

Tomasz GARBACZ<sup>1)\*</sup>, Volodymir KRASINSKYI<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Politechnika Lubelska, Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych

<sup>2)</sup>Lviv Polytechnic National University, Department of Chemical Technology of Plastics

\*e-mail: t.garbacz@pollub.pl

## Geometria kształtek wytwarzanych metodą termoformowania pozytywowego

**Streszczenie:** Właściwości kształtek wytwarzanych metodą termoformowania można ocenić na podstawie stopnia rozciągania folii w kierunku wzdłużnym oraz parametrów geometrycznych, to jest grubości kształtowanej folii. Właściwości te zależą w dużej mierze od warunków technologicznych procesu, geometrii oraz konstrukcji form, jak również rodzaju tworzywa. W pracy przedstawiono charakterystykę procesu termoformowania pozytywowego przy zastosowaniu dwóch rodzajów folii z PVC i PS. Zaprezentowano badania wpływu zmiany warunków technologicznych procesu przetwórstwa na parametry charakteryzujące rozciąganie folii oraz jej właściwości geometryczne.

**Słowa kluczowe:** tworzywa termoplastyczne, termoformowanie pozytywowe, rozciąganie folii, właściwości geometryczne kształtek

### GEOMETRY OF THE MOULDINGS PRODUCED IN THE POSITIVE THERMOFORMING PROCESS

**Abstract:** Properties of the mouldings produced by thermoforming can be evaluated by the degree of stretching the film in the longitudinal direction and geometric parameters, i.e. the thickness of the film. These properties depend on the conditions of the technological process, geometry and construction of forms as well as the type of polymer. Process of positive thermoforming films using two types of films with PVC and PS was described. Measurements and studies of the impact of changes in the conditions of technological process of processing parameters characterizing the stretch thermoforming and geometrical characteristics of the resulting films were used.

**Keywords:** thermoplastics polymers, positive thermoforming, film stretching, geometric properties of mouldings

### 1. WSTĘP

Termoformowanie jest procesem, w którym tworzywo termoplastyczne w postaci płaskiego arkusza, np. folii lub płyty jest nagrzewane do odpowiedniego dla danego rodzaju tworzywa, zakresu temperatury mięknięcia, a następnie formowane w celu uzyskania wymaganego kształtu. Różnorodne odmiany termoformowania są najczęściej stosowanymi metodami przetwórstwa do wytwarzania opakowań z tworzyw polimerowych, głównie PP, PS, PET, a także HIPS, A-PET, C-PET, OPS, PVC, PAL, FOAM PS, GPPS [1-5].

Szerokie zastosowanie tej techniki wytwarzania spowodowane jest głównie niskimi kosztami produkcji wyrobu. Wynika to m.in. z niedużych

kosztów maszyn do produkcji opakowań (termoformierek) oraz ich oprzyrządowania w porównaniu do innych technik wytwarzania, np. technologii wtryskiwania [1-3]. Ponadto termoformowanie charakteryzuje się wysoką wydajnością procesu, ekonomicznością produkcji małoseryjnej oraz krótkim czasem wprowadzenia nowego wyrobu, od projektu do prototypu.

Po podgrzaniu do temperatury, w której tworzywo staje się plastyczne, pod wpływem ciśnienia jest ono włączane do chłodzonej formy, Różnicę ciśnień nad i pod folią, niezbędną do wykonania procesu, uzyskuje się dzięki działaniu próżni oraz nadciśnienia [2, 4, 5]. Tworzywo nagrzane powyżej temperatury mięknięcia i mające już odpowiednią temperaturę formowania jest następnie rozciągane w formie w wyniku

działania na jego powierzchnię ciśnienia różnicowego. W ten sposób wtłoczony do gniazda formy arkusz ulega schłodzeniu w wyniku kontaktu ze ściankami gniazda formy, gdzie po ostudzeniu przyjmuje jej kształt. Siłą formującą uzyskuje się dzięki różnicy ciśnień nad i pod arkuszem tworzywa (folii lub płyty), dzięki oddziaływaniu podciśnienia, oraz nadciśnienia [6-9].

tatem takiego mechanizmu jest powstawanie znacznych przewężeń w miejscach, gdzie kontakt tworzywa ze ściankami formy następuje najpóźniej. Z reguły są to dolne krawędzie i narożniki opakowania [2, 7, 8, 13].

Istnieje wiele metod i kombinacji procesu termoformowania. Można wyróżnić m.in. takie odmiany formowania jak: formowanie próżniowe



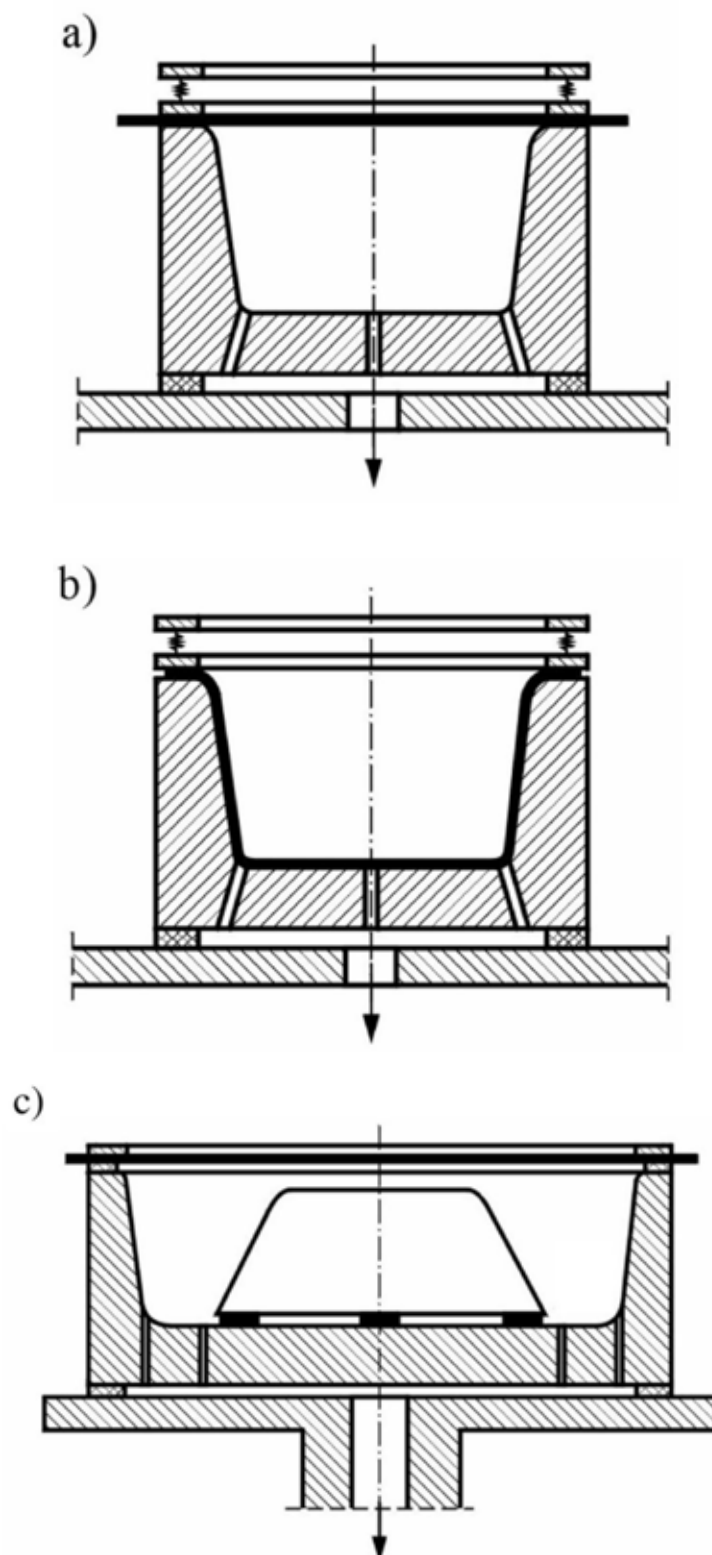
Rys. 1. Przykładowe wyroby opakowaniowe wytwarzane metodą termoformowania [19]

