

TOMASZ JARUGA, KATARZYNA MAZIK^{*)}

Politechnika Częstochowska
Instytut Technologii Mechanicznych
Zakład Przetwórstwa Polimerów
Al. Armii Krajowej 19 C, 42-201 Częstochowa

Wpływ czasu wtrysku i docisku na stan naprężeń własnych w wypraskach wtryskowych

Streszczenie — Przedstawiono wymogi, jakie stawia się procesowi wytwarzania wyprasek przezroczystych metodą wtryskiwania. Zwrócono szczególną uwagę na takie parametry procesu jak: czas wtrysku i docisku, które warunkują uzyskanie odpowiedniej jakości wyprasek. Metodą elastooptyczną zbadano wpływ tych parametrów na stan naprężeń własnych wyprasek z tworzywa (metakrylan metylu)-akrylonitryl-butadien-styren (MABS).

Słowa kluczowe: wtryskiwanie, naprężenia własne, badania elastoplastyczne, czas wtrysku, czas docisku.

THE INFLUENCE OF INJECTION TIME AND HOLDING TIME ON THE RESIDUAL STRESS STATE IN INJECTION MOULDED PARTS

Summary — The requirements for the manufacturing process of transparent parts by injection moulding were described. Special attention was paid to such processing parameters like injection time and holding time, which are essential for the production of good quality parts. The effect of these parameters on the residual stress in (methyl methacrylate)-acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (MABS) injection moulded parts was investigated using photoelastic analysis.

Keywords: injection moulding, residual stress, photoelastic investigation, injection time, holding time.

WPROWADZENIE

Wypraski wtryskowe z tworzyw polimerowych przezroczystych, takich jak polistyren (PS), poli(metakrylan metylu) (PMMA) lub poliwęglan (PC) wymagają szczególnie starannego doboru warunków przetwórstwa. Efektem nieodpowiednio dobranych warunków procesu wtryskiwania może być występowanie wysokiego stanu naprężeń własnych, co w przypadku materiałów przezroczystych, a zwłaszcza wyrobów do zastosowań optycznych, może dyskwalifikować takie wypraski [1–4].

Naprężenia własne są jednymi z niedoskonałości wytworów otrzymywanych z tworzyw polimerowych. Są one superpozycją naprężeń własnych cieplnych i naprężeń własnych reologiczno-technologicznych. Naprężenia własne cieplne są spowodowane zróżnicowaną szybkością ochładzania wytworów z tworzyw polimerowych, ale również czynnikami konstrukcyjnymi wypraski, takimi jak grubość ścianek czy też określona konstrukcja układu chłodzenia formy. Natomiast naprężenia własne reologiczno-technologiczne są spowodowane

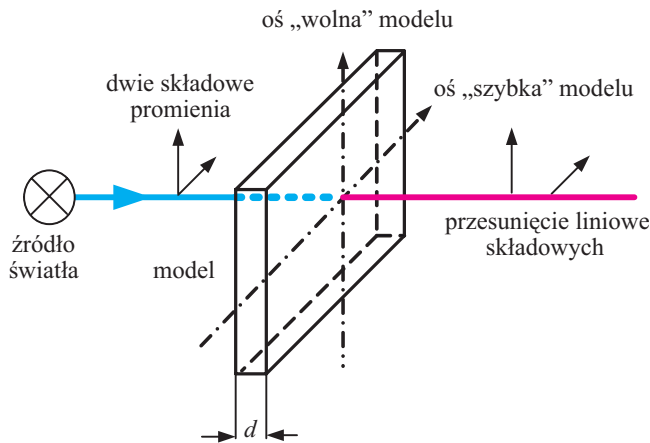
wieloma czynnikami, takimi jak przepływ tworzywa czy warunki przetwórstwa [1, 2, 5–13].

