# Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy

Wydział Inżynierii Mechaniczny

mgr inż. Piotr Czyżewski

Rozprawa doktorska

Badania przebiegu i efektów wtryskiwania nakrętek poliolefinowych

Promotor: Prof. dr hab. inż. Marek Bieliński

Bydgoszcz 2018

Serdecznie dziękuję promotorowi pracy, Panu prof. dr. hab. inż. Markowi Bielińskiemu za pomoc, wskazówki, cenne uwagi oraz czas poświecony mi podczas realizacji tej pracy

**Bardzo dziękuję,** *firmie AKSON Sp z o.o.,* za inspiracje, współpracę, pomoc i życzliwość okazaną w trakcie realizacji pracy Praca doktorska powstała przy wsparciu:

- Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013- projekt "*Realizacja II etapu Regionalnego Centrum Innowacyjności*",
- 2) Europejskiego Funduszu Społecznego i Budżetu Państwa w ramach:
  - a) Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego, Działania 2.6. "Regionalne Strategie Innowacyjne i transfer wiedzy" projektu własnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego "Stypendia dla doktorantów 2008/2009 ZPORR",
  - b) Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Poddziałanie 8.2.2. Regionalne Strategie Innowacji - Projekt "*Krok w przyszłość – stypendia dla doktorantów III edycja*" realizowanego przez Urząd Marszałkowski Województwa Kujawsko-Pomorskiego w latach 2010/2011,
  - c) Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Poddziałanie 8.2.2. Regionalne Strategie Innowacji - Projekt "Krok w przyszłość – stypendia dla doktorantów IV edycja" realizowanego przez Urząd Marszałkowski Województwa Kujawsko-Pomorskiego w latach 2012-2013,
  - d) Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Poddziałanie 8.2.2. Regionalne Strategie Innowacji - Projekt "Krok w przyszłość – stypendia dla doktorantów V edycja" realizowanego przez Urząd Marszałkowski Województwa Kujawsko-Pomorskiego w latach 2013-2014.

Wybrane wyniki badań zostały wykorzystane przez:

 AKSON Sp. z o.o. m. in. w ramach projektu "Program pilotażowy w województwie kujawsko – pomorskim "*Voucher badawczy*" Nr RPKP 05.04.00-04-011/10 finansowany z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Osi priorytetowej 5 Wzmocnienie konkurencyjności przedsiębiorstw Działania 5.4. Wzmocnienie regionalnego potencjału badań i rozwoju technologii Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko – Pomorskiego na lata 2007– 2013.

SFIS WAZNIEJSZIUH UZNAUZEN I AKKUNIWUW	•••••
1. ANALIZA LITERATURY I STANU TECHNIKI	•••••
1.1. Wprowadzenie	•••••
1.2. Charakterystyka konstrukcji polimerowych gwintowanych	
zamknięć opakowań	I
1.2.1. Przegląd stosowanych rozwiązan gwintowanych zamknięc	1
1.2.2 Wymagania stawiana polimarowych zamkniaciom gwintowonym	וו כ
1.2.2. Wymagania stawiane pomnerowych zamknięcioli gwintowanym 1.2.3. Tworzywa polimerowa stosowana do wytwarzonia zamknieć	l∠
awintowanych	~
1.2.4 Standaryzacia w połaczeniach gwintowych opakowań	2 ທ
1.3. Charakterystyka technologii wytwarzania nolimerowych	••••••
gwintowanych zamknieć onakowań	2
1 3 1 Maszyny do wytwarzania zamknieć gwintowanych	2 7
1 3 2. Narzedzia do wytwarzania zamknieć gwintowanych	2
1.3.3. Procesy technologiczne wytwarzania zamknieć gwintowanych	3
1.4. Zastosowanie polimerowych gwintowanych zamknieć onakowa	ıή3
1.4.1. Linie technologiczne w procesie wytwarzania gwintowanych	
zamknieć	3
1.4.2. Transport, magazynowanie i użytkowanie zamknięć gwintowany	ch3
1.4.3. Warunki użytkowania połączeń gwintowych opakowań	3
1.5. Charakterystyka badań połączeń gwintowych opakowań	
polimerowych	3
1.5.1. Metody badawcze połączeń gwintowych opakowań	3
1.5.2. Stanowiska do badań połączeń gwintowych opakowań	4
1.6. Wnioski i ustalenia do badań własnych	4
2. CHARAKTERYSTYKA BADAŃ WŁASNYCH	4
2.1. Sformułowanie problemu	4
2.2. Hipotezy badawcze	4
2.3. Cele pracy	4
2.4. Metodyka badań	4
2.4.1. Obiekty wykorzystane w przedsięwzięciu badawczym	4
2.4.2. Aparatura, urządzenia i systemy informatyczne	5
2.4.2.1. Badania właściwości mechanicznych	5
2.4.2.2. Badania kalorymetryczne próbek z zamknięć gwintowanych	5
2.4.2.3. Badania deformacji zamknięć gwintowanych	5

2.6. Schemat realizacji pracy z zakresem badań (mapka myślowa)78	
2.5. Jakościowy model matematyczny76	
opakowań na odporności na środowiskową korozję naprężeniową75	
2.4.6.7. Badania wpływu cech geometrycznych gwintowanych zamknięć	
próbek zamknięcia gwintowanego74	
środowiskową korozję naprężeniową przyjętych do analizy	
2.4.6.6. Badanie wpływu momentu dokręcającego na odporność na	
wybranych tworzyw	
2465 Badania odnorności na środowiskowa korozia naprażaniowa	
2.4.0.4. Budaniu zjawisku dejormacji wkiadki uszczelnającej w	
2 4 6 4 Badania ziawiska daformacii wkładki uszczalniającej w	
2.4.0.5. Baaania wybranych cech geometrycznych wkłaaki	
zamknięcia w połączeniu gwiniowym	
2.4.0.2. Badania wpiywu wybranych substancji na nakręcanie	
aeformację w połączeniu gwintowym polimer-polimer	
2.4.0.1. Badania wpływu cech geometrycznych nakrętki na jej	
2.4.6. Etap II (badania wiasciwe)	
deformację w połączeniu gwintowym "polimer-metal"	
2.4.5.5. Badania wpływu cech geometrycznych nakrętki na jej	
gwintowanych	
2.4.5.4. Badania symulacyjne procesu wytwarzania zamknięć	
2.4.5.3. Badania kalorymetryczne próbek z zamknięć gwintowanych	
poliolefinowych	
2.4.5.2. Badania właściwości mechanicznych wybranych tworzyw	
2.4.5.1. Badania pękania zamknięć gwintowanych66	
2.4.5. Etap I (badania wstępne)	
2.4.4. Materiały użyte do badań	
2.4.3. Czynniki badane i ich zakres	
badań61	
2.4.2.7. Maszyny i narzędzia wykorzystane do wytwarzania obiektów	
2.4.2.6. Systemy informatyczne	
2.4.2.5. Badania środowiskowej korozji naprężeniowej	
na moment dokręcający58	
2.4.2.4. Badania wpływu wybranych substancji chemii motoryzacyjnej	

3. BADANIA WŁASNE	80
3.1. Analiza wyników badań Etapu I	80
3.1.1. Badania pękania zamknięć gwintowanych	80
3.1.2. Badania właściwości mechanicznych wybranych tworzyw	
poliolefinowych	82
3.1.3. Badania kalorymetryczne próbek z zamknięć gwintowanych	88
3.1.4. Badania symulacyjne procesu wytwarzania zamknięć gwintowany	ch89
3.1.5. Badania wpływu momentu dokręcającego na deformację ścianki	
czaszy zamknięcia wybranych materiałów (para gwintowa	
"polimer-metal")	98
3.1.6. Badania wpływu wybranych cech geometrycznych nakrętki na	
jej deformację (para gwintowa "polimer-metal")	108
3.1.7. Wnioski i wytyczne do badań w Etapie II	116
3.2 Analiza wyników badań Etapu II	117
3.2.1. Badania wpływu wybranych cech geometrycznych nakrętki	
na jej deformację w połączeniu gwintowym "polimer-polimer"	117
3.2.2. Badania wpływu wybranych substancji chemii motoryzacyjnej	
na nakręcanie zamknięcia w połączeniu gwintowym	124
3.2.3. Badania wybranych cech geometrycznych wkładki uszczelniającej	i127
3.2.4. Badania wpływu elementów uszczelniających połączenia	
gwintowego na efekt i wskaźniki związane z nakręcaniem	
zamknięcia	128
3.2.5. Badania odporności na środowiskową korozję naprężeniową	
wybranych tworzyw	131
3.2.6. Badanie wpływu momentu dokręcającego na odporność	
na środowiskową korozję naprężeniową wybranych zamknięć	
gwintowanych	134
3.2.7. Badania wpływu cech geometrycznych zamknięć gwintowanych	
na odporności na środowiskową korozję naprężeniowej	137
3.7. Wnioski końcowe i podsumowanie pracy	138
4. SPIS LITERATURY	142
5. STRESZCZENIE	154
6. SUMMARY	156

## SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I AKRONIMÓW

$A_{N}$	- pole przekroju nakrętki,
$A_{w}$	- pole powierzchni szyjki pojemnika,
CAD	- ang. Computer Aided Design,
E&E	- przemysł elektryczny i elektroniczny,
ESC	<ul> <li>Środowiskowa korozja naprężeniowa,</li> </ul>
ESCR	<ul> <li>odporność na środowiskową korozję</li> </ul>
_	naprężeniową,
F	-siła działająca w osi pionowej,
GK	- system gorąco-kanałowy,
IM	- ang. Injection Moulding,
IT	- technologie informatyczne,
MES	- Metody Elementów Skończonych
PE	- polietylen,
PE-HD	- polietylen dużej gęstości,
PE-LD	- polietylen małej gęstości,
PET	- poli(tereftalan etylenu),
PP	- polipropylen,
PS	- polistyren,
PUR	- poliuretan,
PVC	- poli(chlorek winylu),
RCCM	- ang. Rotary Cap Compression Moulding,
X <sub>c</sub>	- stopień krystaliczności,
ZK	- system zimno-kanałowy,
$\Delta H$	- entalpia topnienia,
$\sigma_{R}$	<ul> <li>naprężenia rozciągające w nakrętce,</li> </ul>
$\sigma_{\rm S}$	<ul> <li>naprężenia ściskające we wkładce uszczelniającej,</li> </ul>

## 1. ANALIZA LITERATURY I STANU TECHNIKI

#### 1.1. Wprowadzenie

Z uwagi na powszechnie używane nazewnictwo głównego elementu uszczelniającego (przedmiot badań) połączenia gwintowego opakowań polimerowych w pracy przyjęto używać tożsamo: zamknięcie, zamknięcie gwintowane oraz nakrętka. W przyjętym eksperymencie analizie nie podlegała gwintowana szyjka pojemnika, a skupiono się głównie na gwintowanym zamknięciu.

Przetwórstwo tworzyw sztucznych jest najszybciej rozwijającą się na świecie obok IT gałęzią przemysłu. Od ponad 50 lat odnotowuje się co roku wzrost produkcji (rys. 1.1) tworzyw świadczący o bardzo dużym zapotrzebowaniu na tego rodzaju materiały [1,2].





Rynek poliolefinowych gwintowanych zamknięć opakowań stanowi istotną część branży opakowań polimerowych. W najbliższych latach przewiduje się, że jego rozwój będzie kształtował się z prędkością dwukrotnie większą niż globalnego rynku opakowań [3]. Największe zużycie tworzyw polimerowych odnotowuje się w branży opakowaniowej (rys. 1.2), gdzie produkcja sięga prawie 40% całkowitej produkcji na Świecie [1]. Szybki rozwój branży opakowaniowej jest wymuszony ciągłym wdrażaniem innowacyjnych rozwiązań materiałowych oraz technologicznych, co wpływa na ochronę środowiska poprzez redukcję materiału w opakowaniu, recykling tworzyw poużytkowych, wykorzystanie materiałów ze źródeł odnawialnych [4].



Rys. 1.2. Zużycie tworzyw sztucznych w Europie wg segmentów zastosowań w 2015 (E&E - przemysł elektryczny i elektroniczny, Inne-artykuły gospodarstwa domowego, meble, sport, zdrowie i bezpieczeństwo) [1]



Rys. 1.3. Zapotrzebowanie tworzyw sztucznych w Europie wg rodzajów tworzyw w 2015 [1]

Produkcja zamknięć polimerowych jest jedną z najlepiej rozwijających się gałęzi przemysłu opakowaniowego na świecie. Opakowania jednorazowe wymuszają ciągły rozwój technologii wtryskiwania zamknięć polimerowych w obszarze materiałowym, konstrukcyjnym, narzędziowym, maszynowym, a także urządzeń peryferyjnych [5–8]. Czas cyklu w produkcji polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań osiągnął już wartości poniżej 2 sekund [9]. Nowe trendy zakładają również produkcję polimerowych zamknięć bazujących na surowcach w pełni odnawialnych takich jak np. trzcina cukrowa [10].

W roku 2012 wyprodukowano w świecie ponad 1 bilion sztuk zamknięć, z czego w Polsce jest produkowanych ok. 1,2% (12 miliardów sztuk). Produkcja w świecie polimerowych zamknięć gwintowanych w 2012 przekroczyła 360 mld sztuk. Szacuje się, że liczba wyprodukowanych na świecie polimerowych gwintowanych zamknięć w 2016 roku przekroczyła 460 miliardów sztuk. Tą wartość zakłada się, że zostanie osiągnięta w Europie w 2021 roku. Światowa wartość rynku zamknięć i nakrętek w 2012 wyniosła 32 mld dolarów a w 2014 r. przekroczyła 40 mld dolarów [11]. W ostatnich siedmiu latach w Europie rynek polimerowych zamknięć (nasadki i nakrętki) rósł w tempie 2% rocznie w Europie i ok. 5% na Świecie [12,13].

Ciągły rozwój rynku polimerowych zamknięć gwintowanych następuje poprzez rozwój materiałów do ich produkcji, narzędzi, maszyn przetwórczych i urządzeń technologicznych [14,15]. Zgodnie ze "spiralą innowacyjności" (rysunek 1.4.) wzrost wymagań wobec wytworów polimerowych jest bezpośrednio odpowiedzialny za tworzenie nowych materiałów, rozwój konstrukcji narzędzi przetwórczych oraz ciągłe mutacje wykorzystywanych technologii [16].



Rys. 1.4. Spirala innowacyjności w produkcji wytworów polimerowych [16]

Działania te wymuszają prowadzenie równoległych prac badawczy na obiektach rzeczywistych [17–19], w których wykorzystywane są nowoczesne narzędzia pomiarowe i badawcze (np. metody optycznej rejestracji prowadzonych badań), symulacje komputerowe wykorzystujące metody elementów skończonych) [20,21]. W efekcie prowadzi to do otrzymywania innowacyjnych konstrukcji gwintowanych zamknięć opakowań polimerowych (np. konstrukcja obniżająca koszty produkcji narzędzi przetwórczych) oraz metod i narzędzi badawczych [22,23]. Wiąże się to z ciągłą potrzebą aktualizacji parametrów technicznych (użytkowych), które można odnaleźć w literaturze. Przykładem są parametry nakręcania polimerowych zamknięć opakowań w zależności od geometrii (głównie średnicy nakrętek) [24,25], które na ogół nie uwzględniają stosowanych rozwiązań konstrukcji gwintów, pozostałych elementów połączenia oraz warunków zamykania opakowania.

## 1.2. Charakterystyka konstrukcji polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań

## 1.2.1. Przegląd stosowanych rozwiązań gwintowanych zamknięć opakowań

Zamknięcia gwintowane znajdują zastosowanie jako element uszczelniający opakowanie, w którym są umieszczane płyny, oleje, mleczka, pasty, materiały sypkie i inne. Opakowania znajdują zastosowanie w przemyśle: motoryzacyjnym, chemicznym, medycznym, farmaceutycznym, spożywczym, kosmetycznym i innym (specjalnym).

Podział gwintowanych zamknięć polimerowych uwzględnia:

- przetwarzany materiał,
- konstrukcję gwintowanego zamknięcia,
- konstrukcję narzędzia przetwórczego,
- proces wytwarzania,
- warunki użytkowania.

Na rysunku 1.5 przedstawiono kryteria, które zostały przyjęte podczas opracowywania podziału gwintowanych polimerowych zamknięć opakowań.



Rys. 1.5. Kryteria przyjęte do przygotowania podziału gwintowanych zamknięć opakowań [Opracowanie własne]

Rozwój branż wykorzystujących polimerowe połączenia gwintowe jest zauważalny w obszarze konstrukcji wytworów i narzędzi, materiałowym, technologicznym i użytkowym. Stosowane rozwiązania konstrukcyjne połączeń gwintowych pozwalają na intensywne ich obciążanie [26], poprzez zmianę rozkładu naprężeń w połączeniu [27] lub zmianę nacisków punktowych na powierzchniowe [28]. Rozwiązania konstrukcyjne nakrętki w obszarze ciągłości i krotności gwintu pozwalają na uzyskanie gwintu ciągłego (pełnego) [29–31], gwintu skracanego [32], gwint wielokrotnego [33] lub gwintu dzielonego [34]. Dużą wagę przywiązuje się do konstruowania elementów uszczelniających połączenie gwintowe m.in. za pomocą wewnętrznego kominka [35] lub wkładki uszczelniającej [36]. Stosowane są również podwójne uszczelnienia wykorzystujące wargę uszczelniającą [37]. Rozwiązania specjalne elementów uszczelniających pozwalają na rozkład nacisków w miejscu uszczelnienia [38] lub wzajemne pozycjonowanie elementów uszczelniających [39]. Stosowane są również rozwiązania konstrukcyjne dające dodatkowe funkcje nakrętce tj.: klapka zamykająca z funkcją uszczelniania typu "flip-top" [40], plomba gwarancyjna [41,42], rozwiązanie ułatwiające odkręcania np. przez osoby starsze [43–46], zabezpieczenie przed dziećmi [47–49].

Rozwiązania konstrukcyjne stosowane w narzędziach technologicznych determinują nadawanie kształtu (formowanie) powierzchni gwintowej przy wykorzystaniu elementów suwakowych [50], wykorzystanie ruchomych rdzeni sprężystych [51] lub segmentowych rdzeni składanych [52]. Specjalne (dedy-kowane pod konstrukcję narzędzia) rozwiązania konstrukcji gwintu umożliwiają na zastosowanie prostej konstrukcji narzędzia w układzie tzw. góra-dół [53]. Rozwiązania konstrukcyjne narzędzi określają również sposób usuwania wypraski z gniazda formującego przy wykorzystaniu systemu hydraulicznego [54], przekładni ślimakowej [55], przekładni zębatej z listwą zębatą [56], specjalnej przekładni po stronie wtrysku [57] lub przekładni zębatej w układzie centralnym [58].

Branża opakowaniowa to również rozwój technologii wytwarzania zamknięć gwintowanych, gdzie może być wykorzystywane tłoczenie [59], wtrysk dwukomponentowy np. do tworzenia elementu uszczelniającego [60] lub zastosowanie odlewanie [61]. Stosowane są również dedykowane rozwiązania materiałowe na gwintowane zamknięcia pojemników małolitrażowych [62] lub wielkolitrażowych [63]. Pod uwagę brane jest również zwiększenie wydajności procesu oraz poprawa właściwości mechanicznych [64].

Na rysunku 1.6 przedstawiono podział polimerowych zamknięć gwintowanych, który został przygotowany uwzględniając takie czynniki jak: materiałowe, konstrukcyjne wyrobu oraz narzędzi, wytwarzania i użytkowania. Z uwagi na stały oraz dynamiczny rozwój rynku polimerowych zamknięć opakowań przedstawiony podział nie stanowi zbioru zamkniętego, ponieważ podlega ciągłemu modyfikowaniu i uzupełnianiu.



Rys. 1.6. Podział gwintowanych zamknięć polimerowych [Opracowanie własne]

Na rysunkach 1.7 - 1.15 przedstawiono wybrane rozwiązania, uwzględniające poszczególne czynniki przyjęte do opracowania podziału polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań. W zamknięciach gwintowanych elementy robocze powiązane są ściśle z cechami geometrycznymi gwintu, które odpowiadają za poprawne spełnianie funkcji użytkowych głównie ochronnych (uszczelnianie opakowania). Z uwagi na masowy charakter technologii wytwarzania oraz zastosowania (np. pojemnik napoju z gazem) gwint nakrętki może być przerywany (rys. 1.7.a). W przypadku opakowań do przechowywania produktów sypkich lub substancji o dużej lepkości, gdzie nie ma wysokich wymagań dotyczących szczelności, stosowane są gwinty wielokrotne, które posiadają więcej niż jeden zwój. (rys. 1.7.b). Takie rozwiązanie ułatwia użytkowanie przez zmniejszenie obrotu nakrętki w celu otwarcia pojemnika.



Rys. 1.7. Rozwiązania konstrukcyjne (cechy geometryczne) geometrii gwintu: a) gwint przerywany na długości, b) gwint 4-zwojowy (krotny) [Opracowanie własne]



Rys.1.8. Zamknięcie dwuelementowe z funkcją magazynowania: a) widok rozwiązania połączenia pomiędzy elementami, b) widok przestrzeni tworzącej komorę magazynującą [Opracowanie własne]

W przypadku zastosowania dwóch specjalnych elementów zamknięcia można wytworzyć pojemnik, do przechowywania materiałów sypkich, które dostają sie do pojemnika w momencie odkręcania nakrętki. Na rysunku 1.8 przedstawiono przykład polimerowego gwintowanego zamknięcia, które oprócz funkcji uszczelniającej posiada również funkcję magazynowania. Połączenie pomiędzy elementami zamknięcia (zaczep) jest ukryte w opakowaniu (rys. 1.8.a), które pełni również funkcję mieszającą podczas opróżniania pojemnika. Komora magazynująca substancje sypkie jest opróżniana podczas pierwszego otwierania pojemnika (rys.1.8.b).



Rys. 1.9. Przykładowe elementy uszczelniające w zamknięciu: a) kominek uszczelniający, b) pierścieniowa wkładka porowata, c) wkładka barierowa [Opracowanie własne]

Na rysunku 1.9 przedstawiono wybrane elementy uszczelniające w polimerowym gwintowanym zamknięciu. Najczęściej stosowane elementy uszczelniające wykorzystywane w połączeniach gwintowych to warga uszczelniająca będąca częścią nakrętki (rys.1.9.a), porowata wkładka uszczelniająca (rys.1.9.b) lub wkładka barierowa (np. laminat).



Rys. 1.10 Zabezpieczenie gwarancyjne: a) pierścień formowany w suwakach, b) pierścień formowany w układzie w formie "góra-dół", c) zamknięcie z otworami pod element plombowania [Opracowanie własne]

Najbardziej popularnym zabezpieczeniem gwarancyjnym jest tzw. pierścień gwarancyjny [65], który może być formowany w narzędziu przetwórczym za pomocą suwaków formujących (rys. 1.10.a) lub w formie typu "góra-dół" (rys.1.10.b). Innym rozwiązaniem może być zastosowanie gwintowanego zamknięcia, które przewiduje wykorzystanie dodatkowych elementów plombujących (rys.1.10.c).



Rys. 1.11 Zamknięcie gwintowane wielokomponentowe montowane w jednym cyklu produkcyjnym: a) złożone zamknięcie po usunięciu z narzędzia, b) zamknięcie z otwartym zaworem [Opracowanie własne]

Innowacyjne rozwiązania wykorzystujące zaawansowane systemy do automatyzacji procesów technologicznych [66] pozwalają wytwarzać kompletne wielokomponentowe polimerowe zamknięcia wytwarzane i składane podczas jednego cyklu (rys. 1.11).



Rys.1.12. Zamknięcia gwintowane wykorzystane w opakowaniach: a) laminat kartonowo-aluminowy, b) pojemnik poliolefinowy, c) tuba aluminowa [Opracowanie własne]

Polimerowe gwintowane zamknięcia znajdują szerokie zastosowanie w opakowaniach pełniąc dodatkowe funkcje np. otwieranie opakowania wykonanego z laminatu kartonowo-polimerowo-aluminiowego (rys.1.12.a). W pojemnikach na odczynniki chemiczne ze względów bezpieczeństwa zamknięcie podczas odkręcania nie jest zdejmowane całkowicie z szyjki pojemnika (rys.1.12.b), lecz utworzone jest rozszczelnienie w części spustowej pojemnika. W przypadku opakowań typu "tuba" wykonanych ze stopów lekkich, wykorzystywanych do magazynowania substancji o podwyższonej lepkości (np. żele, kremy, pasty) zamknięcia pełnią również rolę przebijaka membrany gwarancyjnej (rys.1.12.c).

Z uwagi na uzyskanie specjalnych właściwości gwintowane zamknięcia wytwarzane są w wielowarstwowej technologii Co-injection [67,68] (rys.1.13) lub Monosandwich [69], które należą do technologii wtryskiwania wieloskładnikowego zamkniętego, co pozwala na uzyskanie wewnętrznej warstwy o właściwościach specjalnych (barierowych).



Rys. 1.13. Zamknięcie wytwarzane w technologii Co-injection z wewnętrzną warstwą barierową [Opracowanie własne]

W przypadku pojemników wykorzystywanych do przechowywania substancji, które mogą wydzielać gazy lub zwiększać swoją objętość podczas magazynowania wykorzystywane są zamknięcia z elementami spełniającymi funkcje odgazowujące (rys.1.14).



Rys. 1.14. Zamknięcie gwintowane z funkcją odgazowywania opakowania: a) otwory zewnętrzne na denku, b) elementy odgazowujące wewnątrz [Opracowanie własne]

W wybranych przypadkach, do formowania zamknięcia wykorzystuje się specjalne elementy formujące tzw. "rdzenie do formowania podcięć" [70–73]. Zastosowanie tego typu elementów formujących wymusza wprowadzenie do konstrukcji gwintowanego zamknięcia (rys.1.15.a) rozwiązanie, które umożliwia działanie z wieloelementowym stemplem (rys.1.15.b).



Rys.1.15. Zamknięcie zaprojektowane pod formowanie za pomocą rdzenia do formowania podcięć a) rozwiązanie z gwintem przerywanym, b) konstrukcja rdzenia formującego (1-płyta mocująca rdzeń, 2-płyta mocująca segmenty zewnętrzne, 3-segment formujący zewnętrzny duży, 4-rdzeń łączący, 5-segment łączący mały) [Opracowanie własne]

Zrównoważony rozwój konstrukcji gwintowanych zamknięć opakowań zakłada możliwość wtórnego wykorzystania materiału w celu wytworzenia nowych wartościowych produktów. Do odseparowania elementów opakowania wytworzonych z różnych materiałów wykorzystywane są linie w pełni automatyczne (systemy sortujące) [74], również przy wykorzystaniu separacji elektrostatycznej [75].

## 1.2.2. Wymagania stawiane polimerowym zamknięciom gwintowanym

Wśród wymagań stawianych gwintowanym zamknięciom opakowań najważniejsze jest spełnienie funkcji ochronnych (głównie zagwarantowanie szczelności). Można wyróżnić inne wymagania, które wynikają z potrzeby zastosowania, procesu konstruowania wyrobu i narzędzi, procesu wytwarzania, etapu użytkowania oraz zagospodarowania poużytkowego. Wymagania stawiane gwintowanym zamknięciom opakowań dzieli się na:

- materiałowe: właściwości mechaniczne, odporność chemiczna na substancje umieszczane w opakowaniu, podatność na barwienie, podatność na recykling,
- konstrukcyjne: wypraski zgodne z zasadami technologiczności, cienka ścianka wyrobu, prosta konstrukcja narzędzia, możliwość zastosowania systemów gorąco-kanałowych,
- przetwórcze: produkcja w cyklu automatycznym, szerokie okno przetwórcze, niska lepkość (MFI), duża prędkość wtrysku, niskie temperatury przetwórcze, krótki czas chłodzenia, podatność na recykling, podatność na produkcję zautomatyzowaną (kontrola wyrobu oraz logistyka),
- funkcjonalne: ochrona zawartości, przenoszenie informacji, łatwe dokręcanie i odkręcanie, zabezpieczenie gwarancyjne, dozowanie i aplikowanie zawartości opakowania.

## 1.2.3. Tworzywa polimerowe stosowane wytwarzania zamknięć gwintowanych

Tworzywa termoplastyczne stosowane do produkcji gwintowanych zamknięć charakteryzują się [76,77]:

- podwyższoną odpornością na oddziaływanie zewnętrzne (użytkownika, czynników zewnętrznych, substancji przechowywanych),
- podatnością na wykonanie elementów sprężystych (np. zawiasy, zaczepy),
- odpornością na korozję naprężeniową,
- odpornością na wysoką temperaturę podczas transportu i magazynowania,
- dobrymi właściwościami przetwórczymi,
- wysoką sztywnością,
- możliwością wykonywania wyrobów cienkościennych,
- wysokimi właściwościami estetycznymi,

- odpornością chemiczną,
- barierowością,
- dobrymi właściwościami użytkowymi.

W produkcji zamknięć gwintowanych stosowane są najczęściej tworzywa poliolefinowe (PP, PE-LD, PE-HD) [78]. Tworzywa poliolefinowe swoją dominującą rolę na rynku zawdzięczają ekonomiczności i ekologiczności w produkcji i wtórnemu zagospodarowaniu oraz uniwersalności w zastosowaniach [79]. Cechy charakteryzujące te tworzywa stosowane w produkcji zamknięć, są związane z:

- właściwościami mechanicznymi udarność, moduł Younga, twardość, odporność na temperaturę, odporność na pełzanie,
- konstrukcją wytworu i narzędzia wypraski cienkościenne, różnorodna grubość ścianek, stosowanie systemów GK, odwzorowanie faktury, usuwanie z narzędzia przetwórczego,
- przetwarzalnością szerokie okno przetwórcze, możliwość przetwarzania tworzyw dedykowanych wytłaczaniu i wytłaczaniu z rozdmuchiwaniem, niewymagane suszenie, podatność na recykling, podatność na utylizację, automatyzacja kontroli jakości, podatność na barwienie, podatność na stosowane dodatki,
- użytkowaniem odporność na korozję naprężeniową, odporność na wysoką temperaturę, odporność chemiczna, sprężystość-elastyczność, barierowość, szczelność, podatność na transport i magazynowanie.

Rozwój materiałów poliolefinowych poprzez ich modyfikowanie oraz tworzenie nowych rozwiązań i zastosowań powoduje, że badaniom podlega ich morfologia [80,81], właściwości termiczne [82,83] oraz właściwości mechaniczne [84–86]. Tworzywa poliolefinowe są podatne na modyfikowanie dodatkami [87,88,89] oraz stosowanie napełniaczy [90,91] co wymusza badanie tych kompozycji w obszarze ich przetwórstwa [92,93], gdzie weryfikowany jest wpływ zmiennych parametrów technologicznych [94,95] na właściwości reologiczne [96–99], stan gotowego wytworu [100,101], właściwości użytkowe [102,103] oraz geometrię obiektów badań [104,105]. Przeprowadzane są również badania polegające na wtórnym zagospodarowaniu materiałów poliolefinowych w nowych aplikacjach [106–108] oraz zastosowanie wybranych dodatków [109,110], napełniaczy [111,112] jak i tworzenie mieszanin materiałowych z innymi tworzywami poliolefinowymi [113–115], tworzywami częściowokrystalicznymi [116–118] oraz tworzywami amorficznymi [119,120]. Pod uwagę brane są również mieszaniny poliolefinowe z materiałami naturalnymi i syntetycznymi [121–124].

W tabeli 1.1. zestawiono wybrane właściwości mechaniczne i przetwórcze materiałów poliolefinowych wykorzystywanych do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań, dostarczane na rynek przez następujących producentów surowców: Borealis [125–127], LyondellBasell Industries Holdings [128], Basell Orlen Polyolefins [129–137], Sabic [138–140], Dow [141–143], Ineos [144–146].