Fig. 1. Examples of the packaging products obtained by thermoforming [19]

Aspekty technologiczne dotyczące termoformowania folii oraz kierunki rozwoju metod do wytwarzania kształtek, głównie opakowaniowych, przedstawił w cyklu publikacji Krawczuk D. [10-12]. Zaś kierunki rozwoju materiałów do wytwarzania kształtek oraz nowe metody formowania opisane zostały między innymi w pracy Żenkiewicza M. i Szachy A. [9]. W pracach [7-9] stwierdzono, że kontakt tworzywa ze ścianką formy powoduje szybkie odebranie ciepła, co skutkuje powrotem ze stanu wysoko elastycznego do stanu szklistego wymuszonej elastyczności. To powoduje, że obszary te nie będą ulegały dalszemu odkształcaniu, a co za tym idzie w tych miejscach nie będzie następowała zmiana grubości ścianki wyrobu. Rezul-

pozytywowe i negatywowe, formowanie ciśnieniowe, formowanie próżniowo-ciśnieniowe, formowanie z rozciąganiem wstępnym stemplem, formowanie na stemplu, formowanie na stemplu po rozciągnięciu nadmuchem, formowanie dwóch arkuszy tworzywa i wiele kombinacji tych metod [1, 7, 9-11].

Formowanie próżniowe negatywowe, zwane też matrycowym, jest najstarszą, a jednocześnie najpopularniejszą odmianą termoformowania [1, 2]. W formowaniu negatywowym użyte tworzywo początkowo odkształca się w sposób swobodny, ulegając równomiernemu pocienieniu a następnie zetknięciu się ze ścianką formy, zaś później z dnem gniazda formy i umocnieniu poprzez orientację molekularną i ochładzanie.



Rys. 2. Zasada termoforowania: a, b - formowania negatywnego, c- formowania pozytywnego, przykład

Fig. 2. Basis of the thermoforming: a, b - negative forming, c- positive forming, example

Wskutek tarcia rozciąga się tylko część tworzywa, która to znajduje się poza miejscami, gdzie następuje szybki styk folii z gniazdem. Powstały wyrób ma zróżnicowaną grubość a najcieńsza jest część występująca na narożach. Poprzez uplastycznienie i wytworzenie próżni, kształt folii przybiera kształt gniazda. Podczas rozciąganiu folii głównym czynnikiem który powoduje odkształcenie jest wytworzona próżnia.

W procesie formowania negatywowego, przedstawionego na rysunku 2 a, b, tworzywo umieszcza się na wklęsłej, formie i przyciska ramą poprzez gumową uszczelkę. Powietrze znajdujące się między tworzywem a powierzchnią formy po wcześniejszym jej ogrzaniu, zostaje w wyniku wytworzenia podciśnienia odessane przez kanały formy, a w efekcie wtłoczenie materiału do gniazd formy [7, 9, 10]. Wytwarzany detal styka się z gniazdami formy powierzchnią zewnętrzną ścianki i w zależności od warunków kształtowania odtwarza na powierzchni fakturę jaka znajduje się na powierzchni gniazd formy.

Jednym z czynników, który może spowodować odkształcenie i deformację folii od pożądanego kształtu jest ciśnienie atmosferyczne. Powoduje ono, że podczas procesu formowania część folii, która nie styka się z powierzchnią gniazd formy, ulega większemu rozciągnięciu, co w efekcie prowadzi do pocienienia ścianek wyrobu w tym miejscu. Najcieńsze ścianki powstają na narożach i te miejsca są najbardziej narażone na uszkodzenia. Wadą tej metody formowania jest to, że stosunek wysokości do szerokości wyrobu nie powinien przekraczać 1:3, co powoduje, że tą metodą termoformowania wytwarza się głównie płytkie opakowania, przedmioty płaskie oraz przedmioty niemające prostopadłych ścianek, naroży czy ostrych krawędzi. W formowaniu negatywowym grubość ścianki wyrobu maleje wraz z zagłębieniem się tworzywa w formie, a największe pocienienie występuje w miejscach, w których kontakt rozciąganego tworzywa z chłodzoną formą następuje najpóźniej. Aby zapobiegać zjawisku wczesnego ostygnięcia folii podczas rozciągania, trzeba dość szybko usunąć powietrze znajdujące się pomię-

dzy matrycą a kształtowaną folią [7, 9, 12, 14].

Dynamicznie rozwijającą się odmianą jest formowanie pozytywowe. W metodzie tej, pokazanej schematycznie na rys. 2 c, stosowane są formy w postaci stempla (formy pozytywowe) umieszczone w układzie próżniowym, który jest zamknięty od góry. Formowanie to polega na rozciąganiu przedmiotu z folii lub płyty na ruchomej formie w taki sposób, że forma w postaci stempla styka się ze ściankami wewnętrznymi kształtowanego wyrobu. Uformowanie kształtki następuje w wyniku usunięcia powietrza z formy.