Metoda elastooptyczna jest jedną z metod badania stanu naprężeń własnych polegających na doświadczalnym badaniu naprężeń występujących w modelach wykonanych z przezroczystych, optycznie czułych materiałów, do których zaliczamy przezroczyste tworzywa polimerowe. Tworzywa te w stanie wolnym od naprężeń są optycznie izotropowe, natomiast w stanie naprężonym wykazują dwójłomność wymuszoną, która umożliwia badanie tego stanu naprężeń i odkształceń w świetle spolaryzowanym [2, 13, 14].

Metoda elastooptyczna ma szczególne zastosowanie do badania modeli konstrukcji płaskich. Dzięki walorom elastooptycznym materiału z którego wykonany jest badany element, możliwa jest wizualizacja naprężeń w tym elemencie [15]. Pomaga to w określeniu takich warunków przetwórstwa, przy których wartość różnicy naprężeń głównych będzie jak najmniejsza, a ich rozkład równomierny.

Wektor światła może być przedstawiony jako jego dwie składowe, co pokazano na rys. 1. Widać, że obie składowe przechodzą przez model z różną prędkością — pierwsza składowa, równoległa do osi „szybkiej” mode-

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: lubczynska@ipp.pcz.pl



Rys. 1. Przechodzenie promienia światła przez materiał dwójłomny (według [16])

Fig. 1. Scheme of light transmission through a birefringent material (according to [16])

lu przechodzi z większą prędkością niż druga, równoległa do osi „wolnej”. Czasy, jakie są potrzebne do przejścia składowych promienia światelnego są różne, stąd istnieje różnica czasu przejścia (Δt), która opisana jest wzorem:

$$\Delta t = d \cdot \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) \quad (1)$$

gdzie: v_1, v_2 – prędkości składowych promienia światelnego, d – grubość analizowanego modelu.

Wzajemne przesunięcie liniowe składowych promienia jest proporcjonalne do prędkości światła w powietrzu, a tym samym do różnicy współczynników załamania światła. Według Maxwella współczynniki załamania światła można przedstawiać jako liniową kombinację naprężeń głównych. Wielkość przesunięcia względnego (δ) obu rozszczepionych promieni wyznaczamy z podstawowej zależności:

$$\delta = d \cdot C \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

gdzie: C – stała elastoptyczna materiału, σ_1, σ_2 – naprężenia główne.

Przesunięcie względne składowych promienia jest zatem proporcjonalne do różnicy naprężeń głównych [17]. Przesunięcie względne (m), można wyrazić za pomocą długości fali światła (λ) użytego do badania:

$$m = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{d \cdot C}{\lambda} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (3)$$

Zależność (3) zapisuje się najczęściej w postaci:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = m \cdot \frac{\lambda}{d \cdot C} = m \cdot K \quad (4)$$

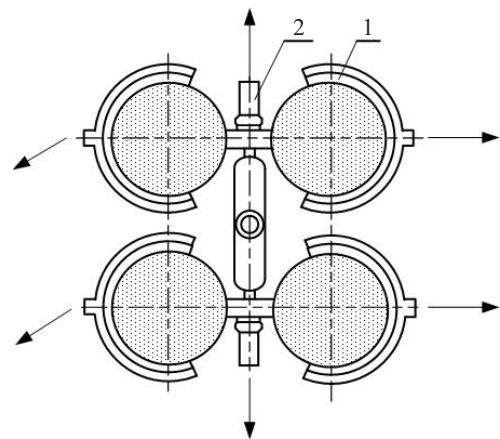
gdzie: K – elastoptyczna stała modelowa.

Równanie (4) jest podstawowym równaniem w elastoptyce [18].

Badając wypraski otrzymane w różnych warunkach przetwórstwa można określić wpływ tych warunków na poziom naprężeń w wypraskach. Jak wykazano w pracach [5, 6], gdzie badaniom poddano wypraski z polistyrenu i poliwęglanu, duży wpływ na koncentrację naprę-

żeń własnych w wypraskach mają zwłaszcza temperatura wtryskiwanego tworzywa oraz ciśnienie docisku [19, 20].