Tworzywa wykorzystywane do produkcji gwintowanych zamknięć występują w szerokim zakresie parametrów właściwości przetwórczych i mechanicznych. Wpływ na taki stan może mieć budowa makrocząsteczek polimeru oraz zastosowane dodatki (materiały pomocnicze). Tworzywa z grupy polietylenów posiadają wskaźnik szybkości płynięcia (MFI), wyraźnie niższy niż materiały z grupy polipropylenów. Z zestawienia wynika, że materiały na gwintowane zamknięcia przeważnie charakteryzują się modułem sprężystości (dla PP i PE-HD) od ok. 1000MPa a w niektórych przypadkach mogą przekraczać 2000MPa. Podobnie jest z wytrzymałością na granicy plastyczności, gdzie PP i PE-HD uzyskują wartości w przedziale 22 - 30MPa oraz wynikami twardości w przedziale 44 - 57MPa. Te wskaźniki nie dotyczą polietylenu małej gęstości (PE-LD), który oprócz temperatury mięknienia (zakres zbliżony do pozostałych tworzyw) posiada kilkukrotnie mniejszą wartości w zakresach prezentowanych wskaźników.

Material	Gęstość	Wskaźnik szybkości płynięcia	Modul sprężystości przy rozciąganiu	Granica plastyczności przy rozciąganiu	Wydlużenie na granicy plastyczności	Udarność Chrapy z karbem (23°C)	Temperatura mięknienia Vicata	Twardość metodą kulki (H358/30)
Jednostka	g·cm <sup>-3</sup>	g·10min <sup>-1</sup>	MPa	MPa	0/0	kJ·m <sup>-2</sup>	°C	MPa
Norma	ISO 1183	ISO 1133		ISO 527		ISO 179	ISO 306	ISO 2039-1
			FOLI	ROPYLEN PI				
HOMOPOLIMER	0,9	2,1 + 53	$1400 \div 1700$	32÷36	8÷9	$2,0{\div}5,0$	90÷95	$68 \div 80$
KOPOLIMER BLOKOWY	0,9	$6 \div 100$	$1200 \div 1650$	$24 \div 30$	4÷7	3,5÷8	65÷90	50÷69
KOPOLIMER RANDOMICZNY	0,9	$1,8{\div}48$	950÷1150	$25 \div 30$	$11 \div 14$	$4,5\div6$	68÷72	47÷60
INNE (Specjalne)	0,9	$18 \div 26$	$1200 \div 2300$	23÷41	5÷12	$2 \div 6$	57÷104	71÷85
			TOA	<b>IETYLEN PE</b>				
HDPE	$0,95{\div}0,96$	$0,4{\div}10$	$1000 \div 1350$	22÷30	10	2,5÷12	63÷70	44÷57
LDPE	$0,92{\div}0,93$	0,3.4	$150 \div 300$	9÷13	I	I	80÷97	$13 \div 21$

Tab.1.1. Zestawienie wybranych właściwości materiałów poliolefinowych stosowanych do produkcji gwintowanych zamknięć [Opracowanie własne]

#### 1.2.4. Standaryzacja w połączeniach gwintowych opakowań

Standaryzacja w konstrukcji elementów polimerowych połączenia gwintowego pozwala na ujednolicenie ich cech geometrycznych. Pozwala to m.in. na kojarzenie par gwintowych składanych elementów (zamknięcie oraz pojemnik) wytwarzanych przez różnych producentów. Na rysunku 1.16 przedstawiono główne cechy gwintowanych zamknięć i szyjki pojemników opisujące przestrzeń gwintowaną [147–149]. Wymiary związane z opisem geometrii gwintu oraz jego położenia podlegają przyjętym w procesie wytwarzania tolerancjom [150,151].



Rys. 1.16. Standaryzacja wymiarowa w przestrzeni połączenia gwintowego polimerowego zamknięcia - szyjki pojemnika: H- wysokość cylindrycznej części gwintowej, Pskok gwintu, D- średnica gwintu, D'- średnica wewnętrzna gwintu, S- początek gwintu, L- grubość wnęki pod wkładkę uszczelniającą,  $\beta$ - kąt technologiczny zamknięcia,  $\alpha$ - kąt roboczy gwintu, **Y**- kąt wzniosu linii śrubowej [147–149]

Na podstawie przyjętych wytycznych stowarzyszenia Glass Packaging Institute (GPI) oraz Society of the Plastics Industry (SPI) podjęto się standaryzacji rozwiązań w połączeniu gwintowym opakowań szklanych, aluminiowych i polimerowych. Na rysunku 1.17 przedstawiono wybrane przykłady standaryzacji cech geometrycznych gwintów wykorzystywanych w opakowaniach polimerowych:

- 400: 1 zwój gwintu ciągłego, standardowa wysokość szyjki,
- 410: 1,5 zwoju gwintu ciągłego, standardowa wysokość szyjki,
- 415: 1,5 zwoju gwintu ciągłego, większy wymiar "H" szyjki,
- 425: 2 zwoje gwintu ciągłego, drobny gwint, standardowa wysokość szyjki,
- 430: 1 zwój gwintu ciągłego, gruby gwint, warga uszczelniająca, standardowa wysokość szyjki,

- luxor: 1,5 zwoju gwintu ciągłego, podwójna szyjka,
- 2030: gwint wielokrotny (nieciągły), standardowa wysokość szyjki,
- 2035: gwint wielokrotny (nieciągły), większy wymiar "H" szyjki,

Globalne wprowadzenie standaryzacji daje możliwość kojarzenia elementów połączenia gwintowego wytwarzanych przez różnych dostawców na całym Świecie.



Rys. 1.17. Standaryzacja geometrii gwintowych wykorzystywanych w opakowaniach [150,152,153]

## 1.3. Charakterystyka technologii wytwarzania polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań

Technologia wtryskiwania tworzyw polimerowych jest zaawansowanym wielowątkowym procesem, którego poprawne funkcjonowanie zależy od składowych procesu technologicznego oraz wpływu czynników zewnętrznych. Na rysunku 1.18 przedstawiono współzależności w układzie technologicznym procesu wtryskiwania. Równowaga pomiędzy elementami procesu, czynnikami zewnętrznymi oraz ich współzależne oddziaływania wpływają na uzyskanie stanu równowagi, a tym samym uzyskanie zamierzonych własności wyrobu i oczekiwanej wydajności produkcji. W celu uzyskania końcowych produktów o powtarzalnych własnościach, składowe procesu wraz z czynnikami muszą stworzyć stabilny układ. Każda zmiana jednego z elementów układu technologicznego zmienia warunki procesu co prowadzi do jego destabilizacji, która z kolei będzie zauważalna poprzez zmianę jakości lub wydajności produkcji.



Rys. 1.18. Relacje pomiędzy wyrobem oraz wydajnością produkcji a składowymi procesu i czynnikami zewnętrznymi [154]

## 1.3.1. Maszyny do wytwarzania zamknięć gwintowanych

Wytwarzanie polimerowych gwintowanych zamknięć stanowi ważny obszar aplikowania w procesie produkcyjnym innowacyjnych rozwiązań technologicznych głównie ze względu na masowość produkcji oraz specyficzne wymagania stawiana podczas użytkowania.

Podstawowe wymagania stawiane wtryskarkom do produkcji gwintowanych zamknięć to efektywna oraz uzasadniona ekonomicznie produkcja. Wtryskarki do wytwarzania gwintowanych zamknięć charakteryzują się następującymi cechami:

- szybkobieżność (czas cyklu poniżej 2s),
- precyzja (mała masa wytwarzanych zamknięć),
- powtarzalność (wąskie okna tolerancji wymiarowej),
- elastyczność (produkcja mało seryjna oraz masowa).

Na rysunku 1.19 przedstawiono standardowe stanowisko do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań wyposażone w układ suszącodozujący (1), który pobiera materiał z pojemnika magazynującego (3) i podaje materiał do układu uplastyczniającego wtryskarki (2). Po rozformowaniu wypraski trafiają do zespołu transportującego (4), który przekazuje je do pojemnika zbiorczego.



Rys. 1.19 Przemysłowe stanowisko produkcyjne do wytwarzania polimerowych gwintowanych zamknięć [Opracowanie własne]

Nowoczesne maszyny przeznaczone do realizowania procesu wtryskiwania gwintowanych zamknięć opakowań mogą być wyposażone w napędy: hydrauliczny (układ narzędziowy) i elektryczny (układ uplastyczniający) lub być całkowicie obsłuchiwane przez napędy elektryczny [155,156]. Maszyny przetwórcze wykorzystywane w procesie wtryskiwania są poddawane badaniom energochłonności [157–159], badaniom sztywności konstrukcji [160–163] oraz badaniom obciążeń w układach wtryskarki [160,161] występujących podczas procesu wytwarzania.

W masowej produkcji gwintowanych zamknięć opakowań najczęściej wykorzystywane są tzw. "wtryskarki szybkobieżne" opierające się na napędzie elektrycznym [164–166].

Dodatkowo stanowiska produkcyjne wyposażone są w systemy kontroli jakości, które metodami optycznymi (analiza obrazu) weryfikują głównie cechy geometryczne każdego wytwarzanego zamknięcia. Wykorzystując takie systemy jest możliwość wytwarzania kilku tysięcy sztuk na minutę. Systemy wizyjne pozwalają na kontrolę i analizę cech geometrycznych zamknięcia tj. średnicę, owalizację, wymiary gabarytowe, deformację, uszkodzenia, wady, grawerunki, kolor, zanieczyszczenia i inne [167,168]. Na rysunku 1.20 przedstawiono stanowisko przeznaczone do kontroli jakości on-line (a) każdego wyprodukowanego zamknięcia wykorzystujące zaawansowane narzędzia do analizy wymiarów i deformacji (b).



Rys.1.20 Nowoczesny system do kontroli jakości on-line: a) modułowe stanowisko do kontroli jakości, b) panel roboczy stanowiska[167,168]

## 1.3.2. Narzędzia do wytwarzania zamknięć gwintowanych

Do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań w technologii wtryskiwania ciśnieniowego wykorzystuje się formy wtryskowe, które można podzielić ze względu na rozformowywanie (uwalnianie z formy) gwintowanych zamknięć [169,170]:

- spychanie nakrętki ze stempla formującego (rys.1.21),
- wykręcanie z nakrętki stempla formującego (rys.1.22),
- składanie do wewnątrz w nakrętce rdzenia formującego (zastosowanie rdzenia do formowania podcięć) (Rys.1.23),

W formach wtryskowych stosowane są najczęściej systemy gorącokanałowe (poz. 6 na rys.1.21-1.23) zapewniające powtarzalną bezodpadową produkcję polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań. Na rysunku 1.21 przedstawiono przekrój równoległy do osi roboczej formy wtryskowej. Budowa narzędzia przetwórczego oraz konstrukcja gwintowanego zamknięcia (zarys gwintu charakteryzujący się łagodnymi kątami i promieniami) umożliwiają rozformowywanie wypraski (oddzielenie wypraski od elementów formujących) poprzez spychanie ze stempla formującego.



Rys.1.21. Schemat konstrukcji formy wtryskowej do wytwarzania zamknięć gwintowanych (tzw. nakrętka spychana): 1-stempel formujący, 2-zespół prowadząco-ustalający, 3-pierścień spychający, 4- gniazdo formujące, 5 matryca formująca, 6-system gorącokanałowy [Opracowanie własne]

W przypadku gwintowanego zamknięcia o wyraźnie naciętym zarysie gwintu, rozformowywanie zachodzi przez wykręcanie stempla formującego z wypraski (rys. 1.22). W tym wypadku zespół stempla formującego ma złożoną budowę z uwagi na występowanie elementów stałych oraz przemieszczających wzdłuż osi narzędzia lub występują jako elementy przekładni zębatej.

Przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne zamknięcia może wpływać na cykl procesu wytwarzania. Skrócenie czasu można uzyskać przez przyspieszenie rozformowywania wypraski podczas otwierania narzędzia. W tym celu wykorzystuje się tzw. rdzenie do formowania podcięć, których zespoły przy usuwaniu wypraski z formy zsuwają się do środka stempla uwalniając przy tym geometrię wewnętrzną oraz gwint (rys. 1.23). Przyjęcie takiego rozwiązania, może pozytywnie wpłynąć na zmniejszenie wymiarów gabarytowych oraz uproszczenie konstrukcji narzędzia przetwórczego.



Rys.1.22. Schemat konstrukcji formy wtryskowej do wytwarzania zamknięć gwintowanych (tzw. nakrętka wykręcana): 1-zespół wykręcający ze stemplem formującym, 2zespół prowadząco-ustalający, pierścień spychający, 4-gniazdo formujące, 5-matryca formująca, 6-system gorąco-kanałowy [Opracowanie własne]



Rys.1.23. Schemat konstrukcji formy wtryskowej do wytwarzania zamknięć gwintowanych (rozformowywanie poprzez składanie zespołu stempla formującego): 1-zespół składanego rdzenia formującego, 2-zespół prowadząco-ustalający, 3-pierścień spychający, 4-gniazdo formujące, 5-matryca formująca, 6-system gorącokanałowy [Opracowanie własne]

Grupy elementów	Materiał wg. DIN	Materiał wg. Werkstoff	Oznaczenia handlowe
	X40Cr14	1.2083	-
	45NiCrMo16	1.2767	-
Elementy formujące	X37CrMoV5-1	1.2343	-
	X40CrMoV5-1	1.2344	-
	CuBe2	-	Ampcoloy 83
	-	-	Moldmax HH
	X33CrS16	1.2085	M315
Elementy	40CrMnMoS8-6	1.2312	-
formy	X38CrMo17	1.2316	M303
	C45U	1.1730	-
Belki transportowe i spinające	C45U	1.1730	-
	40CrMnMoS8-6	1.2312	-
Elementy	AlZnMgCu1,5	3.4365	Fortal
systemów	X38CrMo17	1.2316	M303
termostatujących	CuZn39Pb3	2.0401	-
Elementy ślizgowe	90MnCrV8	1.2842	NMV
Elementy	X153CrMoV12	1.2379	-
prowadzące	34CrAINi7-10	1.8550	-
Elementy mniej odpowiedzialne	C45U	1.1730	_
Łączniki siłowników	1.7225	40HMT	-
Sprzęgła	C45U	1.1730	-

Tab. 1.2. Wybrane materiały wykorzystywane w konstrukcji narzędzi przetwórczych [Opracowanie własne]

Konstrukcja form wtryskowych do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań opiera sie w dużej mierze na elementach standardowych oraz znormalizowanych. Korzystanie z takich rozwiązań znacznie przyspiesza proces projektowania, wytwarzania oraz eksploatacji narzędzi przetwórczych. Formy wtryskowe do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań są wykorzystywane do masowej produkcji. Czas użytkowania form trwa od kilkunastu miesięcy do kilku lat. W tym czasie można wytworzyć nawet kilkaset milionów sztuk wyprasek. Materiały wykorzystywane do budowy narzędzi przetwórczych muszą zapewnić stabilne parametry procesu, trwałość elementów formy podczas długotrwałej eksploatacji narzędzi oraz powtarzalne wymiary wytworów. W tym celu stosowane są najnowsze rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne tj. materiały o specjalnych właściwościach, powłoki, specjalne obróbki oraz specjalne technologie [171,172].

Z uwagi na powszechnie stosowaną nomenklaturę materiałów wykorzystywanych do budowy form, ich oznaczenia podano wg normy DIN oraz Werkstoff. W tabeli 1.2 zestawiono w grupach wybrane materiały wykorzystywane w konstrukcji narzędzi do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań. W konstrukcji narzędzi przetwórczych do wytwarzania gwintowanych zamknięć elementy korpusów są wykonywane z materiałów w stanie ulepszonym cieplnie, natomiast elementy formujące są użytkowane w stanie zahartowanym [125, 126], [173–175].

Narzędzia do przetwórstwa wyprasek wtryskowych weryfikowane są pod kątem efektywności odprowadzania ciepła z gniazda formującego przy zastosowaniu konwencjonalnych układów termostatujących [176,177], kanałów konformalnych [178–180], technologii szybkiego prototypowania [181,182] oraz technologii hybrydowych [183,184]. Do badań reologicznych i cieplnych w formach wtryskowych wykorzystuje się narzędzia opierające się na metodach stykowych [185–187] i bezstykowych [188,189]. Badania stykowe wykorzystuje się do poznawania zjawisk związanych z wypełnianiem gniazda formującego, zjawisk termicznych oraz eliminowania wad w gotowym wytworze [190–192]. Metody numeryczne wykorzystywane są w badaniach reologicznych [189–191] oraz termicznych [196–199].

### 1.3.3. Procesy technologiczne wytwarzania zamknięć gwintowanych

Z uwagi na masową produkcję do wytwarzania polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań wykorzystywane są następujące technologie bazujące na przetwarzaniu materiału wsadowego w postaci granulatu. Wytwarzanie gwintowanych zamknięć opakowań zachodzi w technologiach:

- wtryskiwania ciśnieniowego IM ( ang. Injection Moulding),
- tłoczenia RCCM (ang. Rotary Cap Compression Moulding).

Wprowadzanie elementów automatyzacji (np. poprzez zastosowanie chwytaka odbierającego wypraski lub manipulatora zamykającego klapkę "fliptop") w technologiach wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań powoduje podniesienie efektywności procesu (proces pakowania wyprasek) oraz jakości wytwarzanych wyprasek (brak uszkodzeń i rys na powierzchni). Na rysunku 1.24 przedstawiono schemat zautomatyzowanego procesu wtryskiwania gwintowanych zamknięć opakowań z zastosowaniem chwytaka odbierającego wypraski.



Rys.1.24. Schemat zautomatyzowanego procesu w technologii wtryskiwania polimerowych gwintowanych zamknięć [Opracowanie własne]

W zaawansowanych systemach produkcyjnych, technologie wtryskiwania oraz prasowania mogą stanowić jeden z etapów wytwarzania polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań. Technologie wytwarzania mogą być modyfikowane ze względu na przetwarzany materiał, konstrukcje wytworów, konstrukcje narzędzi przetwórczych, przetwórstwo oraz użytkowanie. Na rysunku 1.25 przestawiono etapy wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań w technologii tłoczenia obrotowego (Rotary Cap Compression Moulding, RCCM. Technologia RCCM jest znacznie bardziej wydajna w porównaniu do technologii wtryskiwania, gdzie proces wytwarzania można potraktować jako ciągły. W technologii RCCM etapy wytwarzania odbywają sie na osobnych stanowiskach, co powoduje, że cała linia produkcyjna zajmuje znacznie więcej miejsca niż stanowisko produkcyjne technologii wtryskiwania.



Rys. 1.25. Etapy wytwarzania gwintowanych zamknięć w technologii tłoczenia obrotowego (Rotary Cap Compression Moulding) [Opracowanie własne]

## 1.4. Zastosowanie polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań

1.4.1. Linie technologiczne w procesie wytwarzania gwintowanych zamknięć

Linie technologiczne wykorzystywane do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań mogą stanowić część linii produkcyjnej ostatecznego produktu (np. pojemnik z substancją pakowaną). Tego typu całkowicie zautomatyzowane linie produkcyjne składają się z linii produkującej pojemniki, linii produkcyjnej zamknięć, stacji napełniania pojemników, stacji zamykającej, stacji etykietującej oraz stacji pakującej. Na rysunku 1.26 przedstawiono etapy wytwarzania na zautomatyzowanej linii technologicznej do kompleksowej produkcji gwintowanych zamknięć opakowań.



Rys. 1.26. Etapy wytwarzania realizowane przy użyciu linii do produkcji gwintowanych zamknięć opakowań [Opracowanie własne]

1.4.2. Transport, magazynowanie i użytkowanie zamknięć gwintowanych

Pojemniki polimerowe posiadające połączenie gwintowe (zamknięcie) podczas transportu i magazynowania są narażone na występowanie niekorzystnych warunków zewnętrznych, co może generować uszkodzenie któregoś z elementów pojemnika. Zakres zmian temperatury jaki może oddziaływać na pojemnik ok. 70°C (od -20 °C do +50 °C). Pękanie elementów pojemnika występuje na skutek korozji naprężeniowej, oddziaływujących sił zewnętrznych lub wewnętrznych, temperatury, czynników zewnętrzny lub wewnętrznych. Na rysunku 1.27 przedstawiono przykładowy pojemnik dedykowany do transportu i magazynowania w utrudnionych warunkach otoczenia. Konstrukcja pojemnika przewiduje zwiększone oddziaływanie obciążeń na pojemnik, posiadający elementy pozycjonujące (rys. 1.27.a i 1.27.b) oraz elementy, których zadaniem jest zwiększenie sztywności postaciowej.


Rys. 1.27. Pojemnik "Kanister 5L" przeznaczony do "sztaplowania" podczas transportu i magazynowania: a) widok całego pojemnika, b) elementy pozycjonujące na górnej części kanistra, c) elementy poprawiające sztywność postaciową, d) elementy pozycjonujące na spodzie kanistra [Opracowanie własne]

## 1.4.3. Warunki użytkowania połączeń gwintowych opakowań

Wybór rodzaju i funkcjonalności połączenia gwintowego (zamknięć oraz połączeń) ma bezpośredni wpływ na przyjętą konstrukcję elementów opakowania. Połączenia gwintowe w opakowaniach są wykorzystywane:

- jednokrotnie użytkowanie opakowania do momentu opróżnienia pojemnika,
- wielokrotnie połączenie gwintowe użytkowane w sposób rozłączający i łączący zespół, często przy zmiennych warunkach.

Ustalenie precyzyjnych warunków zrealizowania połączenia gwintowego jest istotne z punktu widzenia spełnienia funkcji głównie ochronnych. Można wyróżnić tu moment dokręcający, moment odkręcający oraz moment graniczny (skutkuje nieszczelnością połączenia). Niespełnianie warunków użytkowania doprowadza do nieszczelności opakowania wynikającego z : zastosowanie zbyt niskiego momentu dokręcającego, przeskoczenie (ześlizgnięcie) zamknięcia na gwincie szyjki butelki, deformacji zarysu gwintu lub pęknięcie zamknięcia na skutek zastosowania zbyt dużego momentu dokręcającego. Przyjmuje się, że wartość momentu odkręcającego wynosi od 40% do 80% momentu dokręcającego. Wpływ na wartość momentu dokręcającego i odkręcającego mogą mieć takie czynniki jak: typ i zarys gwintu, materiał opakowania, zastosowanie wkładki uszczelniającej, czas użytkowania (transport i magazynowanie) [148,149,200]. Procedury związane z ustalaniem i kontrolą zastosowanych momentów, zostały określone dla zamknięć z gwintem ciągłym (ang. screw) [201], gwintem częściowym (ang. lug) [202], zamknięcia z zabezpieczeniem dziecięcym (ang. child-resistant closures - CRC) [203,204].

# 1.5. Charakterystyka badań połączeń gwintowych opakowań polimerowych

## 1.5.1. Metody badawcze połączeń gwintowych opakowań

Badania opakowań, w których zastosowano połączenia gwintowe z zamknięciem polimerowym mogą być weryfikowane uwzględniając kompletny pojemnik, parę gwintową połączenia lub wybrany element opakowania (rys. 1.28). Badania opakowań z zastosowaniem różnych cech gwintów można podzielić na badania numeryczne, statyczne i dynamiczne.

Wśród badań związanych z oceną cech geometrycznych gwintu opakowania polimerowego występującego w pojemniku można wyróżnić: badania przeprowadzane na kompletnym wypełnionym pojemniku [205–207], badania połączenia gwintowego [18,19] oraz badania elementów pojemnika będących elementami połączenia gwintowego [20,208,209]. Badania numeryczne, które wykorzystują metodę elementów skończonych (MES) [21], mogą odzwierciedlić warunki rzeczywiste, co znacznie przyspiesza analizę i stanowi ważną wartość dodana w obszarze badań nieniszczących. Badania numeryczne moga być wykorzystywane na etapie projektowania poszczególnych elementów opakowania jak i całego zespołu pojemnika. Badania numeryczne (symulacyjne), mogą dotyczyć badań wytrzymałościowych związanych z obciążeniem pojemnika lub jego elementów. Badania symulacyjne mogą być również związane z badaniami procesów wytwarzania elementów opakowania [17,18,210]. Badaniom moga zostać poddane całe pojemniki (również z substancja przechowywaną), połączenie gwintowe oraz pojedyncze elementy wchodzące w skład opakowania stanowiące element połączenia gwintowego [20,211,212].



Rys.1.28. Podział badań z uwzględnieniem połączeń gwintowych w pojemnikach [Opracowanie w własne]

Badania opakowań, połączeń gwintowych lub ich elementów weryfikuje się w następujących obszarach:

- odporność na uszkodzenia podczas transportu (np. badanie na uderzenie i upadek z wysokości),
- szczelność połączenia gwintowego,
- badania dynamiczne pary gwintowej (np. parametry nakręcania, badania innych funkcji użytkowych, ochronnych),
- badania odporności na czynniki zewnętrzne,
- badania odporności na substancje przechowywanego w opakowaniu (ESCR),
- badania numeryczne procesu wytwarzania (np. symulacja procesu wtryskiwania),
- badania numeryczne procesu użytkowania (np. wytrzymałość, deformacje, LS-Dyna, Ansys) [212].

Badania materiałów polimerowych wykorzystywane do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań w dużej mierze opierają się na oznaczaniu cech wytrzymałościowych (statycznych i dynamicznych). Badania środowiskowej korozji naprężeniowej tworzyw poliolefinowych [213,214] i elementów opakowań przebiegają w odmienny sposób [215–217] niż w przypadku materiałów polimerowych o przeznaczeniu konstukcyjnym, gdzie może zachodzić zjawisko korozji naprężeniowej [218–221].

## 1.5.2. Stanowiska do badań połączeń gwintowych opakowań

Układy techniczne do badań połączeń gwintowych występują w postaci aparatury posiadającej uniwersalne zastosowanie w obszarze pomiarów momentu obrotowego oraz przemieszczenia kątowego. Na rysunku 1.29 przedstawiono urządzenia do badania nakręcania elementów połączeń gwintowych, które można podzielić na:

- aparaturę przenośną (urządzenia uniwersalne ogólnego przeznaczenia) (rys.1.29.a): urządzenia ręczne, posiadające podstawowe funkcje kontrolnopomiarowe momentu obrotowego,
- aparaturę stanowiskową:
  - stanowiska kontrolno-pomiarowe (rys.1.29.b): urządzenia stanowiskowe (laboratoryjne) posiadające podstawowe funkcje kontrolno-pomiarowe,

- stanowiska programowalne (rys.1.29.c): uniwersalne zaawansowane stanowiska kontrolno-pomiarowe pozwalające programować badania połączeń gwintowych (konfiguracja nastaw, wielkości mierzone, wizualizacja wyników).



Rys.1.29. Przykładowe systemy do badania nakręcania połączeń gwintowych: a) aparatura przenośna (1-urządzenie rejestrujące, 2-statyw z czujnikiem momentu, 3-badane połączenie gwintowe) firmy Com-ten industries [222], b) stanowisko kontrolnopomiarowe (ręczne) firmy Mecmesin [223], c) uniwersalne stanowisko programowalne firmy Mecmesin

#### 1.6. Wnioski i ustalenia do badań własnych

Aktualny stan literatury specjalistycznej oraz opracowane i przedstawione na jej podstawie wybrane wiadomości z zakresu konstrukcji gwintowanych zamknięć opakowań, materiałów poliolefinowych, technologii wytwarzania, ich zastosowania oraz badań w obszarze elementów opakowań pozwala na sformułowanie następujących wniosków i ustaleń:

- Dynamiczny wzrost zapotrzebowania oraz stale wzrastający obszar zastosowania polimerowych gwintowanych zamknięć powoduje ciągły ich rozwój w obszarze materiałowym, konstrukcyjnym, technologicznych, użytkowym (w tym recyklingu).
- 2. Materiały poliolefinowe przeznaczone do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań charakteryzują się szerokim zakresem parametrów przetwórczych i użytkowych, co utrudnia dobór ich do konkretnego przeznaczenia a podatność na przetwórstwo nie jest skorelowane z właściwościami mechanicznymi i użytkowymi.
- Zawarte w literaturze światowej informacje dotyczące wartości parametrów związanych z osadzaniem zamknięć gwintowanych są ogólne i nie są powiązane z zastosowanym materiałem, geometrią zamknięcia, technologią przetwarzania oraz końcowym użytkowaniem.
- 4. Standaryzacja konstrukcji połączeń gwintowych opakowań polimerowych (lub z udziałem elementów polimerowych) nie uwzględnia doboru odpowiednich rozwiązań materiałowych, użytkowania oraz niekorzystnych zjawisk towarzyszących (wpływ czynników zewnętrznych).
- 5. W przypadku oddziaływania czynników zewnętrznych (np. substancji przechowywanych w opakowaniu) wyniki badań zawartych w literaturze ograniczają się jedynie do opartych na próbkach znormalizowanych danych materiałowych, które nie mogą być odniesieniem do obiektów rzeczywistych. Spowodowane jest to m.in. zmiennymi warunkami podczas procesu wytwarzania wpływającymi na parametry procesu.
- 6. W literaturze brak jest opisu wytycznych do badania oddziaływania czynników zewnętrznych na elementy połączenia gwintowego (badania odporności na środowiskową korozję naprężeniową) dla obiektów rzeczywistych w postaci gwintowanych zamknięć opakowań, jest to szczególnie ważne w przypadku, gdy konstruowane są nowe zamknięcia. Brak jest również oceny wkładek uszczelniających oraz wpływu środków chemicznych na warunki nakręcania w połączeniu gwintowym.

Informacje i analizy zawarte w rozdziale 1.2-1.5 rozprawy pozwoliły na określenie kierunku i wytycznych do podjęcia badań przebiegu i efektów wtryskiwania poliolefinowych gwintowanych zamknięć opakowań. Wykazano, że wiele czynników z obszaru materiałowego, geometrycznego, przetwórczego i użytkowego może mieć wpływ na nie spełnianie funkcji użytkowych poprzez występowanie deformacji oraz pękania gwintowanych zamknięć opakowań.

Z analizy literatury wynika również potrzeba weryfikacji obecnie stosownych metod badawczych w zakresie wpływu czynników zewnętrznych występujących podczas użytkowania oraz opracowania uniwersalnej metodyki badań obiektów rzeczywistych.

Poznanie i uzupełnienie wiedzy z zakresu wpływu właściwości stosowanych materiałów, zmian geometrycznych, parametrów użytkowych oraz wzajemnych relacji elementów połączenia gwintowego na realizację funkcji użytkowych stanowi podstawowy cel pracy.

Sformułowany cel pracy uzasadnia podjęcie badań właściwości użytkowych wtryskiwanych nakrętek poliolenifowych.

# 2. CHARAKTERYSTYKA BADAŃ WŁASNYCH

# 2.1. Sformułowanie problemu

W związku z coraz większą liczbą różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych zamknięć zarówno na rynku polskim, jak również światowym, można zaobserwować istotny wzrost wymagań wobec ich najważniejszych funkcji użytkowych i marketingowych. Funkcjonalność oraz estetyka zamknięć to nie jedyne priorytety współczesnych opakowań. Coraz bardziej zwraca się uwagę na koszty produkcji. Aby je zmniejszy, trzeba wnikliwie analizować współczesny trendy, z których wynika konieczność optymalizacji konstrukcji zamknięć z tworzyw polimerowych oraz wprowadzanie szeregu rozwiązań innowacyjnych w jego budowie.