Wytworzone tą metodą wyroby mają największą grubość w dnie kształtki natomiast cieńsze ściany boczne. Formowanie to umożliwia otrzymanie kształtek głęboko tłoczonych i mających najbardziej równomierną grubość ścianek bocznych. W metodzie tej sporym problemem jest wyjęcie wykonanego wyrobu ze stempla formy. Jest to związane z przyssaniem dna wyrobu do górnej powierzchni formy pozytywowej, w wyniku skurczu materiałowego [2, 9]. Jednak odpowiednia technologia ruchów formy oraz oddziaływań sprężonym powietrzem, niweluje ten problem.

W opisanej metodzie formowania pozytywowego można wymienić kilka jej wariantów. Jedną z nich polega na rozciągnięciu wstępnym folii wewnątrz naczynia próżniowego poprzez usunięcie powietrza, po którym następuje ruch formy, rozciągnięcie mechaniczne folii i obciążenie jej na formie po odłączeniu działania podciśnienia. Natomiast kolejny wariant polega na wprowadzeniu sprężonego powietrza do naczynia próżniowego i wciskaniu formy w rozdmuchaną folię do góry, wytworzenie próżni w formie powoduje rozciągnięcie kształtki. Warianty te zapewniają lepsze wykorzystanie materiału i równomierniejszy rozkład grubości ścianek wyrobu [2, 8, 12]. Jednak najczęściej stosowanym wariantem tego formowania jest technologia „air slip - poduszki powietrznej”. Polega ona na wprowadzeniu sprężonego powietrza do komory, co powoduje rozdmuchanie folii, zaś w trakcie rozdmuchiwania odbywa się także ruch formy znajdującej się

w komorze. W wyniku połączenia obu tych procesów, końcowe rozciąganie odbywa się równocześnie jako pneumatycznie i mechanicznie.

Jednym z podstawowych ograniczeń procesu termoformowania jest zmienny rozkład grubości ścianek formowanego wyrobu. W każdej odmianie formowany arkusz tworzywa ma kontakt tylko z jedną stroną formy, przez co powstaje wyrób, który przyjmuje jej kształt. Powstające przewężenia oraz charakterystyczny dla danego wyrobu, w określonych warunkach formowania, rozkład grubości ścianek ograniczają maksymalną głębokość kształtowanego wyrobu [ 2, 9, 14, 15]. W pracach [9, 16-18] przedstawiono aspekty termoformowania w aspekcie możliwości modyfikacji materiałowej polimerów oraz biopolimerów do wytwarzania kształtek opakowaniowych. Jednak rzadko poruszonym zagadnieniem jest wpływ warunków technologicznych procesu na cechy geometryczne, takie jak grubość kształtek, wytwarzanych z różnych tworzyw polimerowych, przy założonych jednakowych dla tych tworzyw, warunkach procesu technologicznego. Mimo zatem stosunkowo wielu publikacji dotyczących różnych odmian termoformowania, w zasadzie brak jest szerszych informacji porównawczych dotyczących właściwości geometrycznych folii z różnych tworzyw, wytworzonych w tych samych, założonych warunkach procesu technologicznego.

## 2. METODYKA BADAŃ

### 2.1. STANOWISKO BADAWCZE I MATERIAŁY

Celem omówionych w artykule badań jest doświadczaćalne określenie wpływu warunków procesu przetwórstwa metodą termoformowania pozytywowego oraz rodzaju tworzywa na parametry charakteryzujące rozciąganie kształtowanej folii oraz właściwości geometryczne otrzymanych kształtek. Właściwości geometryczne otrzymanych kształtek określono na podstawie pomiarów oraz grubości kształtek w punktach charakterystycznych.

W prowadzonych badaniach zastosowano dwa rodzaje materiału, folii PVC o grubości 0,24 mm oraz folii z PS o grubości 0,50 mm. Oba rodzaje folii miały postać arkuszy o wymiarach 400 x 500 mm, wyciętych z odpowiednich rolek zawierających 200 mb folii.

W badaniach wykorzystano termoformierkę typu PEX B-3 F, wraz z niezbędnym oprzyrządowaniem do termoformowania pozytywowego, której wybrane parametry technologiczne pokazano w tabeli 1. Maszyna ta, przedstawiona na rys. 3, jest przystosowana do wytwarzania opakowań typu „blister” , typu „skin pack” oraz produkcji dowolnych

**Tab. 1. Parametry techniczne termoformierki PEX B 3-F**

**Tab. 1. Technical parameters of the PEX B 3-F plastic thermoforming machine**

Parametr	Wartość
Ciężar	140 kg
Efektywne pole kształtowania folii	320x350 mm
Grubość formowanego materiału	do 4 mm
Moc zainstalowana	4,5 kW, 400 V
Podnoszenie stołu: pneumatyczne	0,6 MPa; 1,5m <sup>3</sup> /h
Skok stołu	300 mm
Szerokość folii	350 mm
Wydajność	60-100 cykl/h

wyrobów ze sztywnej folii lub płyt. Układ sterowania maszyny umożliwia między innymi regulację temperatury układów nagrzewających folię, czasu grzania, czasu oddziaływania podciśnienia, czasu chłodzenia folii. Ten typ maszyny, ze względu na możliwości technologiczne, został wykonany z myślą o małych i średnich przedsiębiorstwach.

W prowadzonym procesie technologicznym zastosowano cztery wymienne formy pozytywowe (o symbolach, I-IV), tego samego kształtu lecz innych wymiarach geometrycznych opisanych w tabeli 2. Były to formy wykonane z laminatu drzewnego, pokryte warstwą antyadhezyjną o wysokości odpowiednio 40, 60, 80 i 100 mm (rys. 4).



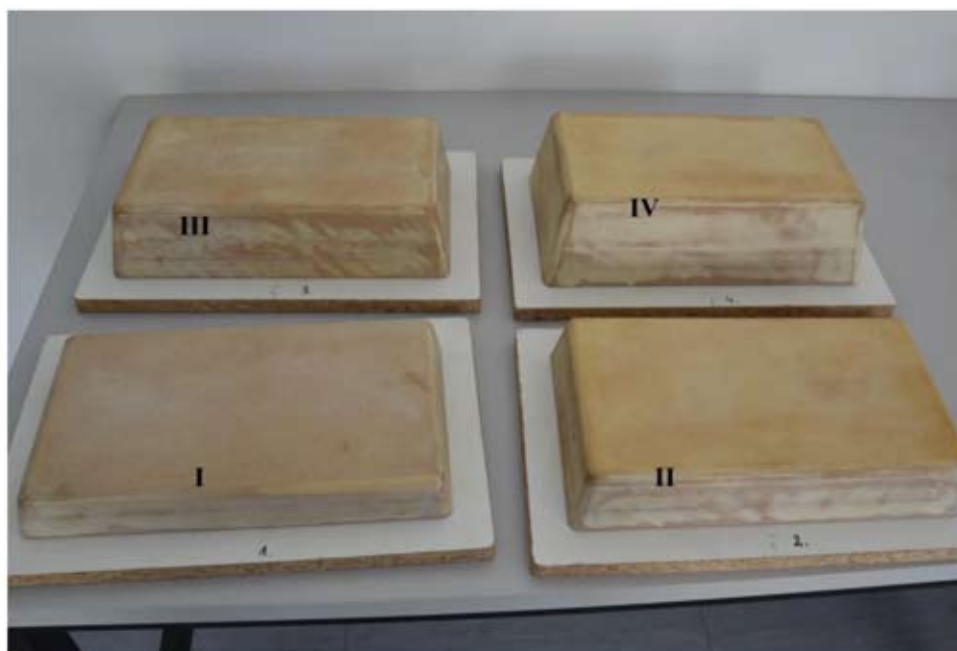
Rys. 3. Wygląd termoformierki PEX B-3 F z formą numer IV w położeniu górnym