Podczas wytwarzania wyrobów z tworzyw przezroczystych metodą wtryskiwania szczególnie ważne jest skuteczne zapewnienie odpowietrzenia gniazd formujących. Jeżeli na skutek zamknięcia gazów w tworzywie dojdzie do powstania pęcherza w środku wypraski, to często taki wyrób nie jest dopuszczany do użytku. Podczas wytwarzania soczewek lub filtrów optycznych odpowietrzać należy nie tylko gniazda, ale również kanały doprowadzające tworzywo [7]. Schemat rozkładu gniazd i kanałów doprowadzających w czterogniazdowej formie do wytwarzania filtrów optycznych z PMMA przedstawiono na rys. 2. Oprócz odpowietrzenia zaleca się stosowanie nadlewów, które dodatkowo zmniejszają ryzyko powstawania zamkniętych pęcherzy gazów w samej wyprasce. Po zakończeniu formowania wyrobów nadlewy należy usunąć.



Rys. 2. Układ odpowietrzania w formie czterogniazdowej stosowanej do wytwarzania elementów optycznych z PMMA: 1 – kanał pierścieniowy odpowietrzający gniazda, 2 – kanał odpowietrzający kanały doprowadzające (według [7])

Fig. 2. Scheme of venting channels in four-cavity mould for the production of optical elements from PMMA: 1 – ring channel for degassing the cavities. 2 – runner venting channel (according to [7])

Wykonywanie wyprasek wykorzystywanych w optyce wymaga ustalenia właściwego czasu docisku, ponieważ jego wartość znacząco wpływa na wartość pozostających w wyprasce naprężeń, które mogą prowadzić do zjawiska dwójłomności wymuszonej, bardzo niekorzystnego w tego typu wypraskach. Różne wartości temperatury części formy wtryskowej, skutkujące odkształceniami wyprasek, mogą być wykorzystane do produkcji wyprasek, których ostateczny kształt jest otrzymywany właśnie po tym odkształceniu, np. soczewek [21].

Naprężenia własne są jednym z czynników decydujących o jakości wyprasek precyzyjnych [22]. Do wypra-

sek precyzyjnych zalicza się elementy optyczne, którym stawiane są wysokie wymagania odnośnie dokładności kształtu i wymiaru, co możliwe jest do uzyskania dzięki zastosowaniu małych wartości ciśnienia wtryskiwania [23], lecz nie wpływa korzystnie na właściwości optyczne wyrobu. Ciśnienie tworzywa w gnieździe w fazie docisku jest czynnikiem decydującym o wielkości skurczu wypraski. Jak dowiedziono w pracy [24], wypraski z przezroczystego PS charakteryzują się mniejszym skurczem, gdy zastosowane jest ciśnienie docisku o większej wartości, co ma jednak negatywny wpływ na rozkład naprężeń własnych, jaki obserwować można w wypraskach stosując metodę elastooptyczną [10]. Czas chłodzenia wypraski w formie, zwłaszcza w małych zakresach jego wartości, ma wpływ na wartość skurczu wyprasek. Po przekroczeniu pewnej wartości czasu chłodzenia skurcz wyprasek wykonanych z kopolimeru akrylonitryl-butadien-styren (ABS) stabilizuje się, co wykazali autorzy pracy [25], udowadniając jednocześnie, że wartość naprężeń własnych związana jest w występowaniem w wypraskach otworów, które formowane są za pomocą przeszkód (rdzeni) w formie.

Celem tej pracy było zbadanie wpływu czasu wtrysku i czasu docisku na jakość wyprasek z wybranego tworzywa przezroczystego. Jakość tę określano na podstawie koncentracji naprężeń własnych, które badano metodą elastooptyczną z uwzględnieniem wpływu warunków takich jak: czas opóźnienia uplastycznienia, czas chłodzenia, ciśnienie docisku, prędkość wtryskiwania oraz temperatura formy.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

