedno z ostatnich zadań dotyczy wyznaczenia strategicznych inwestycji energetycznych, które dotyczyć będą na przykład dopuszczeń do eksploatacji (zastępowanie konwencjonalnych technologii i instalacji nowymi rozwiązaniami, wymiana maszyn lub urządzeń ze względu na normy emisji CO₂ itp.) lub istotnych zmian dotyczących zużycia energii na terenie zakładu. Cele strategiczne odgrywają również rolę w decyzjach inwestycyjnych dotyczących nowych technologii oraz urządzeń. Przedsięwzięcia te wymagają zazwyczaj znaczących nakładów inwestycyjnych i mogą nie spełniać wymogu standardowej stopy zwrotu z inwestycji, ale inne czynniki przekonują do realizacji takiej inwestycji [4–7].

Znaczenie zasadności redukcji zużycia energii w procesie przetwarzania tworzyw sztucznych

Zmniejszenie kosztów za zużycie energii w koszcie wytwarzania dóbr i usług, wpływa na poprawę konkurencyjnej sytuacji firmy na rynku. Globalny rynek, swobodny przepływ towarów i zasobów pracy powodują, że ceny dóbr i usług wyrównują się. Dodatkowym elementem wzmacniającym pozycję na konkurencyjnym rynku jest wizerunek firmy przyjaznej środowisku i oznaczanie produktów i usług znakami i certyfikatami ekologicznymi [16]. Osiągnięcie znacznej oszczędności energii nie powoduje potrzeby przeprowadzenia kosztownych inwestycji, jako że w wielu przypadkach wystarczy zmiana funkcjonowania danego podmiotu (sposobu organizacji pracy jednostki, reżimu korzystania z energii na stanowiskach pracy, korzystania z klimatyzacji, ogrzewania, wietrzenia pomieszczeń itp.). Po rozpoznaniu i uszeregowaniu odbiorników energii, np. wg ich wpływu na całkowity bilans zużycia energii w przedsiębiorstwie, należy przeanalizować możliwości wprowadzenia zmian, dzięki którym uzyska się oszczędności energii.

Przedsiębiorcy w swoich działaniach dążą do tego, aby osiągnąć korzyści finansowe i zminimalizować koszty działania firmy. Oszczędności w firmie mogą być osiągnięte głównie dzięki inwestycjom w procesy produkcyjne. Modernizacja napędów elektrycznych to podstawa zrównoważonego gospodarowania energią elektryczną w firmie bazującej na masowej produkcji. Inwestycje w jed-

nostki napędowe mogą przynieść duże oszczędności. Jednak jak pokazują badania największe i najszybsze oszczędności (nawet do 30% rocznego zużycia energii) uzyskuje się poprzez zmianę nawyków pracowników, która prowadzi do znacznego zmniejszenia zużycia energii w firmie, a także poprzez wdrażanie systemów wspomagających monitorowanie kosztów energii. Podejmowanie wspomnianych działań prowadzi do poważnych oszczędności finansowych [27, 29].

Proces formowania metodą wtryskiwania czy rodmuchiwanie nieswobodnego jest jednym z podstawowych procesów wytwórczych prowadzących do powstania wyprasek z tworzyw sztucznych. Jest to proces, który prowadzi od otrzymania dużej ilości identycznych przedmiotów poczynając od inżynierskich komponentów wysokiej jakości do jednorazowych dóbr konsumenta. Celem przetwórstwa jest nadanie polimerowi odpowiedniej postaci użytkowej i wytworzenie wyrobu nadającego się do stosowania w określonych warunkach. W procesach przetwarzania zachodzą w polimerze złożone przemiany fizyczne i chemiczne, które są wynikiem działania sił mechanicznych (naprężeń), ciepła i ruchu. Struktura i właściwości polimeru zależą od procesów zachodzących podczas topnienia polimeru (upłynniania), wymuszonego płynięcia stopu, mieszania (np. z dodatkami modyfikującymi) i kształtowania. Przez odpowiedni dobór parametrów technologicznych można w ukierunkowany sposób modyfikować właściwości polimeru, zarówno w całej masie jak i w warstwie powierzchniowej [10, 11, 20, 21].

Istnieje wiele istotnych elementów w procesie przetwórstwa tworzyw wpływających na zredukowanie zapotrzebowania energetycznego. Do podstawowych można zaliczyć: maszynę, konstrukcja wypraski i narzędzia, proces, media pomocnicze. Energia niezbędna na realizację fazy produkcyjnej zapewniającej powstanie wypraski zależy od wielu czynników, do których zalicza się [29]:

- projektowanie, wielkość, złożoność i innowacyjność rozwiązań konstrukcji formy wpływają na dobór wielkości maszyny i innych urządzeń pomocniczych,
- zastosowanie w konstrukcji narzędzi przetwórczych elementów dodatkowych np. hydraulicznych rdzeni lub wkładek,
- dodatkowe wyposażenie takie jak odwilżacze, suszarki i grzałki,
- typ użytego materiału przetwarzanego (zróżnicowany zakres temperatur uplastycznienia i chłodzenia – entalpia),
- długość czasu cyklu często determinowana rozwiązaniami konstrukcyjnymi układu chłodzenia,
- brak stosowania rozwiązań uruchamiających urządzenia na żądanie – wtedy, kiedy są potrzebne np. ciągła praca rozdrabniacza wlewków tworzywa, wskazana okresowa.

Każdy proces przetwórstwa tworzyw sztucznych zawiera w swej strukturze miejsca możliwego zredukowania zapotrzebowania energii. Istotnym działaniem

dla redukcji całkowitej konsumpcji energii w miejscu produkcji jest analiza przepływów energii oraz towarzyszących temu kosztów. Pozwala to na oszacowanie potencjału oszczędności, co posłuży za podstawę określonych działań. Jednym ze sposobów na zmniejszenie całkowitego zużycia energii jest ponowne wykorzystanie ciepła będącego odpadem pewnych procesów. Dzięki takim działaniom możliwe jest uzyskanie efektywności energetycznej na poziomie 80%. Należy przyjrzeć się wartościom różnych procesów, aby zaobserwować czy poprawy mogą być realne [12–14, 17]. W trakcie wtryskiwania tworzyw sztucznych tylko od 5% do 10% energii używanej przez wtryskarkę jest właściwie dla powstającej wypraski polimerowej, a pozostałe 90% do 95% używane jest po to, by obsługiwać maszynę (np. wtryskarkę hydrauliczną) [7]. Kiedy całkowite zużycie energii w produkcji przedsiębiorstwa zostanie zidentyfikowane, można wskazać zbędną konsumpcję energii. Nadwyżka energii jest zazwyczaj użyta tylko dla usług i rzadko odnosi się do produkcji. Jest to punkt początkowy dla zredukowania ogólnej konsumpcji energii, ponieważ jest to energia, która jest użyta bez względu na poziomy produkcji i/lub jakość [29]. Poniżej w tablicy 2 przedstawiono przykłady zbytecznego zużycia energii w procesach przetwarzania tworzyw polimerowych.

Tablica 2. Wybrane czynniki wpływające na nadmierne zużycie energii w procesie przetwarzania [12-14, 20-22]

CZYNNIK	PROCES
Temperatura	Temperatura potrzebna do uplastycznienia tworzyw niejednokrotnie, może być zbyt wysoka. Przy zwiększeniu temperatury przetwarzania może wystąpić degradacja materiału, co powoduje pogorszenie się właściwości mechanicznych, niestabilność płynięcia i odbarwianie. Ma to znaczący wpływ na środowisko oraz koszty produkcji. Ze względu na niską przewodność cieplną oraz stosunkowo niską temperaturę topnienia tworzyw sztucznych, należy maksymalnie ograniczać ich nagrzewanie – w celu uniknięcia zmian wymiarowych, zmian barw itp.. Kontrola cyklu ogrzewania może zmniejszyć ilość niezbędnego ciepła i w ten sposób zmniejszać zarówno koszty energii, jak i czas cyklu maszyny.

c.d. Tablica 2

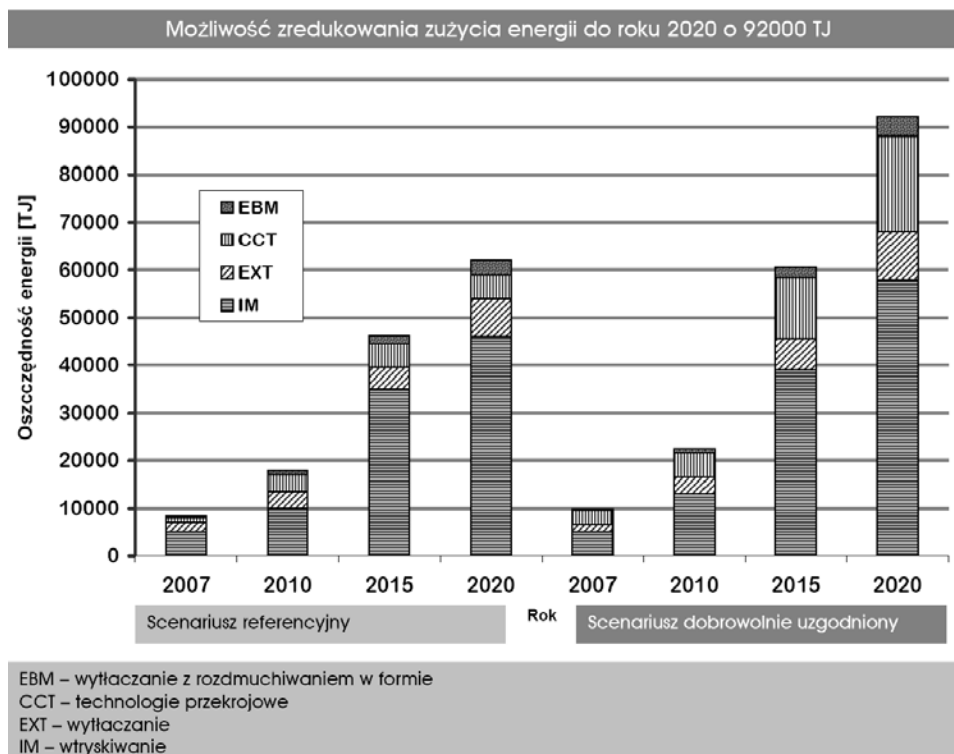
Wtryskiwanie, chłodzenie i układ uplastyczniający	Podstawową funkcją formy wtryskowej lub rozdmuchowej jest umożliwienie wypełnienia płynnym tworzywem gniazd formujących i uformowanie wyrobu, który odzwierciedla kształt gniazd formujących. Drugą podstawową funkcją narzędzi przetwórczych jest efektywne i równomierne odprowadzanie ciepła od gorącego tworzywa. Na formę wtryskową należy patrzeć jak na wymiennik ciepła. Większość energii (ciepła), które zostało dostarczone do tworzywa w wyniku uplastyczniania musi zostać odebrana. Wytwory muszą być doprowadzone do odpowiedniej sztywności, aby możliwe było ich usunięcie. Dla każdego tworzywa określona jest maksymalna temperatura, przy której tworzywo może być usuwane z formy. Zredukowana temperatura topienia tworzyw w procesie wtryskiwania może znacząco zmniejszyć koszty energii. Czas uplastyczniania określony jest głównie poprzez konstrukcję oraz wymaganą wydajność układu uplastyczniającego. Jedynym zatem bezpośrednio regulowanym parametrem pozostaje temperatura. W tym celu niezbędna jest optymalizacja mocy, liczby, wymiarów oraz rozmieszczenia stref grzejnych układu uplastyczniającego oraz układów nimi sterujących.
Sprężone powietrze	Sprężone powietrze używane w maszynach do przetwórstwa tworzyw (np. rozdmuch) jest niezmiernie kosztownym etapem produkcji. Jest to jeden z najdroższych nośników energii. Według różnych źródeł literaturowych sprawność jego użytkowania (wytwarzanie, przesył, wykorzystanie) nie przekracza 20-30%. Reszta energii zamieniana jest w sprężarkach na ciepło oraz podlega stratom poprzez nieszczelności w instalacjach i urządzeniach pneumatycznych. Proces produkcji sprężonego powietrza zazwyczaj charakteryzuje się dużym potencjałem w zakresie poprawy jego efektywności, wynoszącym średnio około 25% zużycia energii elektrycznej. Należy sprawdzić czy ciśnienie jest ustawione na wystarczającym poziomie dla pracy maszyny i jakości produktu, czy nie ma przecieków, czy nie jest używane do wentylacji lub chłodzenia, czy można wyłączyć sprężarkę, jeśli nie jest używane. W przypadku posiadania zainstalowanych mierników przepływu na liniach doprowadzających powietrze oraz przeprowadzania pomiarów zużycia energii elektrycznej przez sprężarki, wyniki takich pomiarów zapewniają informacje wymagane w zakresie ilości dostarczonego powietrza oraz powiązanego zużycia energii elektrycznej. Jeśli ciśnienie danego układu sprężonego powietrza jest narażone na okresowe wysokie zapotrzebowanie, można rozważyć zainstalowanie dodatkowych zbiorników magazynujących, aby umożliwić obniżenie ciśnienia całego układu oraz zredukować wahania ciśnienia. Używając nadmiernie wysokiego ciśnienia zużywa się niepotrzebnie energię. Ponieważ sprężone powietrze stosuje się często do chłodzenia, suszenia i czyszczenia, należy używać sprawnych dysz i regularnie serwisować dysze strumieniowe, aby oszczędzać sprężone powietrze. Zużyte narzędzie często pochłania nadmierną ilość sprężonego powietrza i często wpływa negatywnie na związane z nim procesy stąd ważne, aby sprawdzać okres pracy (żywołność) każdego z odbiorów końcowych. Prawie 70-80% energii pobieranej do cyklu sprężania zostaje zmienione na ciepło, które musi być odprowadzone warto więc wykorzystać ciepło chłodzenia ze sprężarki i wychodzące ze schładzacza: ciepło to można wykorzystać do produkcji ciepła niskotemperaturowego. Niektóre rodzaje sprężarek wykorzystują ciepło gorące odprowadzanego ze sprężarek do regeneracji osuszaczy.