W przeprowadzonych badaniach pod uwagę wzięto zmienne w obszarze cech konstrukcyjnych nakrętek gwintowanych, parametrów procesu wytwarzania oraz warunków użytkowania. Do czynników powodujących uszkodzenie lub całkowite zniszczenie elementów opakowań można zaliczyć: cechy geometryczne elementów opakowania, materiały elementów opakowaniowych, parametry procesowe (wtryskiwania), warunki magazynowania i transportu, użytkowanie, substancje przechowywane w opakowaniu. Na rysunku 2.1 przedstawiono przykładowe uszkodzenia gwintowanych zamknięć opakowań wykorzystywanych w różnych branżach. Na rysunku 2.2 przedstawiono miejsca występowania uszkodzenia (pękanie) gwintowanego zamknięcia: przejście pomiędzy denkiem a ścianką cylindryczną, uszkodzenie wzdłuż linii śrubowej zarysu gwintu, wzdłuż ścianki cylindrycznej (równolegle do osi nakrętki). Z kolei na rysunku 2.3 przedstawiono czynniki, które mają wpływ na deformację oraz pękanie gwintowanych zamknięć opakowań.



Rys. 2.1. Przykłady uszkodzeń gwintowanych zamknięć z PE-HD występujące w opakowaniach: a) farmaceutycznym, b) wyrobu medycznego, c) detergentu, d) płynów motoryzacyjnych



Rys. 2.2. Najczęstsze miejsca występowania pęknięć w polimerowych gwintowanych zamknięciach opakowań: a) zewnętrzna krawędź zarysu gwintu, b) miejsce uszczelniania pojemnika



Rys.2.3. Czynniki wpływające na deformację oraz pękanie gwintowanych zamknięć opakowań

# 2.2. Hipotezy badawcze

Badanie przebiegu i efektów procesu wtryskiwania nakrętek poliolefinowych i powiązanie ich z cechami geometrycznymi stwarza możliwości doskonalenia cech użytkowych w tym zwiększenie odporności na deformację oraz pękanie gwintowanych zamknięć.

Wyznaczenie związków pomiędzy właściwościami materiałów, geometrią elementów opakowań (nakrętki, wkładki uszczelniające), parametrami produkcyjnymi, procesowymi oraz innymi czynnikami środowiskowymi umożliwia podwyższanie efektywności w wybranych obszarach użytkowania.

## 2.3. Cele pracy

Głównym celem rozprawy jest: poznanie i opis warunków niezbędnych, w ramach dostępnej wiedzy w obszarze naukowym przetwórstwa tworzyw, do uzasadnionych działań w obszarze wytwarzania oraz optymalnego użytkowania polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań oraz elementów połączeń gwintowych opakowań. Celem utylitarnym jest przede wszystkim określenie wpływu cech geometrycznych połączeń gwintowych, a także elementów uszczelniających na realizację funkcji ochronnych pojemników.

W ramach niniejszej rozprawy przewiduje się:

- projekt i wykonanie stanowiska do badania deformacji polimerowych nakrętek opakowań,
- projekt i wykonanie stanowiska do badania odporności na ściskanie porowatych wkładek uszczelniających z PE,
- projekt i wykonanie stanowiska do badania korozji naprężeniowej,
- weryfikację właściwości mechanicznych wybranych tworzyw wykorzystywanych do wytwarzania gwintowanych zamknięć opakowań,
- badanie wpływu porowatych wkładek uszczelniających w połączeniu gwintowym na deformację oraz pękanie zamknięcia,
- badanie relacji pomiędzy momentem dokręcającym w połączeniu gwintowym, a wybranymi cechami geometrycznymi nakrętki na występowanie deformacji oraz pękania,
- badanie wpływu substancji umieszczanych w opakowaniach na pozycjonowanie elementów połączenia gwintowanego opakowania,
- badanie wpływu cech geometrycznych oraz materiałowych elementów opakowania (nakrętki) na powstające naprężenia i odkształcenia,
- badanie wpływu momentu dokręcającego połączenia gwintowego na występowanie zjawiska środowiskowej korozji naprężeniowej,
- porównanie metod wyznaczania odporności na korozję naprężeniową wg PN i ISO.

# 2.4. Metodyka badań

Badania realizowane w ramach rozprawy doktorskiej przeprowadzono w Zakładzie Przetwórstwa i Recyklingu Tworzyw ( obecnie Zakład Inżynierii Materiałowej i Przetwórstwa Tworzyw) na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Obiekty badań w postaci gwintowanych nakrętek zostały wytworzone w przedsiębiorstwie AK-SON Sp. z o.o. w Bydgoszczy. Wybrane stanowiska badawcze zostały przygotowane w ramach projektów "Krok w przyszłość-stypendia dla doktorantów" oraz "Voucher badawczy".

## 2.4.1. Obiekty wykorzystane w przedsięwzięciu badawczym

W eksperymencie wykorzystano znormalizowane próbki badawcze (tzw. wiosełka i beleczki) a także obiekty rzeczywiste (nakrętki) i były to:

próbki do badań właściwości mechanicznych: próbki badawcze do badań właściwości mechanicznych zostały przygotowane zgodnie z normą: PN-EN ISO 527, PN-EN ISO 178, PN – EN ISO 179, PN – EN ISO 878. Próbki zostały wyprodukowane w modułowej gorąco-kanałowej formie wtryskowej na wtryskarce Battenfeld 350 plus. Forma laboratoryjna umożliwia wytwarzanie dwóch próbek badawczych w jednym cyklu, które połączone są wlewkiem. Na rysunku 2.4 przedstawiono wypraskę, z której przygotowano próbki w postaci wiosełek (poz.1) oraz beleczek (poz.3) wraz z wymiarami. W tabeli 2.2 zestawiono parametry procesu wtryskiwania dla poszczególnych tworzyw wykorzystanych w badaniach właściwości mechanicznych.



Rys.2.4. Gniazdo formujące wypraskę z której przygotowywano próbki badawcze: 1kształtka wykorzystywana w próbie statycznego rozciągania oraz twardości, 2-wlewek doprowadzający, 3-zarys kształtki badawczej w postaci beleczki wykorzystywanej w badaniach udarowych

Tab.2.2. Parametry procesu wtryskiwania stosowane podczas przygotowania próbek badawczych z wybranych materiałów do badania właściwości mechanicznych uzyskane na wtryskarce 350 plus firmy Battenfeld

Materiał	Oznaczenie materiału	Temperatura wtrysku (Str.:V-I), [°C]	Temperatura formy, [°C]	Prędkość wtrysku, [cm <sup>3</sup> /s]	Punkt przełączenia, [mm]	Czas docisku, [s]	Ciśnienie docisku, [bar]	Czas chłodzenia, [s]	Dozowanie, [cm <sup>3</sup> ]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hostalen ACP 5831D	PEHD 1	230,230, 220,210,40	40	50	30	23	600	15	90
Hostalen GC 7260	PEHD 2	230,230, 220,210,40	40	50	31	23	700	15	50
Liten MB71	PEHD 3	230,230, 220,210,40	40	50	31	23	350	15	90
Malen E FABS 23-D022	PELD 1	230,230, 220,210,40	40	50	30	23	270	15	90
Purell 1840H	PELD 2	230,230, 220,210,40	40	60	28	18	600	15	50
Moplen HP500N	PP 1	230,230, 220,210,40	40	60	28	21	400	15	50
Tipplen K597	PP 2	230,230, 220,210,40	40	50	31	23	270	15	90

				Fazy cyklu procesu wtryskiwania												
		(*		Wtry	/sk		Doo	cisk	]	Dozow	anie			C	hłodzenie	
Materiał	Oznaczenie materiału	Temperatura wtrysku [°C]	Ciśnienie wtrysku [MPa]	Czas wtrysku [s]	Prędkość wtrysku [mm/s]	Punkt przełączenia [mm]	Ciśnienie docisku [MPa]	Czas docisku [s]	Skok ślimaka [mm] **)	Prędkość dozowania [1/min]	Ciśnienie plastyfikacji [MPa]	Dekompresja [mm]	Poduszka resztkowa [mm]	Temp. formy [°C]	Czas chłodzenia [s] **)	Czas cyklu **)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Hostalen ACP 5831D	PEHD 1	265, 265, 260, 255, 250, 240	9	1,75	35	4	4	2	40, 40, 41, 41, 42, 43,	220	0,5	5	0,2	12	15, 15, 16, 17, 18, 18,	23, 23, 24, 25, 26, 26
Hostalen GC 7260	PEHD 2	230, 230, 225, 220, 215, 210	8	1,75	20	4	7,5	2	39, 39, 40, 41, 42, 43,	200	0,5	5	0,2	12	14, 14, 16, 16, 18, 18,	22, 22, 24, 24, 26, 26,
Liten MB71	PEHD 3	230, 230, 225, 220, 215, 210	9	1,5	30	3	5	2	39, 39, 40, 41, 42, 43,	200	0,5	5	0,2	12	15, 15, 15, 16, 17, 18,	22,5 22,5 22,5 23,5 24,5 25,5
Malen E FABS 23-D022	PELD 1	220, 225, 220, 215, 210, 200	9	1,75	25	3	5	2	39, 40, 41, 41, 42, 42,	200	0,5	5	0,2	12	15, 16, 17, 17, 18, 18,	23,5 24,5 25,5 25,5 26,5 26,5
Purell 1840H	PELD 2	220, 225, 220, 215, 210, 200	9	2,5	25	3	5	2	39, 40, 41, 41, 42, 42,	200	0,5	5	0,2	12	15, 15, 16, 17, 18, 18,	23,5 23,5 24,2 25,5 26,7 26,7
Moplen HP500N	PP 1	230, 220, 210, 200, 190, 185	8,5	2,1	20	4	7	2	35, 36, 36, 38, 38, 40,	200	0,5	5	0,2	12	10, 12, 12, 15, 15, 16,	18,5 20,5 20,5 23,5 23,5 24,5
Tipplen K597	PP 2	240, 245, 240, 235, 230, 220	8	1,75	20	4	3,5	2	38, 39, 40, 41, 42, 43,	200	0,5	5	0,2	12	14, 14, 15, 16, 17, 18,	22, 22, 23, 24,25,26,

Tab.2.3. Parametry procesu wtryskiwania użyte do wytwarzania próbek (nakrętki Ø54) z wybranych materiałów do badań deformacji uzyskane na wtryskarce KM 40 firmy Krauss Maffei

\*) Parametry poszczególnych stref grzejnych układu uplastycznionego oraz systemu gorąco kanałowego, \*\*) Wartość parametrów uzależniona od zmiennej grubości denka nakrętki  zamknięcie gwintowane Ø54 (rys.2.5). Nakrętka wykorzystana była w badaniach DSC, symulacyjnych oraz deformacji nakrętek polimerowych, podczas których weryfikowano wstępnie 7 materiałów. Gwint w nakrętce jest rozformowywany przez wykręcenie rdzenia formującego. Wytwarzanie nakrętek odbywało się w jednogniazdowej-prototypowej formie wtryskowej, której konstrukcja umożliwia wytwarzanie nakrętek ze zmienną grubością ścianki w obszarze denka (rys.2.6). Wytwarzanie nakrętek odbywało się na maszynie Krauss Maffei o sile zwarcia 400kN. Parametry procesu wtryskiwania badanych nakrętek zawarto w tabeli 2.3.



Rys.2.5. Zamknięcie gwintowane Ø54 (nakrętka wykręcana): a) rzeczywisty obiekt badań, b) wymiary ogólne na modelu CAD

Na rysunku 2.6 przedstawiono wybrane elementy jednogniazdowej formy wtryskowej, wyjaśniający sposób kształtowania grubość denka badanej nakrętki. Forma wtryskowa została wyposażona w system gorąco-kanałowy (10), dzięki któremu punkt wtrysku znajduje się w centralnej części matrycy formującej (9). W gnieździe formującym (8) grubość ścianki denka nakrętki jest ustalana przez stempel formujący (6), który jest osadzony połączeniem gwintowym we wzorniku gwintu (5) ustalając wymiar szczeliny (7). Położenie stempla formującego względem wzornika gwintu jest uzyskiwane przez silnik hydrauliczny (1) za pośrednictwem przekładni łańcuchowej (2), która obraca stempel a tym samym przemieszcza go w osi narzędzia. Precyzyjna pozycja stempla formującego jest ustalana przez zespół regulujący, wyposażony w śruby regulujące (4) oraz krańcowe czujniki położenia (3).



Rys.2.6. Schemat jednogniazdowej formy wtryskowej do wytwarzania próbek badawczych (nakrętka Ø54): 1-silnik hydrauliczny, 2-przekładnia łańcuchowa, 3czujnik położenia, 4-śruba regulująca, 5-wzornik gwintu, 6-stempel formujący, 7-szczelina formująca, 8-gniazdo formujące, 9-matryca formująca, 10-system gorąco-kanałowy

 zamknięcie gwintowane Ø38 (rys.2.7). Nakrętkę użyto w badaniach deformacji, pękania, wpływu substancji z obszaru tzw. "chemii motoryzacyjnej" oraz wpływu elementów połączenia gwintowego. Rozformowywanie nakrętki odbywało się poprzez spychanie jej ze stempla formującego. Badane nakrętki wytworzono w 12-krotnej przemysłowej formie wtryskowej. W Tab. 2.4. zawarto parametry procesu wtryskiwania badanych nakrętek.



Rys.2.7. Zamknięcie gwintowane Ø38 (nakrętka spychana): a) rzeczywisty obiekt badań, b) wymiary ogólne na modelu CAD

Tab.2.4. Parametry procesu wtryskiwania wykorzystywane podczas wytwarzania próbek badawczych (nakrętki Ø38) z PEHD Hostalen GC 7260 uzyskane na wtryskarce Victory 150 firmy Engel

				I	Fazy c	yklu j	proces	u wtr	yskiwa	ania				
(*		Wt	rysk		Do	cisk		Dozowanie				Chłoo	Izenie	
Temperatura wtrysku [°C]	Ciśnienie wtrysku [MPa]	Czas wtrysku [s]	Prędkość wtrysku [mm/s]	Punkt przełączenia [mm]	Ciśnienie docisku [MPa]	Czas docisku [s]	Skok ślimaka [mm]	Prędkość dozowania [%]	Ciśnienie plastyfikacji [MPa]	Dekompresja [mm]	Poduszka resztkowa [mm]	Temp. formy [°C]	Czas chłodzenia [s]	Czas cykłu [s]
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
240, 245, 245, 235, 230, 220,	14	1,7	25	5	8	1	42	80	0,4	6	1,9	12	5	10,9

\*) Temperatura systemu gorąco kanałowego oraz stref układu uplastycznionego (V-I)

zamknięcie gwintowane Ø52 (rys.2.8). Nakrętka była wykorzystywana w badaniach odporności na środowiskową korozje naprężeniową, gdzie wery-fikowano wpływ zmian cech geometrycznych w obszarze denka. Rozformowywanie nakrętki odbywało się poprzez spychanie jej ze stempla formującego. Parametry procesu wtryskiwania zawarto w tabeli 2.5. (A- pierwotna konstrukcja zamknięcia) oraz tabeli 2.6 (B- zmodyfikowana konstrukcja zamknięcia). Wartości pól przekroju w miejscu występowania zniszczenia zamknięcia: wersja A (194mm<sup>2</sup>), wersja B (329mm<sup>2</sup>).



Rys.2.8. Nakrętka wykorzystana w badaniach odporności na środowiskową korozję naprężeniową: a) rzeczywiste obiekty badań (A-pierwotna konstrukcja zamknięcia, Bzmodyfikowana konstrukcja zamknięcia), b) wymiary ogólne na modelu CAD

Tab.2.5. Parametry procesu wtryskiwania wykorzystywane podczas wytwarzania próbek badawczych (nakrętka Ø52 -wersja A) z PEHD Hostalen GC 7260 uzyskane na wtryskarce Victory 90 firmy Engel

	Fazy cyklu procesu wtryskiwania													
(*		Wtı	rysk		Do	cisk		Dozowanie				Chło	lzenie	
Temperatura wtrysku [°C]	Ciśnienie wtrysku [MPa]	Czas wtrysku [s]	Prędkość wtrysku [mm/s]	Punkt przełączenia [mm]	Ciśnienie docisku [MPa]	Czas docisku [s]	Skok ślimaka [mm]	Prędkość dozowania [%]	Ciśnienie plastyfikacji [MPa]	Dekompresja [mm]	Poduszka resztkowa [mm]	Temp. formy [°C]	Czas chłodzenia [s]	Czas cykłu [s]
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
220, 215, 210, 200, 200	13	1,0	28	4	7	1,5	23	100	0,2	4	-	14	3	9,8

(\*)Parametry stref układu uplastycznionego (IV-I) oraz systemu gorąco kanałowego,

Tab.2.6. Parametry procesu wtryskiwania wykorzystywane podczas wytwarzania próbek
badawczych (nakrętka Ø52 -wersja B) z PEHD Hostalen GC 7260 uzyskane na wtry-
skarce Victory 90 firmy Engel

	Fazy cyklu procesu wtryskiwania													
(*		Wt	trysk		Do	cisk		Do	ozowa	nie		Chłodzenie		
Temperatura wtrysku [°C]	Ciśnienie wtrysku [MPa]	Czas wtrysku [s]	Prędkość wtrysku [mm/s]	Punkt przełączenia [mm]	Ciśnienie docisku [MPa]	Czas docisku [s]	Skok ślimaka [mm]	Prędkość dozowania [%]	Ciśnienie plastyfikacji [MPa]	Dekompresja [mm]	Poduszka resztkowa [mm]	Temp. formy [°C]	Czas chłodzenia [s]	Czas cykłu [s]
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
230, 225, 220, 210, 200	125	1,05	40; 65	8	80	3	65	0,5	0,2	6	5,9	14	5	11,7

(\*)Parametry stref układu uplastycznionego (IV-I) oraz systemu gorąco kanałowego,

polietylenowe wkładki uszczelniające. W badaniach zastosowano wkładki uszczelniające wykonane z porowatego PELD o gęstości 200kg/m<sup>3</sup> (PELD3) i grubości 1,0, 1,5, 2,0, 3,0mm (rys.2.8). Przyjęte do badań wkładki z porowatego PE są powszechnie stosowanym elementem uszczelniającym w opakowaniach polimerowych.



Rys.2.8. Wkładki uszczelniające z porowatego polietylenu o gęstości 200 kg/m<sup>3</sup>

znormalizowane próbki do badań środowiskowej korozji naprężeniowej. Do badań środowiskowej korozji naprężeniowej wykorzystano kształtki badaw-cze przygotowano według ISO 16770 oraz PN-EN ISO 22088. Wykorzystanie wyrównoważonej reologicznie formie wtryskowej pozwoliło na otrzy-mywanie próbek różnej konstrukcji w jednym cyklu (rys.2.9). W tabeli 2.7 zestawiono parametry przetwórcze zastosowane przy wytwarzaniu próbek wykorzystanych w/w badaniach. Próbki wg przyjętych standardów ESCR posiadają następujące wymiary i pola przekroju w miejscu pomiarowym: wg ISO 16770 wymiary 5mm x 2,2mm, pole przekroju A<sub>w</sub>=11mm<sup>2</sup>; wg PN-EN ISO 22088 wymiary 6mm x 6mm, pole przekroju (z naciętym karbem) A<sub>b</sub>=16mm<sup>2</sup>.



Rys.2.9. Kształtki badawcze różnych standardów wytworzone w jednym cyklu produkcyjnym: 1- wlewek ze zbalansowanego kanału doprowadzający, 2-beleczka wg ISO 16770, 3-wiosełko badawcze wg PN-EN ISO 22088

Tab.2.7. Parametry procesu wtryskiwania wykorzystywane podczas przygotowania próbek badawczych z wybranych materiałów w badaniach środowiskowej korozji naprężeniowej uzyskane na wtryskarce e-Victory 110 firmy Engel

Materiał	Oznaczenie materiału	Temperatura wtrysku, (Strefy: V-I) [°C]	Temperatura formy [°C]	Prędkość wtrysku [cm³/s]	Punkt Przełączenia [mm]	Czas docisku [s]	Ciśnienie docisku [bar]	Czas chłodzenia [s]	Dozowanie [cm <sup>3</sup> ]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hostalen GC 7260	PEHD 2	230,230, 220,210,40	40	50	3,1	23	700	15	50
MG 7547S	PEHD4	270,260, 260,230,40	60	11	1,1	16	630	45	30
Eltex® Superstress™ CAP 508	PEHD5	270,260, 260,230,40	60	9	1,0	16	330	45	32

2.4.2. Aparatura, urządzenia i systemy informatyczne

W badaniach stosowano maszyny i urządzenia przemysłowe, aparaturę standardową oraz stanowiska badawcze zbudowane na potrzeby realizacji przedsięwzięcia badawczego.

2.4.2.1. Badania właściwości mechanicznych

W badaniach właściwości mechanicznych wykorzystano standardową aparaturę w postaci: maszyny wytrzymałościowej, młota udarowego oraz twardościomierza Shore'a (Skala D). Na rys. 2.10. przedstawiono próbki badawcze podczas badań właściwości mechanicznych.



Rys.2.10. Aparatura wykorzystywana w badaniach właściwości mechanicznych: a),b) maszyna wytrzymałościowa Z030 firmy Zwick/Roell (Niemcy), c) młot wahadłowy HIT 50, d) twardościomierz Shore'a

2.4.2.2. Badania kalorymetryczne próbek z zamknięć gwintowanych

Badania kalorymetryczne gwintowanych zamknięć opakowań przeprowadzono techniką skaningowej kalorymetrii różnicowej. Na rysunku 2.11 przedstawiono stanowisko do badań kalorymetrycznych, które wykorzystuje aparat *DSC 2014 Polyma* firmy Netzsch. W celu oceny wpływu grubości dna nakrętki na właściwości termiczne, próbki materiałowe zostały przygotowane z wybranych miejsc wyprasek.



Rys.2.11. Stanowisko do badań kalorymetrycznych: 1-prasa do przygotowywania tygielków, 2-nożyce do wycinania próbek, 3-komputer sterująco-rejestrujący, 4-badane nakrętki, 5-kalorymetr, 6-intra cooler (urządzenia chłodzące)

2.4.2.3. Badania deformacji zamknięć gwintowanych

Badania deformacji gwintowanych zamknięć opakowań przeprowadzono przy pomocy metod stykowych i bezstykowych. W metodzie stykowej wykorzystano stanowisko badawcze wyposażone w stół krzyżowy oraz stykową (kontaktową) aparaturę pomiarową.

Do przeprowadzenia badań deformacji poliolefinowych nakrętek zostało zbudowane stanowisko pomiarowe (rys.2.12). Badana nakrętka (13) jest nakręcana na stalowy model szyjki gwintowanej (2), która jest osadzona w uchwycie (1). Pozycjonowanie punktów pomiarowych na denku nakrętki odbywa się za pomocą stołu krzyżowego (12), który pozwala na prostopadłe przesunięcia w osi poziomej z dokładnością 0,02 mm. Stół krzyżowy jest zamocowanych poprzez płytę dystansową (11) do płyty mocującej stanowisko (10). Dokręcanie nakrętek odbywa się przez nakładkę nakrętki (3), która łączy się z kluczem dynamometrycznych (7) za pomocą elektronicznego kątomierza żyroskopowego (4). Pomiar deformacji denka nakrętki odbywa się za pomocą czujnika pomiarowego (5) osadzonego na statywie (9). Pomiar deformacji zewnętrznych powierzchni nakrętki odbywał się za pomocą suwmiarki elektronicznej (14). Rejestracja pomiarów deformacji z czujnika oraz suwmiarki odbywało się na komputerze (8) przy pomocy oprogramowania MARCOM 5.0 firmy Mahr z wykorzystanie koncentratora sieciowego (6).



Rys.2.12. Stanowisko do badania nakręcania oraz deformacji połączeń gwintowych opakowań polimerowych (opis w tekście)

W metodzie bezstykowej zastosowano stanowisko (rys. 2.13) wyposażone w skaner optyczny ATOS II firmy GOM (Niemcy) (2) umieszczony na mobilnym statywie. Badane połączenie gwintowe (3) osadzone jest w płytce mocującej (4), która pozwala na dokręcanie nakrętki, z zabezpieczoną przed obrotem polimerową szyjką. Na płytkę mocującą naniesione są znaczniki położenia (5), które pozwalają w wirtualnej przestrzeni poprawnie pozycjonować kolejne zeskanowane powierzchnie obiektu badań.



Rys.2.13. Stanowisko do skanowania gwintowanych zamknięć (opis w tekście)

2.4.2.4 Badania wpływu wybranych substancji chemii motoryzacyjnej na moment dokręcający

Schemat stanowiska do badania procesu nakręcania, zamieszczono na rysunku 2.14 (w powiększeniu zarejestrowany przykładowy przebieg nakręcania). Na wyposażeniu urządzenia znajduje się programowalne sterowanie z poziomu komputera (7). Badane opakowanie (połączenie gwintowe) (4) umieszczone jest w uchwytach mocujących stanowiska. Uchwyt ruchomy (5) (ruch obrotowy) jest sprzężony z podstawą (6), uchwyt nieruchomy (3) sprzężony z czujnikiem momentu obrotowego (2) zamocowanego w ramie (1).



Rys.2.14. Stanowisko laboratoryjne do badania połączeń gwintowych (opis w tekście)

2.4.2.5 Badania środowiskowej korozji naprężeniowej

Do przeprowadzenia badań odporności na środowiskową korozję naprężeniową zostało zbudowane oryginalne stanowisko (rys. 2.15) pozwalające na prowadzenie badań na próbkach znormalizowanych oraz obiektach rzeczywistych. Korpus stanowiska (1) jest osadzony na płycie mocującej (2). Wanna robocza (3) jest zawieszona w korpusie, wewnątrz której znajdują się dwie grzałki elektryczne (6) oraz czujnik poziomu czynnika roboczego (7). Próbki badawcze (9) podczas badania są unieruchomione za pomocą uchwytów (8). Obciążanie obiektów badań odbywa się przy pomocy sztab obciążających (5) oraz zespołu mocującego (19) i dźwigni głównej (4), której oś obrotu znajduje sie w przegubie (18). Pomiar czasu zerwania odbywa się przez czujnik krańcowy (17) oraz dźwignię czujnika (18). Pulpit sterująco-rejestrujący jest wyposażony w główny włącznik/wyłącznik zasilania (13) oraz włącznik/wyłącznik grzałek (14). Regulacja temperatury odbywa się poprzez termoregulator (15). Czas zniszczenia próbki (sygnalizacja lampką 10) jest rejestrowany przez licznik czasu (12), który może być wyzerowany za pomocą przycisku (11).



Rys. 2.15. Stanowisko do badania odporności na środowiskową korozję naprężeniową; a) główny widok frontowy i boczny, b) mocowanie próbek, c) pulpit sterujący, d) układ roboczy (opis w teście)

# 2.4.2.6 Systemy informatyczne

Do realizacji rozprawy doktorskiej (m.in. prowadzenie badań, obróbki wyników, redagowania pracy) zostały wykorzystane specjalistyczne oprogramowania naukowe, inżynieryjne oraz biurowe. W tabeli 2.8 zestawiono systemy informatyczne wykorzystane w rozprawie.

Zakres prac	Opis	Oprogramowanie	Producent	
Przygotowanie dokumentacji tech-	Dokumentacja 2D, Schematy i rysunki techniczne	Draftsight 2016	Dassault Systèmes	
nicznej, aparatury i oprzyrządowania	Dokumentacja 3D i 2D stanowisk ba- dawczych	NX 9.0	Siemens PLM Software	
Padania wstanna	Badania właściwo- ści mechanicznych	TestXpert II	Zwick	
Badama wstępne	Badania symulacyjne	Cadmould 7.0	Simkon	
Badania deformacji	Badania	Marcom	Mahr Federal	
gwintowanych	materiałowe	Professional 2.0	Wall Pederal	
zamknięć	Badania nakręcania	Gom Inspect 7.5	Gom	
Badania wpływu su nych w opa	bstancji umieszcza- kowaniach	Emperor	Mecmesin	
Dodonio alaman	táu analaunia	Emperor	Mecmesin	
Dadama elemen	ю орако маша	TestXpert II	Zwick	
		Origin 2016	Origin Lab	
Opracowanie v	vyników badań	Oligili 2010	Corporation	
		Office Excel 2007	Microsoft	
		Office Word 2007	Microsoft	
Redagowa	anie pracy	Zotero 5.0	George Mason University	

Tab.2.8. Zestawienie systemów informatycznych wykorzystanych w pracy doktorskiej

#### 2.4.2.7. Maszyny i narzędzia wykorzystane do wytwarzania obiektów badań

Do wytworzenia obiektów badań wykorzystano przemysłowe wtryskarki znajdujące się w laboratorium Inżynierii Materiałowej i Przetwórstwa Tworzyw UTP oraz przedsiębiorstwie AKSON Sp z o.o.. W tabeli 2.9 zestawiono maszyny oraz narzędzia przetwórcze, które zostały wykorzystane do wytwarzania obiektów badań. Do wytworzenia obiektów badań zastosowano wtryskarki o następującej sile zwarcia: 350kN, 400kN, 1100kN, 1500kN oraz 1600kN. W kolumnie 4 podano krotność formy (ilość gniazd formujących). Próbki wg normy ISO 16770 oraz ISO 22088 zostały wytworzone w jednej formie w układzie gniazd formujących 2+2 przy wykorzystaniu zimno-kanałowego systemu doprowadzającego tworzywo. W przypadku próbek wykorzystanych w badaniach właściwości mechanicznych w formie dwugniazdowej zastosowano łączony system doprowadzający tworzywo składający się z centralnej dyszy gorącokanałowej (GK) oraz systemu zimno-kanałowego (ZK). Gwintowane nakrętki wytworzone w jednogniazdowej formie pilotowej (nakrętka Ø54) lub produkcyjnej.