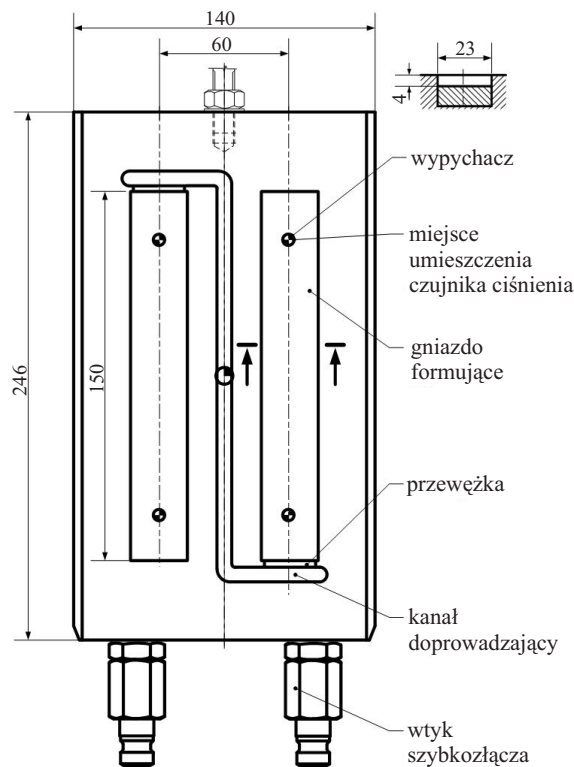
Materiały

Do badań użyto kopolimeru (metakrylan metylu)-akrylonitryl-butadien-styren (MABS) o nazwie handlowej Terlux 2812 TR, którego producentem jest firma BASF. Jest to tworzywo przezroczyste, a wypraski z niego otrzymane charakteryzują się dużą sztywnością, wysoką udarnością i błyszczącą powierzchnią. MABS szeroko stosowany jest w przemyśle farmaceutyczno-medycznym (np. do wytwarzania elementów diagnostycznych), kosmetycznym (szczególnie na opakowania kremów, szminek itp.), w wyrobach z branży AGD (np. podświetlacze do maszynek elektrycznych), a także do produkcji wyrobów takich jak: obudowy sprzętu elektrotechnicznego, elementy sprzętu sportowego, biurowego i higienicznego [26, 27].

Przygotowanie próbek

Próbki w kształcie beleczek o wymiarach $150 \times 23 \times 4$ mm, wytwarzano w formie dwugniazdowej, której matrycowa część formująca w postaci wkładki umieszczonej w obudowie, przedstawiona jest schematycznie na rys. 3. Druga część formująca składa się z płyty płaskiej, w któ-

rej w jednym z gniazd, w miejscu zaznaczonym na rys. 3 umieszczona jest tuleja wtryskowa oraz czujnik ciśnienia tworzywa. Do wykonania wyprasek użyto wtryskarki KraussMaffei KM 65/160/C4.



Rys. 3. Forma wtryskowa użyta do badań — schemat wkładki formującej

Fig. 3. Injection mould used in the study — scheme of the mould insert

Warunki procesu wtryskiwania zestawiono w tabeli 1. Zmiennymi warunkami procesu były: czas fazy wtrysku (t_w) oraz czas fazy docisku (t_d). Stosując metodę krótkich wtrysków ustalono najpierw doświadczalnie czas fazy t_w przy którym gniazdo zostaje wypełnione. Ze względu na wyposażenie układu uplastyczniającego wtryskarki w otwartą dyszę wtryskową, należało zapewnić odpowiednio długi czas opóźnienia uplastycznienia (t_{ou}), aby po zakończeniu fazy wtrysku uniknąć wtłaczania do formy ciekłego tworzywa sprężanego przed ślimakiem podczas uplastycznienia, co spowodowałoby dalszy przepływ i zmianę położenia frontu tworzywa. Następnie wtryskiwano próbki zmieniając parametry t_w i t_d . Stosowano trzy wartości t_w równe 0,5, 0,9 lub 2,5 s oraz trzy wartości t_d wynoszące 8, 10 lub 20 s. Ciśnienie tworzywa w formie monitorowano poprzez obserwację jego zmian w czasie (na panelu sterowniczym maszyny). Próbki wytwarzano stosując dwie różne wartości czasu opóźnienia uplastycznienia (t_{ou}). Pierwszy z czasów wynosił 3 s i stosowano wówczas czas chłodzenia $t_c = 10$ s, a drugi 60 s był bardzo długi i wymagał $t_c = 70$ s.