c.d. Tablica 2

Chłodzenie finalnego produktu	Ponieważ impuls chłodzenia, czyli przepływ wody, stanowi tylko część całego cyklu, istnieje możliwość podwyższenia temperatury cieczy chłodzącej bez negatywnego wpływu na temperaturę ścianki formy. Wskutek zwiększonej różnicy pomiędzy temperaturą wody a temperaturą stopu, ciepło odprowadzane podczas impulsu chłodzenia przesyła się w krótszym czasie, co powoduje skrócenie czasu chłodzenia i tym samym czasu cyklu. Tempo uplastycznienia większości produktów może łatwo zostać zwiększane, ale czas cyklu nie może zostać zmniejszony, ponieważ poprzedni komponent często nadal ochładza się. Czas chłodzenia produktu zazwyczaj sięga nawet do 70% cyklu pracy maszyny. Ważne jest zatem właściwie umiejscowiony kanał chłodzący, jego rodzaj (liniowy lub konformalny), parametry przepływu cieczy (turbulencja) w kanale chłodzącym.
Zmienne szybkości napędu	Zazwyczaj każda maszyna hydrauliczna posiada duże hydrauliczne pompy na wykonywani określonych operacji w trakcie cyklu wtryskiwania. Siła wymagana w danym cyklu wtryskiwania różni się w poszczególnym czasie trwania cyklu. Zmienna szybkość napędu VSD (variable speed drives) jest jednym z najlepszych sposobów zaoszczędzenia energii w silnikach o danej mocy działania w zasięgu ich szybkości pracy. VSD dostosowuje szybkość silnika elektrycznego, tak aby dopasować niezbędną moc do cyklu wtryskiwania. W przypadkach, gdy jest zapotrzebowanie na przepływ zmienny napędy wykorzystujące przemiennik częstotliwości w połączeniu z silnikami indukcyjnymi prądu zmiennego mogą okazać się skutecznym i ekonomicznym rozwiązaniem alternatywnym dla dławieniowej regulacji przepływu, czy też regulacji obejściowej, bądź dla regulacji typu włącz/wyłącz. VSD mają możliwość „miękkiego” uruchomienia silnika (tzw. soft start) unikając przy tym wysokich prądów rozruchowych i zmniejszając spadki napięcia w układzie.
Zasilanie urządzeń elektrycznych. Ogrzewanie i oświetlenie	Ważną kategorią jest zużywanie energii elektrycznej w budynkach do celów oświetleniowych i zasilania urządzeń biurowych. Ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja odpowiadają za większość zużywanej energii w budynkach i w związku z tym stanowią podstawowy obszar działania przy wdrażaniu efektywności energetycznej. Przegrzewanie zimą i chłodzenie latem to główne przyczyny marnowania energii. Należy dopilnować, by kanały gorącego i zimnego powietrza były dobrze izolowane i nie miały nieszczelności. Należy czyścić regularnie kanały powietrzne, ponieważ z czasem kanały mogą się zanieczyszczać powodując nie tylko pogorszenie jakości powietrza, ale także dodatkowy opór zmniejszający wydajność wentylatora powietrza. Należy regularnie sprawdzać wymienniki ciepła na okoliczność wtargnięcia powietrza do systemu gorącej wody i w razie potrzeby, odpowietrzyć wymienniki. Istotne jest unikanie jednoczesnego działania grzejników i urządzeń klimatyzacyjnych w tym samym miejscu. Sprawdzanie czy nie ma żadnych skarg dotyczących niewłaściwych temperatur w pomieszczeniach (zbyt ciepło w czasie grzania, zbyt zimno przy włączonej klimatyzacji).

c.d. Tablica 2

Energia grzewcza	Zasilanie w energię chłodzącą daje jeszcze więcej możliwości zredukowania zużycia energii. Już samo wykorzystanie ciepła oddawanego przez chłodzone wtryskarki pozwala w rzeczywistości zaoszczędzić do 95% kosztów ogrzewania. Z oddawanego ciepła poprzez systemy rekuperacyjne pozyskuje się za darmo ciepło na cele grzewcze, zastępując pierwotne nośniki energii grzewczej, takie jak olej grzewczy czy gaz. W praktyce oznacza to, że wystarczy, aby na powrocie obiegu chłodzącego maszyny była temperatura rzędu 35°C, aby ogrzać biura i hale produkcyjne. W ten sposób w perspektywie całego roku możliwa jest oszczędność bardzo dużej ilości pierwotnych nośników energii grzewczej. Poza tym można dodatkowo zaoszczędzić energię, która normalnie zostałaby wykorzystana do obniżenia temperatury powrotu wody chłodzącej
------------------	---



Rys. 4. Scenariusze oszczędności energii w sektorze przetwórstwa tworzyw możliwe do uzyskania do roku 2020 poprzez zastosowanie innowacji w zakresie układu roboczego przetwórstwa tworzyw jak i kluczowych technologii przekrojowych CCT [33]

W roku 2012 dokonano podpisania stosunkowo dużego porozumienia sektora przetwórstwa tworzyw w kierunku długoterminowego znacznego zredukowania zużycia energii. Porozumienie podpisano pomiędzy National Plastics Converter Associations, European Plastic Converters Association (EuPC) i europejskimi agencjami energetycznymi. Całość porozumienia stało się narzędziem przyczyny-

niającym się do poprawy efektywności energetycznej uzyskanej na skutek możliwych do wykorzystania potencjałów w tej branży m.in. poprzez wymianę starego parku maszynowego na nowy. Poprawa świadomości przedsiębiorstw z sektora MSP przyczyni się do osiągnięcia głównego celu UE jakim jest zredukowanie zużycia energii o 20%. W przypadku założonego scenariusza referencyjnego i dobrowolnego planuje się uzyskać do roku 2020 następujące oszczędności energii: 62000 i 92000 TJ. Znaczące oszczędności energii mają także wynikać z realizacji kluczowych technologii przekrojowych (CCT) istotnych w krajach UE [33].

Podsumowanie

Zaprezentowane uwarunkowania w obszarze efektywności energetycznej w sektorze przetwórstwie tworzyw wskazują na konieczność znacznego zaangażowania sektora przedsiębiorstw MSP w zakresie stosowania podstawowych zasad, wytycznych, możliwości korzystania z instrumentów finansowania umożliwiający sprostanie tym założeniom. W najbliższych latach należy także upatrywać wyzwolenia instrumentów i mechanizmów sprzyjających osiągnięciu tych celów. Nie bez znaczenia było by także przyznanie po roku 2020 firmom odpowiednich europejskich certyfikatów energetycznych (np. D, C, B, A, A+, A++, A+++), świadczących o ich poziomie zaangażowania w zrównoważony rozwój sektora przetwórstwa tworzyw.

Literatura

- [1] Jatinder Madan, Mahesh Mani, Jae Hyun Lee, Kevin W. Lyons: *Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study*. Journal of Cleaner Production, Volume 105, 15 October 2015, s. 157–170
- [2] Elduque A., Elduque D., Javierre C., Fernández A., Santolaria J.: *Environmental impact analysis of the injection molding process: analysis of the processing of high-density polyethylene parts*. Journal of Cleaner Production, Volume 108, Part A, 1 December 2015, s. 80–89.
- [3] Kouki M., Cardin O., Castagna P., Cornardeau C.: *Input data management for energy related discrete event simulation modeling*. Journal of Cleaner Production, Volume 141, 10 January 2017, s. 194–207.
- [4] Radziwona A.: *The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions*, Procedia Engineering 69 (2014) s. 1184–1190
- [5] Giret A.: *Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review*, Journal of Manufacturing Systems, Volume 37, Part 1, October 2015, s. 126–140.
- [6] Adrian C. Newton, Elena Cantarello: *An introduction to the green economy: Science, systems and sustainability*; Book first published London 2014 by Routledge Group, s. 358

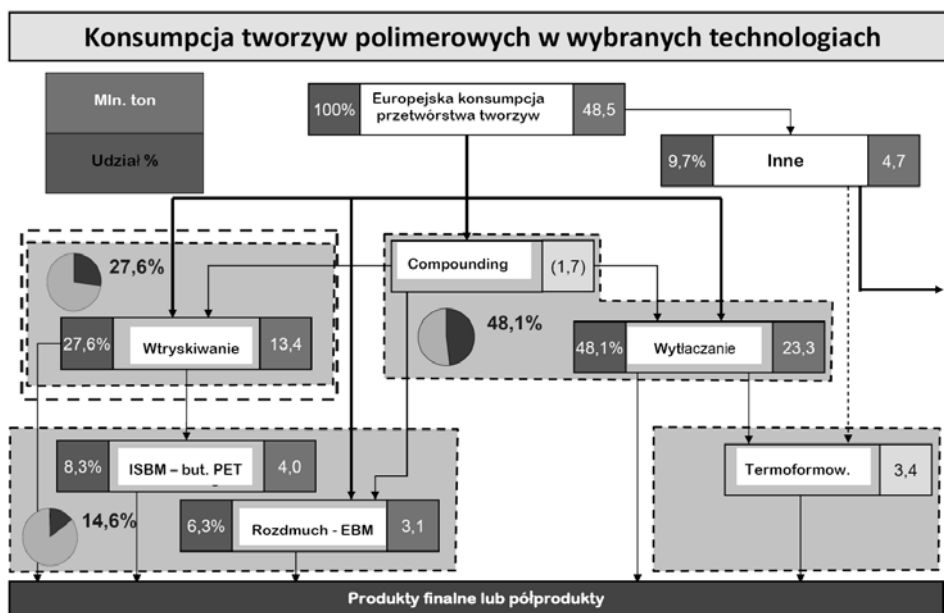
- [7] Spiering T.: *Energy efficiency benchmarking for injection moulding processes, Original Research Article*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 36, December 2015, s. 45–59.
- [8] *Plastics – the Facts 2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Plastics Europe, Brussels – Belgium 2015. www.plasticseurope.org (11.10.2016)
- [9] Praca zbiorowa pod red. Sasimowski E.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Aspekty technologiczne i nowe trendy*. Część 1. Lublin 2015.
- [10] D. Żuchowska, *Polimery konstrukcyjne*, Wyd. Naukowo – Tech., Warszawa 1995.
- [11] W. Korszak (red.), *Technologia tworzyw sztucznych*, Wyd. Naukowo – Tech., Warszawa 1981.
- [12] R. Kent, *Energy management in plastics processing*, Plastics, Rubber and Composites, 2008 vol. 37.
- [13] *Energy in plastics processing – a practical guide*, Good Practice Guide 292, Energy Efficiency Best Practice Programme, British Plastics Federation, London 1999.
- [14] *Low Energy Plastics Processing, Reduced Energy Consumption In Plastics Engineering European Best Practice Guide*, Intelligent Energy – Europe Programme 2006.
- [15] T. Jachowicz, M. Iwanicki, *Charakterystyka wtryskarek elektrycznych*, Teka Kom. Bud. Ekspl. Masz. Elektrotech. Bud. OL PAN, Lublin 2008.
- [16] S. Pasierb, Sz. Liszka, M. Bogacki, A. Osicki, P. Kukła, T. Zieliński, *Efektywne wykorzystanie energii w firmie – poradnik*, Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, Warszawa 2009.
- [17] http://www.oni.de/polnisch/news/pdf/Beitrag_zur_Plastpol.pdf
- [18] http://www.engel.at/engel_web/global/en/128.htm
- [19] www.change.kig.pl/pliki/CARE_Best_Practices_in_Polish.pdf
- [20] <http://www.tworzywa.pwr.wroc.pl/index.php?co=wtrysk04>
- [21] http://www.pro4plast.net/documents/general/Tworzywa_nr_4_2007.pdf
- [22] <http://www.euplastvoltage.eu/uploads/downloads/euplastvoltage-brochure-polish.pdf>
- [23] <http://www.intemo.pl/news/16>
- [24] <http://tworzywa.com.pl/Wiadomo%C5%9Bci/Zalety-i-wady-wtryskarek-elektrycznych-21097.html>
- [25] <http://www.storkspm.com/index.php?lang=pol&page=10060101>
- [26] *PlastNews* 5/2008
- [27] http://czystybiznes.pl/media/filemanager/publikacje/ekologia_to_czysty_biznes_dobre_praktyki.pdf
- [28] Barney L., *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, CRC Press Taylor & Francis Group, USA 2007, tom 1 i 2.
- [29] Kent R., *Energy management in plastics processing. Strategies, targets, techniques and tools*. Plastics Information Direct, London 2013.

- [30] Źródło-Loda M.: *Benchmarking – nowoczesna koncepcja zarządzania organizacją. Efektywność zarządzania zasobami organizacyjnymi*, pod redakcją Piotra Lenika.
- [31] Worpel G., Van den Akker J., Pors J., *Ten Wolde, Plastics do not belong in the ocean*. Towards a roadmap for a clean North Sea. IMSA Amsterdam 2011, s. 39.
- [32] The New Plastics Economy Rethinking the future of plastics. World Economic Forum, Genewa 2016.
- [33] Erik de Ruijter.: *Industry takes the lead: voluntary agreement on energy efficiency in the EU plastic converting sector*. ECEEE 2012 summer study on energy efficiency in industry.

10. Techniki i czynniki warunkujące efektywność energetyczną procesu przetwarzania wtryskowego polimerów

Techniki: mapa energetyczna, monitorowanie i prognozowanie

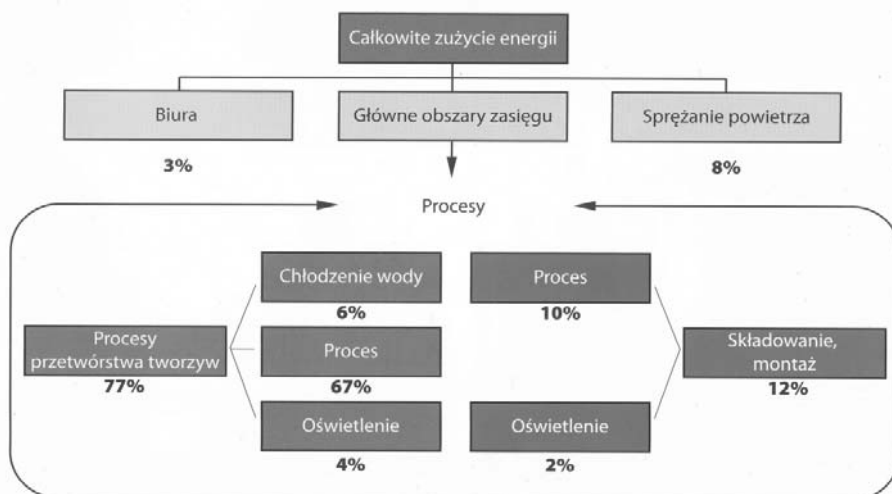
Z uwagi na rosnącą rok rocznie liczbę produkowanych tworzyw na świecie (rok 2015: 322 mln ton [14]) istnieje konieczność wskazywania technik wpływających na poprawę efektywności energetycznej przetwórstwa tworzyw w tym technologii wtryskiwania. Globalne aspekty rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną wymuszają wprowadzanie mechanizmów przyczyniających się do realizacji tych zadań [11, 12]. Konsumpcja energetyczna dla wybranych technologii przetwórstwa jest zróżnicowana i częściowo powiązana z liczbą przetwarzanych wsadów polimerowych. Przykładowy podział konsumpcji tych materiałów w danych technologiach podstawowych zobrazowano na rys. 1 [12].



Rys. 1. Konsumpcja materiałów polimerowych w wybranych technologiach przetwórstwa w tym we wtryskiwaniu [12]

Do zasadnych a zarazem jednych z najprostszych technik wspomagających ocenę zużycia energii w instytucjach przetwórstwa tworzyw jest stworzenie mapy energetycznej dla maszyn czy urządzeń. Na podstawie prostej mapy energetycznej lokalizuje się główne obszary, które konsumują stosunkowo dużą ilość

energii. Przygotowanie takiej mapy nie jest trudne. Może zostać opracowana przez osobę odpowiedzialną lub osoby, które obsługują maszyny. Schemat takiej mapy przedstawia rys. 2. Jedną z najprostszych metod monitorowania konsumpcji energetycznej jest odczytywana wartość zużycia energii przez daną maszynę czy urządzenie w kWh, zaś udział w zużyciu na oświetlenie można policzyć na podstawie liczby żarówek oraz ich mocy. Wyniki można wprowadzić wraz z opisami do arkusza kalkulacyjnego w celu wstępnej oceny zidentyfikowanych obszarów. Monitorowanie i prognozowanie polega na gromadzeniu, przetwarzaniu i wysyłaniu informacji dotyczących efektywności wykorzystania energii [6]. Po dokładnym pomiarze następuje lokalizacja miejsc, w których można uzyskać oszczędności. Mapa energetyczna oraz monitorowanie i prognozowanie jest czynnikiem przekazującym ważne informacje dla działań analitycznych. Istotne jest, aby dokładnie zebrać wszystkie dane i przeprowadzać analizy, które winien realizować wysoko wyspecjalizowany personel w celu wyciągnięcia konkretnych wniosków i prognozowania stanu uwarunkowań energetycznych [9].