	WTRYS	SKARKA	FORMA	WTRYSKOWA
Obiekt badań	Model	Producent	Krotność gniazd	System doprowadzający tworzywo
1	2	3	4	5
Próbki wg normy ISO 527, ISO 178, ISO 179	350 plus	Battenfeld	2x	GK+ZK
Próbki wg normy ISO 16770, ISO 22088	e-victory 110	Engel	2x + 2x	ZK
Nakrętka Ø54	KM 40	Krauss Maffei	1x	GK
Nakrętka Ø52	victory 90	Engel	4x	GK
Nakrętka Ø38	victory 150	Engel	12x	GK

Tab.2.9. Zestawienie maszyn i narzędzi przetwórczych wykorzystanych do wytworzenia obiektów badań

ZK - system doprowadzający zimno-kanałowy, GK- system doprowadzający gorącokanałowy, GK+ZK - system gorąco-kanałowy łączony z systemem zimno-kanałowym

## 2.4.3. Czynniki badane i ich zakres

Na podstawie przeglądu literatury oraz dostępnych informacji związanych z planowaniem doświadczeń w obszarze technicznym przyjęto następujące czynniki badane niezależne:

- rodzaj tworzywa w badaniach deformacji: PP1, PP2, PELD1, PELD2, PEHD1, PEHD2, PEHD3,
- rodzaj tworzywa PEHD w badaniach środowiskowej korozji naprężeniowej: PEHD2, PEHD4, PEHD5,
- próbki w badaniach stopnia krystaliczności: DSC 1, DSC 2,

- cechy geometryczne próbek znormalizowanych (badania wytrzymałościowe, badania ESCR),
- cechy konstrukcyjne gwintowanego zamknięcia: nakrętka Ø54 (rys.2.5),
  Ø52 (rys.2.8), Ø38 (rys.2.7),
- geometria gwintowanego zamknięcia Ø54: (grubość denka:1,3; 1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,3mm),
- płyny chemii motoryzacyjnej: płyn hamulcowy (H), płyn do spryskiwaczy (S), olej silnikowy (O),
- cechy konstrukcyjne porowatej wkładki uszczelniającej (grubość: 1,0 1,5 2,0 3,0mm),
- geometria znormalizowanych próbek w badaniach ESCR: wg ISO 16970, wg PN-EN ISO 22088 (rys.2.8),
- konstrukcja gwintowanego zamknięcia Ø52 w badanich ESCR: (A- pierwotna, B-zmodyfikowana),
- moment dokręcający w połączeniu gwintowym z nakrętką Ø54 (5N, 10N,15N, 20N, 25N, 30N, 35N),
- moment dokręcający w połączeniu gwintowym z nakrętką Ø38 (1,5N; 2,0N; 2,5N; 3,0N; 3,5N; 4,0N; 4,5N; 5,0N)
- siła obciążająca próbki w badaniach ESCR (2kg, 4kg, 6kg, 8kg, 10kg),

Stałe czynniki badań:

- parametry procesu wtryskiwania w badaniach symulacyjnych (czas wtrysku, temperatura wtrysku),
- warunki otoczenia: (wilgotność, temperatura),
- temperatura płynu w badaniach ESCR,

Wynikowe czynniki badań (zależne):

W badaniach nakrętek polimerowych badano takie czynniki jak:

- badane właściwości wytrzymałościowych ( $R_m$ , E,  $\epsilon_m$ ,  $\sigma_{mf}$ , E<sub>f</sub>,  $\epsilon_{mf}$ , U, U<sub>r</sub>, H),
- stopień krystaliczności  $\Delta X$ ,
- odkształcenia ścianki prostopadłej (czasza nakrętki) do osi pionowej nakrętki h,
- odkształcenie zewnętrznej powierzchni cylindrycznej nakrętki: d,
- średnice nakrętki (dolna D<sub>d</sub>, górna D<sub>g</sub>),
- moment dokręcający w badaniach płynów chemii motoryzacyjnej M<sub>d</sub>,
- kąt dokręcenia nakrętki względem szyjki nakrętki α<sub>d</sub>,
- przemieszczenie nakrętki w osi pionowej opakowania  $\Delta z$ ,
- czas zniszczenia próbki w badaniach ESCR t<sub>z</sub>,

#### 2.4.4. Materiały użyte do badań

Na podstawie analizy stanu wiedzy do badań właściwości mechanicznych oraz badań deformacji wybrano materiały z grupy PE-HD, PE-LD oraz PP (Tab.2.10). Ze względy na niewygodne do stosowania nazwy handlowe wybranych materiałów poliolefinowych poddanych ocenie, zastosowano skrótowe oznaczenia (Tab.2.10 i 2.11) związane z ich grupą. W badaniach środowiskowej korozji naprężeniowej zastosowano materiały z grupy PE-HD (Tab. 2.11.) wykorzystywane do wytwarzania opakowań, w których występuje problem pękania. Kolumna 4 w Tab. 2.10. oraz kolumna 3 w Tab.2.11. przedstawia zastępcze oznaczenia materiałów wykorzystywane w dalszej części pracy. Gwintowana szyjka kanistra (badania deformacji) oraz butelki (badania momentu dokręcania) została wykonana z PE-HD TIPELIN 6300B firmy Tiszai Vegyi Kombinat Rt. W Tab.2.12. przedstawiono charakterystykę płynów wraz z wybranymi parametrami i przyjętymi oznaczeniami wykorzystane w badaniach wpływu substancji chemii motoryzacyjnej oraz badaniami środowiskowej korozji naprężeniowej.

	Badane materiały		Durristo	
Grupa tworzyw	Nazwa handlowa	Producent	oznaczenia	
1	2	3	4	
	PE-HD Hostalen ACP 5831D	LyondellBasell	PEHD 1	
PE-HD	PE-HD Hostalen GC 7260	LyondellBasell	PEHD 2	
	PE-HD Liten MB71	Unipetrol	PEHD 3	
	PE I D Malan E EABS 23 D022	Basell Orlen	DEL D 1	
PE-LD	r E-LD Malell E FABS 23-D022	Polyolefins	FELD I	
	PE-LD Purell 1840H	LyondellBasell	PELD 2	
	PP Monlon HP500N	Basell Orlen	DD 1	
DD	FF Woplen IIF 500N	Polyolefins	<b>II</b>	
РР	DD Tinplon K507	Tiszai Chemical	DD 2	
	FF Tippiell K397	Group Plc.	PP 2	

Tab. 2.10. Materiały wykorzystane w badaniach właściwości mechanicznych oraz badaniach deformacji

Nazwa handlowa	Producent	Przyjęte oznaczenia
1	2	3
Hostalen GC 7260	Basell Orlen Polyolefins	PEHD 2
MG 7547S	Borealis	PEHD 4
Eltex® Superstress™ CAP 508	Ineos	PEHD 5

Tab.2.11. Materiały z grupy PE-HD wykorzystane w badaniach środowiskowej korozji naprężeniowej

Tab. 2.12. Charakterystyka wykorzystanych płynów chemii motoryzacyjnej w badaniach nakręcania gwintowanych zamknięć oraz badaniach środowiskowej korozji naprężeniowej

Rodzaj badań	Nazwa	Opis handlowy	Paramet	try	Produ- cent	Przyjęte oznacze- nia
	1	2	4		5	6
	Płyn hamul-	DOT-4	Lepkość kinematyczna (100°C)	1,5 mm²/s	Orlen Oil	Н
	cowy		Gęstość (20°C)	ok.1,06 g/cm <sup>3</sup>		
e Płyn o sprysl wacz Z Olej silnik wy	Płyn do spryski- waczy	Zimowy	Gęstość (20°C) Temperatura krystalizacji	0,955 g/cm <sup>3</sup> -20°C	Orlen Oil	S
	Olej silniko- wy	15W-40	Gęstość względna Lepkość kine- matyczna (100°C)	0,885 g/cm <sup>3</sup> 14,5 mm <sup>2</sup> /s	Orlen Oil	0
ESCR*)	Igepal®	CO-630	Gęstość (25 C) Masa molowa	1,056 g/ml M <sub>n</sub> 617	Sigma- Aldrich	Ι

\*)-badania odporności na środowiskowa korozję naprężeniową

## 2.4.5. Badania wstępne

## 2.4.5.1. Badania pękania zamknięć gwintowanych

W badaniach wstępnych pod uwagę wzięto opakowanie z połączeniem gwintowym o średnicy 38mm, w którym w warunkach użytkowania występowało zjawisko deformacji i pękania zamknięcia. Uszczelnienie połączenia gwintowego odbywało się poprzez zastosowanie wkładki uszczelniającej wykonanej z porowatego polietylenu o grubości 1,5mm. W celu przybliżenia warunków uszczelniania opakowania do występujących w linii technologicznej, wykorzystano płyny chemii motoryzacyjnej: płyn hamulcowy (H), płyn do spryskiwaczy (S), olej silnikowy (O) (szczegółowe informacje zamieszczono w Tab.2.12.). Badane płyny zostały umieszczone w połączeniu gwintowym w taki sposób, aby podczas działania momentu dokręcającego stosowane substancje mogły być rozprowadzone na powierzchni gwintowej zamknięcia i szyjki butelki. Na podstawie analizy literatury oraz stanu wiedzy w badaniach przyjęto następujące wartości momentu dokręcającego: 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 (Nm). Osadzanie gwintowanego zamknięcia na szyjce butelki odbywało się z wykorzystaniem ręcznego klucza dynamometrycznego. Obserwacja i rejestracja pęknięć odbywała się w ciągu szesnastu tygodni.

# 2.4.5.2. Badania właściwości mechanicznych wybranych tworzyw poliolefinowych

W pracy dla przyjętej grupy tworzyw poliolefinowych wyznaczano następujące właściwości mechaniczne:

- moduł sprężystości wzdłużnej, wytrzymałość na rozciąganie, moduł przy zginaniu oraz wytrzymałość na zginanie, oznaczane za pomocą maszyny wytrzymałościowej Z030 firmy Zwick/Roell wg. PN-EN ISO 527 oraz PN-EN ISO 178,
- udarność określaną przy wykorzystaniu młota wahadłowego HIT 50P firmy Zwick/Roell wg. PN – EN ISO 179,
- rozciąganie udarowe przy wykorzystaniu młota wahadłowego HIT 50P firmy Zwick/Roell wg. - PN-EN ISO 8256,
- twardość mierzoną przy użyciu twardościomierza HPE firmy Zwick/Roell, w skali Shore'a D, wg. PN EN ISO 878.

W badaniach twardości pomiar następował w dziesięciu punktach na całej długości próbki, oddalonych od siebie o 15mm. 2.4.5.3. Badania kalorymetryczne próbek z gwintowanych zamknięć gwintowanych

W badaniach kalorymetrycznych wykorzystano próbki pobrane z obszarów (rysunek 2.16), gdzie zmiana geometrii (grubość ścianki z powierzchnią uszczelniającą) może mieć największy wpływ na strukturę materiału.

Próbki o masie w zakresie od 10 mg do 15 mg ogrzewano z szybkością 10 °C/min w atmosferze azotu do temperatury 220°C. Badaniom poddane zostały dwa miejsca, z których przygotowano próbki wycinane z dwóch różnych miejsc wyprasek wtryskowych, odpowiednio z dna (okolice punktu wtrysku) oraz z krawędzi nakrętki.



Rys. 2.16. Miejsca pobierania próbek z nakrętek do badań kalorymetrycznych

Zarejestrowane podczas badań krzywe topnienia DSC poddane zostały analizie w celu wyznaczenia temperatury topnienia, ekstrapolowanej temperatury końca przemiany topnienia oraz entalpii topnienia, tak jak przedstawiono na rysunku 2.17.



Rys. 2.17. Sposób wyznaczania charakterystycznych właściwości z krzywej topnienia DSC 0

Dodatkowo wyznaczono stopień krystaliczności próbek ( $X_c$ ), który obliczony został z poniższego wzoru:

$$X_c = \frac{\Delta H}{\Delta H_c} \times 100\% \tag{2.1}$$

,gdzie symbolem  $\Delta H$  oznaczono entalpię topnienia próbki, a  $\Delta H_c$  entalpię topnienia całkowicie krystalicznego polietylenu wysokiej gęstości.

#### 2.4.5.4. Badania symulacyjne procesu wytwarzania zamknięć gwintowanych

W bazie materiałowej oprogramowania Cadmould zamieszczona jest tylko część materiałów, które zostały (wybrane) badane w ramach badań właściwości mechanicznych oraz badań deformacji. Na podstawie analizy właściwości przetwórczych oraz właściwości fizycznych do analizy zostały dobrane materiały o najbliższej charakterystyce w stosunku do materiałów badanych w warunkach rzeczywistych (Tab.2.13). W bazie materiałowej oprogramowania Cadmould firmy Simcon znajdują się dwa tworzywa: PE-HD Hostalen GC 7260 oraz PP Moplen HP500N, które posiadają swoje numeryczne modele materiałowe. Do odwzorowania obiektu badań wykorzystano powierzchniową siatkę MES [224].

Materiał rzeczywisty	Przyjęte oznaczenie	Materiał symulacyjny
PE-HD Hostalen ACP 5831 D	PEHD 1	PE-HD HOSTALEN GF 4750
PE-HD Hostalen GC 7260	PEHD 2	-
PE-HD Liten MB71	PEHD 3	PE-HD MG9641
PE-LD Malen E FABS 23-D022	PELD 1	PE-HD ELTEX B4020N1343
PE-LD Purell 1840H	PELD 2	PE-HD Purell ACP 6541A
PP Moplen HP500N	PP 1	-
PP Tipplen K597	PP 2	PP HOSTACOM G4 R01

Tab.2.13. Materiały dobrane do przeprowadzenia badań symulacyjnych wypełniania gniazda formującego

# 2.4.5.5. Badania wpływu cech geometrycznych nakrętki na jej deformację w połączeniu gwintowym "polimer-metal"

W badaniach deformacji nakrętki Ø54 wykorzystano metody stykowe i bezstykowe rejestracji odkształceń. W badaniach tych pod uwagę były brane odkształcenia denka nakrętki oraz zmiana średnicy zewnętrznej na różnych wysokościach powierzchni cylindrycznej. W badaniach stykowych wykorzystano stanowisko opisane w rozdziale 2.4.2.3. W badaniach wykorzystujących metodę stykową pomiary deformacji odbywały się przy użyciu czujnika stykowego oraz suwmiarki. Czujnikiem stykowym (1075 firmy Mahr) mierzono odkształcenia płaskiej powierzchni nakrętki, natomiast suwmiarką (16EWR firmy Mahr) mierzono średnice powierzchni cylindrycznej dolnej oraz górnej części pomiędzy żebrami wzmacniającymi. Na rysunku 2.18 przedstawiono umiejscowienie punktów pomiarowych (A-L) oraz średnic pomiarowych (D1, D2). Oba urządzenia pomiarowe przekazywały wyniki pomiarów do komputera poprzez hub, gdzie odbywała się rejestracja za pomocą oprogramowania Marcom Professional 2.0 oraz program Excel firmy Microsoft. Pomiar deformacji płaskiej powierzchni odbywał się poprzez zbieranie wyników odkształceń w dwóch osiach i wyznaczanie wartości średniej z każdego punktu.



Rys.2.18. Schemat rozmieszczenie punktów pomiarowych oraz średnic pomiarowych w stykowych badaniach deformacji

## 2.4.6 Badania właściwe

# 2.4.6.1. Badania wpływu cech geometrycznych nakrętki na jej deformację w połączeniu gwintowym " polimer-polimer"

W badaniach deformacji nakrętki Ø54 wykorzystano metody również bezstykowe rejestracji odkształceń. W badaniach wykorzystano skaner 3D a pomiary odbywały się na płaskiej powierzchni nakrętki oraz na powierzchni bocznej cylindrycznej. Dwanaście punktów pomiarowych zostało naniesione na powierzchnię płaską (denko nakrętki) na każdej z trzech średnic Ø7mm, Ø28mm, Ø52mm (Rys.2.19). Punkty pomiarowe zostały tak wybrane, aby wskazywały odkształcenie w części centralnej (przy punkcie wtrysku), zewnętrznej (przejście płaskiej powierzchni w cylindryczną) oraz pomiędzy nimi. Punkty do pomiaru deformacji powierzchni cylindrycznej zostały wybrane na trzech wysokościach (2mm, 7mm, 11mm) umiejscowione co 60<sup>o</sup> pomiędzy żebrami wzmacniającymi.



Rys.2.19. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na modelu referencyjnym w warunkach bezstykowych

# 2.4.6.2. Badania wpływu wybranych substancji na nakręcanie zamknięcia w połączeniu gwintowym

Badanie miało na celu określenie wpływu płynów chemii motoryzacyjnej na moment dokręcający oraz umiejscowienie (pozycjonowanie) nakrętki względem szyjki butelki po nakręceniu. W badaniach wpływu chemii motoryzacyjnej zastała zastosowana para gwintowa Ø38. W badaniach zastosowano nakrętkę Ø38 oraz butelkę (wysokość 166mm, średnica 72mm, pojemność 250ml). Płyn chemii motoryzacyjnej został nanoszony w sposób, który umożliwiał rozprowadzenie substancji po powierzchniach geometrii gwintowych.

Nakręcanie połączenia gwintowego odbywało się z prędkością 20 obr/min do osiągnięcia maksymalnego momentu dokręcającego (10Nm) lub wystąpienia przeskoku nakrętki na gwintowej szyjce butelki. W badaniach oznaczano również przemieszczenie nakrętki względem butelki poprzez pomiar kąta nakręcania względem położenia początkowego i jego relacje ze skokiem zastosowanego gwintu.

## 2.4.6.3. Badania wybranych cech geometrycznych wkładki uszczelniającej

W badaniach charakteryzujących cechy geometryczne porów we wkładkach uszczelniających wykorzystano stanowisko wyposażone w mikroskop stereoskopowy firmy Opta-view. Próbki badane dzielono wzdłuż średnicy w celu zyskania przekroju pozwalającego na pomiar wartości rzeczywistych porów. Pory mierzono w dwóch kierunkach: równolegle oraz prostopadle do głównej osi próbki. Pomiarom również poddano obwód i pole powierzchni pora w miejscu przecięcia (Rys.2.20).

![](_page_71_Picture_2.jpeg)

Rys. 2.20. Stanowisko do badania cech geometrycznych porowatych wkładek uszczelniających: a) układ pomiarowy do do analizy obrazu, b) przykład pomiaru geometrii pora (wymiary, obwód, pole powierzchni)

# 2.4.6.4. Badania deformacji wkładki uszczelniającej w połączeniu nakrętka-szyjka butelki

W badaniach określono wpływ grubości wkładki uszczelniającej, podczas zamykania pojemnika polimerowego z połączeniem gwintowym, na moment dokręcający i kąt nakręcenia oraz na naprężenie i deformację w elementach połączenia gwintowego (wkładka uszczelniająca, nakrętka). W badaniach wykorzystano obiekty badań opisane w rozdziale 2.4.5.4. Badania podzielono na dwa etapy (I-badania nakręcania w połączeniu gwintowym, II-badania ściskania wkładki uszczelniającej). W badaniach nakręcania wykorzystano stanowisko do badań połączeń gwintowych scharakteryzowane w rozdziale 2.4.2.3. Nakręcanie połączenia gwintowego odbywało się z prędkością 20 obr/min do
osiągnięcia maksymalnego momentu dokręcającego (przeskok elementów połączenia gwintowego) w zależności od przyrastającego kąta nakręcenia.

Na podstawie analizy wyników nakręcania połączenia gwintowego z wkładką uszczelniającą w etapie I, został przeprowadzony kolejny II etap badań: ściskanie wkładki uszczelniającej.

Relacje pomiędzy przemieszczającą się nakrętką a szyjką butelki oraz ściskaną wkładką uszczelniającą zostały odwzorowane na maszynie wytrzymałościowej. W badaniach zastosowano specjalnie zaprojektowany i wykonany układ, przystosowany do maszyny wytrzymałościowej, przystosowany do ściskania wkładek uszczelniających, który odwzorowuje zakres odkształceń zachodzących pomiędzy elementami opakowania w próbie nakręcania. Schemat układu zamieszczono na rysunku 2.21 Pomiędzy płytami ściskającymi maszyny wytrzymałościowej (1, 6) umieszczono uchwyt (5), w którym unieruchomiono nakretkę polimerowa (3) wraz z wkładką uszczelniającą (4) oraz tuleją (2). Z analizy wartości przemieszczeń podczas nakrecania (zamiana otrzymanego kata obrotu na przesunięcie przy stałym skoku gwintu) uzyskano wartości przemieszczenia osiowego pomiędzy elementami połączenia gwintowego. Elementy stanowiska zostały tak zaprojektowane, aby podczas ściskania wkładki uszczelniajacej płaska powierzchnia nakrętki mogła się odkształcić, co dodatkowo przybliża warunki odkształcania z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej do warunków podczas nakręcania.



Rys.2.21. Badania deformacji wkładki uszczelniającej w połączeniu nakrętka-szyjka butelki na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z030: a) zespół ściskający badania na maszynie (w powiększeniu pokazano elementy zespołu ściskającego), b) schemat zespołu ściskającego (opis elementów stanowiska w tekście) [208]

Naprężeń ściskające działające na pole powierzchni wkładki uszczelniającej, wyznaczono ze wzoru:

$$\sigma_{\mathbf{S}} = \mathbf{F} / \mathbf{A}_{\mathbf{w}}, \quad \mathbf{MPa} \tag{2.2}$$

Określanie naprężeń rozciągających działających na przekrój nakrętki wyznaczono ze wzoru:

$$\sigma_{\mathbf{R}} = \mathbf{F} / \mathbf{A}_{\mathbf{N}}, \text{ MPa}$$
(2.3)

gdzie:

 $\sigma_{s}$ - naprężenia ściskające podczas ściskania wkładki uszczelniającej, MPa  $\sigma_{R}$ - naprężenia rozciągające w nakrętce, MPa

F - siła działająca w osi pionowej na wkładkę uszczelniającą oraz nakrętkę, N  $A_w = 48,74 \text{ mm}^2$ , pole powierzchni szyjki pojemnika, gdzie działa siła ściskająca na wkładkę uszczelniającą,

 $A_{\rm N} = 40,59 \text{ mm}^2$ , pole przekroju nakrętki w mm<sup>2</sup> (miejsce występowania pęknięcia),

## 2.4.6.5. Badania odporności na środowiskową korozję naprężeniową wybranych tworzyw

Badania odporności na środowiskową korozję naprężeniową na próbkach zostały przeprowadzone zgodnie z normą ISO 22088 oraz normą ISO 16770. Na podstawie analizy obu norm oraz analizy stanu wiedzy do badań przygotowano roztwór 2% Igepalu. W badaniu przyjęto temperaturę kąpieli: 50°C. Dla badania wg normy ISO 16770 próbki zostały poddane obciążeniu (1kg, 2kg, 3kg, 4kg). Porównano również wyniki badań ESCR dla materiału PEHD2 przeprowadzonych wg przywołanych wcześniej norm w celu odniesienia wpływu zmiennej konstrukcji obu rodzajów próbek [215].

# 2.4.6.6. Badanie wpływu momentu dokręcającego na odporność na środowiskową korozję naprężeniową przyjętych do analizy próbek zamknięcia gwintowanego

W przypadku badań odporności na środowiskową korozję naprężeniową na obiektach rzeczywistych (nakrętka Ø38) weryfikowano wpływ momentu dokręcającego na czas zniszczenia nakrętki. Na podstawie analizy literatury oraz doświadczeń własnych zastosowano obciążenia powstające w wyniku działania momentu dokręcającego 1,5Nm, 2,5Nm oraz 5Nm. W badaniach wykorzystano 2% roztwór Igepalu. W badaniu przyjęto temperaturę kąpieli: 50°C. Na rysunku 2.22. przedstawiono sposób obciążania próbek (a) oraz utwierdzanie obciążanej próbki (b) na gwintowanej szyjce stanowiska. Nakrętki zostały osadzone na szyjkach, które geometrycznie odpowiadały szyjkom pojemników rzeczywistych. Obciążanie nakrętek odbywało się przez zastąpienie momentu dokręcającego siłą działającą na wewnętrzną strony płaskiej powierzchni nakrętki. Obciążenie próbki następowało poprzez naciągnięcie linek przechodzących przez dźwignię roboczą. W badaniu zastosowana siła obciążająca (nakrętek) została uzyskana z przemieszczenia nakrętek (odnotowanego w poprzedzającym badaniu nakręcania) na skutek działania momentu dokręcającego.



Rys. 2.22. Sposób mocowania próbek podczas badania środowiskowej korozji naprężeniowej: a) widok obciążania próbek na stanowisku, b) utwierdzanie próbki na gwintowanej szyjce stanowiska

## 2.4.6.7. Badania wpływu cech geometrycznych gwintowanych zamknięć opakowań na odporności na środowiskową korozję naprężeniową

W badaniach porównawczych zastosowano inną metodykę badania niż w przypadku badania zamknięcia gwintowanego o średnicy 38mm. Stanowisko do badania środowiskowej korozji naprężeniowej wykorzystano do przeprowadzenia przyspieszonych badań ESCR, w których można było ocenić wpływ prowadzonych zmian konstrukcyjnych na gwintowanym zamknięciu o średnicy 52mm. Próbki wstępnie nakręcono na gwintowane szyjki z momentem dokręcającym 7Nm. Geometria szyjki oraz elementów mocujących umożliwiała oddziaływanie substancji aktywnej (2% roztwór Igepalu, temperatura kąpieli 50°C) o odmiennych cechach geometrycznych badanych zamknięć. Na rysunku 2.23 zaprezentowano porównywane nakrętki osadzone w przestrzeni roboczej stanowiska badawczego. Do badań zastosowano obciążenie o wartości: 2kg, 4kg, 6kg, 8kg, 10kg.



Rys.2.23. Badania porównawcze nakrętki Ø52 na stanowisku do badania ESCR korozji naprężeniowej (A- konstrukcja pierwotna, B- konstrukcja zmodyfikowana)

### 2.5. Jakościowy model matematyczny obiektu badań

Na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy oraz doświadczeń własnych w pracy zaproponowano następujące czynniki badane:

### a) wielkości wejściowe badane (zmienne niezależne):

- **MT** rodzaj materiału (PEHD1, PEHD2, PEHD3, PEHD4, PEHD5, PELD1, PELD2, PP1, PP2),
- **P**<sub>G</sub> cechy geometryczne próbek znormalizowanych (badania wytrzymałościowe, badania ESCR),
- Z<sub>G</sub> cechy konstrukcyjne zamknięcia gwintowanego (Ø54, Ø52, Ø38),
- **PW** proces wtryskiwania,
- **GS** grubość ścianki denka nakrętki (1,3; 1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,3),
- MD moment dokręcający (1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0); (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50),

- PŁ rodzaj substancje chemii motoryzacyjnej,
- **R**<sub>b</sub> obciążenie obiektów badań,
- **GW** grubość wkładki uszczelniającej (1,0; 1,5; 2,0; 3,0),
- A<sub>w/b</sub> przekrój znormalizowanej próbki ESCR,
- A<sub>N1/2</sub> przekrój nakrętki w płaszczyźnie pękania, przekrój próbki ESCR

## b) wielkości wyjściowe (zmienne zależne):

- **R**<sub>m</sub> wytrzymałość na rozciąganie,
- E moduł Younga (próba statycznego rozciągania),
- $\epsilon_m$  odkształcenie względne w próbie statycznego rozciągania,
- $\sigma_{mf}$  wytrzymałość na zginanie,
- E<sub>f</sub> moduł Younga (próba 3-punktowego zginania),
- $\varepsilon_{mf}$  odkształcenie względne,
- U udarność (Charpy'ego),
- U<sub>r</sub> udarność podczas rozciągania,
- H twardość (Shore'a),
- $\Delta X$  stopień krystaliczności,
- **h** odkształcenie powierzchni nakrętek (zewnętrzna czasza),
- d odkształcenie powierzchni cylindrycznej nakrętki,
- **Dd** dolna średnica pomiarowa nakrętki,
- **Dg** górna średnica pomiarowa nakrętki,
- $M_d$ -moment dokręcający w połączeniu gwintowym z nakrętką Ø38,
- α położenie kątowe nakrętki względem gwintowanej szyjki butelki,
- t<sub>z</sub> czas zniszczenia próbki,
- σ<sub>s</sub> naprężenia podczas ściskania wkładki uszczelniającej,
- **b** odkształcenie wkładki uszczelniającej,

W pracy przyjęto dwa jakościowe modele matematyczne obiektów badań (MQOB) w postaci:

1. dla obiektów badań znormalizowanych:  $MQ1 = F (MT, P_G, PW, GS, MD, R_m, E, \varepsilon_m, \sigma_{mf}, E_f, \varepsilon_{mf}, U, U_r, T, t_z, A_{w/b}) = 0$ 

2. dla obiektów badań rzeczywistych:  $MQ2 = F(MT, Z_G, MD, PW, PL, R_b, GW, M_d, \alpha, tz, \sigma s, h, b, Dd, Dg, A_{N1/2})=0$ 

#### 2.6. Schemat realizacji pracy z zakresem badań (mapka myślowa)

Na rysunku 2.24 przedstawiono schemat realizacji pracy doktorskiej, w którym badania w ramach zaplanowanego eksperymentu zostały podzielone na dwa etapy.



Rys.2.24. Schemat realizacji pracy z zakresem zaplanowanego eksperymentu

# 2.7. Zestawienie rodzaju badań, obiektów badań oraz wybranych materiałów w przyjętym eksperymencie

Z uwagi na przyjętą dużą liczbę obiektów badań w postaci próbek znormalizowanych (4 typy kształtek) oraz obiektów rzeczywistych (3 rodzaje nakrętek o odmiennych konstrukcjach) w tabeli 2.14 zestawiono badania, obiekty badań, wykorzystane materiały oraz rozdziały opisujące wyniki badań.

Tab.2.14. Zestawienie rodzajów badań oraz badanych materiałów zawartych w przyjętym eksperymencie w odniesieniu do rozdziałów w rozprawie

			÷	RODZAJ MATERIAŁU									
Rodzaj badań		Obiekt badań	Rozdzia	PP 1	<b>PP</b> 2	PELD 1	PELD 2	<b>PELD 3</b>	PEHD 1	PEHD 2	PEHD 3	<b>PEHD 4</b>	PEHD 5
	Pękania	NAKRĘTKA fi38	3.1.1							X			
	Materiałowe	PRÓBKI wg ISO 527/178/179/878	3.1.2	Х	Х	Х	Х		Х	Х	Х		
stępne	Symulacyjne	NAKRĘTKA fi54	3.1.3	Х	Х	Х	Х		X	X	X		
M	Deformacji I	NAKRĘTKA fi54	3.1.4	Х	Х	Х	Х		X	X	X		
	Deformacji II	NAKRĘTKA fi54	3.1.5	Х	Х	Х	Х		Х	Χ	Χ		
	Deformacji III	NAKRĘTKA fi54	3.2.1							X			
	Płyny	NAKRĘTKA fi38	3.2.2							X			
Właściwe	Wkładka uszczelniająca	NAKRĘTKA fi38	3.2.3					X		X			
		PRÓBKA wg ISO 22088/16770	3.2.4							X		Х	X
	ESCR	NAKRĘTKA fi38	3.2.5							X			
		NAKRĘTKA fi52	3.2.6							X			

ESCR- ang. Environmental Stress Cracking Resistance (Odporność na zjawisko Środowiskowej Korozji Naprężeniowej)

#### **3. BADANIA WŁASNE**

#### 3.1. Analiza wyników badań wstępnych

#### 3.1.1. Badania pękania zamknięć gwintowanych

W tabeli 3.1 przedstawiono wyniki badań związane z pękaniem gwintowanych zamknięć w powiązaniu z zastosowanym momentem dokręcającym oraz okresem ich występowania. W tabeli 3.1 zestawiono wyniki obserwacji, w przypadku gdy pękanie zamknięcia występowało w co najmniej w trzech z pięciu próbek obciążonych momentem dokręcającym dla poszczególnych rodzajów płynów. W połączeniu suchym (referencyjnym) zjawisko pękania nie występowało w całym okresie obserwacji, a deformacje były znacznie mniejsze.

Tab. 3.1. Występowanie pękania denka nakrętki w poszczególnych tygodniach prowadzonych obserwacji (H- płyn hamulcowy, S- płyn do spryskiwaczy, O-olej silnikowy)

		Tydzień obserwacji															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Moment dokręcający	1,5																
	2,0																
	2,5														Η		
	3,0							Η						S			
	3,5						Η						S				
	4,0		S			Η										0	
	4,5	S			H							0					
	5,0	S			Η				0								

Na rysunku 3.1. przedstawiono przykładowe porównanie deformacji czaszy nakrętki jakie wystąpiły w gwintowanym zamknięciu (rys.3.1.a), gdy w połączeniu gwintowym podczas nakręcania pojawił się olej. Deformacje zostały pokazane za pomocą kąt  $\beta$ , który powstaje pomiędzy styczną do czaszy nakrętki oraz prostopadłą do osi połączenia gwintowego. Połączenie gwintowe (rys. 3.1.b) było uszczelniane bez oleju silnikowego. Analogicznie zachowywały się elementy połączenia gwintowego, gdy w połączeniu pojawił się płyn do spryskiwaczy i płyn hamulcowy.