Metody badań

Wypraski poddano badaniom elastoptycznym. Badania prowadzono w świetle spolaryzowanym za pomocą polaryskopu liniowego SV-1000 firmy Strainoptics. Widok ogólny urządzenia oraz sposób umieszczania próbek przedstawiony jest na rys. 4. Próbkę umieszczano pomiędzy analizatorem i polaryzatorem. Obraz w postaci różnokolorowych prążków i pól jest widoczny na ana-



Rys. 4. Stanowisko do badań elastoptycznych — polaryskop liniowy SV-1000

Fig. 4. Test stand for photoelastic investigations — linear polariscope SV-1000

lizatorze urządzenia. Każda z barw izochromy określa konkretną wartość różnicy naprężeń głównych ($\sigma_1 - \sigma_2$), podaną w MPa. W układzie izochrom purpurowy prążek określany jest jako kolor przejścia odpowiadający kolejnemu całkowitemu rzędowi izochromy. Kolor czarny odpowiada zerowej różnicy naprężeń głównych [28].

Wtryskiwano po 10 próbek przy określonym zestawie ustalonych warunków procesu. Podczas obserwacji nie stwierdzono wyraźnych różnic w obrazie naprężeń dla wyprasek uzyskanych w tych samych warunkach, dlatego przyjęto, że przedstawione obrazy z badań elastoptycznych są reprezentatywne dla całej serii.

Symulacje komputerowe

Przeprowadzono symulacje komputerowe z wykorzystaniem programu Autodesk Moldflow 2013 pozwalające na określenie skurczu objętościowego wyprasek oraz rozkładu naprężeń. W symulacji zastosowano warunki wtryskiwania, odpowiadające tym użytym podczas wtryskiwania wyprasek. Jednak ze względu na to, że program nie uwzględnia wpływu uplastycznienia na wzrost ciśnienia w gnieździe formy, symulacje przepro-

wadzono stosując tylko duże wartości czasu opóźnienia uplastycznienia, tj. $t_{ou} = 60$ s. W takich warunkach uplastycznienia tworzywa nie ma już wpływu na procesy zachodzące w tworzywie znajdującym się w gnieździe formującym.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Ustalono odpowiedni czas wtrysku, stosując metodę krótkich wtrysków. Z badań wynika, że przy określonych pozostałych warunkach procesu (tabela 1) t_w powinien wynosić 0,9 s. Po takim czasie front przepływającego tworzywa znajduje się tuż przed ścianką końcową gniazda formującego, co przedstawiono w tabeli 2. Dopiero wówczas można rozpocząć fazę docisku.

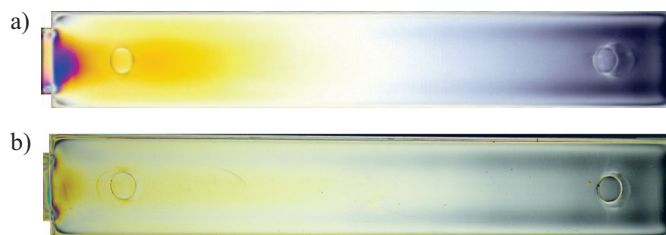
T a b e l a 1. Warunki wtryskiwania zastosowane do wytwarzania próbek

T a b l e 1. Injection conditions used for manufacturing the samples

Wielkość	Wartość
Temperatura wtryskiwanego tworzywa (T_w), °C	260
Czas wtrysku (t_w), s	0,5, 0,9 lub 2,5
Prędkość wtryskiwania (v), m/s	0,085
Objętościowe natężenie przepływu (\dot{V}), cm ³ /s	60
Ciśnienie docisku (p_d), MPa	70
Czas docisku (t_d), s	8, 10 lub 20
Czas chłodzenia (t_c), s	10 lub 70
Czas opóźnienia uplastycznienia (t_{ou}), s	3 lub 60