Rys. 2. Przykładowa mapa energetyczna dla przetwórstwa tworzyw [9]

Do prostych technik gromadzenia danych następnie umożliwiających dokonanie analiz zalicza się czynniki pomiarowe zainstalowane przy maszynach i urządzeniach. Dzięki temu możliwe jest dokładne ustalenie składowych kosztów maszyn i urządzeń w różnych obszarach realizowanej produkcji. Systemy tego typu można łatwo połączyć ze sobą poprzez sieć czy Internet w celu ulepszenia komunikacji między systemem zawierającymi dane oraz w celu kontrolowania zużycia energii [7].

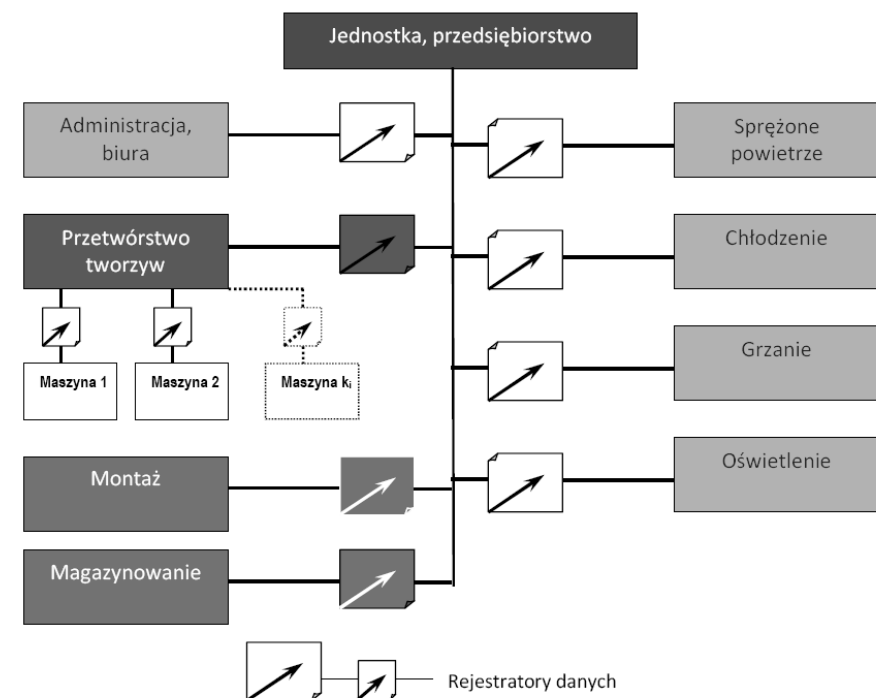
Krzywa charakterystyczna zużycia energii JLH [5] wykorzystywana jest do prognozowania przy uzależnieniu wielkości produkcji. Prognozowanie pole-

ga na obliczeniu szybkości produkcji danej jednostki (kg/h/maszynę), po czym wyszukuje się na wykresie przewidywalnego JLH. Kolejny etap to obliczanie rzeczywistej WKE dla całości zużywanej energii do masy tworzywa przetworzonego. Ostatni etap to porównanie zużytej energii z benchmarkingiem [1, 10] JLH. Do metod porównania wydajności przedsiębiorstwa z konkurencją zalicza się m.in. benchmarking zewnętrzny. Nie jest to łatwa metoda, ponieważ zużycie energii jest uzależnione od danego przetwórstwa oraz zużycie zależy od szybkości produkowanych części, a także od obciążenia procesowego i podstawowego.

Monitorowanie i prognozowanie działań (ang: M&T) [9] dotyczących zużycia energii jest formą gromadzenia, interpretowania i przekazywania informacji dotyczących tej kwestii. M&T dokonuje pomiarów i ustaleń miejsc, w których z powodzeniem można szukać oszczędności energii poprzez podjęcie odpowiednich działań. W jednej z poprzednich części artykułów z serii zarządzania energią prezentowany był benchmarking energetyczny a także jakościowa linia charakterystyczna zużycia energii maszyn (JLH) będąca informacją o stanie energetycznym maszyny. Informacje te są pierwszymi ważnymi danymi. Mapa energetyczna jak i M&T jest kolejnym drugim czynnikiem dostarczającym istotnych informacji z kolejnego poziomu dla działań analitycznych.

Zbieranie danych same w sobie nie dostarcza żadnych konkretnych rezultatów. Potencjalne korzyści w postaci efektywności energetycznych nie mogą w żaden sposób zostać osiągnięte tylko na podstawie zbierania danych i przygotowania raportów. Zebrane dane muszą być przekazane do konkretnych analiz przeprowadzanych przez kompetentnych ludzi, którzy na ich podstawie są w stanie wysunąć odpowiednie wnioski i prognozować kierunki działań [5]. Dla każdej instytucji ilość informacji i wytycznych dotyczących działań M&T musi być odpowiednia do wielkości wydatków energetycznych. M&T może wymagać udoskonalenia zdolności pomiarowych w zależności od alokacji środków finansowych. Nigdy nie należy podejmować działania polegającego na wszechstronnym instalowaniu tychże narzędzi na każdej maszynie. Każdorazowo należy ustalić gdzie zainstalować narzędzia pomiarowe, aby możliwe było obniżenie kosztów użytkowania. Zapisywanie zużycia energii z głównego licznika nie daje precyzyjnych informacji o stanie jednostkowym urządzeń i maszyn, a tym samym menadżerowie nie są w stanie właściwie działać. Prosta logiczna linia pomiarowa zużycia energii dla podjęcia odpowiednich działań M&T (rys. 3) pozwala właściwie alokować koszty związane z instalacją urządzeń pomiarowych w różnorodnych obszarach jednostek produkcyjnych.

Systemy pomiaru energetycznego można w prosty sposób połączyć w jedną całość korzystając z sieci bezprzewodowej lub Internet w celu dynamicznej kontroli i pomiaru. Technologie te są podstawą utworzenia koncepcji automatycznego zarządzania i podejmowania działań (ang: aM&T). Koncepcja ta może zostać rozszerzona na pomiary kosztów w indywidualnych jednostkach. Pozwala to ukierunkować działania zmierzające do obniżenia zużycia energii w miejscach ich największej konsumpcji [9].



Rejestracja danych, analiza mapy energetycznej, przetwarzanie, prognozowanie, szacowanie, ocena, wnioski, optymalizowanie

Rys. 3. Podstawowy zarys struktury układu monitorowania zużycia energii, szczegółowa mapa energetyczna [9, 13]

Czynniki warunkujące obciążenia energetyczne w procesie wtryskiwania

Wtryskiwanie tworzyw termoplastycznych jest jedną z najbardziej popularnych technologii przetwórstwa polimerów, która na przełomie ostatnich lat znalazła w swojej naturze wiele udoskonaleń technicznych i procesowych pozwalających na racjonalne zarządzanie zasobami energetycznymi w trakcie realizacji procesu [4]. Pomimo tych wszelakich udoskonaleń nadal od 60 do 85% energii jest zużywana na wykonywanie ruchów i zadań operacyjnych przez wtryskarkę. Od 15-40% energii zużywanej jest na podgrzanie i uplastycznienie tworzywa przez różnicowane konwencjonalne wtryskarki hydrauliczne. Energia jest pochłaniana w mniejszym lub większym stopniu w zależności od tego czy tworzywo jest przetwarzane lub nie jest, a wtryskarka jest włączona. Istotne, wobec czego jest fakt, aby wtryskarka była obciążona procesowo i podstawowo a nie tylko podstawowo [5]. Wspomniany fakt o niewielkiej ilości energii wymaganej na uplastycznienie tworzywa skutkuje tym, iż w niewielkim stopniu rodzaj przetwarzanego tworzywa polimerowego wpływa na całkowite obciążenie procesowe

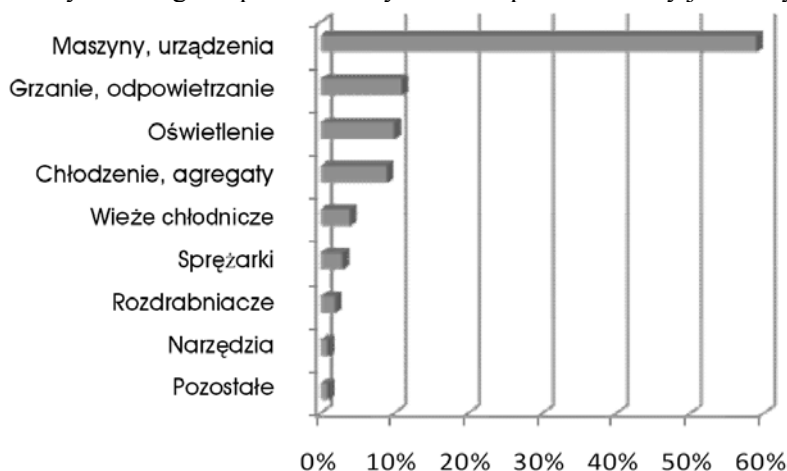
we. W obecnych czasach przetwórcy dysponują wtryskarkami o zróżnicowanym zasilaniu: hydraulicznym, elektrycznym lub hybrydowym [1]. Z uwagi, iż najmniej efektywnymi energetycznie są jak do tej pory wtryskarki hydrauliczne, a nadal szeroko pracujące w przemyśle przetwórstwa polimerów, zostanie wskazanych kilka punktów, na które warto zwrócić uwagę, aby bardziej wpasować się w kanon efektywności energetycznej jednostek hydraulicznych [4, 9]. Wtryskiwanie tworzyw polimerowych jest procesem cyklicznym, podczas którego występuje zmienny pobór energii w trakcie realizacji określonych cykli. Całkowita ilość energii pochłaniana na realizację procesu uzależniona jest między innymi od konstrukcji wypraski, przetwarzanego tworzywa oraz nastaw procesowych parametrów przetwórstwa [1]. Wytwarzanie wyprasek można traktować, jako zakończenie kompletnych dwóch cykli. Tworzywo, które jest uplastycznione w jednym cyklu jest wtryskiwane w drugim, podczas gdy tworzywo do następnego cyklu będzie uplastycznione. Chłodzenie rozpoczyna się od zakończenia fazy docisku danego cyklu jest zazwyczaj jednym z najbardziej energochłonnych i czasochłonnych ogniw [6].

Do wybranych komponentów konwencjonalnej wtryskarki hydraulicznej odpowiedzialnych za konsumpcję energetyczną zalicza się [4, 9]:

- zasilanie sieciowe i przyłącze chłodzenia – chłodzenie oleju pochłania do 50% energii zasilania sieciowego, co jest zamieniane na straty ciepłne i obciążenie układu chłodzenia,
- zasilanie wsadem i jednostka wtryskująca – mechanizm napędowy ślimaka (obrotowy i posuwisto zwrotny) dysza wtryskująca i zawór zwrotny ślimaka,
- elementy grzejne układu uplastyczniającego – niezbędne dla zaistnienia procesu uplastyczniania tworzywa,
- jednostka zamykania – odpowiedzialna za mocowanie formy i wytworzenie odpowiedniej siły zwarcia na etapie wtryskiwania oraz zamknięcia formy podczas chłodzenia wypraski i jej końcowego uwolnienia,
- system kontrolny – odpowiedzialny za rejestrowanie poszczególnych stanów i ruchów maszyny.

Energia zostaje na wejściu wprowadzona i pochłonięta przez maszynę głównie na wytworzenie odpowiedniej siły hydraulicznej konsumowanej na dane procesy, także na nagrzanie cylindra i przekazanie ciepła do tworzywa, następnie usunięcia ciepła przez system chłodzący i w niewielkim stopniu przez samą wypraskę, która opuszcza formę. Możliwym jest obliczenie zbalansowania energetycznego pomiędzy realizowanym procesem a ilością energii niezbędnej na uplastycznienie i wtrysnięcie tworzywa. Wiadomym jest, że głównie to maszyna i przyłącza termalne i chłodzące są głównymi ogniwami zużycia energii. Zużycie energii w procesie wtryskiwania dotyczy nie tylko energii pochłanianej przez maszynę, lecz również przez szereg innych towarzyszących składowych wykorzystywanych podczas realizacji cyklu [1, 2]. Wtryskarki wykorzystują około

60% kosztów przeznaczonych na konsumpcję energii, wobec czego działania na wtryskarkach stanowią największe możliwości zmniejszenia ich wydatków. Rozkład zużycia energii w procesie wtryskiwania przedstawiony jest na rys. 4.

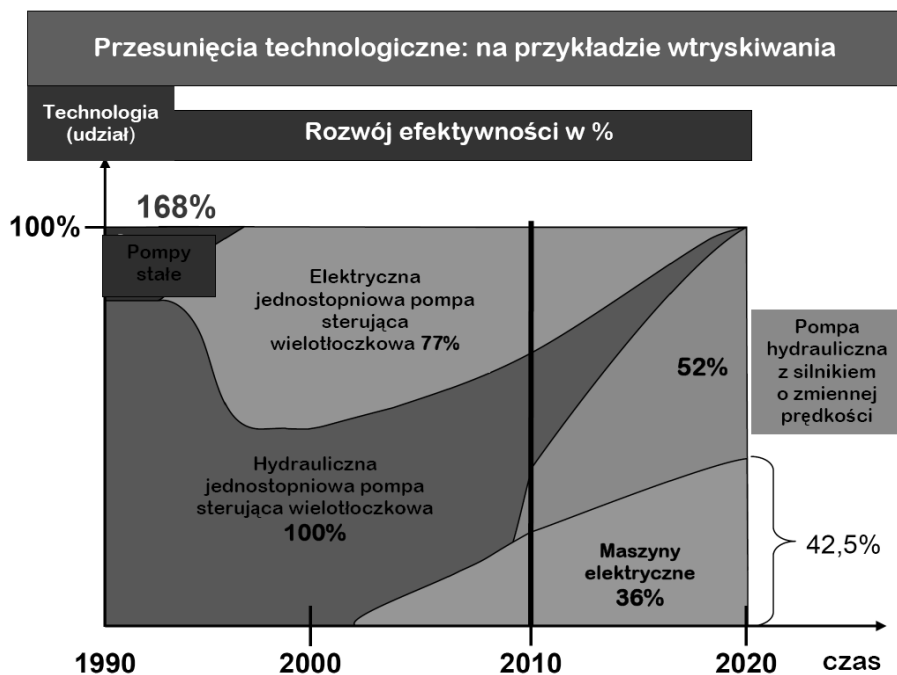


Rys. 4. Podział zużycia energii w procesie wtryskiwania [7]

Zużycie prądu w procesie wtryskiwania zależy od wielu czynników, na które ma się wpływ i można w nie ingerować, aby ograniczyć ich zużycie. Głównym czynnikiem jest projektowanie, rozmiar oraz stopień zróżnicowania elementu wytwarzanego jakim jest wypraska. Pobór energii w procesie wtryskiwania zależy m.in. od gabarytów wypraski, ponieważ im większa jest część elementu tym większa moc jest potrzebna do jego wytworzenia. Zależy to również od rdzeni hydraulicznych formy czy konieczności lokalizowania zaprasek. Kolejnym czynnikiem wpływającym na efektywność energetyczną jest zarządzanie urządzeniami pomocniczymi, do których zalicza się: suszarki, młyny (rozdrabnianie mechaniczne). Stosując nowszej generacji urządzenia oraz określając odpowiednie parametry urządzeń, można w znacznym stopniu zmniejszyć zużycie energii. Pamiętając o właściwościach materiałów wykorzystywanych do produkcji elementów, trzeba uwzględnić temperaturę płynięcia oraz krzepnięcia tworzywa. Jest to ważne, ponieważ materiały charakteryzujące się wysoką temperaturą krzepnięcia oraz płynięcia potrzebują dłuższego chłodzenia bądź nagrzewania, co zwiększa zużycie energii na te procesy. Elementami wtryskarek, które zużywają prąd są m.in. silniki i pompy wykorzystywane podczas całego cyklu produkcji. Należy uwzględnić także takie urządzenia pomocnicze, które nie wiążą się znacznie z samą produkcją wytworów, lecz z całą linią produkcyjną. Do tych urządzeń zalicza się przenośniki taśmowe, linie pakujące i roboty, które są w pełni zautomatyzowane i potrzebują znacznej ilości energii [1, 6, 7, 9].