Rys. 3.1. Porównanie deformacji w połączeniach gwintowych z olejem silnikowym (moment dokręcający 3,5Nm): a) połączenie gwintowe bez oleju silnikowego, b) połączenie gwintowe z olejem

W przypadku zastosowania momentu dokrecającego o wartościach 1,5 Nm oraz 2,0 Nm nakrętek dla wszystkich zastosowanych płynów w całym zakresie proponowanego eksperymentu nie występowało niszczenie. Najniższa odporność na pękanie zaobserwowano w połączeniu gwintowym z płynem "S" (płyn do spryskiwaczy). W pierwszym tygodniu zniszczeniu uległy zamknięcia, gdzie zastosowano moment dokręcający o wartościach 4,5 Nm i 5,0 Nm, natomiast w drugim tygodniu pęknięcie zaobserwowano w połaczeniu gwintowym uszczelnione momentem dokręcającym o wartości 4,0 Nm. W czwartym tygodniu obserwacji nastąpiło pękanie zamknięcia w połączeniu gwintowym z płynem hamulcowym "H" przy wartościach momentu 4,5 Nm i 5,0 Nm i w kolejności pękały nakrętki ze zmniejszającym się momentem do wartości 3,5Nm (w siódmym tygodniu). Ostatnie obserwowane pęknięcia wystąpiły po 3,5 miesiącach dla płyn hamulcowego przy momencie dokręcającym o wartości 2,5Nm (pekniecie przy najniższej wartości momentu dokrecajacego). Zastosowanie oleju silnikowego w badanym połączeniu przyczyniło sie do powstania pęknięcia dopiero w ósmym tygodniu (moment dokręcający 5Nm), kolejne pęknięcie ujawniło się w jedenastym tygodniu obserwacji dla momenty dokręcającego 4,5 Nm. Najwyższa odporność na pekanie nakrętki zaobserwowano w połączeniu gwintowych z zastosowaniem oleju silnikowego przy wartości momentu dokręcającego 4Nm. Była to najniższa wartość momentu, gdzie wystąpiło pękanie dla tego rodzaju obserwowanego połączenia.

Zastosowane płyny chemii motoryzacyjnej posiadają odmienne parametry (lepkość kinematyczną oraz kąt zwilżania) co powoduje, że podczas tych samych warunków nakręcania zmienia się współczynnik tarcia pomiędzy elementami połączenia gwintowego. Zmienia to warunki nakręcania i powoduje, że w połączeniach gwintowych (z płynem hamulcowym i płynem do spryskiwaczy) zamknięcia "nakręcały" się głębiej. Było to wyraźnie widoczne poprzez występujące deformacje czaszy zamknięcia. Na rysunku 3.2. przedstawiono przykładowy wpływ momentu dokręcającego na wielkość występującego zniszczenia zamknięcia (propagację oderwanie czaszy - tzw. wieczkowanie) w połączeniu gwintowym, w przypadku zastosowania płynu hamulcowego.



Rys. 3.2. Propagacja pękania gwintowanych zamknięć w obszarze denka w przypadku zastosowania połączenia z płynem hamulcowym i momentu dokręcającego: a) 2,5 Nm; b) 3,0 Nm; c) 3,5 Nm; d) 4,0 Nm; e) 4,5 Nm; f) 5,0Nm

#### 3.1.2. Badania właściwości mechanicznych wybranych tworzyw poliolefinowych

Charakterystykę oraz ocenę wytypowanych materiałów poliolefinowych zrealizowano w badaniu o przebiegu statycznym (próba statycznego rozciągania, próba 3-punktowego zginania, twardość) oraz dynamicznym (udarność metodą Charpy-ego, udarowe rozciąganie). Szczególną uwagę zwrócono podczas przygotowywania znormalizowanych kształtek badawczych, w kierunku uzyskania stabilnych warunków wytwarzania oraz powtarzalnych cech geometrycznych korzystnie wpływających na wyniki badanych właściwości.

W przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych kształtki badawcze zostały zweryfikowane pod kątem zgodności wymiarów przekroju poprzecznego w części pomiarowej z wymogami normy. W tabeli 3.2 zestawiono wyniki pomiarów przekroju poprzecznego odcinka pomiarowego próbki. Poprzez dobór właściwych parametrów procesu wtryskiwania wytworzono próbki badawcze posiadające niewielkie odchyłki wymiarowe, co ma istotny wpływ na uzyskanie powtarzalnych wyników badań właściwości mechanicznych. Kształtki badawcze do badań właściwości mechanicznych zostały pobrane po ustabilizowaniu się procesy wtryskiwania.

 Tab. 3.2. Zestawienie wymiarów przekroju poprzecznego odcinka pomiarowego próbek badawczych stosowanych tworzyw poliolefinowych

 Badane materiały
 Wymiary poprzeczne przekroju

Padana matariaku	Wymiary poprzeczne	e przekroju
Badalle materiary	h, mm	b, mm
1	2	3
PEHD 1	<b>4,20</b> ±0,01	<b>10,00</b> ±0,03
PEHD 2	<b>4,11</b> ±0,01	<b>9,96</b> ±0,06
PEHD 3	<b>4,19</b> ±0,01	<b>9,91</b> ±0,01
PELD 1	<b>4,15</b> ±0,01	<b>9,91</b> ±0,01
PELD 2	<b>4,04</b> ±0,01	<b>9,94</b> ±0,03
PP 1	<b>4,09</b> ±0,01	<b>10,05</b> ±0,01
PP 2	<b>4,15</b> ±0,01	<b>9,91</b> ±0,01

W tabeli 3.3 zestawiono wyniki badań właściwości mechanicznych uzyskanych podczas próby statycznego rozciągania. W przypadku tworzyw z grupy PELD moduł sprężystości wzdłużnej jest od 6 do 8 razy mniejszy w odniesieniu do tworzyw z grupy PEHD oraz PP. To samo dotyczy wytrzymałości na rozciąganie, gdzie wyniki grupy PEHD oraz PP są 2-3 krotnie większe niż grupy PELD.

Tab.3.3. Wyniki badań właściwości mechanicznych uzyskanych podczas próby statycznego rozciągania

Badane	Е,	R <sub>m</sub> ,	ε <sub>m</sub> ,
materiały	MPa	MPa	%
1	2	3	4
PEHD 1	<b>704,21</b> ±11,49	<b>24,40</b> ±0,18	<b>12,89</b> ±0,13
PEHD 2	<b>845,01</b> ±15,07	<b>25,59</b> ±0,26	12,07±0,21
PEHD 3	<b>838,98</b> ±17,41	<b>25,56</b> ±0,25	<b>11,39</b> ±0,17
PELD 1	<b>140,39</b> ±4,79	<b>11,91</b> ±0,49	<b>116,58</b> ±28,17
PELD 2	<b>103,19</b> ±3,25	<b>11,12</b> ±0,10	<b>114,77</b> ±2,92
PP 1	<b>834,37</b> ±11,22	<b>30,06</b> ±0,39	<b>14,19</b> ±0,08
PP 2	<b>694,50</b> ±5,96	<b>21,58</b> ±0,17	<b>8,98</b> ±0,22



Rys.3.3. Przykładowe przebiegi krzywych rozciągania wybranych tworzyw poliolefinowych uzyskanych podczas próby statycznego rozciągania

Na rysunku 3.3 przedstawiono przykładowe krzywe rozciągania dla każdej grupy materiałowej. Przebieg krzywych rozciągania dla grupy PELD posiada wyraźny odmiennych charakter od pozostałych grup. Można zauważyć brak wyraźnego wzmocnienia (w odniesieniu do pozostałych grup materiałowych) w obszarze naprężeń maksymalnych. Spowodowane to jest skłonnością materiału do pełzania na skutek przykładanej siły. Przebieg krzywych rozciągania dla grup PEHD oraz PP jest zbliżony w obszarze odkształceń sprężystych. Materiały z grupy PEHD posiadają zbliżony przebieg odkształceń w całym zakresie prowadzonego eksperymentu.

Badane materiały	E <sub>f</sub> , MPa	σ <sub>fm</sub> , MPa	ε <sub>fm</sub> , %		
1	2	3	4		
PEHD 1	1053,42±137,62	<b>33,38</b> ±0,48	<b>11,84</b> ±0,32		
PEHD 2	<b>1404,79</b> ±155,38	<b>35,43</b> ±0,61	<b>11,55</b> ±0,35		
PEHD 3	1316,26±167,36	<b>34,71</b> ±0,61	<b>11,25</b> ±0,28		
PELD 1	<b>388,51</b> ±187,44	<b>8,21</b> ±0,14	<b>9,20</b> ±0,33		
PELD 2	<b>92,93</b> ±26,95	<b>3,18</b> ±0,29	<b>9,03</b> ±0,66		
PP 1	<b>1350,96</b> ±108,90	<b>42,21</b> ±0,62	<b>12,68</b> ±0,40		
PP 2	<b>1127,29</b> ±261,59	<b>34,36</b> ±0,33	<b>11,32</b> ±0,27		

Tab.3.4. Wyniki badań właściwości mechanicznych uzyskanych w próbie 3-punktowego zginania

W tabeli 3.4 zestawiono wyniki badań właściwości mechanicznych uzyskanych w próbie 3-punktowego zginania. Podczas badania, żaden z analizowanych materiałów nie wykazywał się pękaniem próbek podczas oznaczania wartości maksymalnych. Najmniej korzystne właściwości mechaniczne (naprężenia) charakteryzują materiały z grupy PELD. W przypadku PELD 1 wartość moduł sprężystości przy zginaniu jest 4-krotnie mniejsza w porównaniu do PELD 2 i co najmniej 10-krotnie mniejsza od modułów sprężystości dla materiałów z grupy PEHD oraz PP. Wytrzymałość na zginanie próbek z PELD 2 jest ponad dwa razy mniejsza od PELD 1 i ponad 10 razy mniejsza od materiałów z grupy PEHD i PP.



Rys.3.4. Zestawienie przykładowych przebiegów wybranych tworzyw poliolefinowych uzyskanych podczas próby 3-punktowego zginania

Na rysunku 3.4 przedstawiono przykładowe przebiegi krzywych w warunkach 3-punktowego zginania przyjętych w programie badań materiałów. W przypadku materiałów z grupy PEHD oraz PP 2 przebiegi są bardzo zbliżone do siebie w całym zakresie odkształceń. Tworzywa z grupy PELD są wyraźnie mniej odporne na zginanie (szczególnie PELD 2).

W przypadku badań twardości (rys.3.5) uzyskane wyniki występujące w grupach tworzyw PEHD i PELD są zbliżone do siebie. Twardość w grupie PEHD jest na poziomie 60°ShD. Wyniki twardości dla materiałów z grupy PELD są ponad 30% mniejsze w porównaniu do grupy PEHD. Odmienne relacje występują w przypadku grupy PP, gdzie różnica pomiędzy wynikami PP 1 i PP 2 jest na poziomie 14% (Twardość PP 1=66,5160°ShD).



Rys. 3.5. Porównanie wyników badań twardości uzyskanych metodą Shore'a (skala D)

Zestawienie wyników udarowego obciążania próbek badawczych przedstawiono na rysunku 3.6. Najwyższe wartości udarności wykazywały próbki PEHD 1, które są ponad 15 krotnie większe niż w pozostałych materiałach w grupie. Materiały z grupy PELD posiadają udarność o ok. 35% mniejszą od wartości charakteryzującej PEHD 1. W przypadku PP1 wyniki udarności są ponad 10 razy mniejsze niż PP 2. W przypadku próbek z PEHD 1 oraz materiałów z grupy PELD nie występowało całkowite zniszczenie próbek i ich podział na dwie części. Z tego powodu przeprowadzono dodatkowe badanie udarowego rozciągania, które dodatkowo weryfikuje właściwości strukturalne badanych tworzyw.

W badaniach udarowego rozciągania na wyniki ma wpływ karb (typ v) wykonany po obu stronach próbki oraz inny charakter działania siły niszczącej. W badaniach udarowego rozciągania próbki wszystkich materiałów zostały całkowicie zniszczone poprzez rozdzielenie (zestawienie wyników na rysunku 3.7). Najwyższe wartości uzyskały materiały z grupy PELD. W przypadku grupy PEHD najwyższą wartość uzyskały próbki z PEHD 1. Nie zaobserwowano wyraźnej relacji pomiędzy udarnością oznaczoną metodą Charpy'ego i metodą udarowego rozciągania. Materiały, które wykazują się wysoką udarność uzyskaną podczas udarowego rozciągania, nie wykazują tych relacji w przypadku próby udarowego zginania.



Rys.3.7. Wyniki badań udarności uzyskanych w próbie udarowego rozciągania

#### 3.1.3. Badania kalorymetryczne próbek z zamknięć gwintowanych

Krzywe topnienia DSC próbek pobranych z miejsca DSC 1 oraz DSC 2 przedstawiono na rysunku 3.8. Na podstawie ich analizy stwierdzono, że warunki termiczne podczas chłodzenia nakrętek o większej grubości dna sprzyjają powstaniu struktury krystalicznej HDPE o większym stopniu uporządkowania. Świadczy o tym przesuniecie maksimum krzywej topnienia próbki 2,3 DSC 1 w kierunku wyższej temperatury w porównaniu do próbki pobranej z nakrętki o grubości ścianki równej 1,3 mm (1,3 DSC 1). Ekstrapolowana temperatura końca przemiany topnienia próbek 1,3 DSC 1 i 2,3 DSC 1 wynosi odpowiednio 142,2°C i 144,5°C (Tabela 3.5). Próbka 2,3 DSC 1 charakteryzuję się również wyższą entalpią topnienia, a tym samym wyższym o ponad 3% stopniem krystaliczności w porównaniu do próbki 1,3 DSC 1. Różnica stopnia krystaliczności może wpływać na zmianę właściwości mechanicznych materiału z którego wykonana została wypraska. Próbki pobrane z miejsca DSC 2 wyprasek charakteryzują się zbliżonym przebiegiem krzywych topnienia DSC oraz podobną wartością temperatury końca przemiany topnienia. Jednakże, należy zwrócić uwagę, że w tym przypadku próbki 1,3 DSC 1 i 2,3 DSC 1 różnią się wartościami stopnia krystaliczności, które są zbliżone do tych wyznaczonych dla próbek pobranych z miejsca DSC 1.



Rys. 3.8 Krzywe topnienia DSC próbek z pobranych z nakrętek: a) próbki z miejsca DSC 1, b) próbka z miejsca DSC 2

[			<b>F1</b> . (			
	Grubość Temperatura		temperatura	Entalnia	Stopień	
Тур	ścianki	topnienia	końca przemiany	tonnienia	krystaliczności*,	
próbki	[mm]	[°C]	topnienia.	[J/g]		
	[]	[0]	[°C]	[0/8]	[/0]	
DSC 1	1,3	134,4	142,2	194,7	66,45	
	2,3	136,0	144,5	204,4	69,76	
DSC 2	1,3	136,0	143,9	195,4	66,69	
	2,3	134,0	144,1	202,5	69,10	

Tab. 3.5 Wyniki badań DSC dla próbek pobranych z wybranych miejsc z nakrętek o różnej grubości ścianki

\*Entalpia topnienia polietylenu o 100% stopniu krystaliczności – 293 J/g [80]

#### 3.1.4. Badania symulacyjne procesu wytwarzania zamknięć gwintowanych

W badaniach symulacyjnych z uwagi na odmienne właściwości przetwórcze badanych materiałów oraz stosowanie zmian w geometrii nakrętek wykorzystano parametry procesu zaproponowane przez algorytm oprogramowania Cadmould. Do analizy przyjęto następujące wyniki symulowanego procesu wtryskiwania: straty ciśnienia, teoretyczna masa wtrysku, czas krzepnięcia, wpływ skurczu na grubości ścianki oraz deformację. W wybranych tworzywach rozkład strat ciśnienia był analogiczny. W obszarze deformacji i pękania wartości strat ciśnienia w każdym przypadku wynosił ok. 50% wartości maksymalnych (obszar żeber wzmacniających). Na rysunku 3.8 przedstawiono rozkład strat ciśnienia w gnieździe formującym dla tworzyw PELD1 oraz PELD2 i geometrii nakrętki ze ścianką czaszy o grubości 1,3mm. Parametry przetwórcze oraz właściwości materiału powodują, że wyniki strat ciśnienia dla tworzyw należących do tej samej grupy są dwukrotnie większe (tworzywo PELD2 w odniesieniu do tworzywa PELD1).

Na rysunku 3.9 przedstawiono zależność wartości strat ciśnienia w gnieździe formującym od zmiennej grubości ścianki dla tworzyw wybranych do badań. Analizując wyniki można zauważyć, że wraz ze wzrostem grubości ścianki zmniejszają się wartości strat ciśnienia dla przyjętych do analizy materiałów. Tworzywo PELD 2 charakteryzuje się występowaniem największych strat ciśnienia w zakresie od 44 MPa (grubość ścianki 1,3) do 27 MPa (grubość ścianki 2,3). Porównując wartości strat ciśnienia dla tworzywa PELD2 do pozostałych badanych tworzyw są one znacznie wyższe (średni spadek strat ciśnienia wynosi ok.10MPa). W pozostałych przypadkach badane tworzywa mają podobne przebiegi, a ich wzajemne przesunięcie "równoległe" lub pokrywające jest efektem zbliżonych wartości właściwości przetwórczych oraz nastaw procesowych. Najniższe wartości strat ciśnienia uzyskano dla tworzyw PP1 oraz PP2, na co mogą mieć wpływ m.in. wyższe wartości temperatury uplastycznienia w oknie przetwórczym. Z punktu widzenia wypełniania gniazda tworzywem korzystne jest dla późniejszego użytkowania gotowych zamknięć, aby wartości strat ciśnienia były jak najmniejsze co przyczyni się do otrzymania niskich wartości naprężeń stycznych podczas wypełniania gniazda formującego szczególnie w obszarze narażonym na występowanie zjawiska pękania.



Rys.3.8. Straty ciśnienia uzyskane w gnieździe formującym dla przyjętej grubości ścianki czaszy nakrętki 1,3 mm: a) tworzywo PELD1, b) PELD2



Rys.3.9. Wpływ grubości ścianki czaszy na straty ciśnienia w gnieździe formującym dla wybranych tworzyw

Na rysunku 3.10 przedstawiono przykładową zmianę rozkładu czasu krzepnięcia w gnieździe formującym dla zamknięcia o zmiennej grubości ścianki (czaszy) (1,3mm; 1,7mm; 2,3mm) dla materiału PEHD3. Zmiana grubości ścianki spowodowała wydłużenie czasu krzepnięcia z 10,2s (przy grubość ścianki 1,3mm) o 1,2s (12% czasu przy grubość ścianki 1,7mm) oraz o 5,5 s (54% czasu przy grubość ścianki 2,3mm). Ma to bezpośredni wpływ na czas chłodzenia oraz na czas cyklu, którego wydłużanie jest ekonomicznie niekorzystne. Wzrost grubości ścianki powoduje, że obszarem wymagającym większej skuteczności termostatowania staje się obszar dna zamknięcia.

Na rysunku 3.11 przedstawiono wpływ grubości ścianki czaszy nakrętki na maksymalny czas krzepnięcia wybranych tworzyw. Największy wzrost czasu krzepnięcia uzyskano dla tworzywa PP1 (58%) oraz PEHD3 (55%). W przypadku PELD1, PELD2, PEHD1, PEHD2 czas krzepnięcia zmieniał się w przedziale od 16% do 23%. Najmniejszą zmianę czasu krzepnięcia uzyskano dla PP1, która wyniosła ok. 1%. W wybranych tworzywach wraz ze wzrostem grubości ścianki obszar z wydłużającym się czasem krzepnięcia przesuwał się w okolice punktu wtrysku. Jest to korzystne ze względu na przebieg fazy docisku, podczas której tworzy się struktura częściowo-krystaliczna w obszarze czaszy (ścianka o zmiennej grubości) oraz obszaru występowania pękania (przejście pomiędzy czaszą a ścianką cylindryczną).



Rys. 3.10. Rozkład czasu krzepnięcia dla tworzywa PEHD3 przy zmieniającej się grubości ścianki czaszy: a) 1,3mm, b) 1,7mm, c) 2,3mm



Rys.3.11. Zależność pomiędzy czasem krzepnięcia a grubością dna zamknięcia dla badanych materiałów (Cadmould)

Wprowadzanie zmian cech konstrukcyjnych poprzez zmianę grubości ścianki (czaszy) gwintowanego zamknięcia ma wpływ na wzrost masy wypraski. Na rysunku 3.12 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian masy wypraski wybranych tworzyw. Średni przyrost masy analizowanych tworzyw wynosi 1,8 g i stanowi to wzrost o ok. 15% masy początkowej. Różnica pomiędzy poszczególnymi grupami tworzyw dla każdej grubości ścianki nie przekracza 0,5 g co stanowi ok. 5% całkowitej masy zamknięcia. Zmiana masy wypraski na skutek wprowadzonych zmian konstrukcyjnych wpływa na czas cyklu oraz zwiększone zapotrzebowanie na przetwarzany surowiec. Specjalne właściwości przetwórcze lub użytkowe jakie posiada przetwarzany materiał mogą również podnieść jego koszt, co w połączeniu z wydłużonym procesem produkcyjnym będzie miało wpływ na ostateczną cenę wypraski. Ma to szczególny wpływ przy masowej produkcji gwintowanych zamknięć, gdzie czynniki ekonomiczne odgrywają istotną rolę.

Na rysunku 3.13 przedstawiono wpływ zmiany grubości wybranej ścianki zamknięcia na skurcz objętościowy jaki zachodzi podczas procesu wtryskiwania. W tworzywach PELD2 oraz PEHD2 zmiana cech geometrycznych nie ma znaczącego wpływu na wartość skurczu objętościowego. W przypadku PEHD3 skurcz objętościowy przyjmuje najwyższe wartość przy zmianie



grubości o ok.2,5%. W przypadku PEHD1 oraz PP1 i PP2 wartość skurczu zmienia się o ok. 1%.

Rys. 3.12. Zależność masy wtryskiwanej od grubości ścianki czasz zamknięcia (Cadmould)



materiałów (Cadmould)



Rys.3.14.Wpływ grubości ścianki czaszy na tworzące sie zapadnięcia na zewnętrznej powierzchni zamknięcia w przypadku PEHD1: a) 1,3mm, b) 1,7mm, c) 2,3mm



Rys.3.15. Zależność deformacji od grubości ścianki czaszy zamknięcia dla wybranych tworzyw (Cadmould)

rysunku 3.15 przedstawiono wpływ grubości ścianki zamknięcia na maksymalna deformacje w osi "Z" w centralnym punkcie wypraski. We wszystkich badanych materiałach wyniki deformacji z uwagi na przeciwny zwrot na osi "Z" są wartościami ujemnymi (czasza zamknięcia zapada się). Najniższą wartość deformacji czaszy uzyskano dla PP1 (ok.-0,3mm przy grubości ścianki 1,5 mm; 1,7 mm oraz 1,9 mm). Najwyższa wartość deformacji uzyskano dla PEHD3 (przy grubości ścianki 2,1mm osiągnęłą wartość -1,7 mm). W przypadku pozostałych tworzyw uzyskano deformację w zakresie od -0,7 mm do -1,2 mm. Z kolei przypadku tworzyw z grupy PEHD oraz PP poczatkowe zwiększenie grubości ścianki spowodowało zmniejszenie deformacji, uzyskując dla grubości 2,1 mm maksymalne wartości deformacji oraz dalej ich spadek przy grubości ścianki 2,3 mm. W przypadku tworzyw z grupy PELD można zauważyć tworzenie się deformacji tylko w jednym kierunku wraz ze wzrastającą grubością ścianki. Nierównomierna deformacja jest spowodowana zmianą grubości ścianki nakrętki zarówno w obszarze czaszy jak i ścianki cylindrycznej związanej z geometrią nakrętki.

Na rysunku 3.16 przedstawiono przykładowe deformacje w osi "Z" dla zamknięcia przy grubości ścianki 2,1 mm, przy której występowało maksymalne deformacje. Na rysunku można zauważyć, że deformacji podlegały również cylindryczne ścianki zamknięcia, co mogło mieć wpływ na wartości deformacji czaszy.



Rys.3.16. Deformacje zamknięcia w osi "Z" dla wybranych tworzyw: a)PP1, b) PELD2, c) PEHD3

# 3.1.5. Badania wpływu momentu dokręcającego na deformację ścianki czaszy zamknięcia wybranych materiałów (para gwintowa "polimer-metal)

Na rysunku 3.17 przedstawiono schemat sposobu wyznaczania deformacji czaszy zamknięcia w odniesieniu do osi układu współrzędnych. Miejsca odniesienia umieszczono w okolicy punktu wtrysku (punkt F oraz G). Pod uwagę był brany wymiar pomiędzy punktami odniesienia a punktami znajdującymi się na zewnętrznej części czaszy (punkty A i L) określony jako maksymalna deformacja czaszy. Uzyskane wartości dodatnie opisują deformację czaszy do wewnątrz zamknięcia (analogicznie ujemne wartości deformacji świadczą o deformacji na zewnątrz).



Rys. 3.17. Schemat wyznaczania maksymalnych deformacji czaszy w badanych zamknięciach

Na rysunkach od 3.18 do 3.23 przedstawiono zależność maksymalnych deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia od momentu dokręcającego dla przyjętych do badań materiałów przy zmiennej grubości ścianki: 1,3 mm; 1,5 mm; 1,7 mm; 1,9 mm; 2,1 mm; 2,3 mm. Kolory odpowiadające poszczególnym materiałom w tym zestawieniu, są jednakowe dla wszystkich grubości ścianki zamknięcia.



Rys. 3.18. Zależność maksymalnych deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego dla przyjętych do badań materiałów przy grubości ścianki 1,3 mm



Rys. 3.19. Zależność maksymalnych deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego dla przyjętych do badań materiałów przy grubości ścianki 1,5 mm



Rys. 3.20. Zależność maksymalnych deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego dla przyjętych do badań materiałów przy grubości ścianki 1,7 mm



Rys. 3.21. Zależność maksymalnych deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego dla przyjętych do badań materiałów przy grubości ścianki 1,9 mm



Rys. 3.22. Zależność maksymalnych deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego dla przyjętych do badań materiałów przy grubości ścianki 2,1 mm



Rys. 3.23. Zależność maksymalnych deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego dla przyjętych do badań materiałów przy grubości ścianki 2,3 mm

Na wykresach przedstawiających maksymalne deformacje w odniesieniu do zastosowanego momentu można zauważyć, że nie wszystkie krzywe obejmują cały zakres realizowanych badań. Spowodowane jest to wcześniejszym zniszczeniem nakretki (pekniecie w okolicy czaszy) co dyskwalifikuje daną próbkę do dalszych pomiarów. Rozpatrując wszystkie krzywe jednocześnie, można zauważyć, że wraz ze wzrostem grubości ścianki zamknięcia krzywe zmieniają przebiegi względem siebie. W przypadku grubości ścianki 1,3 mm oraz 1,5 mm krzywe deformacji nachodzą na siebie oraz przecinają się. Można również zauważyć, że krzywe tworzyw (oprócz PP1) od momentu dokręcającego 15Nm (dla grubości ścianki 1,3mm) oraz 20Nm (dla grubości ścianki 1,5mm) odnotowują zmniejszenie przyrostu mierzonych deformacji. Może być to spowodowane zwiększonym odkształceniem czaszy zamknięcia w obszarze zewnętrznych punktów co z kolei może być związane z mniejszą sztywnościa całej ścianki. Od grubości ścianki 1,7mm można zauważyć, że wartości uzyskiwanych deformacji przemieszczaja się względem siebie tworząc pary. Wzrost grubości ścianki w znaczący sposób wskazuje grupowanie się krzywych deformacji. Wyjątek stanowi PEHD1, którego krzywa maksymalnych deformacji znajduje się w skrajnym położeniu w odniesieniu do tworzyw z tej samej grupy. Jest to spowodowane mniejszymi deformacjami wstępnymi na skutek naprężeń wewnętrznych, które mogą powstawać po procesie wtryskiwania.

Zwiększenie grubości ścianki pokazuje, że styczne do krzywych opisujące maksymalne deformacje tworzą z osią odciętych (oś momentu dokręcającego) większy kąt. Jest to spowodowane zwiększeniem sztywności deformowanej ścianki wynikające ze zwiększenia jej grubości. Deformacje jakie powstają w nakrętce na skutek procesu wytwarzania mają istotny wpływ na wartości deformacji powstającej w procesie zakręcania.

Na rysunku 3.24. przedstawiono zależność pomiędzy maksymalnym przyrostem deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia podczas dokręcania a zmieniającą się grubością ścianki zamknięcia. Jest to odległość o jaką przesuną się (wzdłuż osi "Z") punkty pomiarowe (F, G) znajdujące się w okolicy punktu wtrysku na zewnętrznej powierzchni ścianki przy maksymalnym momencie dokręcającym. Wzrost deformacji (przy zmiennej grubości ścianki) wynika ze zmiany sztywności ścianki na skutek działania momentu dokręcającego. W przypadku tworzyw z grupy PELD i PEHD oraz PP1 do grubości ścianki 1,7 mm następował wzrost deformacji. Odmienny efekt uzyskano dla PP2, którego przyrost deformacji przy grubości 1,7 mm zmniejszył się, ponownie wzrósł przy grubości ścianki 2,1 mm. Dla większości badanych tworzyw grubość ścianki 1,9 mm i 2,1 mm były granicą dla wzrastającej deformacji. Przy kolejnej rozważanej grubości ścianki 2,3 mm wartości przyrostu deformacji są niższe. Zmniejszenie przyrostu deformacji wynika ze zwiększonej sztywności ścianki, która stawia większy opór podczas dokręcania i uniemożliwia głębszego osadzenia nakrętki na szyjce butelki. Z tego wynika, że w połączeniu gwintowym na skutek oddziaływania szyjki gwintowanej na wewnętrzną powierzchnię, ścianka tylko częściowo przyjmuje obciążenie, które jest ujawniane poprzez deformację. Pozostała część obciążenia przechodzi w inny obszar nakrętki (miejsce występowania pęknięcia).



Rys.3.24. Przyrost deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia badanych materiałów przy zmiennej grubości ścianki denka

Na rysunkach od 3.25. do 3.31. przedstawiono wpływ momentu dokręcającego na maksymalną deformację powstającą w czaszy zamknięcia przy zmiennej grubości ścianki dla badanych tworzyw. W przypadku, gdy krzywe nie osiągnęły maksymalnego przyłożonego momentu dokręcającego (50Nm) następowało przedwczesne zniszczenie badanych próbek i przerwanie eksperymentu.

Porównując deformację w zamknięciach wytworzonych z tworzyw z grupy PEHD można zauważyć zarówno pewne podobieństwa jak i różnice. Odmienne przebiegi uzyskano w próbkach z PEHD1 (rys.3.25), gdy krzywe maksymalnych deformacji przecinają się lub nachodzą na siebie. W przypadku próbek z PEHD2 (rys.3.26) oraz PEHD3 (rys.3.27) uzyskano zbliżone wartości deformacji łącznie z deformacjami jakie powstały w procesie wytwarzania.



Rys. 3.25. Zależność maksymalnej deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego przy różnych grubościach ścianki dla PEHD 1





Rys. 3.26. Zależność maksymalnej deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego przy różnych grubościach ścianki dla PEHD 2

Rys. 3.27. Zależność maksymalnej deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego przy różnych grubościach ścianki dla PEHD 3

W przypadku próbek z PEHD2 oraz PEHD3 można zauważyć, że wraz ze wzrostem grubości ścianki oraz zwiększającym się momentem dokręcającym przyrost deformacji obniża się i kończy się zniszczeniem nakrętki. Spowodowane jest to przeniesieniem obciążenia z deformowanej ścianki do miejsca, gdzie występuje powierzchnia cylindryczna zamknięcia.

Analizując deformację w próbkach wytworzonych z PELD można zauważyć, że krzywe układają się w podobny sposób poprzez zmniejszenie maksymalnego przyrostu deformacji przy momencie dokręcającym 15-20Nm. W przypadku deformacji próbki z PELD2 (rys.3.29) przy wartości momentu 45Nm dokręcającego następowało zniszczenie badanych próbek. Można również zauważyć większy wpływ deformacji początkowych niż w przypadku próbek z PELD1 (rys.3.28). Wartość graniczna, gdy deformacja przestaje istotnie przyrastać, mimo zwiększającego się momentu dokręcające zostało uzyskane dla deformacje przy momencie dokręcającym 20Nm. Kolejne zwiększanie momentu dokręcającego powoduje, że następuję znaczne obciążenie w innych obszarach nakrętki.