Fig. 3. View of thermoforming machine PEX B-3 F with the mold no IV in the upper position

Tab. 2. Charakterystyka geometryczna stosowanych form pozytywowych

Tab. 2. Geometrical characteristic of positive molds used

Rodzaj formy	Szerokość mm	Długość mm	Wysokość mm
I	180	320	40
II	170	315	60
III	160	305	80
IV	150	295	100



Rys. 4. Wygląd form pozytywowych I-IV, stosowanych w prowadzonych badaniach  
Fig. 4. View of the positive molds I-IV, used in research

## 2.2. CZYNNIKI BADAWCZE

Niezależnie od rodzaju wytwarzanych kształtek, opakowań, każdy proces termoformowania składa się z pewnych etapów, które są realizowane kolejno przy zastosowaniu stanowiska zintegrowanego lub na kilku modułowych maszynach stanowiska technologicznego. Należą do nich: nagrzewanie tworzywa, formowanie oraz chłodzenie, obróbka wykończeniowa wyrobu, które są określane za pomocą parametrów stałych oraz zmiennych. W prowadzonych badaniach zgodnie z zastosowaną metodyką ustalono temperaturę układów nagrzewających folię w zakresie od 365 do 430 °C, czas nagrzewania - 20 s, czas oddziaływania podciśnienia - 5 s, czasu chłodzenia folii - 5 s.

Wybrane parametry prowadzonego procesu termoformowania folii PVC oraz PS przedstawiono w tabeli 3.

Ze względu na cel pracy opracowano i przyjęto grupę czynników charakteryzujących proces badawczy. W programie badań przyjęto jako czynniki wynikowe:

- grubość otrzymanej folii w punktach charakterystycznych A-I,  $g_r$ , mm,
  - stopień rozciągania w kierunku wzdłużnym,  $S_r$ .
- Czynniki zmienne stanowiły:
- rodzaj tworzywa i jego grubość, folia PVC, folia PS,
  - charakterystyka geometryczna form pozytywowych, formy I-IV,
  - temperatura zewnętrznego układu grzejnego,  $T_z$ , °C, od 380 do 430 °C,
  - temperatura wewnętrznego układu grzejnego,  $T_w$ , °C, od 365 do 400 °C.

Stopień rozciągania  $S_r$  w kierunku wzdłużnym kształtowanej folii określono z zależności:

$$S_r = g_p / g_r \cdot 100\%$$

w której:

- $g_p$  – grubość początkowa folii, równa = 0,24 mm, dla folii PVC oraz 0,50 mm dla folii PS
- $g_r$  – grubość otrzymanej folii, mm,
- $S_r$  – stopień rozciągania w kierunku wzdłużnym.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Podczas przeprowadzonego procesu termoformowania pozytywowego wykonano 48 kształtek, z folii PVC i PS, których przykładowy wygląd pokazano na rysunku 5. Na folię w kształcie prostokątnego arkusza, zostały naniesione poziome i pionowe linie, które tworzyły kratę w celu późniejszego określenia rozciągania poszczególnych ścianek wykonanych kształtek. Ustalone wartości temperatury zewnętrznego

i wewnętrznego układu grzejnego oraz wyniki pomiarów temperatury kształtowanej folii przedstawiono w tabeli 3. W kolumnach tabeli zamieszczono również rodzaje materiałów polimerowych użytych do prób i oraz stosowanych form pozytywowych. Temperaturę kształtowanej folii mierzono bezpośrednio po zakończeniu procesu nagrzewania folii. Pomiary wykonano przy zastosowaniu kamery termowizyjnej EasIR<sup>TM</sup>-4, której przykładowy obraz termalny pokazano na rysunku 6.



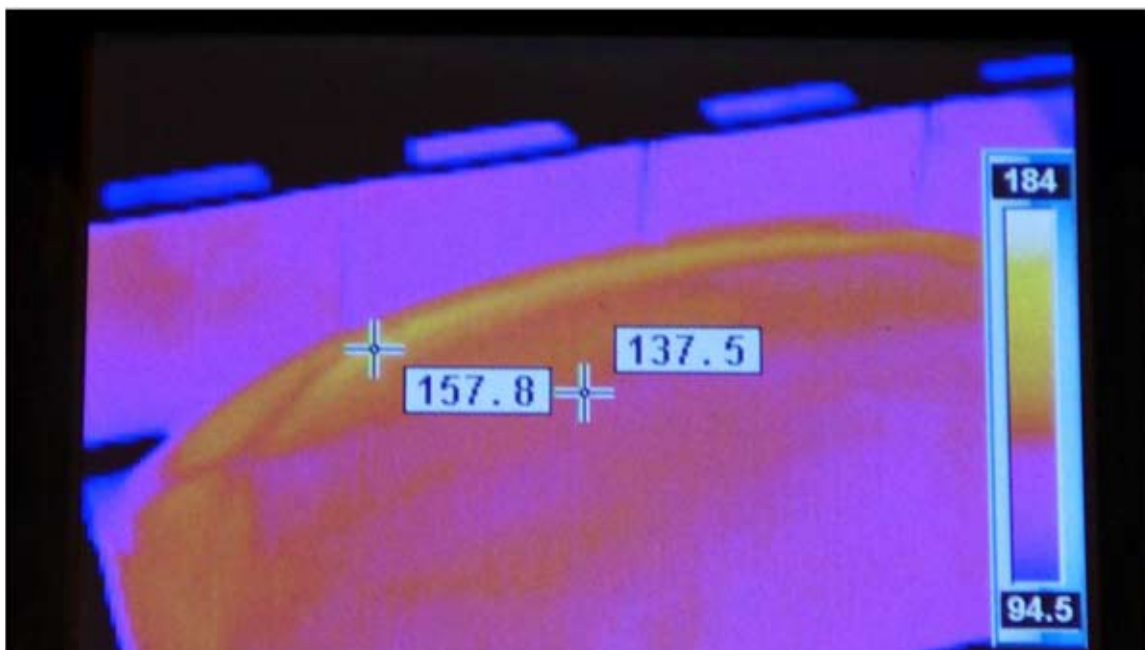
Rys. 5. Kształtki z folii PVC wytworzone przy zastosowaniu form I-IV, przykład  
Fig. 5. Moldings from PVC foil obtained with the use of the molds I-IV, example