W procesie wtryskiwania znaczne zużycie energii przypada na elementy grzejne układu uplastyczniającego i napędy elektryczne, hydrauliczne. Pozostała część zużywana jest przez urządzenia peryferyjne. Na wysokość wykorzystywanej energii wpływ ma również szybkość wtryskiwanego tworzywa do formy oraz szybkość jego chłodzenia. Podczas szybkiego wtryskiwania elementu bardzo duże znaczenie ma także odpowiednie odpowietrzenie formy [1, 2].

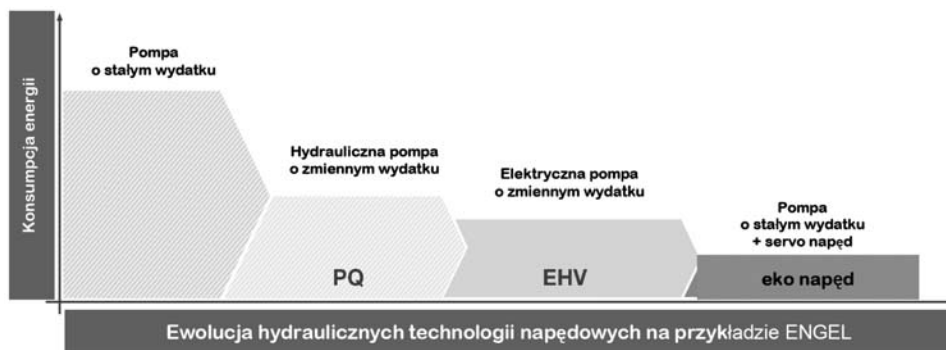
Poprawienie efektywności energetycznej często wynika z wprowadzenia elektrycznych wtryskarek, co daje przewagę nad konkurencją wykorzystującą urządzenia typowo hydrauliczne. Wprowadzenie tegoż parku maszynowego powoduje z reguły zmniejszenie zużycia energii nawet o 60% oraz niższe koszty jego utrzymania [8]. Także relatywne wielkości oszczędności energii w fazie realizacji procesu wtryskiwania wynikają z wchodzenia na rynki technologicznych przesunięć dotyczących efektywnych energetycznie systemów wykonawczych występujących w maszynach – wtryskarkach. Prognozę trendu do roku 2020 [12] zobrazowano na rys. 5.



Rys. 5. Prognoza trendu 2020 przesunięć dotyczących efektywnych energetycznie systemów wykonawczych występujących w wtryskarkach [12]

Nowe generacje maszyn posiadają lepszą efektywność energetyczną, co prowadzi w konsekwencji do zmniejszenia energochłonności. Terminowe przeglądy maszyn, urządzeń, narzędzi przetwórczych (w tym form) jak również ich konserwacje wpływają na obniżenie zużycia tak cennego źródła, jakim jest energia

[1]. Często zakup nowych maszyn lub wymiana ich na innowacyjny park maszynowy daje ogromne możliwości, a finanse poniesione na ich zakup szybciej się zwracają niż kupno maszyn używanych. Stosowanie nowych urządzeń pomocniczych do tego procesu ma również wielkie znaczenie, ponieważ urządzenia to pomimo tego, że pochłaniają energię, w znacznym, stopniu obniżają koszty energii całego procesu. Nie bez znaczenia jest także modernizowanie starszych maszyn w zakresie zastosowania innowacyjnych napędów o cechach eko (rys. 6) [15].

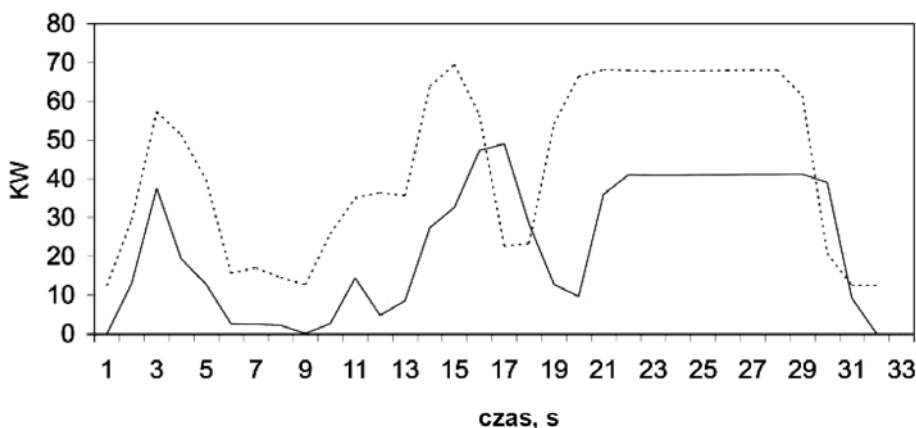


Rys 6. Ewolucja hydraulicznych technologii napędowych [15]

Chłodzenie w procesie wtryskiwania jest bardzo ważnym czynnikiem, dzięki któremu po wtrysnięciu i dociśnięciu tworzywa może być po chwili wyjęty z formy detal. Zarówno zwiększenie jak i poprawienie chłodzenia formy umożliwiają kanały chłodzące. Ich celem jest szybkie i jednolite schłodzenie, co prowadzi do redukcji czasu cyklu wtryskiwania o 20÷50% [4]. Proces chłodzenia w przetwórstwie jest jednym z najdroższych procesów. Aby obniżyć koszty chłodzenia i ustalić je na jednakowym poziomie używa się urządzeń zwanych „chillerami”. Agregat używany jest do chłodzenia urządzeń i hydrauliki, w którym czynnikiem chłodzącym jest woda.. Nowoczesne zastosowania oferują wiele sposobów, które mają za zadanie minimalizowanie zużycia energii. Do takich zalicza się między innymi zintegrowanie chłodzenia swobodnego, zastosowanie elektrycznych rozszerzalnych zaworów oraz zmienna praca wentylatorów i kompresorów w zależności od zapotrzebowania. W procesie wtryskiwania chiller zużywa od 5 do 15% zapotrzebowania całej energii. Dzięki zastosowaniu nieskomplikowanych urządzeń można zredukować zużycie energii do przedziału między 10 a 80%. Należy pamiętać, że zastosowanie nowego urządzenia wiąże się z wdrożeniem i zainstalowaniem sterującego nim oprogramowania. Zmniejszając zużycie energii należy przeprowadzić analizę elementarnych oraz nowych jednostek. Aby osiągnąć większe korzyści stosuje się również podwójne obiegi separujące formę oraz całą hydraulikę maszyny. Poprzez zastosowanie kilku obiegów w chillerach możliwe jest stworzenie indywidualnych obiegów, co

zwiększa efektywność energetyczną z braku mieszania mediów odbierających ciepło. „Chiller” jest urządzeniem, którego zadaniem jest poprawienie efektywności chłodzenia procesu. Jest to bardzo ważne w przetwórstwie, gdyż temperatura chłodzenia może wpływać, na jakość wykonanego produktu. Urządzenia te mają za zadanie utrzymywanie ciągłej stałej temperatury w celu poprawienia efektywności całego procesu. Ważnym także czynnikiem jest również izolacja cieplna instalacji przesyłu zimna i ciepła, dzięki czemu możliwe jest osiągnięcie dużych wartości zaoszczędzenia energii nawet w granicach 50% [9].

Wtryskarki wyposażone są zwykle w duże pompy hydrauliczne otwierania i zamykania formy oraz wtrysku materiału. Zmienna szybkość napędów (VSD) czy napędów zupełnie nowej generacji (eco servo napęd) to najlepsze rozwiązanie tego typu, dążące do obniżenia zużycia energii silników działających z określoną prędkością. VSD dopasowuje prędkość silnika elektrycznego do zapotrzebowania w produkcji tworzywa. Stosowanie VSD pozwala na lepszy proces kontroli pracy wielu silników, zmniejszenie hałasu, zużycia eksploatacyjnego elementów i popytu na układy hydrauliczne. Rysunek 6 przedstawia czas trwania cyklu wtryskiwania, w którym całkowity czas wynosi 31,5 sekundy, a poszczególne czasy dotyczą: wtrysku – 3 s; docisku – 3,4 s; chłodzenia – 10,4 s; uplastyczniania – 10,2 s; otwarcia formy – 2 s; uwolnienia wypraski – 2,5 s. [7].



Rys. 6. Cykl wtryskiwania: linia ciągła z VSD, linia przerywana bez VSD [7]

Ważnym czynnikiem w procesie wtryskiwania jest także temperatura formy. Jakość formowanych powierzchni wzrasta wraz ze wzrostem temperatury, zaś wyższe temperatury powodują wydłużenie czasu cyklu procesu. Aby zachować wysoką, jakość powierzchni przy stałym czasie cyklu wykorzystuje się innowacyjną technologię RHCM [4]. Polega ona na szybkim nagrzewaniu i chłodzeniu formy przy uniknięciu wad powierzchniowych. Gwałtowne nagrzewanie wytwarza się dzięki wykorzystaniu pary i elektrycznych opasek grzejnych na narzędziu, zaś chłodzenie dzięki zastosowaniu przepływu zimnej cieczy. Skrócenie

czasu cyklu zmniejsza pobór energii. Możliwe jest wówczas jej zaoszczędzenie bądź przeznaczenie jej do innych celów [1, 13].

Aby zmniejszyć zużycie energii elektrycznej należy sprawdzać parametry procesu wtryskiwania oraz urządzeń pomocniczych w celu zapewnienia ich równego poziomu pracy. Niestójność w tym zakresie może powodować niestabilny proces, co w efekcie może doprowadzić do wadliwego działania systemu. Należy sprawdzić czy siła rozprężno – zaciskowa nie jest wyższa od wymaganej oraz czy czas chłodzenia nie jest zbyt długi. Krótszy czas cyklu pozwala osiągnąć mniejsze pochłonięcie energii. Projektowanie elementów o dokładnych wymiarach oraz ograniczanie odpadów produkcji pozwala zredukować zużycie mocy oraz zwiększa efektywność produkcji. Należy używać odpowiednich narzędzi i maszyn z odpowiedniego materiału, aby ograniczyć poprawki. Odpowiednio zarządzane urządzenia pomocnicze np. do chłodzenia, ogrzewania bądź suszenia pozwalają na niskie równomierne wykorzystywanie energii. Do ograniczenia jej zużycia również zalecane jest stosowanie odpowiednich wymienników ciepła oraz kanałów chłodzących. Zarówno czas chłodzenia jak i czas grzania powinien być tak dobierany, aby go zminimalizować [5, 6].

Wtryskarka w procesie wtryskiwania potrzebuje znaczącego zapotrzebowania mocy, aby jej praca przynosiła oczekiwane efekty. Zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego wtryskarki może przyczynić się do zmniejszenia mocy silnika. Do produkcji należy wybierać odpowiednie narzędzia oraz wybierać szybkie metody. Czas, jaki przeznaczany jest na chłodzenie produktu to więcej niż 50% czasu trwania całego cyklu. Efektywność zużycia energii można poprawić poprzez zmniejszenie czasu trwania cyklu chłodzenia (układy konformalne) [5], co przynosi duże korzyści w postaci krótszego cyklu produkcji oraz zmniejszenie zużycia energii.

Podsumowanie

Przeszkodą we właściwym zarządzaniu kosztami energii jest brak formalnej struktury i zrozumienia podstawowych zasad oraz poznania czynników warunkujących zużycie energii. Kwestie związane z organizacją i zarządzaniem energią wiążą się z pewnymi podstawami: mapa energetyczna, monitorowanie, prognozowanie. Kolejno można stosować bardziej szczegółowe techniki testowania, przechodząc od tempa produkcji do indywidualnego testowania danych wzorcowych z bieżącymi maszyn i urządzeń, opartego na wielkości produkcji. Czynniki warunkujące efektywność energetyczną powinny być równolegle wpisane w proces zarządzania energią oraz indywidualnie dostosowane do potrzeb przedsiębiorstwa. Algorytm postępowania winien zawierać zasadnicze zagadnienia [1, 2, 6 11]:

- wpływ na środowisko,
- korzyści finansowe,
- sposób w jaki organizacja używa energii,

- co organizacja może poczynić, aby zminimalizować zużycie energii,
- indywidualny wkład pracowników.

Dowodzono, że procesy przetwórstwa jak i same wyroby z tworzyw sztucznych mają potencjał w zakresie zrównoważonego rozwoju [3] w tym minimalizacji zapotrzebowania energii [12]. Na przetwórców wywierana jest więc coraz większa presja, aby obniżyć zużycie energii podczas procesu wytwarzania. Uruchamianie europejskich mechanizmów projektowych np. projekt EUPLA-STVOLTAGE, porozumień [11] i innych światowych działań [13] jest czynnikiem warunkującym promowanie znamion efektywności energetycznej w sektorze przetwórstwa polimerów. Wiele zróżnicowanych osiągnięć w zakresie nowoczesnych maszyn o znamionach Industry 4.0 oraz wysokim potencjale efektywności energetycznej, rok rocznie jest promowanych w ramach największych targów przetwórstwa tworzywa [16].