Rys. 3.28. Zależność maksymalnej deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego przy różnych grubościach ścianki dla PELD 1



Rys. 3.29. Zależność maksymalnej deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego przy różnych grubościach ścianki dla PELD 2

W przypadku materiałów z grupy PP (rys.3.30 oraz rys.3.31) można zauważyć, że przebieg krzywych dla obu przyjętych materiałów jest zbliżony w całym zakresie pomiarowym. W przypadku PP1 na przyrost maksymalnych deformacje nie ma znaczącego wpływu zmiana grubości ścianki (zmiana o 0,2 mm w całym zakresie zadawanego momentu dokręcającego). W przypadku próbek z PP2 wartość deformacji zmienia się w zakresie 0,5mm w pozycji wyj-

ściowej i zmniejsza sie do 0,3mm dla maksymalnego momentu dokręcającego. Próbki z PP wykazują zbliżony poziom deformacji przy zmieniającej się grubości ścianki.



Rys. 3.30. Zależność maksymalnej deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego przy różnych grubościach ścianki dla PP1



Rys. 3.31. Zależność maksymalnej deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego przy różnych grubościach ścianki dla PP2

# 3.1.6. Badania wpływu wybranych cech geometrycznych nakrętki na jej deformację (para gwintowa "polimer-metal")

W kolejnych analizach skupiono się tylko na jednym tworzywie PE-HD2, które wcześniej zostało wytypowane do badań właściwych. Na rysunkach od 3.32 do 3.37 przedstawiono dla przyjętych do badań grubości ścianek, deformację wyznaczoną w wybranych punktach pomiarowych przy zmiennym momencie dokręcającym. Uzyskane wyniki deformacji przy momencie dokręcającym (0Nm) będącym punktem odniesienia potwierdzają uzyskane wyniki deformacji w badaniach symulacyjnych. Przyłożenie momentu dokręcającego powoduje, że czasza zamknięcia podczas nakręcania zmienia swój kształt z wklęsłego na znacząco wypukły.

W przypadku grubości ścianki od 1,3 mm do 1,7 mm na rysunkach przedstawione są wyniki deformacji tylko do momentu 45Nm. Po przekroczeniu tej wartości, przy momencie 50Nm obiekty badań podlegały zniszczeniu (pęknięcie nakrętki). Zaobserwowano że, przyłożenie momentu dokręcającego (przy grubości ścianki 1,3mm oraz 1,5mm) spowodowało, że uzyskano symetryczny przebieg deformacji względem przyjętych punktów pomiarowych oraz osi zamknięcia. W przypadku grubości 1,3mm oraz 1,5mm można zauważyć, że największe deformacje powstają w skrajnych punktach (A oraz L). Spowodowane jest to mniejszą sztywnością ścianki. Pomiędzy punktami B oraz K wartości deformacji są kilkukrotnie mniejsze niż w punktach A i L. W przypadku grubości ścianki 1,9mm, 2,1mm oraz 2,3mm zaobserwowano, że rozkład krzywych deformacji jest bardziej, symetryczny, a różnice pomiędzy "sąsiadującymi" punktami są mniejsze. Jest to szczególnie widoczne w deformacjach w skrajnych punktach.

Wraz ze wzrostem grubości ścianki deformacje we wszystkich punktach zwiększają się. Jest to spowodowane zwiększeniem jej sztywności ścianki co wpływa na lokalne (pomiędzy punktami) przenoszenie obciążenia i deformację. Wzrost grubości ścianki korzystnie wpłynął na wytrzymałość podczas dokręcania, co dało możliwość dokręcenia większym momentem.


Rys.3.32. Wpływ momentu dokręcającego na rozkład deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia w przyjętych punktach pomiarowych dla grubości ścianki 1,3 mm



Rys.3.33. Wpływ momentu dokręcającego na rozkład deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia w przyjętych punktach pomiarowych dla grubości ścianki 1,5 mm



Rys.3.34. Wpływ momentu dokręcającego na rozkład deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia w przyjętych punktach pomiarowych dla grubości ścianki 1,7 mm



Rys.3.35. Wpływ momentu dokręcającego na rozkład deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia w przyjętych punktach pomiarowych dla grubości ścianki 1,9 mm



Rys.3.36. Wpływ momentu dokręcającego na rozkład deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia w przyjętych punktach pomiarowych dla grubości ścianki 2,1 mm



Rys.3.37. Wpływ momentu dokręcającego na rozkład deformacji czaszy gwintowanego zamknięcia w przyjętych punktach pomiarowych dla grubości ścianki 2,3 mm

Na rysunkach od 3.38 do 3.41 zestawiono wyniki deformacji dla PE-HD2. Na rysunkach tych przedstawiono wpływ grubości ścianki gwintowanego zamknięcia na deformację przy zadanych momentach dokręcających. Wartość początkowa deformacji (rys.3.38) na istotny wpływ na kształtowanie się deformacji przy zwiększającym się momencie dokręcającym. Wartości deformacji w skrajnych punktach wzrastają wraz ze wzrostem grubości ścianki. Pogłębiające się odkształcenie czaszy wraz ze wzrostem grubości ścianki (przy momencie 0Nm) może być spowodowane naprężeniami powstającymi podczas procesu wytwarzania nakrętek. Pojawiają się one już po procesie, podczas chłodzenia na zewnątrz formy wtryskowej oraz w czasie ich magazynowania. Zastosowanie kolejnych wartości momentu dokręcającego (poniżej 20Nm) spowodowało wyrównywanie deformacji czaszy (symetryczne zarysy). Wyniki deformacji dla wartości momentów 20Nm i 30Nm pokazują, że wraz ze wzrostem grubości ścianki wzrasta jej sztywność (mniejsze wartości deformacji w zewnętrznych punktach pomiarowych czaszy).



Rys. 3.38. Wpływ grubości ścianki na deformację w wybranych punktach pomiarowych przy momencie dokręcającym 0Nm



Rys. 3.39. Wpływ grubości ścianki na deformacje w wybranych punktach pomiarowych przy momencie dokręcającym 10Nm



Rys. 3.40. Wpływ grubości ścianki na deformacje w wybranych punktach pomiarowych przy momencie dokręcającym 20Nm



Rys. 3.41. Wpływ grubości ścianki na deformacje w wybranych punktach pomiarowych przy momencie dokręcającym 30Nm

Na rysunkach od 3.42 do 3.44 przedstawiono wpływ momentu dokręcającego na zmianę średnic pomiarowych w dolnej części nakrętki (D<sub>d</sub>) oraz w górnej części nakrętki (Dg). Do analizy wybrano trzy grubości ścianki zamknięcia: 1,3mm, 1,9mm oraz 2,3mm.We wszystkich przypadkach grubości ścianki zaobserwowano, że wraz ze wzrostem momentu dokręcającego górna średnica pomiarowa ma tendencję do zmniejszania, natomiast dolna ma tendencję do zwiększania swojej wartości. Zmiana wartości średnic pomiarowych jest spowodowana przemieszczaniem się (zsuwaniem się) gwintu nakrętki względem gwintu szyjki na skutek przyłożonego momentu, promieniowo (w płaszczyźnie prostopadłej do osi połączenia). Zmniejszanie średnicy pomiarowej spowodowane jest deformacją ścianki (czaszy) zamknięcia, która odpowiada za szczelność połączenia oraz przemieszczaniem się (tzw. zsuwanie się nakrętki z gwintu szyjki), którego przyczyna jest niewystarczająca wartość kąta roboczego gwintu. W przypadku grubości ścianki 1,3mm (rys.3.42) oraz 1,9mm (rys.3.43) można zauważyć, że przy wartościach momentu dokręcającego powyżej 10Nm średnica górna ponownie rośnie, natomiast dolna ponownie maleje. Może to być bezpośrednio związane z tzw. zsuwaniem się nakrętki z gwintu lub znacznym odkształceniem czaszy. Zjawisko to nie występuje przy grubości ścianki 2,3mm (rys.3.44) na skutek znacznego zwiększenia sztywności ścianki.



Rys.3.42. Wpływ momentu dokręcającego na średnicę pomiarową przy grubości ścianki 1,3 mm (Dg- górna średnica pomiarowa, Dd- dolna średnica pomiarowa)



Rys.3.43. Wpływ momentu dokręcającego na średnicę pomiarową przy grubości ścianki 1,9 mm (Dg- górna średnica pomiarowa, Dd- dolna średnica pomiarowa)



Rys.3.44. Wpływ momentu dokręcającego na średnicę pomiarową przy grubości ścianki 2,3 mm (Dg- górna średnica pomiarowa, Dd- dolna średnica pomiarowa)

#### 3.1.7. Wnioski i wytyczne do badań właściwych

Na podstawie badań wstępnych w zakres których wchodziły badania pękania, badania właściwości mechanicznych, badania symulacyjne oraz badania deformacji gwintowanych zamknięć wytworzonych z przyjętych w programie badań materiałów można przyjąć następujące wnioski:

1. Występowanie w połączeniu gwintowym substancji chemii motoryzacyjnej wpływa na występowanie zjawiska pękania zamknięcia gwintowanego. Rodzaj tej substancji wpływa na czas występowania zniszczenia w przyjętym programie badań. W badaniach właściwych należy podjąć próbę określenia wpływu kolejnych czynników zewnętrznych (substancji), które mogą wpływać na zjawisko deformacji oraz pękania gwintowanych zamknięć opakowań.

2. Wyniki badań właściwości mechanicznych poszerzają wiedzę o zachowaniu próbek badawczych na skutek działania obciążeń o charakterze statycznym i dynamicznym jednakże, nie wyczerpuje to wszystkich niewiadomych niezbędnych do oceny przydatności zarówno materiałów polimerowych jak i cech konstrukcyjnych połączeń gwintowych. Oznaczanie właściwości mechanicznych daje możliwość wstępnej selekcji materiałów ze względu na charakter obciążeń występujących w połączeniu gwintowym opakowań.

3. Przeprowadzone badania symulacyjne mogą stanowić ważny element wstępnej oceny przydatności wybranego materiału do aplikacji w opakowaniach. Szczególnie kiedy będą brane pod uwagę parametry wpływające na czas cyklu oraz występującą deformację, które mogą mieć wpływ na warunki nakręcania.

4. Przeprowadzone badania zakresu odkształceń dla wybranych materiałów potwierdzają deformację uzyskaną w badaniach symulacyjnych. Dzięki temu istnieje możliwość korzystnej ingerencji w parametry procesu oraz cechy geometryczne nakrętki w celu podniesienia odporności na deformację oraz pękanie już na etapie wstępnego projektowania połączeń gwintowych.

5. Przeprowadzone wstępne badania odkształceń odbywały się w połączeniu gwintowym z wykorzystanie stalowej szyjki gwintowanej. Obciążenia powstające w połączeniu gwintowym ujawniały się w postaci deformacji oraz odkształceń tylko w nakrętce. Korzystne będzie, aby na etapie właściwych prób do badań deformacji wykorzystać w parzę gwintowej szyjkę gwintową z materiału poliolefinowego.

6. W badaniach wstępnych analizowane były połączenia gwintowe bez udziału dodatkowych elementów tj. wkładek uszczelniających, które mogą wpływać na warunki nakręcania. W badaniach właściwych ważnym będzie więc ocena wpływu elementów uszczelniających na warunki nakręcania.

Wyniki badań wstępnych oraz na ich podstawie sformułowane wnioski mają istotny wpływ na przyjęcie programu badań właściwych. W badaniach właściwych eksperyment zostanie rozszerzony o wyznaczenie deformacji zamknięcia w połączeniu pary gwintowej polimer-polimer, a także wpływ wkładki uszczelniającej na efekty nakręcania.

## 3.2 Analiza wyników badań właściwych

3.2.1. Badania wpływu cech geometrycznych nakrętki na jej deformację w połączeniu gwintowym "polimer-polimer"

W rozdziale omówiono wyniki badań deformacji gwintowanych zamknięć wykonanych z wybranego do badań właściwych tworzywa PEHD2. Do badań przyjęto zakres momentu dokręcający od 0Nm do 35Nm (zastosowanie większego momentu dokręcającego skutkowało zniszczeniem polimerowej gwintowanej szyjki). Zmienność momentu przyjęto co 5Nm. Na rysunkach od 3.45 do 3.48 przedstawiono przykładowe deformacje czaszy nakrętki dla grubości ścianki 1,3mm oraz momentu dokręcającego: 5Nm, 15Nm, 25Nm oraz 35Nm. Analizując otrzymane deformacje w czaszy zaobserwowano że, przyrastała ona do wartości momentu dokręcającego 25Nm (rys.3.47.). Przy większych wartościach momentu dokręcającego wartości odkształcenia czaszy zmniejszyły się (rys.3.48). Zostało to spowodowane odkształceniem się gwintowanej szyjki oraz znaczącym odkształceniem zamknięcia w obszarze połączenia gwintowego.



Rys. 3.45. Rozkład deformacji na powierzchni czaszy zamknięcia dla ścianki o grubości 1,3mm i momentu dokręcającego 5Nm (GOM Inspect)



Rys. 3.46. Rozkład deformacji na powierzchni czaszy zamknięcia dla ścianki o grubości 1,3mm i momentu dokręcającego 15Nm (GOM Inspect)



Rys. 3.47. Rozkład deformacji na powierzchni czaszy zamknięcia dla ścianki o grubości 1,3mm i momentu dokręcającego 25Nm (GOM Inspect)



Rys.3.48. Rozkład deformacji na powierzchni czaszy zamknięcia dla ścianki o grubości 1,3mm i momentu dokręcającego 35Nm (GOM Inspect)

Na rysunku 3.49 przedstawiono maksymalne deformacje czaszy przy wzrastającej wartości momentu dokręcającego przy różnych grubościach ścianki gwintowanego zamknięcia. Wraz ze wzrostem grubości ścianki uzyskiwane maksymalne deformacje przyjmują mniejsze wartości przy wzrastającym momencie dokręcającym. W przypadku grubości ścianki 1,3mm zmniejszenie odkształceń zachodzi dla momentu dokręcającego 15Nm oraz powyżej 25Nm. Największe wartości maksymalnych deformacji uzyskano dla grubości ścianki 1,5mm (usztywnienie ścianki spowodowało przenoszenie deformacje bez odkształcenia czaszy).



Rys.3.49. Zależność maksymalnej deformacji czaszy nakrętki od momentu dokręcającego dla rożnych grubości ścianki

Na rysunkach od 3.50 do 3.53 przedstawiono przykładowe wartości deformacji bocznej ścianki zamknięcia o grubości 1,3mm oraz momentów dokręcających 5Nm, 15Nm, 25Nm oraz 35Nm. Podczas zastosowania momentu dokręcającego 5Nm ścianka odkształcała się na zewnątrz (dodatnie wartości odkształceń). Przy zastosowaniu większych momentów dokręcających powyżej 15Nm deformacja w górnej części ścianki przyjmuje wartości ujemne co świadczy o przemieszczaniu się w kierunku promieniowym zamknięcia gwintowego względem zastosowanej szyjki. Jednakże wartości tych odkształceń nie są tak znaczące jak w przypadku połączenia gwintowego polimer-stal, gdy cała deformacja była przejmowana przez zamknięcie gwintowe. Wtym przypadku część odkształcenia na skutek wywieranego obciążenia jest przenoszona na gwintowaną polimerową szyjkę.



Rys.3.50. Rozkład deformacji na powierzchni ścianki bocznej w przypadku momentu dokręcającego 5Nm



Rys. 3.51. Rozkład deformacji na powierzchni ścianki bocznej w przypadku momentu dokręcającego 15Nm



Rys. 3.52. Rozkład deformacji na powierzchni ścianki bocznej w przypadku momentu dokręcającego 25Nm



Rys. 3.53. Rozkład deformacji na powierzchni ścianki bocznej w przypadku momentu dokręcającego 35Nm

Przy zastosowaniu większych wartości momentów dokręcających (co najmniej 15 Nm) można zauważyć, że deformacja w obszarze średnicy (punkty pomiarowe na ściance cylindrycznej odczytane z tej samej odległości pomiarowej) przyjmują wartości różniące się między sobą o ponad 0,3 mm. W konsekwencji powoduje to efekt owalizacji nakręcanego zamknięcia. Zjawisko to jest spowodowane nieciągłością technologiczną gwintu na szyjce polimerowej.

Na rysunku 3.54 przedstawiono zależność deformacji ścianki bocznej od momentu dokręcającego. Literą G oznaczono deformacje w górnej średnicy ścianki, gdzie powierzchnia boczna ścianki łączy się z powierzchnią czaszy zamknięcia. Literą D oznaczono deformacje w dolnej średnicy ścianki bocznej. Wraz ze wzrostem momentu dokręcającego deformacja dolnej średnicy zamknięcia przyjmują wartości dodatnie, a deformacje górnej średnicy zamknięci przyjęła wartości ujemne, co pokazuje wzajemne przemieszczanie się elementów połączenia gwintowego. Wartość deformacji w przypadku górnego i dolnego obszaru pomiarowego (górna i dolna średnica nakrętki), przy przyjętych grubościach ścianki czaszy i wzrastającego momentu dokręcającego nie przekraczały 0,05mm (zmiana na średnicy o ok. 0,1mm). Wyjątek stanowi górna średnica zamknięcia przy momencie dokręcającym 35Nm, gdy deformacja przekracza 0,1mm.

Porównując wyniki deformacji górnej i dolnej średnicy pomiarowej w badanych parach gwintowych polimer-metal oraz polimer-polimer można stwierdzić, że podczas nakręcania zamknięcia gwintowanego na szyjkę polimerową w wyniku działającego obciążenia część deformacji jest odbierana przez gwintową szyjkę.



Rys. 3.54. Wpływ momentu dokręcającego na deformację ścianki bocznej dla różnych grubości ścianki

## 3.2.2. Badania wpływu wybranych substancji chemii motoryzacyjnej na nakręcanie zamknięcia w połączeniu gwintowym

Badania wpływu wybranych substancji chemii motoryzacyjnej na efekty nakręcanie zamknięcia w połączeniu gwintowym zostały podzielone na dwa etapy. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem stanowiska badawczego wyposażonego w klucz dynamometryczny oraz stanowiska pozwalającego na zaprogramowanie ruchu obrotowego w połączeniu gwintowym. Pomiar odbywał się, gdy wewnętrzna strona ścianki nakrętki dotykała powierzchni płaskiej szyjki butelki. Na rysunku 3.55 przedstawiono wyniki badań wpływu substancji chemii motoryzacyjnej na kąt dokręcenia przy zmieniającym się momencie. Maksymalny moment dokręcającego do wartości 0Nm na skutek rozłączenie połączenie gwintowego (tzw. "przeskakiwanie" nakrętki na gwincie szyjki). Zastosowanie w połączeniu substancji w postaci oleju silnikowego oraz płynu do spryskiwaczy ponad dwukrotnie podniosło wartość kąta nakręcania już przy momencie dokręcającym o wartości 1Nm (w porównaniu do połączenia suchego oraz połączenia z płynem hamulcowym). W przypadku płynu do spryskiwaczy w odniesieniu do połączenia suchego ta relacja zamienia się o stałą wartość (ok. 90°) aż do maksymalnego zastosowanego momentu. W przypadku płynu hamulcowego kąt dokręcenia powiększa się w porównaniu do połączenia suchego i przy momencie dokręcającym 2,5Nm ustala się na poziomie ok. 30°. W przypadku oleju silnikowego kąt dokręcenia wzrastał w całym zakresie momentu dokręcającego osiągając wartość 310° (przy momencie dokręcającym 4,5Nm) co stanowi prawie trzykrotną wartość kąta nakręcania połączenia suchego.



Rys.3.55. Wpływ momentu dokręcającego na kąt dokręcenia dla różnych przypadków połączenia gwintowego (ręczne uszczelnianie połączenia)

W tabeli 3.5 przedstawiono wyniki wyznaczania momentu dokręcającego oraz kąta nakręcającego dla połączeń gwintowych z zastosowanymi płynami chemii motoryzacyjnej. Nakręcanie zamknięcia odbywało się do chwili spadku momentu dokręcającego do wartości 0Nm na skutek rozłączenie połączenie gwintowego (tzw. "przeskakiwanie" nakrętki na gwincie szyjki). Nie uzyskano ścisłej zależności pomiędzy otrzymanymi wartościami momentów dokręcających a kątem dokręcania. Wartości momentu dokręcającego i kąta dokręcania dla płynu hamulcowego są mniejsze niż w przypadku suchego połączenia gwintowego, co skutkowało szybszym ześlizgnięciem się geometrii zamknięcia z gwintowanej szyjki. Płyn do spryskiwaczy oraz olej silnikowy przyczyniły się do zwiększenia wartości kąta nakręcenia przy obniżeniu wartości momentu dokręcającego. Skład chemiczny płynów powoduje zmianę warunków nakręcania (m.in. odmienny kąt zwilżania na powierzchniach elementów połączenia podlegających kontaktowi oraz zmiana współczynnika tarcia) zamknięcia na szyjkę.

Rodzaj Substancji	Oznaczenie	Moment Dokręcający, [N·m]	Kąt Dokręcenia, [°]
1	2	3	4
Połączenie suche	R	$7{,}20\pm0{,}62$	$295\pm36$
Płyn hamulcowy	Н	$3,46 \pm 0,32$	238 ± 13
Płyn do spryskiwaczy	S	$6{,}28\pm0{,}61$	347 ± 31
Olej silnikowy	0	$2,\!45\pm0,\!15$	354 ± 42

Tab. 3.5. Wyniki badań nakręcania dla wybranych płynów chemii motoryzacyjnej

Na rysunku 3.56 przedstawiono przykładowe przebiegi krzywych nakręcania uzyskanych w badaniach z wykorzystaniem programowalnego stanowiska do badania nakręcania. Opisane krzywe przedstawiają R - połączenie referencyjne (suche), H - połączenie z płynem hamulcowym, S - połączenie z płynem do spryskiwaczy, O - połączenie z olejem silnikowym. Uzyskane zależności obrazują oprócz wpływu płynów chemii motoryzacyjnej na moment dokręcający to również wpływ na wartość kąta nakręcenia. Kąt nakręcenia wskazuje na ułożenie się nakrętki względem gwintowanej szyjki ( tzw. jak głęboko nakrętka jest osadzona na szyjce). W przypadku płynu do spryskiwaczy (krzywa S) podczas nakręcania możemy zauważyć zmianę momentu dokręcającego (zwielokrotnienie efektu wzrostu i spadku momentu o tendencji rosnącej), co powoduje duże obciążenia połączenia gwintowego.



Rys. 3.56. Przykładowe przebiegi zależności kąta nakręcania od momentu dokręcającego z zastosowanymi płynami chemii motoryzacyjnej (opis w tekście)

Zastosowanie płynów chemii motoryzacyjnej powoduje zmianę panujących warunków pomiędzy powierzchniami współpracującymi podczas nakręcania, a tym samym ma to wpływ na wartość momentu dokręcającego i odkręcającego a co za tym idzie na zdolność do zachowania szczelności w połączeniu opakowania.

## 3.2.3. Badania wybranych cech geometrycznych wkładki uszczelniającej

Jedna z funkcji użytkowych (ochronne) w połączeniach gwintowanych opakowań (szczelność połączenia), jest często realizowane za pomocą poliolefinowych porowatych wkładek. Do badań zostały wybrane porowate wkładki uszczelniające z uwagi na ich powszechne stosowanie w połączeniach gwintowych opakowań polimerowych. W pracy podjęto próbę powiązania wpływu cech geometrycznych porowatych wkładek z PE ze zjawiskiem pękania nakrętek poliolefinowych.

W pracy scharakteryzowano wybrane cechy geometryczne porów, które tworzą strukturę wkładek uszczelniających o różnej grubości. Pod uwagę wzięto: wysokość pojedynczych porów, szerokość porów, obwód przekroi porów oraz pole przekroju porów. Wysokość porów była mierzona równolegle do wymiaru grubości wkładki. Szerokość porów określono jako wymiar równoległy do średnicy wkładki. Przekrój był wyznaczony wzdłuż prostopadłej do powierzchni wkładki.

Tab. 3.6. Wyniki wartości średnich wybranych pomiarów przekrojów porów w zależności od grubości wkładki uszczelniającej

Grubość wkładki, mm	Wysokość porów [mm]	Szerokość porów [mm]	Obwód przekroju porów [mm]	Pole przekroju porów [mm <sup>2</sup> ]
1	2	3	4	5
1,0 1,5 2,0 3,0	$\begin{array}{c} 0,116 \pm 0,019 \\ 0,146 \pm 0,034 \\ 0,165 \pm 0,025 \\ 0,236 \pm 0,035 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0,369 \pm 0,047 \\ 0,371 \pm 0,025 \\ 0,370 \pm 0,048 \\ 0,371 \pm 0,054 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0,844 \pm 0,129 \\ 0,920 \pm 0,090 \\ 0,956 \pm 0,142 \\ 1,063 \pm 0,142 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0,031 \pm 0,006 \\ 0,047 \pm 0,013 \\ 0,050 \pm 0,013 \\ 0,069 \pm 0,016 \end{array}$

Wraz ze wzrostem grubości wkładki wrasta wysokość porów (kolumna 2) przy zachowaniu zbliżonej ich szerokości (kolumna 3). Wzrost grubości porów wpływał również na nieznaczne zwiększenie obwodu oraz pola w przekroju poprzecznym. Zmiana cech geometrycznych porów występowała przede wszystkim w kierunki prostopadłym do powierzchni wkładki uszczelniającej, co należy powiązać z procesem technologicznym. Wpływała na to zwiększona ilość gazu zawarta w porach wewnątrz wkładki, a tym samym miało to wpływ na zachowanie wkładki podczas nakręcania w połączeniu gwintowym

# 3.2.4. Badania wpływu elementów uszczelniających połączenia gwintowego na efekt i wskaźniki związane z nakręcaniem zamknięcia

Na rysunku 3.57 przedstawiono przykładowe przebiegi momentu dokręcającego w funkcji kąta nakręcania, w zależności od grubości porowatych wkładek uszczelniających. Zwiększenie grubości wkładki uszczelniającej powoduje "głębsze" umieszczenie nakrętki względem szyjki pojemnika oraz obniżenie wartości momentu dokręcającego do 43% (w przypadku wkładki uszczelniającej o grubości 3mm) w stosunku do wartości maksymalnej (otrzymanej dla wkładki uszczelniającej o grubości 1mm). Zastosowanie wkładki uszczelniającej o większej grubość, skutkuje zmniejszeniem zarejestrowanego momentu dokręcającego. Co związane jest z przejmowaniem części odkształceń przez element uszczelniający.



Rys. 3.57. Zależność momentu dokręcającego od kąta nakręcania dla wkładek uszczelniających o różnych grubościach (przykładowe przebiegi)



Rys. 3.58. Wpływ grubości wkładki na siłę ściskającą, podczas przemieszczania osiowego pomiędzy elementami połączenia gwintowego (przykładowe przebiegi)

Na rysunku 3.58 przedstawiono przykładowe zależności siły i odkształcenia podczas ściskania wkładek uszczelniających, zarejestrowane na maszynie wytrzymałościowej (zgodnie z rysunkiem 2.19). Zakres odkształceń przyjętych w badaniach wytrzymałościowych, wyznaczono na podstawie odkształceń w próbie nakręcania. W tabeli 3.7 zestawiono średnie wyniki pomiarów w próbie nakręcania (rysunek 3.57) oraz ściskania (rysunek 3.58) wraz z obliczonymi wartościami naprężeń przy ściskaniu wkładki uszczelniające oraz naprężeń rozciągających w nakrętce w zależności od grubości wkładki uszczelniającej.

Tab. 3.7. Zestawienie danych dotyczących grubości wkładki uszczelniającej, wyników badania nakręcania i badania ściskania oraz naprężeń ściskających wkładki uszczelniającej i naprężeń rozciągających w nakrętce

Grubość wkładki, mm	Moment dokręcający [N·m]	kąt dokręcenia [°]	Przemieszczenie w osi [mm]	Siła osiowa [N]	Naprężenia ściskające wkładkę [MPa]	Naprężenia rozciągające w nakrętce [MPa]
1	2	3	4	5	6	7
1,0	7,02±0,35	235±32	1,96±0,27	936±37	19,21±0,76	23,06±0,91
1,5	6,58±0,75	269±13	2,24±0,11	748±37	15,36±0,76	18,44±0,92
2,0	4,56±0,25	297±19	2,47±0,16	583±15	11,96±0,32	14,37±0,38
3,0	3,99±0,2	365±16	3,04±0,14	530±31	10,17±0,75	12,06±0,95
			1		1	

Zastosowanie wkładki uszczelniającej o większej grubości powoduje wzrost wartości kąta nakręcenia oraz spadek maksymalnej wartości momentu dokręcającego. W kolumnie 4 przedstawiono wyniki pionowego przemieszczania się szyjki pojemnika względem nakrętki (suma odkształcenia wkładki uszczelniającej i dna nakrętki). Wraz ze wzrostem grubości wkładki uszczelniającej zmniejsza się wartość jej odkształcenia oraz odkształcenie nakrętki. Związane jest to ze spadkiem siły (o 400N) działającej w osi pionowej co dalej wpływa na zmniejszenie naprężeń przy ściskaniu wkładki uszczelniających (o 47%) oraz zmniejszenie naprężenia rozciągającego w nakrętce o połowę. Zastosowanie wkładki uszczelniającej powoduje, że część siły i naprężenia w połączeniu gwintowym są kompensowane poprzez odkształcenia zachodzące w porowatej strukturze wkładki uszczelniającej. Podczas działania siły ściskającej na wkładkę uszczelniającą, struktura porowata przejmuje znaczną część odkształcenia, które w konsekwencji zmniejszają deformację dna nakrętki. Wraz ze wzrostem grubości wkładki uszczelniającej zwiększa się udział fazy porowatej, w badanym przekroju a tym samym zdolność do pochłaniania przykładanej siły. Ma to związek m.in. z wzrostem wymiarów (pola przekroju) poszczególnych porów. Złożenie krzywych zapisanych na rysunkach 3.57 i 3.58 umożliwia ocenę wartości odkształcenia, które zachodzi w nakrętce, po uwzględnieniu tej części, za którą odpowiada wkładka uszczelniająca.

# 3.2.5. Badania odporności na środowiskową korozję naprężeniowej wybranych tworzyw

W badaniu przyjęto dwie obowiązujące normy, które charakteryzują się różnymi cechami geometrycznymi próbek badawczych PN-EN ISO 22088 (próbki w postaci małych wiosełek) oraz ISO16770 (próbki w postaci beleczek z naciętym karbem). Próbki są zróżnicowane pod względem kształtu, długości, przekroju oraz wprowadzeniem karbu (rys.2.9). Nacięty karb może istotnie wpłynąć na zachowanie się badanej próbki podczas badania[226].