Na rys. 5 przedstawiono fotografie wyprasek uzyskanych przy zbyt krótkim czasie $t_w = 0,5$ s. Wypełnianie gniazda zachodzi wówczas pod wpływem ciśnienia docisku. W przypadku jednej z przedstawionych wyprasek $t_{ou} = 3$ s (rys. 5a), a drugiej $t_{ou} = 60$ s (rys. 5b).


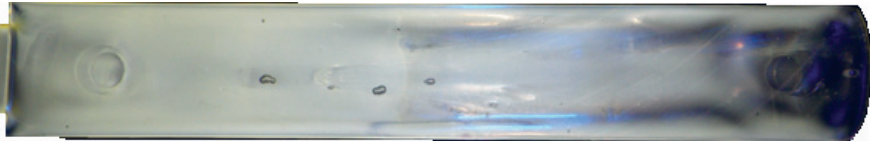

Zastosowanie zbyt krótkiego czasu fazy wtrysku powoduje zbyt powolne wypełnianie gniazda w fazie docisku. Powstają wówczas znaczne różnice ciśnienia i temperatury tworzywa pomiędzy tworzywem w pobliżu



Rys. 5. Obraz stanu naprężeń w wypraskach uzyskanych z zastosowaniem czasów $t_w = 0,5$ s i $t_d = 8$ s oraz: a) $t_{ou} = 3$ s, b) $t_{ou} = 60$ s

Fig. 5. Stress state in the parts manufactured at the processing times $t_w = 0,5$ s, $t_d = 8$ s and: a) $t_{ou} = 3$ s; b) $t_{ou} = 60$ s

T a b e l a 2. Stopień wypełnienia formy uzyskany z zastosowaniem czasu docisku $t_d = 0$ s oraz zmiennego czasu wtrysku (t_w)
T a b l e 2. The degree of mould filling at holding time $t_d = 0$ s and variable injection time t_w

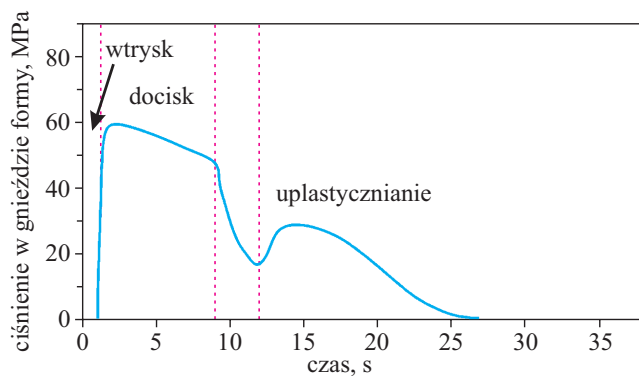
t_w , s	Elastooptyczny obraz wypraski
0,5	
0,9	
1,0	

końcowej ścianki gniazda — na końcu drogi przepływu, a tworzywem na początku gniazda — w pobliżu przewężki. Stan naprężeń jest niski w końcowej części gniazda, natomiast znaczną koncentrację naprężeń można zaobserwować w pobliżu przewężki. Z powodu powolnego wypełniania gniazda dochodzi do stosunkowo równomiernego rozłożenia naprężeń w wypraskie. W samej przewężce i tuż za nią w gnieździe, gdzie następuje intensywne ścinanie tworzywa, naprężenia własne utrwalają się (rys. 5a).