Literatura

- [1] Jatinder Madan, Mahesh Mani, Jae Hyun Lee, Kevin W. Lyons: *Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study*. Journal of Cleaner Production, Volume 105, 15 October 2015, s. 157–170.
- [2] Elduque A., Elduque D., Javierre C., Fernández A., Santolaria J.: *Environmental impact analysis of the injection molding process: analysis of the processing of high-density polyethylene parts*. Journal of Cleaner Production, Volume 108, Part A, 1 December 2015, s. 80–89.
- [3] Giret A.: *Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review*, Journal of Manufacturing Systems, Volume 37, Part 1, October 2015, s. 126–140.
- [4] Spiering T.: *Energy efficiency benchmarking for injection moulding processes*, Original Research Article, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 36, December 2015, s. 45–59,
- [5] Praca zbiorowa pod red. Sasimowski E.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Aspekty technologiczne i nowe trendy*. Część 1. Lublin 2015
- [6] Kent R., *Energy management in plastics processing*, Plastics, Rubber and Composites, 2008 vol. 37
- [7] Low Energy Plastics Processing, Reduced Energy Consumption In Plastics Engineering European Best Practice Guide, Intelligent Energy – Europe Programme 2006
- [8] T. Jachowicz, M. Iwanicki, *Charakterystyka wtryskarek elektrycznych*, Teka Kom. Bud. Ekspl. Masz. Elektrotech. Bud. OL PAN, Lublin 2008,
- [9] Kent R., 2013, *Energy management in plastics processing. Strategies, targets, techniques and tools*. Plastics Information Direct, London

- [10] Źródło-Loda M.: *Benchmarking – nowoczesna koncepcja zarządzania organizacją. Efektywność zarządzania zasobami organizacyjnymi*, pod redakcją Piotra Lenika
- [11] Ruijter E.: *Industry takes the lead: voluntary agreement on energy efficiency in the EU plastic converting sector*. ECEEE 2012 summer study on energy efficiency in industry.
- [12] Euromap, Energy Efficiency: Plastics and Rubber Machines Well Placed! www.euromap.org (dostęp 18.10.2016)
- [13] <http://energy.gov/> U.S. Department of Energy 1000 Independence Ave., SW Washington, DC 20585 (dostęp 25.10.2016)
- [14] Plastics – the Facts 2016. *An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Plastics Europe, Brussels – Belgium 2016. www.plasticseurope.org (dostęp 26.10.2016)
- [15] Napędy eco drive <http://www.engelglobal.com/pl/> (dostęp 26.10.2016)
- [16] K 2016 Preview: Injection Molding, <http://www.ptonline.com/> (dostęp 26.10.2016)

11. Wybrane możliwości scenariusza wytwarzania gniazd form nowej generacji dla przetwórstwa rodmuchowego i wtryskowego tworzyw z zastosowaniem technologii addytywnych

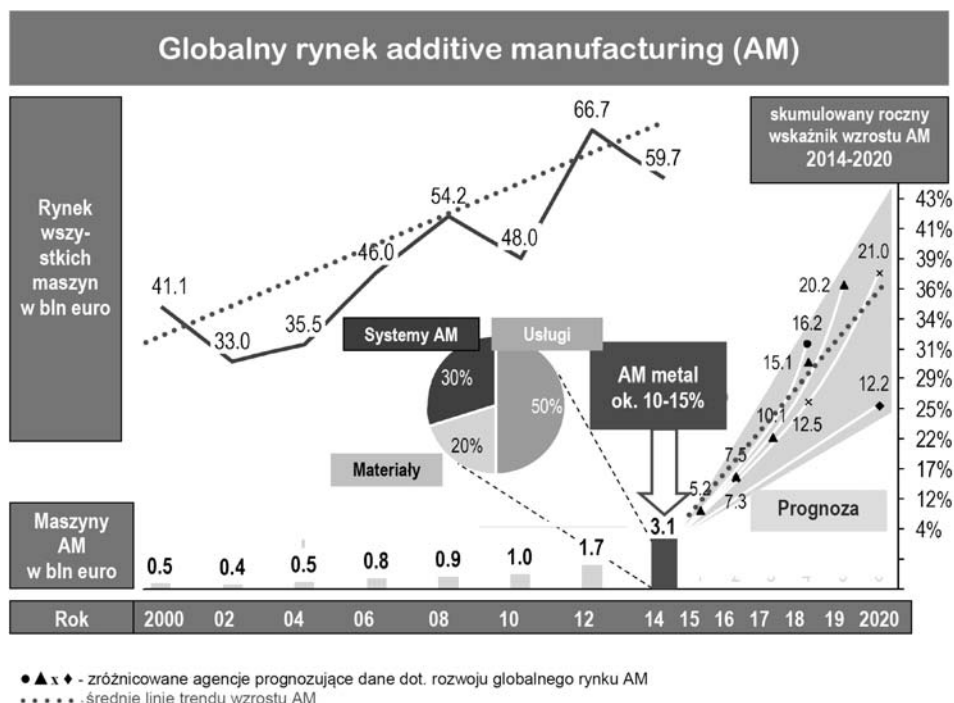
Wprowadzenie

Przetwórstwo tworzyw termoplastycznych zarówno metodą wtryskiwania jak i rodmuchiowania jest jedną z najbardziej popularnych metod produkcji wyrobów, w tym opakowaniowych z tworzyw sztucznych, ponieważ odznacza się stosunkowo wysoką produktywnością złożonych kształtów, przy stosunkowo niewielkich nakładach [10, 17, 18]. Europejskie dane dotyczące przetwórstwa tworzyw [1] (rys. 1) świadczą, iż branża przetwórstwa tworzyw sztucznych odgrywa istotną rolę z punktu widzenia wzrostu gospodarczego dzięki innowacjom w wielu sektorach europejskiej gospodarki, m.in. opakowaniach, w motoryzacji itp. Liczba przetwarzanych tworzyw ciągle rośnie (średnio 4,5% rocznie), a w Polsce [2] zauważa się tendencje do szybkiego wzrostu zużycia tworzyw sztucznych podczas realizacji procesów produkcji różnorodnych nowych wytworów polimerowych.



Rys. 1. Zapotrzebowanie tworzyw sztucznych w Europie według kraju [1]

W Polsce podczas realizacji procesów przetwórstwa tworzyw sztucznych w roku 2015 przetworzono ok. 3,1 mln ton (w całej Europie 49 mln ton) [1], co oznacza 6,1 % wzrost w porównaniu z rokiem 2014. Utrzymuje się tendencja szybszego wzrostu zużycia tworzyw w krajach Europy Środkowej i Wschodniej w porównaniu z pozostałą częścią kontynentu. Średnia europejska wzrostu zapotrzebowania na tworzywa w roku 2015 szacowana jest jedynie na 2,1%. Ilości tworzyw zużywane na potrzeby przetwórstwa w Polsce stanowią ok. 6,6 % średniego zapotrzebowania europejskiego. Polska pozostaje na szóstym miejscu pod względem zapotrzebowania na tworzywa po w Europie po Niemczech, Włoszech, Francji, Hiszpanii. Łączne obroty dwóch głównych segmentów branży tworzyw sztucznych w Polsce (produkcja tworzyw w formach podstawowych oraz przetwórstwo) szacowane są na ok. 17,2 mld euro. Taki stan rzeczy wymusza na przetwórcach tworzyw sztucznych przeróżne mechanizmy zachowawcze i rynkowe, które wywołują chęć i wręcz konieczność wprowadzania nowych technologii produkcji w tym narzędzi do przetwórstwa tworzyw polimerowych przy wykorzystaniu technologii addytywnych umożliwiających rewolucjonizowanie tej branży o znamionach Industry 4.0 jak i spełnieniu kanonów zrównoważonego rozwoju [4, 51]. Upatruje się także w najbliższych latach znaczący rozwój rynku addytywnego w tym maszynowego (rys. 2), który jak do tej pory stanowi poniżej 1% w stosunku do obecnych maszyn stosowanych w obróbce narzędziowej [36]. Także zauważalną tendencją na rynku jest dążenie producentów do skracania serii produkcyjnych, przy jednoczesnym zwiększaniu częstotliwości wprowadzania nowych wyrobów na rynek. Konsekwencją tych działań jest coraz silniejsza presja wywierana na producentach form przetwórczych (rozdmuchowych, wtryskowych), w kierunku wykonywania pełnowartościowych narzędzi do produkcji krótkoseryjnych, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów wykonania zarówno samego narzędzia, jak i późniejszej produkcji z jego wykorzystaniem. Stąd też niezwykle istotnym jest, aby producenci narzędzi dla przetwórstwa byli w stanie oferować wyroby umożliwiające skracanie czasu cyklu wtrysku, czyli zwiększania wielkości produkcji wypraski w jednostce czasu. Ciągłym jest także dążenie do podnoszenia jakości wytworów (wtryskiwanych, rodmuchowanych) oraz umożliwienia produkcji coraz bardziej ich zaawansowanych geometrycznie kształtów [19].



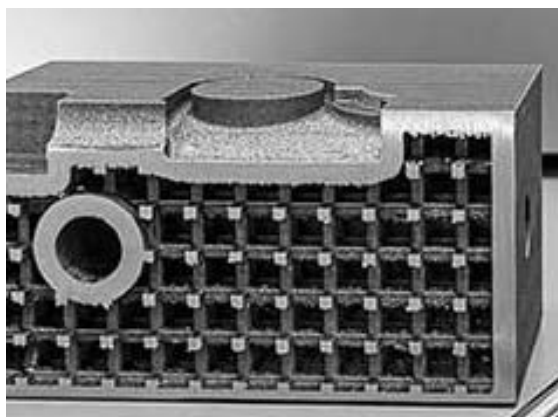
Rys. 2. Globalny rynek technologii addytywnych i jego prognoza rozwoju do roku 2020 [36]

Technologie ubytkowe na tle addytywnych

Wytwarzanie form wtryskowych czy rozdmuchowych do przetwórstwa tworzyw tradycyjnymi metodami obróbki ubytkowej było już znane na samym początku XX wieku. W latach 90-tych XX narodziła się nowa technologia spiekania proszków metali z wykorzystaniem lasera [5]. Z tego powodu rozpoczęły się na świecie w środowiskach naukowych próby zastosowania tej klasy technologii przyrostowego kształtowania przedmiotów w odniesieniu do przeróżnych dziedzin w tym do przetwórstwa tworzyw polimerowych. Pierwsze szersze europejskie zastosowania, będące następstwem obiecujących badań naukowych [15], tej klasy technologii podjęto po roku 2008. Zaadaptowano wtedy technologie przyrostowe spiekania proszków metali w europejskim i światowym przemyśle przetwórstwa tworzyw, do realizacji budowy gniazd narzędziowych form wtryskowych. Jak do tej pory nie wykorzystuje się szerzej technologii addytywnych do budowy elementów gniazd rozdmuchowych.

Dotychczasowe technologie wytwarzania metalowych form przetwórczych opierają się głównie o technologie ubytkowe, które do chwili obecnej są czasochłonne i nie pozwalają na znaczące skrócenie czasu wytwarzania tychże zaawansowanych narzędzi przetwórczych. Trzeba mieć na uwadze, iż efektywność energetyczna i czasowa wytwarzania form oraz realizacja procesów produkcyj-

nych jest głównie uzależniona od konstrukcji i technologii głównej składowej narzędzi, jakim są gniazda formy. Ubytkowa technologia produkcji gniazd form wtryskowych nie pozwala na sprostanie kryterium efektywności energetycznej i czasowej. Natura technologii ubytkowych, jak do chwili obecnej, nie uległa takiej ewaluacji, która pozwoliłaby na wytwarzanie zaawansowanych wewnętrznie struktur geometrycznych w budowanych narzędziach [19]. W przypadku jej zastosowania można mówić, co najwyżej o możliwości wytworzenia zaawansowanych struktur geometrycznych na powierzchni zewnętrznej gniazd form, przy stosunkowo dużych nakładach czasowych, wynikających z liczby następujących po sobie operacji technologicznych. Taki stan rzeczy powiązany jest również z dosyć wysokimi nakładami energetycznymi w trakcie realizacji tychże zabiegów. Odpowiedzią na te zagadnienia stają się technologie addytywnego (przyrostowego) kształtowania powierzchni [3, 4, 6, 9, 11-14, 19, 51], gdyż nie posiadają praktycznie ograniczeń, co do budowy zaawansowanych struktur geometrycznych wewnątrz narzędzia. Technologie te, jak do tej pory, nie mają jeszcze wysokiej popularności wśród producentów narzędzi w Polsce i zaczynają dopiero nabierać znaczenia. W kierunku ich zaawansowanego zastosowania nadal prowadzonych jest wiele badań w ośrodkach naukowych i badawczo-rozwojowych [36]. Oczywiście należy zaznaczyć, że techniki szybkiego wytwarzania narzędzi posiadają wrodzone cechy, których w żadnym wypadku nie posiadają tradycyjne techniki współczesnych technologii wytwarzania: proces addytywny, możliwość zmian materiałowych (tworzenie hybryd), tworzenie dowolnie zaawansowanych kształtów geometrycznych, tworzenie struktur porowatych – gąbczastych (ang. lattice structures [20, 37] rys. 3). Jednakże, aby móc wykorzystać technologie addytywne w innowacyjnych procesach produkcyjnych, niezbędne jest ich wsparcie nowatorskimi rozwiązaniami informatycznymi oraz bardzo nowoczesnym parkiem maszynowym, odpowiedzialnym za dalszą obróbkę detalu, niezbędną po procesie addytywnego budowania narzędzi.



Rys. 3. Struktura elementu narzędziowego typu lattice [37]

W odniesieniu do wykorzystywania technologii przyrostowych w branży produkcji narzędzi dla przetwórstwa termoplastów, firmy nie wykorzystują jeszcze w pełni możliwości tychże technologii, głównie z uwagi na brak dostatecznej wiedzy. W szczególności technologie przyrostowe nie są, jak dotąd w Polsce, wykorzystywane w procesach wytwarzania struktur wewnętrznych o budowie porowatej (gąbczastej) [37] oraz zaawansowanych geometrycznie turbulentnych progów w kanałach chłodzących.

Z uwagi na istniejące cechy świadczące o dynamicznie rozwijającym się zapotrzebowaniu rynkowym na wyroby z tworzyw sztucznych, coraz częstsze krótkoseryjne partie produkcyjne, regulacje unijne, wymogi rynku, konieczność inwestowania w technologie przyjazne środowisku itd. [38, 51], technologia wytwarzania form wtryskowych i rozdmuchowych do przetwórstwa tworzyw polimerowych wymaga niekonwencjonalnego podejścia do etapu wytwarzania form (gniazd) dedykowanych do produkcji wytworów z tworzyw sztucznych.

W literaturze przedmiotu można odnaleźć wiele artykułów o postępującej ewaluacji w zastosowaniu technik generatywnych do budowy narzędzi gniazd formujących do wtryskiwania tworzyw. Istnieją wzmianki, iż techniki te służyły na samym początku jedynie do tworzenia modeli fizycznych gniazd w celu sprawdzenia poprawności działania współpracujących elementów [24], minimalizacji czasów zwłoki wynikających z metody prób i błędów itp. [25, 26, 27]. Dalszy rozwój technik przyrostowych zapoczątkował ich zastosowanie w odniesieniu do intensyfikowania i uzyskania zamierzonego chłodzenia wypraski z tworzywa oraz jego stanu strukturalnego w gnieździe formującym poprzez zastosowania kanałów konformalnych [31, 32, 33]. Należy także zaznaczyć, że charakterystyka chłodzenia jest uzależniona od materiału, z którego jest wykonane narzędzie. Ten punkt zaczepienia stał się momentem, od którego naukowcy i inżynierowie zapoczątkowali wykonywanie konformalnych kanałów chłodzących w gniazdach formujących wykonanych z materiałów o wysokiej przewodności cieplnej [23, 28, 30]. Tworzono też przeróżne hybrydy materiałowe [29, 30, 34] gniazd narzędziowych w celu osiągnięcia gradientowości chłodzenia w gnieździe formującym [35].