	Typ próbki							
		PN-EN ISO	22088	ISO 16770				
Tworzywc	Moduł Younga [MPa]	Naprężenia [MPa]	Odkształcenie [mm]	Moduł Younga [MPa]	Naprężenia [MPa]	Odkształcenie [mm]		
1	2	3	4	5	6	7		
PEHD2	688±20	26,29±0,22	4,35±0,08	2063±53	40,55±1,64	2,64±0,18		
PEHD4	612±28	$25,40\pm0,78$	4,77±0,11	2056±25	40,47±1,53	3,34±0,45		
PEHD5	563±19	23,46±0,74	4,60±0,44	2060±5	41,02±1,28	3,29±0,28		
1								

Tab.3.8. Wyniki próby statycznego rozciągania dla przyjętych do badań materiałów

W tabeli 3.8 porównano wyniki badań próby statycznego rozciągania próbek badawczych wg PN-EN ISO 22088 (tzw. małe wiosełka) oraz ISO

16770 (tzw. beleczki) dla przyjętych do badań 3 rodzajów PEHD. W przypadku wartości modułu sprężystości próbek wg normy ISO 22088 można zauważyć znaczące różnice przekraczające 120 MPa. Maksymalne różnice w modułach dla próbek wg ISO 16770 wyniosły 7 MPa. Różnice w wynikach wytrzymałości na rozciąganie w przypadku poszczególnych typów próbek badawczych nie przekraczają 3 MPa dla próbek wg ISO 22088 oraz 1 MPa dla próbek wg ISO16770. W przypadku odkształcenia różnice pomiędzy wynikami nie przekraczają 1mm. W przypadku próbki wg ISO 16770 zastosowanie karbu naciętego na każdej ściance próbki w porównaniu do próbki PN-EN ISO 22088 spowodowało skrócenie odkształcenia o ok. 33% każdego z badanych materiałów. Różnica w wynikach jest spowodowana wartością pola przekroju próbki. Mimo naciętego karbu na próbce wg ISO 16770 jej pole przekroju jest o 45% większe od próbek wg PN-EN ISO 22088. Na rysunku 3.59 przedstawiono przykładowe przebiegi podczas rozciągania dla PEHD2, gdzie można zauważyć wpływ karbu (próbki wg ISO 16770) na znaczne skrócenie odkształcenia oraz brak fazy odkształceń plastycznych. W przypadku próbek wg PN-EN ISO 22088 można zauważyć efekt pełzania charakterystyczne dla tworzyw z grupy PELD.



Rys.3.59. Porównanie krzywych rozciągania wiosełko, beleczka z karbem (przykładowe krzywe) dla PEHD2

Na rysunku 3.60 przedstawiono wyniki badań odporności na środowiskową korozję naprężeniową (ESCR) w warunkach wzrastającego obciążenia dla zastosowanych w pracy materiałów, wykorzystywanych w produkcji gwintowanych zamknięć opakowań. W przypadku PEHD2 dla każdej wartości naprężenia, uzyskane wyniki są kilkukrotnie niższe niż PEHD5. Wraz ze wzrostem wartości naprężeń niszczących różnica odporności pomiędzy PEHD2 oraz PEHD4 jest coraz mniejsza. Różnice pomiędzy poszczególnymi materiałami zmniejszają się wraz ze wzrostem wartości naprężenia niszczących.



Rys. 3.60. Wyniki badania odporności na środowiskową korozje naprężeniową (kąpiel: 2% roztwór IGEPAL CO-630, temperatura: 50°C)

Na rysunku 3.61 przedstawiono wyniki badań ESCR wg obu norm przeprowadzonych dla PEHD 2. Badania korozji naprężeniowej przeprowadzane wg normy ISO 16770 oraz normy ISO 22088 są badaniami, których wyniki nie mogą być traktowane zamiennie (różnica pomiędzy cechami geometrycznymi oraz przygotowaniem próbek do badań). Pole przekroju próbki wg ISO 22088 jest o 45% mniejsze niż próbki wg ISO 16770). Przygotowanie próbek badawczych ma istotny wpływ na powstające naprężenia (wykonany karb istotnie spiętrza naprężenia w przekroju). Wyniki badań środowiskowej korozji naprężeniowej są również zależne od warunków przeprowadzania badania (temperatura, rodzaj obciążenia, substancje czynne).



Rys.3.61. Porównanie badania odporności na korozję naprężeniową przeprowadzone wg norm ISO 16770 oraz PN-EN ISO 22088 dla PEHD 2 (kąpiel: 2% roztwór IGEPAL CO-630, temperatura: 50°C)

## 3.2.6. Badanie wpływu momentu dokręcającego na odporność na środowiskową korozję naprężeniową wybranych zamknięć gwintowanych

W celu potwierdzenia zjawisk zachodzących w badanych materiałach badania środowiskowej korozji naprężeniowej przeprowadzono również na nakrętkach dostosowując elementy mocujące stanowiska tak, aby można było ocenić próbki w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Z uwagi na czasochłonność badania przyjęto maksymalny czas pojedynczej próby na 100 godzin. Na rysunku 3.62 przedstawiono widok obiektów badań po zniszczeniu (oderwanie ścianki zamknięcia odpowiedzialnej za szczelność opakowania). W tabeli 3.9 zestawiono parametry wejściowe oraz wyniki badań wpływu momentu dokręcającego na odporność na środowiskową korozję naprężeniową. W kolumnie 2 znajdują się informacje o położeniu gwintowanego zamknięcia po nakręceniu. W kolumnie 3 zamieszczono wartość przemieszczenia nakrętki względem gwintowanej szyjki uzyskiwane podczas nakręcania, które zostało wymuszone na stanowisku badawczym. W kolumnie 4 zamieszczono wartości siły rozciągającej powstałej na skutek wymuszenia przemieszczenia zamknięcia względem gwintowanej szyjki. Wraz ze wzrostem momentu dokręcającego następuje wzrost przemieszczenia zamknięcia względem gwintowanej szyjki, co przekłada się na znaczny wzrost siły (naprężeń) oraz przy oddziaływaniu substancji czynnych (w badaniach zastosowano 2% roztwór IGEPAL CO-630) spada odporność na środowiskową korozję naprężeniową.



Rys.3.62. Zniszczone nakrętki Ø38 podczas badania wpływu momentu dokręcającego na odporność na środowiskową korozję naprężeniową

Tab.3.9.	Wyniki	badania	środowiskowej	korozji	naprężeniowej	nakrętki	polimerowej
(kąpiel: 2	2% roztw	vór IGEF	PAL CO-630, ter	mp.: 23°	C)		

Moment	Moment Kąt		Siła	Czas			
dokręcający	okręcający dokręcenia pionowe		rozciągająca	zniszczenia			
[Nm]	[°]	[mm]	[N]	[h]			
1	2	3	4	5			
1,5	104±30	0,86±0,28	49,6±4,2	>100			
2,5	135±33	1,11±0,34	83,4±6,7	11,70±0,84			
5	178±32	1,49±0,37	123,0±10,4	6,60±1,29			

## 3.2.7. Badania wpływu cech geometrycznych zamknięć gwintowanych na odporności na środowiskową korozję naprężeniowej

W rozdziale 3.2.7 przedstawiono zastosowanie opracowanej metody jako przyspieszonego sposobu weryfikowania zmian cech geometrycznych gwintowanego zamknięcia w celu podniesienia odporności na środowiskową korozję naprężeniową. Rozdział zawiera wyniki badań odporności na środowiskowa korozję naprężeniową w zmodyfikowanych gwintowanych zamknięciach stosowanych w tym samym rodzaju opakowania.

Na rysunku 3.63 przedstawiono efekty występowania zjawiska środowiskowej korozji naprężeniowej. Zniszczenie zamknięcia (próbka A) poprzez oderwanie ścianki odpowiedzialnej na szczelność od pozostałej części zamknięcia. W przypadku zamknięcia (próbka B) nie występuje również deformacja w obszarze ścianki uszczelniającej.



Rys. 3.63. Badane nakrętki w trakcie prób ESCR (zniszczenie zamknięcia A)

W tabeli 3.10 zawarto zestawienie wszystkich zmiennych wejściowych i wyjściowych przedstawiających wpływ zmian konstrukcyjnych w gwintowanym zamknięciu w kierunku podniesienia odporności na środowiskową korozję naprężeniową (ESCR). Zmiany cech geometrycznych nakrętki (wzmocnieniu konstrukcyjne obszaru występowania pękania) umożliwiły zwiększenie o ponad 1/3 pola przekroju nakrętki najbardziej narażonego na występowanie zjawiska środowiskowej korozji naprężeniowej ESC. Spowodowało to spadek naprężeń o 41% w stosunku do nakrętki przed zmianami konstrukcyjnymi.

Tab.3.10. Wyniki badań wpływu zmian konstrukcyjnych w rzeczywistym obiekcie (zamknięcie gwintowane) na odporności na korozję naprężeniową A-nakrętka przed zmianami konstrukcyjnymi, B- nakrętka z wprowadzonymi zmianami konstrukcyjnymi

Masa sztaby "Obciążenie"	Siła rozciągająca	ca [MPa] Naprężenia rozciągające		Czas zni [h	szczenia 1]
[⊾ع]	[1]	A	В	A	В
1	2	í í	3	4	Ļ
2	19,61	0,1	0,06	19±1,96	669±31
4	39,23	0,2	0,12	$17 \pm 1,08$	$101 \pm 12,2$
6	58,84	0,3	0,18	2,0±0,31	24±4,2
8	78,45	0,4	0,24	$1,0\pm0,16$	$18 \pm 1,8$
10	98,07	0,5	0,30	$0,25\pm0,13$	8,25±1,75



Rys.3.64. Zależność czasu zniszczenia od siły obciążającej dla zamknięcia bez zmian (A) oraz dla zamknięcia ze zmianami w konstrukcyjnymi (B) (substancja czynna: roztwór 2% IGEPAL-CO 630, temperatura kąpieli: 50°C)

Modyfikacja cech konstrukcyjnych nakrętki umożliwiła 16-krotny wzrost ESCR w przypadku zastosowanego obciążenia wywołującego siłę o wartości 98,07N. Z kolei w przypadku działania siły o wartości 19,61N ESCR wzrosła ponad 35-krotnie. Na rysunku 3.64 przedstawiono wpływ przykładane-

go obciążenia na czas zniszczenia nakrętek przed i po wprowadzonych zmianach konstrukcyjnych. Przy niskich wartościach obciążeń różnica w czasie zniszczenia jest kilkudziesięciokrotna. Dopiero przy wysokich wartościach obciążeń można zauważyć, że różnica w uzyskanych czasach występowania zniszczenia zmniejsza się. Jednak że wartości te dotyczą tylko warunków eksperymentu jako metody porównawczej dającej możliwość oceny obiektów rzeczywistych na ESCR.

### 3.7. Wnioski końcowe i podsumowanie pracy

Podjęty w rozprawie problem związany z procesami destrukcji gwintowanych zamknięć opakowań obejmujących ich deformację oraz pękanie jest skomplikowany (wielowątkowy) ze względu na swój interdyscyplinarny charakter oraz interesujący od strony poznawczej, gdzie wiele wątków badawczych pozwoli na uzupełnienie stanu badań oraz techniki. Podejmowany problem ze względy na swój złożony charakter obejmuje swoim zakresem obszary: materiałowe, konstrukcyjne, technologiczne oraz użytkowe. Powszechność aplikacji opakowań zamykanych przy wykorzystaniu połączenia gwintowego powoduje, że polimerowe gwintowane zamknięcia muszą być wytwarzane w masowej produkcji. Niespełnienie funkcji użytkowych opakowania na skutek destrukcji zamknięcia spowodowanych różnymi czynnikami może doprowadzić do poważnych konsekwencji ekonomiczno-prawnych związanych z karami umownymi lub odszkodowaniami na skutek wstrzymania produkcji, niedostarczenia partii wyrobów lub wycofania gotowych produktów z rynku.

W rozprawie na podstawie analizy stanu badań i techniki zaproponowano eksperyment, który został podzielony na dwa etapy: Etap I (badania rozpoznawcze) oraz Etap II (badania właściwe). Opracowany eksperyment zakładał badania przebiegu i efektów wtryskiwania dla wybranych wytworów na przykładzie próbek znormalizowanych oraz obiektów rzeczywistych w postaci gwintowanych zamknięć opakowań. W pracy przedstawiono wyniki badań pękania oraz deformacji polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań, badania wpływu płynów chemii motoryzacyjnej oraz elementów uszczelniających na nakręcanie oraz badanie odporności na środowiskową korozje naprężeniową próbek z wybranych tworzyw oraz obiektów rzeczywistych. Dotychczasowe badania dotyczące polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań miały charakter cząstkowy [14, 15, 16, 17, 18, 70, 71]. Przedstawione wyniki są jednym z pierwszych opracowań przedstawiających zjawiska występujące w połączeniu gwintowym opakowań polimerowych podczas osadzania zamknięcia oraz w późniejszym czasie użytkowania.

W wyniku przeprowadzonych badań możliwe było sformułowanie następujących wnioski o charakterze poznawczym:

- 1. W rozprawie przyjęty eksperyment został oparty na oryginalnej metodyce badań, której realizacja przyczyniła się do skonstruowania i wykonanie oraz zastosowanie oryginalnych narzędzi i stanowisk badawczych umozliwiających do badań na próbkach znormalizowanych oraz obiektach rzeczywistych.
- 2. Dobór materiału na zamknięcia a także technologia wytwarzania ma istotny wpływ na występowanie deformacji w zamknięciu, które są przyczyną niszczenia nakrętki (odrywania ścianki uszczelniającej podczas użytkowania). Występowanie deformacji początkowych (skurcz pierwotny i wtórny) na skutek procesu wytwarzania ma wpływ na powstawanie deformacji podczas nakręcania. Grubość ścianki gwintowanego zamknięcia (w przypadku tworzyw z grupy PEHD) ma największy wpływ na rozkład wartości maksymalnych deformacji początkowych, co przekłada się na wartości deformacji przy zastosowanym momencie dokręcającym,
- 3. Na podstawie analizy krzywych topnienia DSC (próbki pobrane z newralgicznych punktów z uwagi na pękanie nakrętki) stwierdzono, że warunki termiczne podczas chłodzenia nakrętek o większej grubości ścianki czaszy sprzyjają powstaniu struktury krystalicznej PEHD o większym stopniu uporządkowania, co korzystnie wpływa na wybrane właściwości wytrzymałościowe.
- 4. Przy większych wartościach momentu dokręcającego (powyżej 15Nm) maksymalne wartości deformacji zmniejszają się dla PEHD 2, PEHD 3 oraz materiałów z grupy PELD co jest spowodowane odkształceniami w innej części geometrii ścianki. Można to powiązać z niską wartością udarności (tworzywa PEHD) oraz niską wytrzymałością na rozciąganie (PELD). Zjawisko to korzystnie wpływa na zmniejszenie naprężeń w obszarze występowania pękania zamknięcia.
- 5. Zbyt wysokie wartości momentu dokręcającego powodują zmianę średnic pomiarowych w górnej i dolnej części zamknięcia gwintowego. Zjawisko to polega na promieniowym zsuwaniu się zamknięcia na zewnątrz opakowania za co bezpośrednio odpowiadają cechy geometryczne gwintów w zamknięciu i szyjce pojemnika.
- 6. Płyny chemii motoryzacyjnej w połączeniach gwintowych mają wpływ na wartość momentu dokręcającego oraz kąta nakręcania, co przekłada się na występujące deformacje oraz tendencje do pękania. Niskie wartości momentu dokręcającego przy większych wartościach kąta nakręcania powodują zsuwanie się zamknięcia z gwintu szyjki pojemnika a tym samym zmniejszenie deformacji (naprężeń) w zamknięciu.

- 7. Grubość w tym struktura porowata wkładki uszczelniającej korzystnie wpływa na zmniejszenie naprężeń w zamknięciu gwintowanym a tym samym na zmniejszenie tendencji do pękania.
- 8. Stosowane w pracy uniwersalne stanowisko badawcze umożliwia ocenę wpływu środowiskowej korozji naprężeniowej (dla zmiennych substancji aktywnych i warunków głównie temperaturowych) w przypadku próbek znormalizowanych oraz obiektów rzeczywistych (np. nakrętek).
- 9. Z przeprowadzonych badań wynika, że odporność tworzyw na środowiskową korozję naprężeniową (ESCR), nie ma ścisłego powiązania ze standardowymi parametrami wytrzymałościowymi charakteryzującymi te materiały.
- 10. W badaniach nie stwierdzono bezpośredniej korelacji pomiędzy wynikami badań oznaczania ESCR wg ISO 16770 oraz PN-EN ISO 22088. Jest to spowodowane odmiennymi cechami geometrycznymi próbek (inne wartości przekroju poprzecznego) oraz stosowaniem w przypadku normy ISO 16770 karbu. Stąd różnice niektórych wskaźników (np. moduł Younga) sięgają 120MPa.

W wyniku przeprowadzonych badań możliwe było sformułowanie następujących wnioski utylitarne:

- 1. Wykorzystanie narzędzi numerycznych pozwala na wstępną ocenę nakrętki głównie w obszarze czynników związanych z chłodzeniem (związek z tworzeniem się struktury krystalicznej) oraz deformacjami nakrętki
- 2. Opracowana metodyka badania polimerowych gwintowanych zamknięć opakowań pod kątem występowania zjawiska środowiskowej korozji naprężeniowej umożliwia weryfikację szerokiego zakresu parametrów, a także przeprowadzania badań porównawczych oraz realizacji przyspieszonych programów badań, zarówno dla obiektów badań znormalizowanych jak i obiektów rzeczywistych.
- 3. Istotny wpływ na występowanie zjawisk korozji naprężeniowej (wartość wskaźnika ESCR) mają oprócz cech konstrukcyjnych gwintowanych zamknięć pojemników właściwości zastosowanych materiałów. Ze względu na szeroki eksperyment w badaniach właściwych w części związanej z oznaczaniem ESCR wybrano trzy materiały (PEHD2, PEHD4, PEHD5) do badań na próbkach znormalizowanych oraz jeden materiał (PEHD2) do badań na obiektach rzeczywistych.
- 4. Zbudowane stanowisko badawcze dodatkowo, dzięki swojej uniwersalnej konstrukcji pozwala na prowadzenie badań przy stałym oraz zmiennym obciążeniu oraz może być również wykorzystane do badania pełzania.
- 5. Zaprojektowane i wykonane uniwersalne stanowisko do badania środowiskowej korozji naprężeniowej może posłużyć w warunkach rzeczywistych (przemysłowych) ocenie nowych produktów (np. nakrętek), przeprowa-

dzania przyspieszonych badań porównawczych korygowania i modyfikacji cech geometrycznych zamknięć gwintowych oraz oceny zmian różnych cech geometrycznych na odporność na środowiskową korozję naprężeniową.

W wyniku przeprowadzonych badań możliwe było sformułowanie następujących wniosków do dalszych badań:

- 1. W dalszych rozważaniach należy bliżej przyjrzeć się zachowaniu się zamknięciom gwintowanych (tworzeniu się deformacji) pod działaniem długotrwałego obciążenia na skutek zastosowania momentu dokręcającego.
- 2. W kolejnych badaniach przewiduje się również zbadania zjawiska pełzania w elementach połączenia gwintowego opakowań na skutek działania długotrwałego obciążenia z wykorzystaniem stanowiska do badania ESCR.
- 3. Podjęta zostanie próba określenia wpływu zmiennych warunków otoczenia (temperatury) i obciążenia (cykliczne oraz dynamiczne) wytrzymałość
- 4. Jednym z obszarów będzie określenie wpływu cech geometrycznych gwintu (zarys) na deformacje występujące podczas nakręcania.
- 5. Planuje się również znalezienie korzystnych rozwiązań konstrukcyjnych zamknięcia, które podniosą wytrzymałość na obciążenia statyczne i dynamiczne oraz odporność na środowiskową korozję naprężeniową w korelacji z zastosowanym materiałem.
- 6. Podjęte zostaną również próby zamodelowania połączenia gwintowego z zastosowaniem narzędzi numerycznych (MES) w celu określenie wpływu obciążeń statycznych i dynamicznych na powstawanie deformacji oraz pękania podczas nakręcania i użytkowania.

### 4. SPIS LITERATURY

- [1] Plastics the Facts 2016. An Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data, Plastics Europe, Brussels, Belgium.
- [2] Plastics the Facts 2013. An Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data, Plastics Europe, Brussels, Belgium.
- [3] "Polski Rynek Opakowań Rośnie Dwukrotnie Szybciej Niż Światowy Wiadomości w Plastech.Pl" [Online]. Available: https://www.plastech.pl/wiadomosci/Polskirynek-opakowan-rosnie-dwukrotnie-szybciej-niz-11145. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [4] Farmer, N., 2016, Innowacje w Opakowaniach Żywności i Napojów. Rynki , Materiały, Technologie, Wydawnictwo naukowe PWN SA, Warszawa.
- [5] "Trendy Na Europejskim Rynku Zakrętek i Zamknięć Wiadomości w Plastech.Pl" [Online]. Available: https://www.plastech.pl/wiadomosci/Trendy-na-europejskimrynku-zakretek-i-zamkniec-8953. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [6] "Maszyny Do Produkcji Zakrętek Na Targach K Wiadomości w Plastech.Pl" [Online]. Available: https://www.plastech.pl/wiadomosci/Maszyny-do-produkcjizakretek-na-targach-K-8005. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [7] "Lekkie Zamknięcia Do Butelek Firmy CSI Wiadomości w Plastech.Pl" [Online]. Available: https://www.plastech.pl/wiadomosci/Lekkie-zamkniecia-do-butelekfirmy-CSI-7430. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [8] "Industry News K-2016" [Online]. Available: http://www.k-online.com/cgibin/md\_k/lib/pub/tt.cgi/Industry\_News.html?oid=2429&lang=2&ticket=g\_u\_e\_s\_t. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [9] "Rekord Szybkości w Produkcji Zakrętek Wiadomości w Plastech.Pl" [Online]. Available: https://www.plastech.pl/wiadomosci/Rekord-szybkosci-w-produkcjizakretek-8797. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [10] "Nakrętki z Biopolietylenu Na Norweskim Rynku Wiadomości w Plastech.Pl" [Online]. Available: https://www.plastech.pl/wiadomosci/Nakretki-zbiopolietylenu-na-norweskim-rynku-7543. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [11] "Zużycie Zakrętek w 2020 Roku Przekroczy Bilion Sztuk Wiadomości w Plastech.Pl" [Online]. Available: https://www.plastech.pl/wiadomosci/Zuzyciezakretek-w-2020-roku-przekroczy-bilion-sztuk-7884. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [12] PlastEurope, 2015, "Plasteurope.Com EUROPEAN PLASTIC CAPS AND CLO-SURES: Growth in Value Added Products to Be above Average / Overall Market to Increase by 2% Annually to 2019 / AMI Report" [Online]. Available: https://www.plasteurope.com/news/EUROPEAN\_PLASTIC\_CAPS\_AND\_CLOSU RES\_t232234/. [Accessed: 07-Dec-2017].
- [13] "Caps and Closures."
- [14] "Company and Product Search K-2016," K PORTAL Trade Fair Plast. Rubber -K 2019 [Online]. Available: http://www.k-online.com/cgibin/md\_k/lib/pub/tt.cgi/Company\_Product\_Search\_2016.html?oid=87926&lang=2 &ticket=g\_u\_e\_s\_t. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [15] "Wiadomości Plastech Tworzywa Sztuczne i Opakowania" [Online]. Available: https://www.plastech.pl/wiadomosci. [Accessed: 03-Dec-2017].
- [16] Zawistowski, H., and Frenkler, D., 2007, Formy Wtryskowe. Dokumentacja Obiegowa Przy Zamawianiu i Odbiorze, Plastech, Warszawa.

- [17] Bieliński, M., Czyżewski, P., and Cieślak, J., 2009, "Testing the Deformation of Plastic Screw Caps.," Chemnitz, Germany.
- [18] Bieliński, M., and Czyżewski, P., 2010, "The Influence of Bottom Wall Thickness on Non-Dilatational Strain of a Plastic Screw Cap," Halle (Saale), Germany.
- [19] Bieliński, M., and Czyżewski, P., 2011, "The Assessment of Plastic Packaging Performance," Chemnitz, Geramny.
- [20] Bieliński, M., Czyżewski, P., and Peplinski, K., 2011, "Funkcje Ochronne Opakowań Polimerowych," Zakopane, Polska.
- [21] Bieliński, M., and Czyżewski, P., "Charakterystyka Badań Wybranych Funkcji Ochronnych Opakowań Polimerowych," Inż. Apar. Chem., 51(5), pp. 208–210.
- [22] Czyżewski, P., and Bieliński, M., "Stanowisko Do Badania Nakręcania Połączeń Gwintowych Oraz Deformacji Zamknięć Opakowań Polimerowych, Zwłaszcza Nakrętek Polimerowych."
- [23] Bieliński, M., and Czyżewski, P., "Polimerowe Zamknięcie Gwintowane."
- [24] Selke, S., Culter, J., and Hernandez, R., 2004, Plastic Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulation., Hanser, Munich.
- [25] Qorpac, 2017, "Closure Torque" [Online]. Available: http://www.qorpak.com/pages/ClosureTorque. [Accessed: 08-Dec-2017].
- [26] DeLange, R., Evans, E., and Buster, J. L., "Threaded Connection for Enhanced Fatigue Resistance."
- [27] Masaaki, S., and Miyuki, Y., "Threaded Connection Tubular Goods."
- [28] Gastón Mauro Mazzaferro, Tommaso Coppola, Stefano AMATO, Ramón Alberto Aguilar Armendariz, and Philippe Pierre Darcis, "Threaded Connection with Improved Root Thread Profile."
- [29] "Method of Making Thin-Walled Plastic Screw Caps."
- [30] "Insulated Runner System for Plastic Cap Molds."
- [31] "Internally Threaded Plastic Nut."
- [32] "Screw Cap Made of Plastics Material."
- [33] "Blow-Molded Container Having Finish with Thread Groove and Tamper Evident Features."
- [34] "Plastic Closure with Structural Thread Formation."
- [35] "Moulded Closure and Method of Manufacture."
- [36] "Composite Bottle Cap with Liner."
- [37] "Bi-Injected Cap, and Method for Manufacturing Such a Cap."
- [38] "Przyłacze Rurociągu Dla Syfonu."
- [39]
- [40] "Method and Apparatus for Injection Molding of Plastic Closures."
- [41] "Method of Making a Plastic Cap."
- [42] "Tamper Resistant Bottle Cap and Neck."
- [43] "Plastic Molding of a Nut."
- [44] "Senior-Friendly Child-Resistant Cap."
- [45] "Child-Resistant/Senior-Friendly Container."
- [46] "Easy Opening, Screw Cap for Threaded Opening Type Containers."
- [47] "Child-Resistant Flip-Top Closure."
- [48] "Child Resistant Screw Cap."
- [49] "Infant and Toddler Drinking Containers with Child Resistant Caps."
- [50] "Process of Removing a Plastic Cap from a Mold."

- [51] "Device at a Collapsible Core, Preferably at Injection-Moulding Tool for Plastic Material, Silicone, Rubber and Similar Material."
- [52] "Mechanically Collapsible Core for Injection Molding."
- [53] "Thread Mold."
- [54] "Method and Apparatus for Injection Molding of Plastic Closures."
- [55] "Threaded Lid Injection Mold Release."
- [56] "Process for Forming a Threaded Molded Plastic Article."
- [57] "Apparatus for Removing Threaded Parts from Plastic Injection Molds."
- [58] "Mold Unscrewing Mechanism for Making Threaded Articles."
- [59] "Method of Making a Plastic Cap."
- [60] "Method and Apparatus for Molding a Closure Cap."
- [61] "Nut Casting Method."
- [62] "Polymer Composition for Bottle Screw Caps."
- [63] "Polymer Composition for a Container Closure."
- [64] "Polymer Mixtures for Injection-Molding Applications."
- [65] Akson Sp z.o.o., "Standardowe Zamknięcia." [Online]. Available: http://www.akson.eu/Akson/oferta\_CAP.html. [Accessed: 04-Dec-2017].
- [66] Zahoransky, 2017, "The One-Stop Solution Provider for Automation & Molds," Zahoransky Group [Online]. Available: www.zahoransky.com.
- [67] Snyder, M. R., 2015, "Add-on Co-Injection Gear Minimizes Multimaterial Molding Costs - Technology," Plast. Mach. Mag. [Online]. Available: http://www.plasticsmachinerymagazine.com/technology/injection-molding/add-onco-injection-gear-minimizes-multimaterial-molding-costs.html. [Accessed: 04-Dec-2017].
- [68] Milacron, "Co-Injection Molding | Milacron" [Online]. Available: http://www.milacron.com/products/co-injection-molding/. [Accessed: 04-Dec-2017].
- [69] Bociąga, E., 2008, Specjalne Metody Wtryskiwania Tworzyw Polimerowych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [70] Akson Sp z.o.o., and HASCO Hasenclever GmbH + Co KG, 2011, "Studium Innowacyjności Rdzeni Do Formowania Podcięć" [Online]. Available: http://www.opakowania.biz/index.php?id=artykuly&id\_a=34703&page=3. [Accessed: 04-Dec-2017].
- [71] Salhaney, B., 2012, "Best Methods of Molding Undercuts," Plast. Technol. [Online]. Available: https://www.ptonline.com/articles/best-methods-of-moldingundercuts. [Accessed: 07-Dec-2017].
- [72] DME Company, 2017, "Solutions for Injection Molding Undercuts DME Company" [Online]. Available: http://www.dme.net/undercuts. [Accessed: 07-Dec-2017].
- [73] Gawlak, M., "Techniczno-Ekonomiczne Aspekty Projektowania Form Do Wytwa-Rzania Nakrętek," Technologiczno-Przyrodniczy.
- [74] Błędzki, A., Jeziórska, R., and Kijewski, J., 2017, Odzysk i Recykling Materiałów Polimerowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [75] Żuk, T., Separacja Elektrostatyczna Mieszanin Tworzyw Biodegradowalnych, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz 2015.
- [76] Kuzia, A., 1998, Opakowania z Tworzyw Sztucznych, Agro food technology, Czeladź.
- [77] Florowska, A., and Maszewska, M., 2016, Opakowania z Tworzyw Sztucznych, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- [78] Kuzia, A., 1998, Opakowania z Tworzyw Sztucznych, Agro Food Technology, Czeladź.
- [79] Czaja, K., 2005, Poliolefiny, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [80] Barczewski, M., Kloziński, A., Jakubowska, P., and Sterzyński, T., 2014, "Nonisothermal Crystallization of Highly-Filled Polyolefin/Calcium Carbonate Composites Authors," J. Appl. Polym. Sci., (131, 41201,).
- [81] Dobrzyńska-Mizera, M., Dutkiewicz, M., Sterzyński, T., and Di Lorenzo, M. L., 2016, "Isotactic Polypropylene Modified with Sorbitol-Based Derivative and Siloxane-Silsesquioxane Resin," 85, pp. 62–71.
- [82] Jakubowska, P., Sterzynski, T., and Samujlo, B., 2010, "Rheological Studies of Highly-Filled Polyolefin Composites Taking into Consideration P-V-T Characteristics," Polimery, 55(5), pp. 379–389.
- [83] Prociak, A., Sterzynski, T., Michalowski, S., and Andrzejewski, J., 2011, "Microwave Enhanced Foaming of Carbon Black Filled Polypropylene," Cell. Polym., 30(4), pp. 201–213.
- [84] Rizvi, S. J. A., 2017, "Effect of Injection Molding Parameters on Crystallinity and Mechanical Properties of Isotactic Polypropylene," Int. J. Plast. Technol., 21(2), pp. 404–426.
- [85] Paukszta, D., Szostak, M., and Rogacz, M., 2014, "Mechanical Properties of Polypropylene Copolymers Composites Filled with Rapeseed Straw," Polimery, 59(2), pp. 163–167.
- [86] Rizvi, S. J. A., Singh, A. K., and Bhadu, G. R., 2017, "Optimization of Tensile Properties of Injection Molded Alpha-Nucleated Polypropylene Using Response Surface Methodology," Polym. Test., 60, pp. 198–210.
- [87] "Laser Marking Additive Cleared for Caps and Closures."
- [88] Barczewski, M., Czarnecka-Komorowska, D., Andrzejewski, J., Sterzynski, T., Dutkiewicz, M., and Dudziec, B., 2013, "Processing Properties of Thermoplastic Polymers Modified by Polyhedral Oligomeric Silsesquioxanes (poss)," Polimery, 58(10), pp. 805–815.
- [89] Jakubowska, P., and Sterzynski, T., 2012, "Thermal Diffusivity of Polyolefin Composites Highly Filled with Calcium Carbonate," Polimery, 57(4), pp. 271–275.
- [90] Bula, K., Ciesielczyk, F., and Maciejewski, H., 2013, "Magnesium silicate modified with silanes as filler of polypropylene. Preparation and characterization of composites," Przemysl Chem., 92(11), pp. 1976–1980.
- [91] Bula, K., and Jesionowski, T., 2010, "Effect of Polyethylene Functionalization on Mechanical Properties and Morphology of PE/SiO2 Composites," Compos. Interfaces, 17(5–7), pp. 603–614.
- [92] Bociaga, E., and Palutkiewicz, P., 2012, "Effects of Blowing Agent Content and Injection Moulding Conditions on Selected Properties and Surface Quality of Polypropylene Moulded Parts," Polimery, 57(1), pp. 38–48.
- [93] Bociaga, E., 2010, "Criterion for the Choice of Injection Method," Polimery, 55(3), pp. 172–180.
- [94] Kuzmanovic, M., Delva, L., Cardon, L., and Ragaert, K., 2016, "The Effect of Injection Molding Temperature on the Morphology and Mechanical Properties of PP/PET Blends and Microfibrillar Composites," Polymers, 8(10), p. 355.