**Tab. 3. Temperatura układów grzejnych oraz nagrzewanej folii podczas procesu termoformowania pozytywowego**

**Tab. 3. Temperature of heating systems and foil during positive thermoforming process**

Material	Rodzaj formy	Temperatura zewnętrznego układu grzejnego, °C	Temperatura wewnętrznego układu grzejnego, °C	Temperatura folii na środku kształtowanego arkusza, °C
Folia PS	I-IV	380	365	155
	I-IV	410	380	160
	I-IV	430	400	166
Folia PVC	I-IV	380	365	155
	I-IV	410	380	152
	I-IV	430	400	160





Rys. 6. Termograf formowanej folii z PS, dla temperatury układu grzejnego: zewnętrznego 410 °C, wewnętrznego 380 °C

Fig. 6. Thermograph of the formed PS foil, for the temperature of the: external heating system 410 °C, internal heating system 380 °C

Tab. 4. Wyniki pomiarów grubości kształtek z PVC w punktach charakterystycznych A-I, dla temperatury układu grzejnego: zewnętrznego 380 °C, wewnętrznego 365 °C

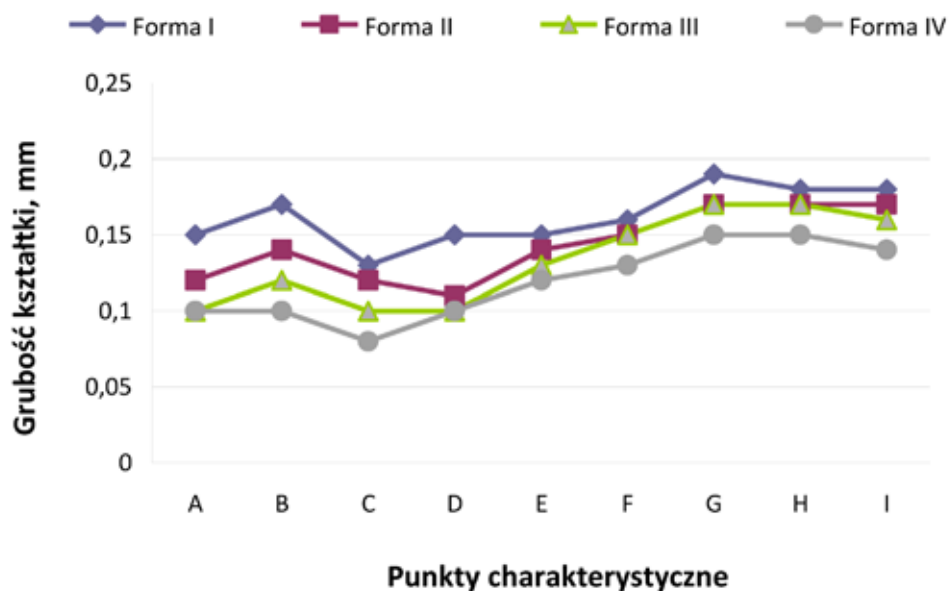
Tab. 4. The results of the thickness measurements of the PVC moulds, measured in characteristic points A-I, for the temperature of the: external heating system 380 °C, internal heating system 365 °C

Rodzaj Próbek	Rodzaj Formy	Grubość kształtki w punktach charakterystycznych, mm								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
Rodzaj folii; PVC = 0,24 mm										
1	I	0,15	0,17	0,13	0,15	0,15	0,16	0,19	0,18	0,18
2	II	0,12	0,14	0,12	0,11	0,14	0,15	0,17	0,17	0,17
3	III	0,10	0,12	0,10	0,10	0,13	0,15	0,17	0,17	0,16
4	IV	0,10	0,10	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,15	0,14
Rodzaj folii; PS = 0,50 mm										
1	I	0,43	0,49	0,44	0,50	0,50	0,48	0,48	0,50	0,45
2	II	0,38	0,45	0,34	0,48	0,48	0,48	0,45	0,43	0,42
3	III	0,23	0,44	0,21	0,29	0,49	0,49	0,37	0,42	0,38
4	IV	0,19	0,29	0,16	0,22	0,47	0,47	0,34	0,36	0,34

Na zdjęciu termowizyjnym kształtowanego arkusza jest widoczna różnica temperatury, jakie osiąga wyrób w poszczególnych obszarach. Brzegi folii charakteryzują się znacznie mniejszą temperaturą, na co wskazuje kolor fioleto-

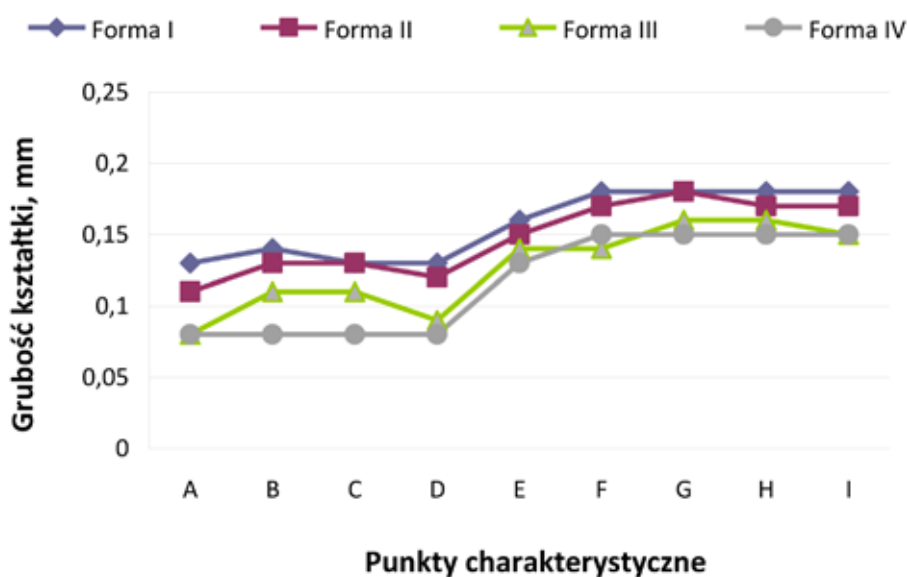
wy, natomiast w centralnej części temperatura waha się w granicach od 137°C do ok. 157°C.