Wśród najistotniejszych aspektów możliwości wykorzystania technologii addytywnych w budowie narzędzi do przetwórstwa rozdmuchowego i wtryskowego należy wskazać następujące możliwości [5–35]:

- zaprojektowania i wykonania szeregu nowatorskich rozwiązań konstrukcyjnych, które w znaczący sposób polepszają parametry technologiczne procesu przetwórstwa (m.in. skracają czas trwania cyklu nawet o 30%, zmniejszają liczbę detali wadliwych nawet o 70% w stosunku do technologii tradycyjnych),
- produkcji narzędzi z całej gamy nowoczesnych materiałów (np. innowacyjne stopy metali w tym aluminium o podwyższonej przewodności cieplnej czy stopów bazujących na miedzi), które dotąd nie były wykorzy-

stywane w produkcji gniazd form np. gniazda formy mogą być budowane z aluminium o wysokiej przewodności cieplnej dochodzącej średnio do $110 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, a po dodatkowej obróbce cieplnej gniazda do $173 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ [9]. Należy zaznaczyć, że dla dotychczas wytwarzanych gniazd formujących przewodność cieplna wynosi około $25\text{-}30 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ [7],

- produkcji gniazd form w oparciu o materiały wysoce konduktywne łączone także w materiał hybrydowy, dzięki czemu istnieje możliwość uzyskania hiperkonduktywności narzędzi, czy gradientowości procesu chłodzenia wytworu w formie,
- uzyskania najszybszych czasów wytwarzania zaawansowanych technologicznie i geometrycznie gniazd form, pozwalającą na redukcję czasu wykonania formy nawet o 50% w stosunku do technologii powszechnie wykorzystywanych przez przemysł,
- produkcji form wtryskowych krótkoseryjnych pełnowartościowych, tzn. z zastosowaniem w gniazdach form rozwiązań zarezerwowanych dotychczas wyłącznie dla form seryjnych,
- produkcji form weryfikacyjnych krótkoseryjnych (10÷100 sztuk) na etapie rozwoju produktu [39],
- umożliwienie projektowania i wytwarzania kanałów chłodzących o niespotykanych dotąd cechach geometrycznych, tzw. turbulentnych kanałów chłodzących, kanałów adoptowanych do określonej charakterystyki jaką ma uzyskać wytwór,
- wytwarzania elementów narzędziowych gniazd form o cechach porowatych – strukturalnych, znacząco redukujących ciężar wagowy narzędzia, co wpływa na poprawę dynamiki pracy formy jak i minimalizację zapotrzebowania energetycznego,
- skrócenia czasu realizacji zamówienia wytwarzania gniazd form o około 40÷50% w stosunku do czasów notowanych w technologiach tradycyjnych,

- narzędzia charakteryzować się mogą znacznie podwyższoną efektywnością energetyczną przetwórstwa tworzyw, w gniazdach z kanałami konformalnymi o wysokiej przewodności cieplnej, na skutek zmniejszenia zużycia energii¹ oraz skrócenia jednostkowego czasu cyklu wytwarzania wytworu, poprzez zastosowanie nowych materiałów, nowatorskiej budowy kanałów konformalnych oraz zastosowaniu mostków termicznych wewnątrz gniazd.

Potencjalny scenariusz przebiegu projektowania i technologii wytwarzania zaawansowanych gniazd form

Poniżej przedstawiono scenariusz projektowania, wytwarzania oraz wdrożenia gniazd form do przetwórstwa tworzyw przy wykorzystaniu technologii addytywnych. W dalszej części rozdziału scenariusz ten jest określany jako: NSWGF – nowy scenariusz wytwarzania gniazd form. Propozycja zasadniczego scenariusza NSWGF składa się z trzech faz: I – projektowania wirtualnego, II – wykonanie zasadnicze elementów narzędziowych, III – kontrola wykonania i ustalenia listy optymalnych parametrów produkcyjnych.

FAZA I – projektowanie komputerowe

W wyniku realizacji fazy pierwszej powstają niezbędne projekty i rysunki wykonawcze, na bazie, których realizowany jest proces produkcyjny gniazd formujących w fazie II. Projektowanie komputerowe stanowi istotne podejście do tej kwestii w odniesieniu do dotychczas stosowanych rozwiązań w branży produkcji narzędzi dla przetwórstwa tworzyw sztucznych. Jednym z rozwiązań informatycznych możliwych do zastosowania w fazie pierwszej procesu produkcyjnego jest oprogramowanie o parametrach zbliżonych do Autodesk Within (zaawansowany program do projektowania lekkich struktur geometrycznych – gąbczastych) [20], które dotychczas spotykane było jedynie w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Faza programowania komputerowego nie tylko pozwala na zaprojektowanie narzędzia w sposób optymalny, zarówno pod kątem zużycia materiałów czy w zakresie parametrów technologicznych pracy formy. Innowacyjne podejście do kwestii procesu technologicznego pozwala zaprojektować rozwiązanie, które już na etapie projektowania zapewnia przeprowadzenie

¹ Przy założeniu przetwarzania 10000 kg (1tony) tworzywa polimerowego energia niezbędna na jego podgrzanie wynosi około 3,72 GJ. Zakłada się że 20% tej energii jest niezbędnej do nagrzania i ochłodzenia formy czyli 0,74 GJ [19]. Powoduje to, iż przy spełnieniu kryterium redukcji czasu cyklu w rozważanej technologii produkcji gniazd form na poziomie 40% można zaoszczędzić 0,3 GJ energii elektrycznej na tonę przetwarzanego tworzywa. Przy założeniu, że przetwórstwo wtryskowe pochłania rocznie w Europie zachodniej około 15 milionów ton tworzywa, można uzyskać relatywnie wysokie korzyści energetyczne w zależności od stosowania NSWGF.

pierwszego, pełnego testu pracy planowanego narzędzia, a także pozwoli na ustalenie ostatecznego kształtu wypraski, jaka uzyskiwana będzie w wyniku użycia rozważanej formy produkcyjnej. Dotychczasowe technologie pozwalają na przeprowadzenie pierwszego testu dopiero po zasadniczym wyprodukowaniu formy, co zwiększa koszty i wydłuża czas realizacji usługi.

Faza projektowania komputerowego ma możliwość oparcia o następujące etapy:

a) Zaawansowane efektywne projektowanie lub pozyskiwanie danych CAD 3D na podstawie wymagań klienta lub dostępnych modeli z inżynierii odwrotnej za pośrednictwem specjalistycznego oprogramowania typu CATIA V6 [40] lub NX Siemens [41] i inne podobnej klasy, a także modułów eksperckich reverse engineering, mould tooling design i mechanical surface design zapewniających szybkie i poprawne tworzenie danych. W wyniku tego etapu możliwe jest kompletne zamodelowanie (lub modyfikacja – u technologicznie) projektowanego wytworu, które przedstawione zostają klientowi do akceptacji. Oprócz zaawansowanego oprogramowania możliwe jest wykorzystanie skanera optycznego 3D w celu pozyskania geometrii wytworu. Etap ten kończy się wygenerowaniem optymalnego z punktu widzenia procesu produkcyjnego, projektu wypraski detalu, jaki ma być produkowany za pomocą tworzonej formy wtryskowej.

b) Drugi etap projektowania komputerowego to wykonanie wstępnych projektów kanałów konformalnych (w tym możliwości zastosowania nowatorskich rozwiązań jakimi są tzw. przegrody i progi turbulentne zwiększające właściwości termiczne gniazda – wymiany ciepła), ustalenie gabarytów formy, jej podziału i parametrów uwalniania wytworu. W wyniku etapu drugiego wygenerowane zostaną pliki 3D formy. W przypadku form wtryskowych nastąpi także automatyczne korygowanie kształtu wypraski lub gniazda formującego na podstawie danych symulacji wtryskiwania z oprogramowania typu MOldex3D, Simpoe, Moldflow, Cadmould, SigmaSoft [42], co w efekcie pozwala na prawidłowe wytworzenie danych do budowy fizycznych elementów składowych form.

c) Projektowanie i analizy specjalistycznych cech strukturalnych gniazd narzędziowych o wewnętrznej strukturze zróżnicowanej porowatości zapewniającej uzyskanie gradientowych cech narzędzia, co pozwoli na wytworzenie form o zrównoważonym lub zamierzonym stanie chłodzenia. Struktury porowate (typu lattice) pozwalają także na zapewnienie narzędziu określonych cech wytrzymałościowych przy obniżeniu wagi narzędzia i ilości materiału zużytego na wytworzenie gniazda. Realizacja tych założeń jest możliwa w klasie oprogramowania typu Autodesk Within Enhance. Etap ten pozwala na stworzenie projektu elementu narzędziowego o zoptymalizowanych parametrach wagi, struktury wewnętrznej, wytrzymałości mechanicznej (parametry te mają wpływ na cenę i właściwości termiczne – mosty cieplne). Etap ten stanowi innowacyjne podejście do kwestii projektowania narzędzi do przetwórstwa tworzyw sztucznych. Zastosowanie w rozważanym procesie produkcyjnym najnowszych narzędzi

projektowych stosowanych 10 lat temu jedynie w branży lotniczej i kosmicznej (np. Within Enhance), pozwala na uzyskanie niespotykanych dotąd możliwości produkcyjnych. Po pierwsze, zaprojektowanie określonych struktur gąbczastych wewnątrz gniazda innych elementów formy, wpływa na uzyskanie pożądanej wytrzymałości gniazda na napór ciśnienia szczególnie tworzywa wtryskiwanego. Obecnie szeroko stosowane technologie ubytkowe pozwalają jedynie na wykonanie wkładki z litego materiału, którego wytrzymałość z reguły jest 3 a nawet 4 krotnie wyższa od żądanej. Inaczej mówiąc, zastosowanie struktur gąbczastych w ma możliwość zoptymalizowania ilości wykorzystywanego materiału, wagi formy oraz jej kosztu wytworzenia. Po drugie zaś, możliwość projektowania struktur gąbczastych pozwala na wykonanie precyzyjnych mostków termicznych, których zadaniem jest kierowanie całego ciepła/chłodzenia, dostarczonego do kanałów konformalnych w kierunku jego odprowadzenia. Obecnie czynnik grzejący/chłodzący podawany do kanałów w gnieździe formy rozchodzi się równomiernie zarówno w stronę formowanego wytworu, jak i formy, co negatywnie wpływa na czas cyklu produkcyjnego, jak i koszt.

d) Analiza inżynierska polegająca na realizacji symulacji procesu wtryskiwania o parametrach zbliżonych do SigmaSoft lub Moldflow. Działanie to jest niezbędne do wykonania szeregu analiz konstytuowania cech wyprasek na poziomie projektowania formy wtryskowej. Na podstawie analiz i testów użytkownik jest w stanie określić zachowanie tworzywa w gnieździe podczas fazy wtrysku, docisku i chłodzenia oraz otrzymać pełną informację na temat deformacji detalu (odchyłek kształtu od wymagań rysunkowych) w postaci pliku txt z wypadkowymi wektorami kierunków deformacji. Całość symulacji jest powiązana z możliwością przeprowadzenia zrównoważonych i równoległych analiz inżynierskich dotyczących przepływu cieczy chłodzącej przez kanały konformalne (rozkład ciśnień, wydatki, prędkość czynnika, geometria kanałów, turbulencje przepływu) oraz jej wpływu na proces chłodzenia wypraski z tworzywa w gnieździe formującym. Na podstawie tych analiz konstruktor jest w stanie wprowadzić zmiany korygujące kształt gniazda przed przystąpieniem do fizycznych prac wykonawczych elementów gniazd formy wtryskowej. Wirtualna analiza inżynierska jest czynnikiem wpływającym na uzyskanie praktycznie większościowej kontroli nad przebiegiem zasadniczego etapu produkcyjnego formy. Możliwości, jakie daje innowacyjny proces projektowania komputerowego, pozwalają na praktycznie bezbłędne zaprojektowanie narzędzia, zarówno pod kątem jego pracy na maszynie (parametry technologiczne), jak i pod kątem parametrów wytworu, otrzymanego, jako efekt finalny procesu. Tradycyjne technologie pozwalają przeprowadzić testy zbliżone do omawianych dopiero na etapie tzw. pierwszej próby tj. w momencie faktycznego wyprodukowania formy i założenia jej na maszynę przetwórczą. Wobec powyższego można uznać, iż Faza I procesu technologicznego w ramach opisywanego scenariusza, charakteryzuje się nowatorskimi rozwiązaniami. Dzięki nim, technologia produkcji form zapewnić może niespotykane powszechnie dotąd w Polsce możliwości produk-

cyjne (np. struktury gąbczaste, progi turbulentne), ale także wpływa na znaczące skrócenie procesu i obniżenie kosztów (wirtualne testy, wprowadzanie zmian w konstrukcji przed wykonaniem rzeczywistym formy itp.).