Po zastosowaniu zbyt krótkiego czasu t_d , decydujące znaczenie na rozkład naprężeń w wypraskach ma czas t_{ou} . Jeżeli proces uplastyczniania tworzywa rozpocznie się w stosunkowo krótkim czasie, wtedy gdy jest jeszcze możliwy przepływ tworzywa do gniazda przez przewężkę, to w efekcie w obszarze wypraski za przewężką

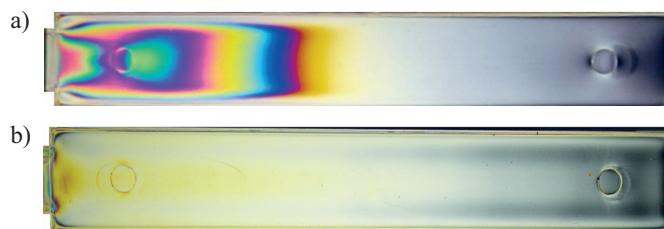
powstaną znaczne naprężenia (rys. 5a). Przykładowy wykres ukazujący wpływ uplastyczniania na zmiany ciśnienia w gnieździe na skutek zastosowania zbyt krótkiego czasu docisku pokazano na rys. 6. Widoczny jest wzrost ciśnienia związany z rozpoczętym procesem uplastyczniania, co następuje po pewnym czasie od zakończenia zbyt krótkiej fazy docisku — tym szybciej, im krótszy jest ustawiony czas t_{ou} [19].

Większą różnicę w koncentracji naprężeń zaobserwowano w wypraskach, które wtryskiwano ze zbyt długim czasem $t_w = 2,5$ s, ale zbyt krótkim czasem $t_d = 8$ s, co pokazano na rys. 7. Po zastosowaniu krótkiego czasu $t_{ou} = 3$ s w połowie długości wypraski utrwały się duże naprężenia własne, co pokazano na rys. 7a. W chwili zakończenia fazy docisku tworzywo w przewężce nie było jeszcze zestalone i nastąpił przepływ wsteczny do kanałów wtryskowych. Tworzywo znajdujące się bliżej końca wypraski było już na tyle zestalone, że nie podlegało w dużym stopniu działaniu docisku, stąd równomierny rozkład naprężeń własnych w tej części wypraski. Dla porównania, gdy zastosowano długi czas $t_{ou} = 60$ s, naprężenia



Rys. 6. Wykres ciśnienia w gnieździe formy otrzymany z zastosowaniem zbyt krótkiego czasu docisku i szybkim rozpoczęciem uplastyczniania w przypadku zastosowania otwartej dyszy wtryskowej

Fig. 6. Plot of the pressure in the mould cavity at too short holding time and fast start of plasticization using an open nozzle












Rys. 7. Obraz stanu naprężeń w wypraskach uzyskanych z zastosowaniem parametrów $t_w = 2,5$ s i $t_d = 8$ s oraz: a) $t_{ou} = 3$ s, b) $t_{ou} = 60$ s

Fig. 7. Stress state in the parts manufactured using the parameters: $t_w = 2.5$ s and $t_d = 8$ s; a) $t_{ou} = 3$ s, b) $t_{ou} = 60$ s

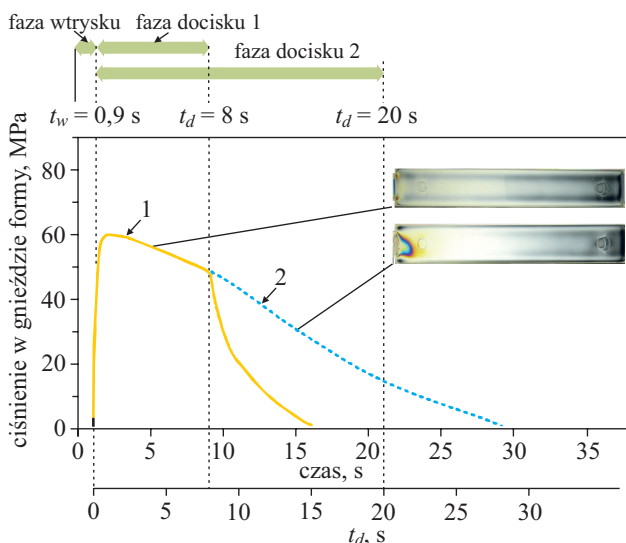
T a b e l a 3. Obrazy stanu naprężeń własnych obserwowanych w wypraskach z MABS otrzymanych z zastosowaniem $t_{ou} = 60$ s i różnych wartościach t_w i t_d