W tabeli 4. przedstawiono przykładowe wartości średnie pomiarów grubości kształtek w dziewięciu punktach charakterystycznych



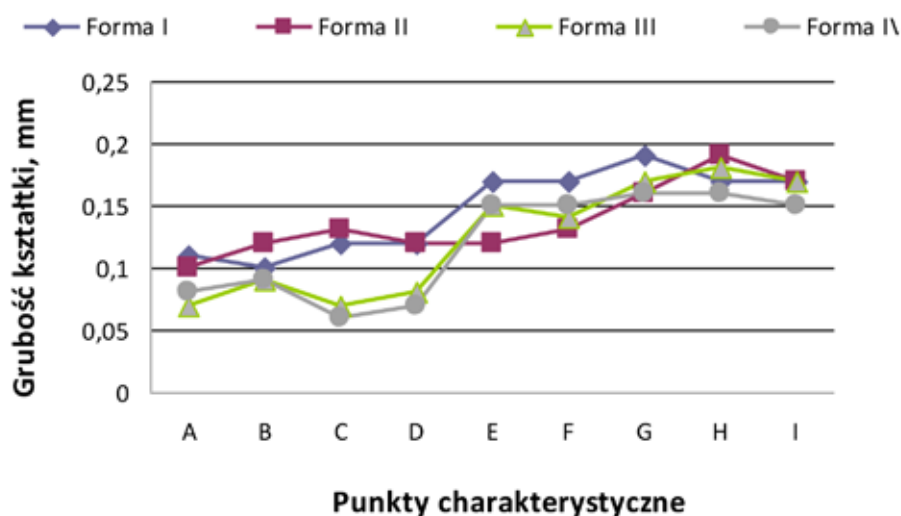
Rys. 7. Zmiana grubości folii kształtki z PVC w punktach charakterystycznych A-I, dla temperatury układu grzejnego: zewnętrznego 380 °C, wewnętrznego 365 °C

Fig. 7. The dependence of the PVC foil thickness changes in the characteristic points A-I, for temperature of the: external heating system 380 °C, internal heating system 365 °C



Rys.8. Zmiana grubości folii kształtki z PVC w punktach charakterystycznych A-I, dla temperatury układu grzejnego: zewnętrznego 410 °C, wewnętrznego 380 °C

Fig. 8. The dependence of the PVC foil thickness changes in the characteristic points A-I, for temperature of the: external heating system 410 °C, internal heating system 380 °C



Rys. 9. Zmiana grubości folii kształtki z PVC w punktach charakterystycznych A-I, dla temperatury układu grzejnego: zewnętrznego 430 °C, wewnętrznego 400 °C

Fig. 9. The dependence of the PVC foil thickness changes in the characteristic points A-I, for temperature of the: external heating system 430 °C, internal heating system 400 °C

A-I, wykonanych z folii z polichlorku winylu. Pomiaru dokonano za pomocą Mikrometru Wilson Wolpert IP 54 o dokładności pomiaru 0,001 mm. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli zaokrąglono do dwóch miejsc po przecinku. Interpretację graficzną kompletnych wyników badań grubości otrzymanych kształtek przedstawiono na rysunkach 7-12.

Na rysunkach 7-9, przedstawiono rozkład grubości kształtek wykonanych z folii PVC. Można zauważyć, że rozkład grubości ścianek zależy od głębokości kształtowanego wyrobu, geometrii formy oraz ustalonych parametrów procesu termoformowania pozytywowego. Grubości ścianek kształtek wykonanych z folii PVC w punktach F, G, H, I są zbliżone do grubości pierwotnej i różnią się względem wartości nominalnej średnio o 15%. Można zauważyć, że największe wartości grubości mają miejsca pomiarowe znajdujące się na dnie kształtki, gdzie podczas procesu materiał przylegał do górnej części formy. W punktach A, B, C, D, E, wartości są znacznie niższe, nawet o 41%, co jest spowodowane tym, że materiał, po przylgnięciu do górnej części formy, ochładzał się i nie miał możliwości dalszego rozciągania, zaś rozciąganie folii na ściankach bocznych

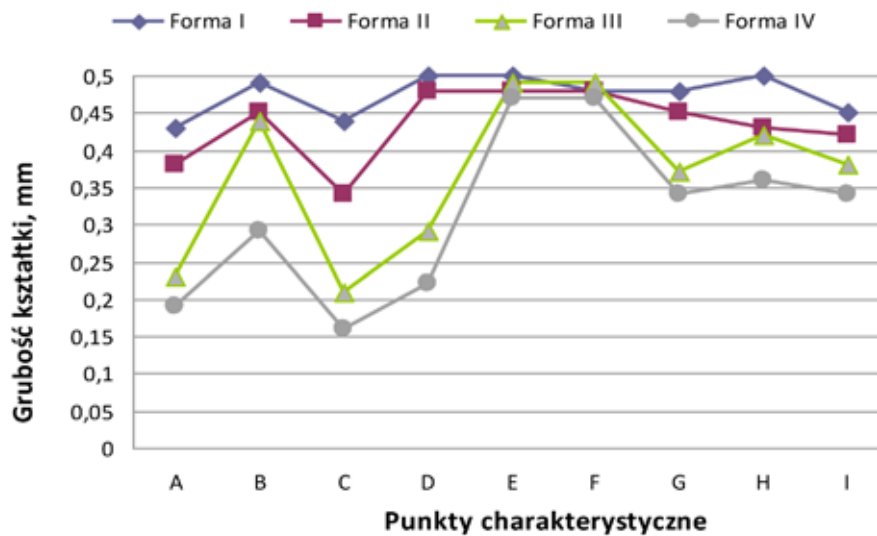
było realizowane tylko przez nieochłodzoną część folii. Zauważono, że za wysoka temperatura grzania powoduje w efekcie zbytne uplastycznienie materiału, jego przetopienie oraz nakładanie się na siebie warstw podczas oddziaływania formy pozytywowej na kształtowaną folię.

Wyniki badań grubości folii z PS pokazano na rysunkach 10-12. W przypadku folii z PS, dno kształtki jest cieńsze od materiału podstawowego nawet o 24%, natomiast pozostałe miejsca pomiaru grubości, znajdujące się na ściankach bocznych, różnią się nawet o 50% od wartości nominalnej. Jest to spowodowane tym, podobnie jak w przypadku folii PVC, że materiał podczas rozciągania stykał się najpierw z górną częścią formy, a następnie rozciągał się po bocznych ściankach formy. Dno kształtki jest miejscem najgrubszym, a najcieńsze są ścianki boczne. Gwałtowny spadek grubości występuje w punkcie C, ze względu na to, że jest to punkt znajdujący się na ściance bocznej kształtki, gdzie materiał uległ największemu rozciągnięciu.