FAZA II – wykonanie zasadnicze elementów narzędziowych

Faza druga rozpoczyna się od przekazania dokumentacji projektowej, wykonanej w fazie pierwszej, do poszczególnych stanowisk (maszyn) produkcyjnych. Poprzez kolejno po sobie następujące obrabianie detalu na specjalnie dobranych nowoczesnych maszynach produkcyjnych, następuje doprowadzenie materiału do gotowej formy wtryskowej. Proponowana faza wykonania zasadniczego elementów narzędziowych może przebiegać w następującym zasadniczym procesie produkcyjnym, który zaprezentowano poniżej.

a) Wykonanie wysoko konduktywnych gniazd form wtryskowych z regulowanymi konformalnymi strefami odprowadzenia ciepła o zaawansowanej geometrii z turbulentnymi przegrodami, za pośrednictwem bezpośredniej przyrostowej techniki wytwarzania narzędzi (np. DMLS, SLM lub SLS [9÷11]) z wysoko przewodzących proszków metali. Dotychczasowe podejście technologiczne obróbki ubytkowej uniemożliwia fizyczną realizację tak zaawansowanych geometrycznie struktur elementów narzędziowych dla przetwórstwa tworzyw. Szeroko wykorzystywane technologie pozwalają jedynie na wykonie kanałów chłodzących prostoliniowych, które powstają przez wykonanie prostego przewiertu w materiale narzędziowym. Trwają także prace nad możliwościami zwiększenia efektywności chłodzenia za pośrednictwem specjalistycznej konfiguracji wkładek turbulentnych wprowadzanych do prostoliniowych kanałów chłodzących [43]. Addytywny sposób fizycznego wykonania gniazd formy trwać może zaledwie kilkadziesiąt godzin (ok. 20-80godzin).

b) W celu optymalizacji kosztów produkcji po procesie addytywnej budowy elementów narzędziowych możliwe jest automatyczne odzyskiwanie metalicznego proszku wykorzystywanego w trakcie realizacji procesu, w celu ponownego jego użycia, z podziałem na określone frakcje. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie oszczędności materiałowych przy jednoczesnym zapewnieniu dokładnego parametru gęstości wkładki (np. technologia DMLS, Sieving station EOS). Proces ten odbywa się na specjalnym urządzeniu wykorzystującym zestaw sit oraz warunki próżni. W ten sposób możliwe jest ponowne wykorzystanie do 95% proszku znajdującego się w przestrzeni roboczej maszyny do przyrostowego wytwarzania narzędzi (bez materiału, który wykorzystany zostanie na wytworzenie gniazda).

c) Analiza termiczna wykonanego gniazda formującego z wykorzystaniem kamery termowizyjnej (np. FLIR, Fluke [44]). Analiza przeprowadzana jest w kierunku sprawdzenia drożności konformalnych kanałów chłodzących z jednoczesną oceną efektywności chłodzenia poprzez przepuszczanie cieczy o okresowo zmiennej temperaturze i obserwacji zmiany temperatury na powierzchni

gniazda. Kamera termowizyjna umożliwia sprawdzenie drożności i dystrybucji cieczy w kanałach, a także założeń symulacji inżynierskich, co nie jest możliwe do określenia w tak szybki sposób innymi metodami.

d) Po pozytywnych wynikach analizy termicznej następuje obróbka cieplna wkładek wykonanych w technologii przyrostowej. Jej celem jest podwyższenie twardości i współczynnika przewodzenia ciepła narzędzia oraz usunięcie własnych naprężeń strukturalnych. Obróbka cieplna, jaka następować będzie w wyniku zastosowania przyrostowej metody wytwarzania (spiekanie laserem) powoduje, iż wykonany w ten sposób detal charakteryzuje się naprężeniami występującymi w całej wytworzonej konstrukcji. Obróbka cieplna elementów wytworzonych techniką addytywną jest niezbędna dla zaniku naprężeń wewnętrznych będących skutkiem natury procesu (np. DMLS), dzięki czemu obrabiany detal jest bardziej podatny na dalsze etapy jego obróbki. Ponadto zwiększona zostaje twardość detalu do wymaganego przez dalszy proces produkcyjny, a także określone parametry w przypadku procesu wtryskiwania – optymalny poziom twardości detalu w zakresie 50÷54 HRC. Proces ten prowadzony jest w kontrolowanych warunkach ze względu na możliwość degradacji materiału (tzw. odpuszczenie czyli zmniejszenie twardości).

e) Przygotowanie wybranych składowych elementów form może następować z wykorzystaniem szybkiego oraz powtarzalnego systemu pozycjonowania (np. typu PreSet EROWA z dokładnościami rzędu 0,005mm). System EROWA [45] pozwala na jednoznaczne precyzyjne ustawienie elementów obrabianych (wkładek, gniazd wykonanych metodą spiekania) na referencyjnej palecie obróbczej poza przestrzenią roboczą obrabiarki dla wielu stanowisk bez konieczności demontażu detalu obrabianego z tej palety. Dzięki temu istnieje możliwość przygotowania ciągu prac obróbczych bez konieczności zatrzymywania obrabiarki oraz ze względu na stałe ustawienie elementu na palecie istnieje możliwość wykonania ciągu technologicznego na różnych obrabiarkach, co znacznie skraca czas przygotowania produkcji wybranych elementów narzędziowych.

f) Wysoko dokładna obróbka wykańczająca jest niezbędna dla uzyskania określonego stanu powierzchni. Wytwarzane detale w metodzie przyrostowej posiadają w tym celu naddatek rzędu 0,5÷1,0mm. Stąd też konieczne jest dokonanie bardzo wysoko dokładnościowej i szybkobieżnej (dla stopów wysoko przewodzących 6÷8 razy szybsza niż dla stali) obróbce wykańczającej ($\pm 0,006$ mm).

Odpowiednie zaprojektowanie przebiegu fazy II, w tym dobór kolejno występujących po sobie urządzeń, pozwala na uzyskanie optymalnego czasu wykonania zadania produkcyjnego. Precyzja wymiarów oraz założeń dotyczących charakterystyki termicznej dodatkowo może zostać potwierdzona ponownymi testami/analizami (skanery, termowizja).

FAZA III – kontrola wykonania i ustalenia listy optymalnych parametrów produkcyjnych

Faza trzecia polega przede wszystkim, na sprawdzeniu wykonanego narzędzia pod kątem zgodności z dokumentacją projektową wygenerowaną w fazie pierwszej. Ponadto dokonane zostaje ustalenie optymalnych parametrów produkcyjnych określonego detalu, z oszacowaniem kosztu wytworzenia detalu w zależności od użytego parku maszynowego. Faza trzecia może przebiegać w następujących etapach:

a) Kontrola zasadnicza/ końcowa jakości wykonanego gniazda formującego/formy np. przy wykorzystaniu systemu typu PreSet Erowa [45]. Kontrola polega na pomiarach rzeczywistych i ich porównaniu z modelem konstrukcyjnym wygenerowanych w fazie I.

b) Montaż wykonanych gniazd formujących i wybranych elementów narzędziowych z pozostałymi podzespołami formy.

c) Realizacja prób na ultra szybkich maszynach posiadających rozszerzone możliwości nastawy parametrów procesu przetwórstwa na potrzeby testów i realizacji przyszłej produkcji z wykorzystaniem nowej generacji form. Maszyny te, pozwalają na dobór optymalnych parametrów procesu i uzyskanie możliwie ultra krótkiego czasu cyklu przy zachowaniu wymogów jakościowych i wymiarowych. Na podstawie wyników prób inżynier produkcji ma możliwość doboru optymalnej maszyny do produkcji wyrobów znajdującą się na wyposażeniu określonej instytucji. Inaczej mówiąc, dzięki zastosowaniu prób na maszynach o rozszerzonych parametrach, możliwe jest pełne przetestowanie właściwości produkcyjnych (osiągów) danej formy. Analiza ta pozwala na ustalenie optymalnych parametrów procesu przetwórstwa z punktu widzenia kosztów.

d) Analiza termowizyjna pracy całej formy w układzie roboczym przetwórstwa. Sprawdzane jest przede wszystkim tempo chłodzenia detalu i sprawność działania mostków termicznych. Na tym etapie możliwa jest również korekcja chłodzenia formy poprzez zabieg wyseparowania określonego kanału.

e) Pomiary energochłonności procesu produkcyjnego i możliwe nadanie etykiety energetycznej dla wytworzonego narzędzia przeznaczonego do realizacji określonego przetwórstwa polimerów i produkcji konkretnych wytworów. Jak do tej pory brak w przetwórstwie tworzyw stosowania określonych etykiet tego typu. Przykład takiej etykiety dla procesu wtryskiwania zaproponowano w publikacji [46]

Mając na uwadze dotychczasowe dokonania przemysłowe w branży produkcji narzędzi do przetwórstwa termoplastów, należy wskazać, że zarys scenariusza produkcji form można uznać za jeden z nowocześniejszych i o znamionach nowej generacji projektowania i wytwarzania dla branży przetwórstwa tworzyw polimerowych.

O nowości technologicznej decydują, przede wszystkim, następujące aspekty:

- nowatorski kształt procesu produkcyjnego pozwalający na osiągnięcie bardzo krótkich czasów realizacji zamówienia [19];
- zastosowanie w procesie produkcyjnym rozwiązań dotychczas niespotykanych w branży narzędziowej (np. oprogramowanie do projektowania struktur gąbczastych – porowatych [20]);
- innowacyjne zaprojektowanie technologii w kierunku zastosowania w strukturze budowy formy zaawansowanych struktur gąbczastych;
- innowacyjne zaprojektowanie technologii w kierunku możliwości wykonania nowatorskich kanałów konformalnych przegrodowo-turbulentnych [22], niespotykanych dotąd w branży,
- innowacyjne zaprojektowanie technologii w kierunku możliwości wykonania w gnieździe formy specjalnych mostków termicznych, zwiększających proces grzania/ studzenia detalu [7];
- zastosowanie w procesie produkcyjnym kilku grup testów, w celu wyeliminowania możliwości popełnienia błędu (informatyczne testy „na sucho”, testy precyzji wymiarowania, testy termowizyjne) [17];
- osiągnięcie zdolności technologicznej budowy narzędzi o niespotykanych dotąd parametrach wymiany cieplnej pomiędzy cieczą chłodzącą a powierzchnią gniazda wtryskowego [17, 18, 21], co do tej pory było niespotykane w skali przemysłowej (tzw. liczba Reynoldsa wielokrotnie wyższa [22] niż standard dla branży, hiperkonduktywność).

Skrócona charakterystyka wybranych elementów składowych niezbędnych do realizacji technologii produkcji zrównoważonych gniazd form

Poniżej scharakteryzowano wybrane elementy składowe wymagające swojego udziału w proponowanym scenariuszu wytwarzania zrównoważonych nowoczesnych gniazd form do przetwórstwa tworzyw:

a) Oprogramowanie CAD 3D z dodatkowymi modułami wspomagającymi o parametrach zbliżonych do CATIA V6 lub NX Siemens [40, 41] pozwala na konstruowanie zaawansowanych postaci geometrycznych gniazd formujących w tym z adaptacyjnymi (konformalnymi) kanałami chłodzącymi oraz prawidłowe odczytywanie plików konstrukcyjnych 3D pozyskiwanych z różnych źródeł niezbędnych dla wykonawstwa zrównoważonych form np. dla branży opakowaniowej czy motoryzacyjnej. Rozważany typ oprogramowania nie powoduje utraty atrybutów podczas translacji formatu plików na inny format, co jest niezwykle istotne podczas opracowywania dokumentacji i przygotowania plików dla fizycznego wykonania gniazd/form. Dostępny moduł reverse engineering pozwala na wykonywanie pliku konstrukcyjnego zapisanego w postaci .igs, .stp, CATpart uzyskanego na podstawie transformacji chmury punktów ze skanerów 3D pozyskujących informacje na temat fizycznych geometrii wytworów. Moduł pozwala zamienić chmurę punktów na powierzchnię i stworzenie bryły niezbęd-

nej do opracowania dokumentacji konstrukcyjnej do fizycznego wytwarzania form. Kolejny moduł Mould Tooling Design jest swoistym w swego rodzaju kreatorem dającym możliwość stworzenia pełnej dokumentacji formy wtryskowej na podstawie baz danych dostawców znormalizowanych elementów do form. Także moduł Mechanical Surface Design zapewnia automatyczną modyfikację kształtu gniazda formy, wynikającą z natury zachowania się tworzyw polimerowych w trakcie wypełniania i zestalania się w gnieździe formującym. Moduł ten dokonuje zmian na podstawie danych wynikowych dostępnych z oprogramowania symulacyjnego do wtryskiwania tworzyw. Niniejszym powiązania pomiędzy poszczególnymi modułami oprogramowania CAD3D są podstawą stworzenie wynikowej prawidłowej postaci zapisu informacji konstrukcyjnej niezbędnej do wytworzenia oczekiwanego rezultatu w postaci gniazda wykonanej w technologii spiekania proszków metali jak i finalnej zrównoważonej szybkobieżnej formy dla przetwórstwa tworzyw.

b) Oprogramowanie do tworzenia zaawansowanych struktur wewnętrznych, o parametrach zbliżonych do Autodesk Within [20] jest niezbędnym najnowocześniejszym narzędziem pozwalającym na wirtualne zaprojektowanie gniazda o gradientowej strukturze wewnętrznej zapewniającej wytworzenie wkładek o zrównoważonym lub zamierzenie zmienionym stanie chłodzenia. Struktury te pozwalają także na zapewnienie narzędziu określonych cech wytrzymałościowych przy obniżeniu wagi narzędzia i ilości materiału zużytego na wytworzenie rozważanego obiektu.

c) Oprogramowanie do symulacji procesu wtryskiwania tworzyw polimerowych, o parametrach zbliżonych do Moldflow, Cadmould lub SigmaSoft [42] na podstawie przyjętych założeń konstrukcyjnych i technologicznych przetwórstwa oprogramowanie pozwala na uzyskanie wielu podstawowych danych dotyczących procesu wtryskiwania. Wiąże się to z wirtualną weryfikacją zaprojektowanych postaci konformalnych kanałów chłodzących w powiązaniu z zachowaniem się przepływającego tworzywa w gnieździe formującym, a następnie uzyskanie podstawowych informacji na temat konstytuowanych się cech wyprasek wtryskowych. Dotyczy to w szczególności ich geometrii tuż po wyjęciu z gniazda formy oraz cech geometrycznych nabytych na wolnym powietrzu po wyciągnięciu z gniazda formy. Oprogramowanie potrafi zaproponować postać geometryczną gniazda formującego (dla przyjętych warunków przetwórstwa wtryskowego tworzyw), która może być nieznacznie odmienna od rzeczywistej wypraski, ale pozwala w warunkach produkcyjnych na uzyskanie oczekiwanego kształtu geometrycznego wypraski zgodnej z wymiarami konstrukcyjnymi oczekiwanymi przez klienta. Podobnie w celu uzyskania masy danych dla procesu rodmuchiwania istnieje możliwość zastosowania oprogramowania typu Ansys-Polyflow [48] lub Abaqus Unified FEA [40].

d) Urządzenie do przyrostowego spiekania proszków metali, o parametrach zbliżonych do EOS [9], SLM [8] czy ConceptLaser M2 [49] pozwala na wytwarzanie w bardzo krótkim czasie (kilkunastu 12–48, kilkudziesięciu 49–92

godzin), w technologii przyrostowej zawansowanych geometrycznie struktur gniazd formujących z turbulentnymi konformalnymi kanałami o dowolnej geometrii, co jest jedną z podstaw realizacji idei technologicznej rozważanego scenariusza technologicznego.

e) Urządzenie do automatycznego recyklingu proszku metali, o parametrach zbliżonych do Sieving Station EOS [9] zapewnia uzyskanie po realizacji danego procesu spiekania proszku o określonej frakcji ziaren do ponownego wykorzystania. Prawidłowa wielkość ziaren proszków stali zapewnia uzyskanie zamierzonego parametru gęstości wkładki na poziomie gwarantowanym przez producenta urządzenia tejże klasy.

f) Piec do obróbki cieplnej – o parametrach zbliżonych do następujących typów urządzeń: NORGPOL lub KepkaGroup [47]. Piec taki jest niezbędny w rozważanej technologii, dla produkcji elementów narzędziowych wykonanych w technice spiekania proszków metali, które winny być poddane obróbce cieplnej w celu usunięcia naprężeń, zwiększenia twardości oraz przewodności cieplnej. Proces obróbki cieplnej musi być przeprowadzany w kontrolowanych warunkach ze względu na możliwość degradacji materiału (odpuszczenia – zmniejszenia twardości), w tym celu konieczne jest zastosowanie pieca posiadającego możliwość dokładnej nastawy parametrów i ich kontrolowania podczas całego procesu.

g) System precyzyjnego realizowania ciągu technologicznego typu PreSet EROWA [45] wraz z zaawansowanymi postprocesorami komunikacyjnymi. System taki pozwala na jednoznaczne precyzyjne ustawienie elementów obrabianych (wkładek, gniazd wykonanych metodą przyrostową) na palecie obróbczej poza przestrzenią roboczą obrabiarki. Dzięki temu istnieje możliwość przygotowania ciągu prac obróbczych bez konieczności zatrzymywania obrabiarki oraz ze względu stałe ustawienie elementu na palecie istnieje możliwość wykonania ciągu technologicznego na różnych obrabiarkach, co znacznie skraca czas przygotowania produkcji wybranych elementów. Postprocesory komunikacyjne zapewniają prawidłową komunikację między maszynami i urządzeniami wykorzystywanymi w NSWGF.