- [95] Bociaga, E., and Palutkiewicz, P., 2013, "The Influence of Injection Molding Parameters and Blowing Agent Addition on Selected Properties, Surface State, and Structure of HDPE Parts," Polym. Eng. Sci., 53(4), pp. 780–791.
- [96] Nobile, M. R., Fierro, A., Jakubowska, P., and Sterzyński, T., 19-23 June, "Rheological Properties of Polyolefin Composites Highly Filled with Calcium Carbonate," Naples, Italy.
- [97] Klozinski, A., 2010, "Evaluation of the Reynolds Number in Rheological Measurements of Polyethylene," Polimery, 55(7–8), pp. 575–581.
- [98] Klozinski, A., 2016, "Application of in-line measurement technique for evaluation of rheological properties of polyethylene/calcium carbonate composites," Polimery, 61(11–12), pp. 788–798.
- [99] Wilczynski, K. J., 2017, "Determination of viscosity curves based on limited rheological measurements," Polimery, 62(6), pp. 441–446.
- [100] Klepka, T., Jeziorska, R., and Szadkowska, A., 2015, "Thin wall products made of modified high density polyethylene," Przemysl Chem., **94**(8), pp. 1352–1355.
- [101] Palutkiewicz, P., and Garbacz, T., 2017, "Assessment of the effectiveness of selected blowing agents in the injection molding of thermoplastic materiaw," Polimery, 62(6), pp. 447–456.
- [102] Glogowska, K., Sikora, J. W., and Dulebova, L., 2016, "The Effect of Multiple Processing of Polypropylene on Selected Properties of Injection Moulded Parts," Adv. Sci. Technol.-Res. J., 10(32), pp. 65–72.
- [103] Glogowska, K., Sikora, J. W., and Duleba, B., 2016, "Effect of Mechanical Properties of Metal Powder-Filled Hybrid Moulded Products," J. Polym. Eng., 36(7), pp. 705–712.
- [104] Postawa, P., and Koszkul, J., 2005, "Change in Injection Moulded Parts Shrinkage and Weight as a Function of Processing Conditions," J. Mater. Process. Technol., 162, pp. 109–115.
- [105] Postawa, P., 2005, "Shrinkage of moldings and injection molding conditions," Polimery, 50(3), pp. 201–207.
- [106] Wrzesniewska-Tosik, K., Zajchowski, S., Ryszkowska, J., Tomaszewska, J., Mirowski, J., and Szola, K., 2015, "Influence of preparation method of keratin fibers from poultry feathers on the properties of composites from recycled high density polyethylene," Polimery, **60**(2), pp. 109–117.
- [107] Barczewski, M., Matykiewicz, D., Andrzejewski, J., and Skorczewska, K., 2016, "Application of Waste Bulk Moulded Composite (BMC) as a Filler for Isotactic Polypropylene Composites," J. Adv. Res., 7(3), pp. 373–380.
- [108] Kamleitner, F., Duscher, B., Koch, T., Knaus, S., and Archodoulaki, V. M., 2017, "Upcycling of Polypropylenethe Influence of Polyethylene Impurities," Polym. Eng. Sci., 57(12), pp. 1374–1381.
- [109] Sykutera, D., and Bielinski, M., 2014, "Selected Properties of Recycled Polypropylene Obtained from Porous Injection Molded Parts," Polimery, 59(7–8), pp. 602–605.
- [110] Bielinski, M., and Muzyczuk, P., 2011, "Studies on the Mechanical Properties in Compression of Porous Polypropylene," Polimery, **56**(4), pp. 309–316.
- [111] Gu, F., Hall, P., and Miles, N. J., 2015, "Experimental Investigating Effect of Reprocessing on Properties of Composites Based on Recycled Polypropylene,"

Proceedings of the 2015 International Conference on Power Electronics and Energy Engineering (Peee 2015), A. Leung, ed., Atlantis Press, Paris, pp. 177–184.

- [112] Bahlouli, N., Pessey, D., Raveyre, C., Guillet, J., Ahzi, S., Dahoun, A., and Hiver, J. M., 2012, "Recycling Effects on the Rheological and Thermomechanical Properties of Polypropylene-Based Composites," Mater. Des., 33, pp. 451–458.
- [113] Hubo, S., Delva, L., Van Damme, N., and Ragaert, K., 2016, "Blending of Recycled Mixed Polyolefins with Recycled Polypropylene: Effect on Physical and Mechanical Properties," Proceedings of the Regional Conference Graz 2015 - Polymer Processing Society Pps: Conference Papers, C.H. Holzer, and M. Payer, eds., Amer Inst Physics, Melville, p. 140006.
- [114] Fel, E., Khrouz, L., Massardier, V., Cassagnau, P., and Bonneviot, L., 2016, "Comparative Study of Gamma-Irradiated PP and PE Polyolefins Part 2: Properties of PP/PE Blends Obtained by Reactive Processing with Radicals Obtained by High Shear or Gamma-Irradiation," Polymer, 82, pp. 217–227.
- [115] Borovanska, I., Dobreva, T., Benavente, R., Djoumaliisky, S., and Kotzev, G., 2012, "Quality Assessment of Recycled and Modified LDPE/PP Blends," J. Elastomers Plast., 44(6), pp. 479–497.
- [116] Tomaszewska, J., and Zajchowski, S., 2013, "Study on the Mechanical Properties and Structure of the Compounds of Pe/Pvc Recyclates Filled with Wood Flour," Polimery, 58(2), pp. 106–113.
- [117] Mariana Mancera-Garcia, K., Angel Waldo-Mendoza, M., and Alonso Escobar-Barrios, V., 2016, "Synthesis and Evaluation of Compatibilizer Based on Interpenetrating Polymer Networks (IPN) for PET/LDPE Blends," J. Appl. Polym. Sci., 133(29), p. 43704.
- [118] Parres, F., Crespo-Amoros, J. E., Nadal-Gisbert, A., and Navarro, R., 2012, "Mechanical and Thermal Properties Analysis of Polypropylene Reinforced With Polyamide Microfibre Obtained From Shredded Tyres," Polym. Polym. Compos., 20(9), pp. 817–821.
- [119] Stenvall, E., Tostar, S., Boldizar, A., and Foreman, M. R. S. J., 2013, "The Influence of Extrusion Conditions on Mechanical and Thermal Properties of Virgin and Recycled PP, HIPS, ABS and Their Ternary Blends," Int. Polym. Process., 28(5), pp. 541–549.
- [120] Catelli de Souza, A. M., and Caldeira, C. B., 2015, "An Investigation on Recycled PET/PP and Recycled PET/PP-EP Compatibilized Blends: Rheological, Morphological, and Mechanical Properties," J. Appl. Polym. Sci., 132(17), p. 41892.
- [121] Gozdecki, C., Wilczynski, A., Kociszewski, M., Tomaszewska, J., and Zajchowski, S., 2012, "Mechanical Properties of Wood-Polypropylene Composites with Industrial Wood Particles of Different Sizes," Wood Fiber Sci., 44(1), pp. 14– 21.
- [122] Gozdecki, C., Wilczynski, A., Kociszewski, M., and Zajchowski, S., 2015, "Properties of Wood-Plastic Composites Made of Milled Particleboard and Polypropylene," Eur. J. Wood Wood Prod., 73(1), pp. 87–95.
- [123] Kuciel, S., Liber-Knec, A., and Zajchowski, S., 2010, "Composites Based on Polypropylene Recyclates and Natural Fibers," Polimery, 55(10), pp. 718–725.
- [124] Hadi, A. J., Najmuldeen, G. F., and Bin Yusoh, K., 2013, "Dissolution/Reprecipitation Technique for Waste Polyolefin Recycling Using New Pure and Blend Organic Solvents," J. Polym. Eng., 33(5), pp. 471–481.

- Borealis, 2017, "Solutions for Rigid Consumer Products." [125]
- [126] Borealis Group, 2014, "Borealis and Borouge Introduce a Lightweight BorPure PE Innovation for Caps and Closures" [Online]. Available: https://www.borealisgroup.com/news/borealis-and-borouge-introduce-alightweight-borpure-pe-innovation-for-caps-and-closures. [Accessed: 04-Dec-2017].
- Borealis Group, "BorPure<sup>TM</sup> MB5568 and MB5569 A Lightweight, Sustaina-[127] ble, Cost Efficient HDPE Solution for Beverage Caps & Closures," Caps Clos. [Online]. Available: https://www.borealisgroup.com/polyolefins/consumerproducts/rigid-packaging/caps-and-closures. [Accessed: 04-Dec-2017].
- LyondellBasell, "LyondellBasell Caps & Closures," LyondellBasell [Online]. [128] Available: https://www.lyondellbasell.com/en/productstechnology/polymers/application/caps--closures/. [Accessed: 04-Dec-2017].
  - "BASELLORLEN-Polietylen Małej Gęstości-Gatunki Używane Do Zastoso-
- [129] wań Wtryskowych."
- "BASELLORLEN-Polietylen Dużej Gęstości-Gatunki Używane Do Zastoso-[130] wań Wtryskowych."
- [131] "BASELLORLEN-PP Homo, PP Random, Art. Konsumenckie i Wtryskowe-MOPLEN (Dom i Ogród)."
- "BASELLORLEN-PP Specjalny, Art. Konsumenckie i Wtryskowe Adstif i [132] Clyrell."
- "BASELLORLEN-PP -ZAKREKI, ZAMKNIECIA, TUBY." [133]
- "BASELLORLEN-PP-Kopo, Art. Konsumenckie i Wtrysko-[134] we MOPLEN HiMFI."
- [135] "BASELLORLEN-PP Kopolimer Udarowy - Moplen."
- [136] "BASELLORLEN-PE\_Purell - Medycyna i Farmacja."
- "BASELLORLEN-PP-Purell-Medycyna i Farmacja." [137]
- [138] Sabic, 2014, "Sabic Releases New Materials for Caps and Closures Market -Packaging Today" [Online]. Available: http://www.packagingtoday.co.uk/news/newssabic-releases-new-materials-for-capsand-closures-market-4255310. [Accessed: 06-Dec-2017].
- Sabic, 2013, "SABIC HELPS THE PACKAGING INDUSTRY TO DELIVER [139] SAFE, SUSTAINABLE AND CONVENIENT SOLUTIONS" [Online]. Available: https://www.sabic-

ip.com/gep/ko/NewsRoom/PressReleasePrint/october\_16\_2013\_sabichelpsthepack aging.html. [Accessed: 06-Dec-2017].

- "SABIC Caps & Closures" [Online]. Available: [140] https://www.sabic.com/en/industries/packaging/rigid-packaging-foodbeverages/caps\_and\_closure. [Accessed: 06-Dec-2017].
- "DOW-EVERCAP<sup>TM</sup> Innovative Closure Resins." [141]
- "DOW Caps & Closures" [Online]. Available: [142]
- https://www.dow.com/polyethylene/ap/en/application/rigid/caps.htm. [Accessed: 06-Dec-2017].
- [143] "DOW - Bottles & Drums" [Online]. Available: https://www.dow.com/polyethylene/ap/en/application/rigid/bottle.htm. [Accessed: 06-Dec-2017].
- "INEOS-Rigid Packaging Solution." [144]

- [145] "INEOS-High Density Polyethylene Resins (HDPE) for Injection-Moulding."
- [146] "INEOS-Low Density Polyethylene Resins (LDPE) for Injection-Moulding and Compounding."
- [147] Selke, S., Plastics Packaging: 'Properties, Processing, Applications and Regulation.
- [148] B&C PLASTICS LTD., "Neck Finishes" [Online]. Available: http://www.bcplasticsltd.com/plastics\_neck.php. [Accessed: 06-Dec-2017].
- [149] Berry Plastics Canada Inc., 2017, "Berry Plastics Canada Technical Information - Closures Technical" [Online]. Available: http://www.berryplasticscanada.ca/en/info\_tech/closures\_technical.html. [Accessed: 06-Dec-2017].
- [150] Bottles.com, 2017, "Specifications of a Bottle Cap" [Online]. Available: https://www.bottles.com/Knowledge/specs.shtml. [Accessed: 07-Dec-2017].
- [151] SHINING ALUMINUM PACKAGING CO., LTD, 2017, "Aluminum Botttle Neck Finishes," Shining Alum. Packag. [Online]. Available: http://www.cnshining.com/aluminum-botttle-neck-finishes.html. [Accessed: 07-Dec-2017].
- [152] PlastCaps, "The Advanced Technologies for Plastic Products" [Online]. Available: http://www.plastcaps.com/technics.htm. [Accessed: 07-Dec-2017].
- [153] Pipeline Packaging, 2012, "Cap and Neck Finishes," Pipeline Packag.
- [154] Zawistowski, H., and Zięba, S., 2015, Ustawianie Procesu Wtryskiwania Tworzyw Termoplastycznych, Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych PLASTECH, Warszawa.
- [155] Googship, V., 2004, Practical Guide to Injection Moulding, Rapra Technology Limited, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK.
- [156] "Thin-Wall, Packaging and Caps and Closures Injection Molding Machines" [Online]. Available: http://www.sumitomo-shi-demag.us/highspeedpackaging.html. [Accessed: 29-Dec-2017].
- [157] Feng, G., and Zhang, C., 2012, "Development Overview and Direction of Energy-Saving Technology on Plastic Injection Molding Machine," Sustainable Environment and Transportation, Pts 1-4, M.J. Chu, H.H. Xu, Z. Jia, Y. Fan, and J.P. Xu, eds., Trans Tech Publications Ltd, Stafa-Zurich, pp. 109–112.
- [158] Matarrese, P., Fontana, A., Sorlini, M., Diviani, L., Specht, I., and Maggi, A., 2017, "Estimating Energy Consumption of Injection Moulding for Environmental-Driven Mould Design," J. Clean. Prod., 168, pp. 1505–1512.
- [159] Zhang, H., Ren, L., Gao, Y., and Jin, B., 2017, "A Comprehensive Study of Energy Conservation in Electric-Hydraulic Injection-Molding Equipment," Energies, 10(11), p. 1768.
- [160] Binqi, R., Hongwei, Z., Huabin, O., Yanjian, W., Yuanhui, Z., and Jingyang, W., 2017, "Study on the Clamping Force Measurement and Partial Load Regulation Technology of Injection Molding Machine," Cirp J. Manuf. Sci. Technol., 19, pp. 19–24.
- [161] Park, S., Bae, J., Jeon, Y., Chu, K., Bak, J., Seo, T., and Kim, J., 2018, "Optimal Design of Toggle-Linkage Mechanism for Clamping Applications," Mech. Mach. Theory, **120**, pp. 203–212.

- [162] Lin, W. Y., Shen, C. L., and Hsiao, K. M., 2006, "A Case Study of the Five-Point Double-Toggle Mould Clamping Mechanism," Proc. Inst. Mech. Eng. Part C-J. Mech. Eng. Sci., 220(4), pp. 527–535.
- [163] Huang, M.-S., Lin, T.-Y., and Fung, R.-F., 2011, "Key Design Parameters and Optimal Design of a Five-Point Double-Toggle Clamping Mechanism," Appl. Math. Model., 35(9), pp. 4304–4320.
- [164] "Ultra-High-Speed El-Exis SP Injection Molding Machines" [Online]. Available: http://www.sumitomo-shi-demag.us/elexisspmain.html. [Accessed: 29-Dec-2017].
- [165] "ENGEL E-Speed High-Speed Injection Moulding Machine" [Online]. Available: https://www.engelglobal.com/en/at/solutions/injection-moulding-machines/espeed.html. [Accessed: 29-Dec-2017].
- [166] "Packaging ARBURG" [Online]. Available: https://www.arburg.com/us/us/products-and-services/injectionmolding/industries/packaging/#!prettyPhoto. [Accessed: 29-Dec-2017].
- [167] 2017, "Cap Box FREE STANDING VISION SORTING SYSTEM for PRE-CISION INSPECTION of PLASTIC CLOSURES," Cap Box [Online]. Available: http://www.capbox.it/capbox/cap-sorter-quality-control/. [Accessed: 06-Dec-2017].
- [168] IntraVis, 2017, "CapWatcher III More Raw Data. Better Decisions." [Online]. Available: https://www.intravis.de/en/products/capwatcher-iii/. [Accessed: 06-Dec-2017].
- [169] Jones, P., 2008, The Mould Design Guide, Smithers Rapra Technology Limited, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK.
- [170] Zawistowski, H., and Zięba, S., 2015, Ustawianie Procesu Wtryskiwania Tworzyw Termoplastycznych, Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych PLASTECH, Warszawa.
- [171] Zawistowski, H., 2003, Rozwój Konstrukcji Form Wtryskowych, Plastech, Warszawa.
- [172] Zawistowski, H., 2001, Nowoczesne Formy Wtryskowe. Problem Konstrukcji i Użytkowania., Plastech, Warszawa.
- [173] Kaczorowski, M., 2012, Materiały Metalowe i Ceramiczne, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [174] Ciszewski, A., Radomski, T., and Szummer Andrzej, 2009, Materiałoznawstwo, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [175] Zawistowski, H., 2004, Użytkowanie i Konserwacja Wtryskarek i Form, Plastech, Warszawa.
- [176] Peplinski, K., and Bielinski, M., 2015, "Prototype Modular Inserts to Boost the Cooling of Mold Cavities in Polymer Processing," Polimery, 60(11–12), pp. 747– 750.
- [177] "Projekt NCRR: Ecooling" [Online]. Available:

http://ecooling.put.poznan.pl/pl/opis\_projektu. [Accessed: 30-Dec-2017].

- [178] Kria, F., Hammami, M., and Baccar, M., 2017, "Conformal Heating/Cooling Channels Design in Rapid Heat Cycle Molding Process," Mech. Ind., **18**(1), p. 109.
- [179] Shinde, M. S., and Ashtankar, K. M., 2017, "Additive Manufacturing-Assisted Conformal Cooling Channels in Mold Manufacturing Processes," Adv. Mech. Eng., 9(5), p. 1687814017699764.

- [180] Ilyas, I., Taylor, C., Dalgarno, K., and Gosden, J., 2010, "Design and Manufacture of Injection Mould Tool Inserts Produced Using Indirect SLS and Machining Processes," Rapid Prototyp. J., 16(6), pp. 429–440.
- [181] Kuo, C.-C., Chen, W.-H., Zhang, J.-W., Tsai, D.-A., Cao, Y.-L., and Juang, B.-Y., 2017, "A New Method of Manufacturing a Rapid Tooling with Different Cross-Sectional Cooling Channels," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 92(9–12), pp. 3481– 3487.
- [182] Kuo, C.-C., Chen, W.-H., Liu, X.-Z., Liao, Y.-L., Chen, W.-J., Huang, B.-Y., and Tsai, R.-L., 2017, "Development of a Low-Cost Wax Injection Mold with High Cooling Efficiency," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 93(5–8), pp. 2081–2088.
- [183] Soshi, M., Ring, J., Young, C., Oda, Y., and Mori, M., 2017, "Innovative Grid Molding and Cooling Using an Additive and Subtractive Hybrid CNC Machine Tool," Cirp Ann.-Manuf. Technol., 66(1), pp. 401–404.
- [184] Homar, D., Cerce, L., and Kopac, J., 2017, "Cooling Simulation of Conformal Cooling Injection Mould Insert Produced by Hybrid Manufacturid," Teh. Vjesn.-Tech. Gaz., 24(4), pp. 981–986.
- [185] Mendibil, X., Llanos, I., Urreta, H., and Quintana, I., 2017, "In Process Quality Control on Micro-Injection Moulding: The Role of Sensor Location," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 89(9–12), pp. 3429–3438.
- [186] Wang, Q., Zhen, M., Wu, Z., and Cai, Y., 2017, "Effect of Process Parameters on Cavity Pressure in Injection Molding," Advances in Materials, Machinery, Electronics I, L. Liu, C. Yang, and J. Ke, eds., Amer Inst Physics, Melville, p. UNSP 050005.
- [187] Di Fratta, C., Koutsoukis, G., Klunker, F., and Ermanni, P., 2016, "Fast Method to Monitor the Flow Front and Control Injection Parameters in Resin Transfer Molding Using Pressure Sensors," J. Compos. Mater., 50(21), pp. 2941–2957.
- [188] Mrozek, K., Staniek, R., and Szostak, M., 2014, Research on External and Internal Induction Heating Effectiveness of Injection Molds by Means of Thermovision Measurements, Amer Soc Mechanical Engineers, New York.
- [189] Mrozek, K., 2016, Optimization of Injection Mold Design Through Application of External Selective Induction Heating, Amer Soc Mechanical Engineers, New York.
- [190] Postawa, P., Stachowiak, T., and Grzesiczak, D., 2015, "On-Line Temperature Recording in a Multi Cooling Channel Injection Molding Tool," Polimery, 60(5), pp. 351–355.
- [191] Bociaga, E., and Palutkiewicz, P., 2013, "The Impact of Mould Temperature and Blowing Agent Content on Structure and Properties of Injection Moulded Parts," Cell. Polym., 32(5), pp. 257–277.
- [192] Kim, B., and Min, J., 2017, "Residual Stress Distributions and Their Influence on Post-Manufacturing Deformation of Injection-Molded Plastic Parts," J. Mater. Process. Technol., 245, pp. 215–226.
- [193] Moayyedian, M., Abhary, K., and Marian, R., 2016, "Gate Design and Filling Process Analysis of the Cavity in Injection Molding Process," Adv. Manuf., 4(2), pp. 123–133.
- [194] Ho, J.-Y., Park, J. M., Kang, T. G., and Park, S. J., 2012, "Three-Dimensional Numerical Analysis of Injection-Compression Molding Process," Polym. Eng. Sci., 52(4), pp. 901–911.

- [195] Moayyedian, M., Abhary, K., and Marian, R., 2017, "The Analysis of Short Shot Possibility in Injection Molding Process," Int. J. Adv. Manuf. Technol., 91(9– 12), pp. 3977–3989.
- [196] Altaf, K., and Rani, A. M. bin A., 2015, "Numerical Study of Profiled Conformal Cooling Channels for Cooling Time Reduction in Injection Mould Tools," Int. J. Eng. Syst. Model. Simul., 7(4), pp. 230–237.
- [197] Hammani, M., Kria, F., and Baccar, M., 2015, "Numerical Study of Thermal Control System for Rapid Heat Cycle Injection Molding Process," Proc. Inst. Mech. Eng. Part E-J. Process Mech. Eng., 229(4), pp. 315–326.
- [198] Jamsheed, M., Rahman, M. A., Moyeed, M. A., and Ahmed, G. M. S., 2015,
  "Design and Analysis of Plastic Injection Mould for CAM BUSH with Submarine Gate," Mater. Today-Proc., 2(4–5), pp. 2083–2093.
- [199] Chen, W.-J., 2012, "Simulation and Analysis of Optimization Process Parameters for Multi-Cavity Injection Molding Parts Warpage by Genetic Algorithm Method," Intelligent Materials, Applied Mechanics and Design Science, H. Zhang, and D. Jin, eds., Trans Tech Publications Ltd, Stafa-Zurich, pp. 54–57.
- [200] All American Containers, 2017, "Closure Torque Application : All American Containers" [Online]. Available: http://allamericancontainers.com/closure-torqueapplication/. [Accessed: 07-Dec-2017].
- [201] ASTM International, "ASTM D2063 / D2063M 10(2012)."
- [202] ASTM International, "ASTM D3198 97(2002)."
- [203] ASTM International, "ASTM D3810 97(2002)."
- [204] ASTM International, "ASTM D3968 97(2002)."
- [205] "ASTMF2338.Pdf."
- [206] "PN-O-79782:1996" [Online]. Available: http://sklep.pkn.pl/pn-o-79782-1996p.html. [Accessed: 08-Jan-2018].
- [207] "PN-O-79786:1996" [Online]. Available: http://sklep.pkn.pl/pn-o-79786-1996p.html. [Accessed: 08-Jan-2018].
- [208] Bieliński, M., and Czyżewski, P., "The Influence of a Porous Sealing Insert on Forces and Deformations Occurring in a Threaded Connection of a Polymer Packaging," Polimery, 59(9), pp. 673–676.
- [209] Pepliński, K., 2015, "Effect of Extrusion Blow Molding Bottle Neck Area Structural Form on Deformation during Application of the Closure," J. Pol. CIMEEAC, Vol. 10, no 1.
- [210] Pepliński, and K, 2013, "Selected Aspects of Virtual Prototyping the Blowing Preform Process in the Ansys-Polyflow Software," J. Pol. CIMAC, Vol. 8, no 3.
- [211] "InzApChem\_2017\_5\_174-175.Pdf."
- [212] Bieliński, M., and Czyżewski, P., "Charakterystyka Badań Wybranych Funkcji Ochronnych Opakowań Polimerowych," Inż. Apar. Chem., **51**, pp. 208–210.
- [213] ISO 16770, "Plastics -- Determination of Environmental Stress Cracking (ESC) of Polyethylene -- Full-Notch Creep Test (FNCT)."
- [214] ISO 22088, "Tworzywa Sztuczne -- Oznaczanie Środowiskowej Korozji Naprężeniowej (ESC)."
- [215] Bieliński, M., Czyżewski, P., and Kościuszko, A., 2016, "Investigation of the Resistance to Environmental Stress Crack of High Density Polyethylene Parts," Poznań.
- [216] "ASTM D1693 15."

- [217] "Technical Tip: Environmental Stress Crack Resistance."
- [218] Leda, H., 2011, Materiały Inżynierskie w Zastosowaniach Biomedycznych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [219] Kargerkocsis, J., 1991, "Environmental-Stress Corrosion Behavior of Polyamides and Their Composites with Short Glass-Fiber and Glass Swirl Mat - a Comparison," Polym. Bull., 26(1), pp. 123–130.
- [220] Robeson, L. M., 2012, "Environmental Stress Failure of Glassy Thermoplastics: Mechanisms and Approaches to Resolve the Problem," Abstr. Pap. Am. Chem. Soc., 244.
- [221] Robeson, L. M., 2013, "Environmental Stress Cracking: A Review," Polym. Eng. Sci., 53(3), pp. 453–467.
- [222] Com-ten industries, "Bottle Testers, Torque Gauges, Cap Testers: Com-Ten" [Online]. Available: http://www.com-ten.com/bottle-torque-tester.html. [Accessed: 06-Dec-2017].
- [223] Mecmesin, "Tornado Torque Tester | Digital Torque Testers | Torque Measurement Instruments | Torque Testing Products" [Online]. Available: http://www.mecmesin.com/tornado-torque-tester. [Accessed: 06-Dec-2017].
- [224] Wilczyński, K., 2016, Komputerowe Wspomaganie Projektowania w Przetwórstwie Tworzyw, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [225] Bieliński, M., Czyżewski, P., and Kościuszko, A., "Investigation of the Resistance to Environmental Stress Crack of High Density Polyethylene Parts Rapid Communication."
- [226] Ward, I. M., Mechaniczne Własności Polimerów Jako Tworzyw Konstrukcyjnych, John Wiley and Sons Ltd.

## BADANIA PRZEBIEGU I EFEKTÓW WTRYSKIWANIA NAKRĘTEK POLIOLEFINOWYCH

## Streszczenie

Praca doktorska podejmuje problematykę deformacji oraz pękania gwintowanych zamknięć opakowań poprzez analizę przebiegu i efektów wtryskiwania nakrętek poliolefinowych. W części literaturowej scharakteryzowano polimerowe gwintowane zamknięcia stosowane w opakowaniach w odniesieniu do wdrożonych rozwiązań konstrukcyjnych, stawianych wymagań, wykorzystywanych materiałów oraz zastosowanych standaryzacji w połączeniach gwintowych. Scharakteryzowano technologię wytwarzania poprzez analizę współczesnych maszyn przetwórczych, opis konstrukcji narzędzi przetwórczych oraz obecnie wykorzystywane metody wytwarzania. Opisano również metody oraz stanowiska badawcze wykorzystywane do oceny połączeń gwintowych.

W przyjętym eksperymencie przeprowadzono badania znormalizowane, jak również badania według opracowanej metodyki, która wymagała skonstruowania i wykonania szeregu oryginalnych stanowisk badawczych pozwalających na przeprowadzenie badań m.in. na obiektach rzeczywistych. Zrealizowany w ramach rozprawy doktorskiej eksperyment został podzielony na dwa etapy. W etapie pierwszym przeprowadzone badania należy traktować jako wstępne, gdzie weryfikowano m.in. pękanie nakrętki w przyjętych warunkach badań. Analizie właściwości mechanicznych poddano wybrane do badań tworzywa poliolefinowe, które są masowo wykorzystywane do wytwarzania gwintowanych zamknięć. W badaniach kalorymetrycznych analizowano próbki pobrane z newralgicznych obszarów nakrętki. W analizie numerycznej procesu wtryskiwania określono ponadto wpływ właściwości przetwórczych oraz konstrukcji nakrętki na przebieg oraz efekty procesu wytwarzania. W etapie pierwszym określono również wpływ właściwości wybranych materiałów na powstające deformacje zamknięcia podczas jego nakręcania w połączeniu gwintowym "polimer-metal". W etapie drugim przeprowadzono badania właściwe, gdzie m.in. zbadano deformacje w połaczeniu gwintowym "polimer-polimer" dla zmiennych cech konstrukcyjnych nakrętki oraz przyjętych warunków nakręcania. Zweryfikowano również wpływ wybranych płynów chemii motoryzacyjnej na warunki nakręcania. Analizie poddano również porowate wkładki uszczelniające w celu określenie wpływu ich zmiennych cech geometrycznych na wybrane wskaźniki związane z nakręcaniem zamknięcia. Etap drugi eksperymentu

zawierał również badania związane z oznaczaniem odporności na środowiskową korozję naprężeniową, gdzie analizie poddano wybrane tworzywa poliolefinowe, parametry nakręcania oraz wpływ cech konstrukcyjnych zamknięcia gwintowanego.

W pracy stwierdzono, że na występowanie deformacji oraz destrukcji polimerowego gwintowanego zamknięcia opakowań wpływ mają: dobór materiału, parametry procesu wtryskiwania, cechy konstrukcyjne nakrętki, parametry i warunki nakręcania zamknięcia oraz czynniki zewnętrzne, w tym występujące podczas transportu i magazynowania. Zaproponowane stanowiska (w tym do oznaczania odporności na środowiskową korozję naprężeniową) charakteryzujące się uniwersalnością w badaniach próbek według różnych standardów jak również w ocenie właściwości użytkowych obiektów rzeczywistych w postaci nakrętek.