Wyniki określające stopień rozciągania badanej folii z PVC i PS przedstawiono w tabelach 5 i 6. Stwierdzono wpływ temperatury

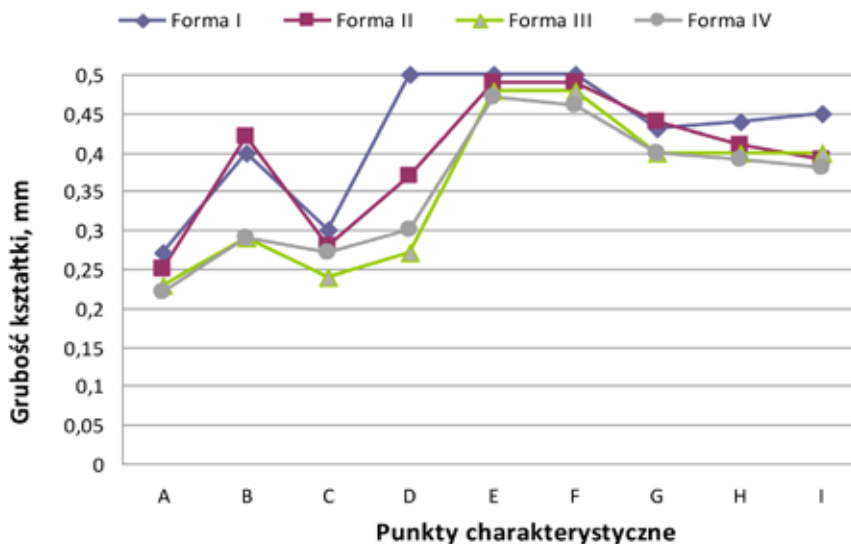
nagrzewania folii na zmianę jej rozciągania. W przypadku folii z PVC kształtowanej przy stosowanej formie o wysokości 40 mm, dla temperatury w zakresie 365-380°C określono jej rozciąganie do 184%, zaś przy temperaturze

w zakresie 400-430°C, rozciąganie wyniosło ponad 200%. Zastosowanie, w procesie termoformowania, formy o wysokości 100 mm spowodowało, przy tych samych temperaturach, rozciąganie folii z PVC od 300 do 480%.



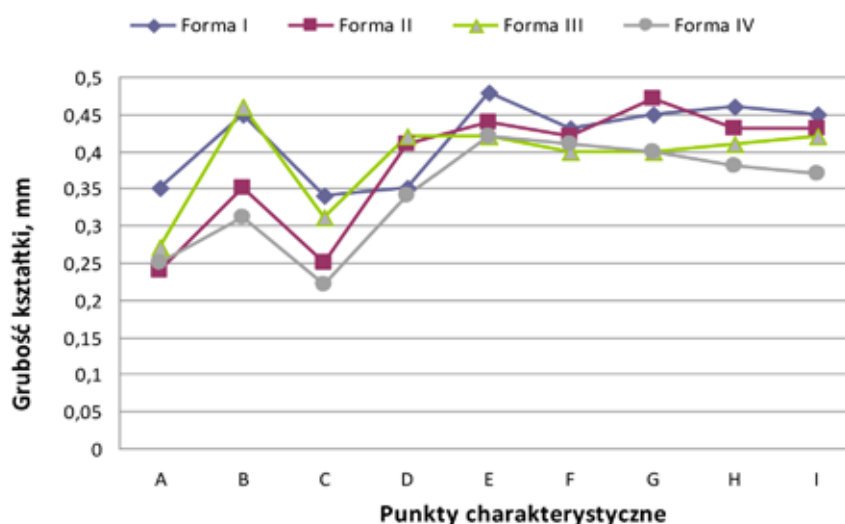
Rys.10. Zmiana grubości folii kształtki z PS w punktach charakterystycznych A-I, dla temperatury układu grzejnego: zewnętrznego 380 °C, wewnętrznego 365 °C

Fig. 10. The dependence of the PS foil thickness changes in the characteristic points A-I, for temperature of the: external heating system 380 °C, internal heating system 365 °C



Rys.11. Zmiana grubości folii kształtki z PS w punktach charakterystycznych A-I, dla temperatury układu grzejnego: zewnętrznego 410 °C, wewnętrznego 380 °C

Fig. 11. The dependence of the PS foil thickness changes in the characteristic points A-I, for temperature of the: external heating system 410 °C, internal heating system 380 °C



Rys. 12. Zmiana grubości folii kształtki z PS w punktach charakterystycznych A-I, dla temperatury układu grzejnego: zewnętrznego 430 °C, wewnętrznego 400 °C  
 Fig. 12. The dependence of the PS foil thickness changes in the characteristic points A-I, for temperature of the: external heating system 430 °C, internal heating system 400 °C

Tab. 5. Stopień rozciągania wzdłużnego  $S_r$  kształtek z PVC w punktach charakterystycznych A-I  
 Tab. 5. Degree of longitudinal stretching  $S_r$  of the PVC moulds in characteristic points A-I

Rodzaj	Stopień rozciągania kształtki w punktach charakterystycznych $S_r$ , %								
Formy	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Temp. ukł. grzejnego: zewnętrznego 380 °C, wewnętrznego 365 °C									
I	160	141	184	160	160	150	126	133	133
II	200	171	200	218	171	160	141	141	141
III	240	200	240	240	184	160	141	141	150
IV	240	240	300	240	200	184	160	160	171
Temp. ukł. grzejnego: zewnętrznego 410 °C, wewnętrznego 380 °C									
I	218	240	184	184	150	133	133	133	133
II	218	184	184	200	160	141	141	141	141
III	300	218	218	266	171	171	171	150	160
IV	300	300	300	300	184	160	160	160	160
Temp. ukł. grzejnego: zewnętrznego 430 °C, wewnętrznego 400 °C									
I	218	240	200	200	141	141	126	141	141
II	240	200	184	200	200	184	150	126	141
III	342	266	141	300	160	171	141	133	141
IV	300	266	480	342	160	160	150	150	160

**Tab. 6. Stopień rozciągania wzdłużnego  $S_r$  kształtek z PS w punktach charakterystycznych A-I**  
**Tab. 6. Degree of longitudinal stretching  $S_r$  of the PS moulds in characteristic points A-I**