h) Maszyny do obróbki dokładnościowej (frezarka 3D, tokarka, wycinarka elektroerozyjna i wiertarka do głębokich otworów) – frezarka z dokładnościami wykonania rzędu ± 0.005 mm oraz obrotami wrzeciona do 40000 obr/min, pozwala na uzyskanie elementów narzędziowych, które po tej obróbce nie wymagają dalszej obróbki ręcznej (np. osłkowania, polerowania). Przy kreowaniu detali cylindrycznych (za pomocą technik przyrostowych) istnieje możliwość uzyskania wysokich dokładności ich powierzchni za pośrednictwem tokarki. Wycinarka elektroerozyjna o klasie dokładności jak frezarka i tokarka ma uzasadnienie w przypadku dokonywania zwiększenia wysokości wkładek wykonanych na maszynie przyrostowej. Wykorzystuje się tutaj wysokość płyty montażowej (maszyny do spiekania proszków), a z jej gabarytów wycina się osadzenie wkładki w gnieździe lub wycina się dodatkowy kształt wkładki z płyty. Jedno-

cześnie wycinarka elektroerozyjna jest niezastąpionym narzędziem służącym do rozdzielenia płyty bazowej od wkładki-gniazda, po uformowaniu elementu w technice przyrostowej. Także ze względu na wyjścia i wejścia obiegów konformalnych we wkładkach narzędziowych, koniecznym jest wiercenie głębokich otworów w płytach formy z dużą dokładnością położenia w celu połączenia obu systemów chłodzenia (koordynacja osi kanałów na połączeniu wkładka-oprawa). Dokładność położenia uzyskuje się za pomocą dokładnego pozycjonowania w osi X i Y oraz precyzyjnego wykonania przejścia wiertła (zaawansowane prowadzenie wiertła) w jednym lub maksymalnie dwóch taktach na głębokość do 700mm. Zespół ciągu technologicznego frezarki, tokarki, wycinarki i wiertarki są niezbędnymi ciałami budowy form w scenariuszu NSWGF.

i) Ultraszybkie maszyny do wtryskiwania tworzyw polimerowych (np. wtryskarki o parametrach zbliżonych do Netstal Elion, Evos, Synergy [50]). Ultra szybkie wtryskarki charakteryzują się możliwością realizacji procesu wtryskiwania w bardzo krótkim czasie – poniżej 5 sekund.

j) System termowizyjnej oceny procesu i samej natury fizycznej narzędzia do przetwórstwa tworzyw (kamery termowizyjne typu Fluke, Flir [44]). Realizacja procesu przetwórstwa tworzyw wymaga nadzoru przebiegu procesu wytwarzanych wyprasek a także stanu technicznego gniazd form z wykorzystaniem najnowocześniejszych narzędzi diagnostycznych. Jednym z nich jest kamera termowizyjna zapewniająca realizację niniejszego celu

Podsumowanie

Wskazane w rozdziale wybrane możliwości zastosowania technologii addytywnych w zaproponowanym scenariuszu rozwoju i wytwarzaniu zrównoważonych gniazd form nowej generacji dla przetwórstwa rozdmuchowego i wtryskowego tworzyw wskazują na umożliwienie wykonywania gniazd form z regulowanymi, konformalnymi strefami odprowadzenia ciepła.

Rozwiązania te są szczególnie uzasadnione dla powstania w skróconym czasie krótkoseryjnych, wysoko przewodzących gniazd formujących nowej generacji z regulowanymi strefami odprowadzenia ciepła. W przypadku standardowych technologii nie jest możliwe to do zrealizowania z uwagi na brak zdolności wytworzenia kanałów chłodzących, które by w równomiernie efektywnym stopniu (krótszym czasie) odbierały energię cieplną od formowanego w gnieździe tworzywa [12, 14].

Proponowany zarys technologiczny ma również szczególną aprobatę dla wyprasek technicznych o stosunkowo skomplikowanej budowie, gdzie równomierne chłodzenie jest niezwykle istotne z punktu widzenia konstytuowania jednorodnie strukturalnych cech wewnętrznych elementów z tworzyw. Na przykład brak równomiernego chłodzenia niejednokrotnie uniemożliwia uzyskanie wypraski o jednorodnej strukturze powierzchniowej [18]. Stan taki nie daje możliwości lakierownia wytworów z tworzyw sztucznych, które mają zapewnić wy-

soki jednolity połysk bez załamania światła, co jest niezwykle istotne w zewnętrznych elementach mających zastosowanie w motoryzacji [16]. Także w branży przetwórstwa rozdmuchowego jednym z najdłużej trwających czasów cyklu jest czas chłodzenia wytworów w miejscach gdzie jest formowana zgrzeżina. Tutaj też upatruje się możliwości i realne korzyści z zastosowania technologii addytywnych czy technik wpływających na podwyższanie efektywności chłodzenia [43].

Możliwe zastosowanie określonych elementów NSWGF skraca zabiegi międzyoperacyjne w stosunku do tradycyjnego podejścia wytwarzania gniazd produkcyjnych –form, a także sam czas wytwarzania wytworów z tworzyw. Umożliwia to znacznie bardziej elastyczne reagowania na potrzeby rynkowe klientów różnych branż gospodarczych.

Także proces formowania wytworów z tworzyw, z zastosowaniem ultraszybkich maszyn pozwala podwyższyć efektywność realizacji technologii wtryskiwania czy rozdmuchowych przy zmniejszonym zapotrzebowaniu energetycznym na realizację tego procesu. Realizowanie procesu z zastosowaniem nowoczesnych narzędzi przetwórstwa tworzyw ma możliwość racjonalnego zarządzania stanem przebiegu procesu chłodzenia w gnieździe formującym za pomocą specjalistycznej termowizji. Skorelowanie składowych ciał w NSWGF przedstawionych w trzech podstawowych fazach przebiegu wytwarzania form, stanowi niewątpliwie nowatorskie podejście technologiczne i organizacyjne, które wpływają synergicznie na realizowany zakres projektowania, wytwarzania i eksploatacji zrównoważonych gniazd form nowej generacji.

Literatura

- [1] Plastics - the Facts 2016, Plastics Europe, Brussels – Belgium 2016, www.plasticseurope.org
- [2] Przemysł tworzyw sztucznych w Polsce, wydawnictwo Fundacja Plastics Europe, Warszawa 2012.
- [3] Liou Frank W.: *Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development*, USA, 2008 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [4] Radziwona A.: *The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions*, Procedia Engineering 2014, 69, s. 1184–1190.
- [5] Gebhardt A.: *Rapid Prototyping*, Hanser Publishers, Munich 2003.
- [6] Gibson I.: *Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications - Reverse Engineering, Software Conversion and Rapid Prototyping*, John Wiley & Sons, Knovel 2008.
- [7] Ahn, D. G. and Kim, H. W., *Study on the Manufacture of a Thermal Management Mould with Three Different Materials Using a Direct Metal Tooling Rapid Tooling Process*, Proc. IMechE Part B: J. Engng. Manuf., 2010, 224, 3, s. 385–402.

- [8] <http://www.hrsflow.com/eng/soluzioni/slm-technology.php> (dostęp 10.11.2016)
- [9] Materiały EOS, <https://www.eos.info/en/products/systemsequipment/metal-laser-sintering-systems.html> (dostęp 10.11.2016)
- [10] Materiały 3D System, <http://www.3dsystems.com/solutions/injection-molding> (dostęp 10.11.2016)
- [11] Materiały SLM Solution GmbH <https://slm-solutions.com/> (dostęp 10.11.2016)
- [12] Xuan-Phuong Dang: *Design of U-shape Milled Groove Conformal Cooling Channels for Plastic Injection Mold*, International Journal of Precision Engineering And Manufacturing February 2011, 12, 1, s. 73–84
- [13] Miltiadis A. Bobolus: *CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation*, 2010, Ph. D. & Ventus Publishing.
- [14] Dong-Gyu Ahn, Seung-Hwa Park, Hyung-Soo Kim: *Manufacture of an Injection Mould with Rapid and Uniform Cooling Characteristics for the Fan Parts Using a DMT Process*, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing December 2010, 11, 6, s. 915–924.
- [15] Gunnink J.W.: *Extreme Cycle time Reduction of Injection Moulding Processes by using High Performance Injection Moulds and Moulding Processes – Hipermoulding*, raport 2008
- [16] Sykutera D.: *Uzdatnianie powierzchni polipropylenu do nakładania lakierów wodorozcieńczalnych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 5, 47, 2008.
- [17] Kazmer D.O.: *Plastics Manufacturing Systems Engineering A Systems Approach*, Carl Hanser Verlag Munich 2009.
- [18] Kazmer D.O.: *Injection Mold Design Engineering*, Carl Hanser Verlag Munich 2007.
- [19] Dong-Gyu Ahn: *Applications of Laser Assisted Metal Rapid Tooling Process to Manufacture of Molding & Forming Tools – State of the Art.*, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol. 12, o. 5, s. 925–938.
- [20] Zastosowania struktur gąbczastych <http://www.autodesk.com/products/within/overview> (dostęp 10.11.2016)
- [21] Kim, H. S., Lee, K. Y., Suh, J. H. and Ahn, D. G., *Final Report on Strategy Project of Development of Leading Innovation Technology for Medium and Small Industries – Manufacture and Evaluation of the Injection Mould Incorporating Conformal Cooling Channels Using DMF Technologies*, Woosung Inc., Final Project Report, 2010.
- [22] Bejan A., Kraus A.D.: *Heat Transfer Handbook*, 2003 John Wiley & Sons
- [23] Morrow, M. R., Qi, H, Kim, I., Mazumder, J. and Skerlos, S. J., *Environmental Aspects of Laser-based and Conventional Tool and Die Manufacturing*, J. Clean Prod., 2005, 15, 10, s. 932–943.

- [24] Chua, C. K., Teh, S. H. and Gay, R. K. L., *Rapid Prototyping Versus Virtual Prototyping in Product Design and Manufacturing*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 1999, 15, 8, s. 597–603.
- [25] Karapatis, N. P., van Griethuysen, J. P. S. and Glardon, R., *Direct Rapid Tooling: a Review of Current Research*, Rapid Prototyping J., 1998, 4, 2, s. 77–89.
- [26] Rosochowski, A. and Matuszak, A., *Rapid Tooling: the State of the Art*, J. Mater. Process. Technol., 2000, 106, 1-3, s. 191–198.
- [27] Yang, D. Y., Ahn, D. G., Lee, C. H., Park, C. H. and Kim, T. J., *Integration of CAD/CAM/CAE/RP for the Development of Metal Forming Process*, J. Mater. Process. Technol., 2002, 125–126, 9, s. 26-34.
- [28] Ahn, D. G. and Park, S. H., *Manufacturing Technology of Injection Mold with a High Cooling Rate Using DMT Rapid Prototyping Process*, Proc. of KSPE Autumn Conference, 2006, s. 17–18.
- [29] Ahn, D. G., Kim, H. W., Park, S. H. and Kim, H. S., *Manufacture of Mould with a High Energy Efficiency Using Rapid Manufacturing Process*, Proc. of the 10th International Conference on Numerical Method in Industrial Forming Process, 2010, s. 185–191.
- [30] Ahn, D. G. and Kim, H. W., *Study on the Manufacture of a Thermal Management Mould with Three Different Materials Using a Direct Metal Tooling Rapid Tooling Process*, Proc. IMechE Part B: J. Engng. Manuf., 2010, 224, 3, s. 385–402.
- [31] Mazumder, J., Dutta, D., Kikuchi, N. and Ghosh, A., *Closed Loop Direct Metal Deposition: Art to Part*, Opt. Lasers Eng. 2000, 34, 4–6, s. 397–414.
- [32] Dimla, D. E., Camilotto, M. and Miani, F., *Design and Optimisation of Conformal Cooling Channels in Injection Moulding Tools*, J. Mater. Process. Technol., 2005, 164–165, 15, s. 1294–1300.
- [33] Knights, M., *Rapid Tooling: It's Faster in Molding, Too*, Plastic Technology Online Article, 2005. <http://www.ptonline.com/articles/rapid-tooling-it's-faster-in-molding-too>
- [34] Ahn, D. G., Kim, H. W. and Lee, K. Y., *Design of the Thermally Conductive Mould to Improve Cooling Characteristics of Injection Mould for a Mouse*, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, 2009, 33, 3, s. 201–209.
- [35] Beal, V. E., Erasenthiran, P., Ahrens, C. H. and Dickens, P., *Evaluating the Use of Functionally Graded Materials Inserts Produced by Selective Laser Melting on the Injection Moulding of Plastics Parts*, Proc. of IMechE Part B: J. Engng. Manuf., 2007, 221, 6, s. 945–954.
- [36] Beger R.: *Additive Manufacturing – next generation AMnx study 2016* https://www.rolandberger.com/en/Publications/pub_additive_manufacturing.html (dostęp 10.11.2016).

- [37] <http://www.ptonline.com/articles/medical-automotive-molder-explores-new-technologies-for-tooling-cooling> (dostęp 10.11.2016)
- [38] Elduque A., Elduque D., Javierre C., Fernández A., Santolaria J.: *Environmental impact analysis of the injection molding process: analysis of the processing of high-density polyethylene parts*. Journal of Cleaner Production, 1 December 2015, 108, Part A, s. 80–89.
- [39] 3D print molds for prototyping in the final material, www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/injection-molding (dostęp 10.11.2016).
- [40] Mold and Tooling Design to Manufacturing <http://www.3ds.com/products-services/catia/capabilities/plastic-part-mold-design-engineering/> (dostęp 10.11.2016).
- [41] NX Mold Design https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/nx/for-manufacturing/tooling-fixture-design/mold-design.shtml (dostęp 10.11.2016).
- [42] <http://www.molding-simulation.com/> (dostęp 10.11.2016).
- [43] Pepliński K., Bieliński M.: *Prototypowe wkładki modułowe intensyfikujące chłodzenie wnek form w procesach przetwórstwa polimerów. Komunikat szybkiego druku*. Polimery 2015, 11–12, s. 747.
- [44] <http://www.tequipment.net/fluke/flir-e4-vs-fluke-ti90-vs-fluke-ti95-ther/> (dostęp 14.11.2016).
- [45] <http://er-system.com.pl/> (dostęp 14.11.2016).
- [46] Spiering T.: *Energy efficiency benchmarking for injection moulding processes, Original Research Article*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, December 2015, 36, s. 45–59.
- [47] <http://norgpol.pl/oferta/piece-i-suszarnie/>; <http://kepka.com.pl/> (dostęp 14.11.2016).
- [48] <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Polyflow> (dostęp 14.11.2016).
- [49] <http://www.concept-laser.de/en/industry/mould.html> (dostęp 14.11.2016).
- [50] <http://www.netstal.com/en/home.html#> (dostęp 14.11.2016).
- [51] Ford S., Despeisse M.: *Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges*, Journal of Cleaner Production, 2016, 137, s. 1573–1587