Rodzaj	Stopień rozciągania kształtki w punktach charakterystycznych, $S_r$ %								
Formy	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Temp. ukł. grzejnego: zewnętrznego 380 °C, wewnętrznego 365 °C									
I	118	104	115	102	102	106	106	102	113
II	134	113	150	106	106	106	113	118	121
III	221	115	242	175	104	104	137	121	134
IV	238	175	238	231	108	108	150	141	150
Temp. ukł. grzejnego: zewnętrznego 410 °C, wewnętrznego 380 °C									
I	145	113	150	145	106	118	113	110	113
II	212	145	204	124	112	121	108	118	118
III	188	110	164	121	121	127	127	124	121
IV	204	164	231	150	121	124	127	134	137
Temp. ukł. grzejnego: zewnętrznego 430 °C, wewnętrznego 400 °C									
I	188	127	170	102	102	102	118	115	113
II	204	121	182	137	104	104	115	124	130
III	221	175	212	188	106	106	127	127	127
IV	231	175	218	190	108	110	127	130	134

Podobne zależności wystąpiły w przypadku rozciągania folii z PS, pokazane w tabeli 6. Nagrzewanie folii w temperaturze 365-380°C, dla formy o wysokości 40 mm, spowodowało jej rozciąganie w zakresie 102-118%, zaś w temperaturze 400-430°C wyniosło odpowiednio od 106 do 188%. Zastosowanie formy o wysokości 100 mm spowodowało, przy omawianych temperaturach, rozciąganie w zakresie 108-238% i odpowiednio 106-231%.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wyników stwierdzono widoczny wpływ rodzaju folii, warunków jej nagrzewania oraz pozostałych badanych warunków procesu termoformowania na właściwości geometryczne wytworzonych kształtek. Następuje zmiana

grubości formowanej folii mierzonej w punktach charakterystycznych oraz jej stopnia rozciągania w kierunku wzdłużnym. Może mieć to wpływ na dalsze właściwości wytworzonych kształtek, to jest na: wytrzymałość mechaniczną, właściwości struktury geometrycznej i właściwości wizualne.

Grubość otrzymanych kształtek z folii PVC i PS, przy założonych wymiarach kształtek, jest determinowana głównie stopniem uplastycznienia materiału, regulowanym poprzez zmianę temperatury układu nagrzewającego folię. Wzrost temperatury nagrzanej folii, oczywiście w zakresie jej właściwego przetwórstwa, powoduje zwiększone pocienienie ścianek, przede wszystkim bocznych, wytwarzanych kształtek. Rozkład grubości ścianek zależy od głębokości kształtowanego wyrobu, geometrii formy oraz innych parametrów procesu termoformowania pozytywowego.

Wyznaczony stopień rozciągania folii w kierunku wzdłużnym, dla badanych tworzyw, zależy również od temperatury nagrzewanej folii, ale też od wymiarów geometrycznych formy, głównie jej wysokości. W przypadku termoformowania pozytywowego powstawanie znacznych przewężeń folii występuje w miejscach, gdzie kontakt tworzywa ze ściankami formy następuje najpóźniej. Z reguły są to ścianki boczne, dolne krawędzie i narożniki wytwarzanych kształtek. Powstające przewężenia oraz charakterystyczny dla danego wyrobu, w określonych warunkach formowania, rozkład grubości ścianek ograniczają maksymalną głębokość kształtowanego wyrobu.

Możliwy jest również wpływ pozostałych parametrów procesu termoformowania, głównie czasu nagrzewania folii i czasu chłodzenia folii, co nie było jednak celem niniejszych badań. Jednocześnie trzeba zauważyć, że przeprowadzona ocena jest miarodajna w odniesieniu do badanych tworzyw i tylko w stosowanym zakresie zmiany parametrów procesu kształtowania folii metodą termoformowania pozytywowego.

## LITERATURA

1. Sikora R.: *Obróbka tworzyw wielocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1996, 84-95.
2. Throne J.: *Technology of thermoforming*. Carl Hanser Verlag, Munich 1996, 18-27.
3. Garbacz T.: *Opakowania biodegradowalne z tworzyw polimerowych*. Przetwórstwo Tworzyw 2012, 1, 12-16.
4. Jachowicz T., Sikora J. W.: *Wpływ starzenia naturalnego na wybrane właściwości folii polimerowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Chemia, zeszyt 20, Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009, 47-50.
5. Tor-Świątek A.: Characteristics of physical structure of poly(vinyl chloride) extrudate modified with microspheres. *Polimery* 2012, 7-8, 577-580.
6. Ashter S., A.: *Thermoforming of single and multilayer laminates*. Wiliam Andrew-Elsevier, Waltham 2013, 120-147.
7. Illig A.: *Thermoforming a practical guide*. Carl Hanser Verlag, Munich 2001.
8. Morales R A. et al.: *Effect of the thermoforming process variables on the sheet friction coefficient*. *Materials and Design* 2014, 53, 1097-1103.
9. Żenkiewicz M., Szach A.: *Wybrane problemy termoformowania materiałów polimerowych*. *Polimery* 2010, 5, 337-350.
10. Krawczuk D.: *Tworzywa polimerowe do rozciągania próżniowego i ich właściwości*. *Przetwórstwo Tworzyw* 2012, 2, 103-112.
11. Krawczuk D.: *Stanowisko badawcze termoformowania opakowań z tworzyw polimerowych i jego zastosowanie*. *Mechanik* 2013, 5, 450-452.
12. Krawczuk D.: *Zmienność grubości ścianek w termoformowanym opakowaniu*. *Opakowanie* 2014, 5, 56-59.
13. Godshall D. i inni: *Processing-structure-property investigation of blown HDPE films containing both machine and transverse direction oriented lamellar stacks*. *Polymer* 2003, 18, 5397-406.
14. Krawczuk D.: *Badanie wpływu temperatury i ciśnienia termoformowania na opakowanie*. *Opakowanie*, 2011, 11, 58-61.
15. Krawczuk D.: *Termoformowanie opakowań z tworzyw sztucznych*. *Opakowanie* 2012, 1, 56-61.
16. Novotny P., Saha P., Kouba K.: *Fitting of K-BKZ model parameters for the simulation of thermoforming*. *International Polymer Processing* 1999, 3, 291-295. DOI 10.3139/217.1543.
17. Torres F.G., Bush S.F.: *Sheet extrusion and thermoforming of discrete long glass fibre reinforced polypropylene*. *Composite* 2000, 31, 1289-1294.
18. Kumar P.S. et al.: *The effect of material characteristics and mould parameters on the thermoforming of thick polypropylene sheets*. *Journal of Plastic Film and Sheeting* 2014, 2, 162-180.
19. Web: [www.browm-machine.com](http://www.browm-machine.com) [dostęp, 11.04.2017]

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 21-05-2017

Data akceptacji publikacji do druku: 20-06-2017