T a b l e 3. Residual stress images for MABS parts manufactured using plasticization delay time $t_{ou} = 60$ s at various t_w and t_d values

Numer wypraski	Parametr procesu		Elastoptyczny obraz wypraski
	t_w , s	t_d , s	
1	0,5	8	
2	0,5	10	
3	0,5	20	
4	0,9	8	
5	0,9	10	
6	0,9	20	
7	2,5	8	
8	2,5	10	
9	2,5	20	

w wyprascie były małe i jak widać na rys. 7b, nie wykazywały różnic na całej długości wypraski. Naprężenia powstałe w wyprascie są zatem nie tyle efektem przepływu wstecznego przez przewężkę, co spowodowane są przez ponowne sprężanie tworzywa w fazie uplastyczniania.

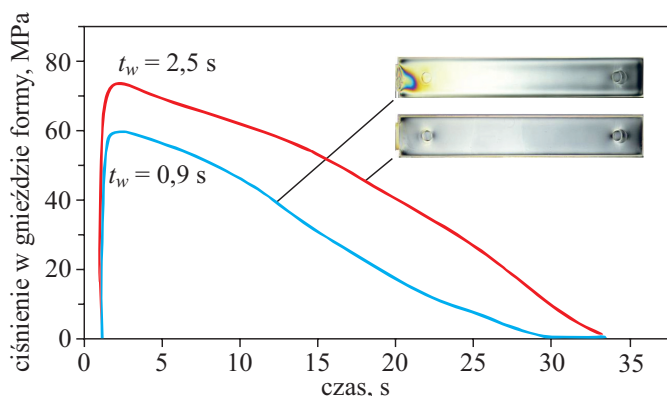
Po ustawieniu długiego czasu $t_{ou} = 60$ s, w celu uniknięcia wpływu tej fazy cyklu na stan naprężeń w wypraskach, porównano następnie oddziaływanie czasów t_d i t_w na te naprężenia. Otrzymane obrazy elastoplastyczne poszczególnych wyprasek zestawiono w tabeli 3. Obrazy naprężeń w wypraskach otrzymanych z zastosowaniem stałego czasu $t_w = 2,5$ s, ale różnych wartości $t_d = 8$ lub 10 s (wypraski 7 i 8) różnią się. Jest to związane z tym, że przy niewielkich wartościach t_d , nawet ich niewielkie zmiany powodują duże różnice w masie wyprasek [19] i ich właściwościach. Wykresy zmian ciśnienia w gnieździe podczas wytwarzania dwu wyprasek, otrzymanych z zastosowaniem $t_d = 8$ s i $t_d = 20$ s, przedstawiono na rys. 8. Okazuje się, że zastosowanie czasu wtrysku $t_w = 0,9$ s (czas potrzebny do wypełnienia gniazda formującego) nie zapobiega powstawaniu znacznych naprężeń w gnieździe



Rys. 8. Wykres zmian ciśnienia w gnieździe formy podczas wtryskiwania w warunkach $t_w = 0,9$ s, $t_{ou} = 60$ s oraz $t_d = 8$ s (1) i $t_d = 20$ s (2)

Fig. 8. Plot of changes in the pressure in the mould cavity during injection under the conditions: $t_w = 0,9$ s, $t_{ou} = 60$ s oraz $t_d = 8$ s (1) i $t_d = 20$ s (2)

za przewężką, co widoczne jest na wyprascie nr 6 w tabeli 3. Na przykładzie wypraski 4 widać, że przepływ wsteczny tworzywa, jaki następuje przez przewężkę przy $t_d = 8$ s, nie wpływa na powstawanie dużych naprężeń, a pojawiają się one za przewężką dopiero wtedy, gdy zastosuje się odpowiednio długi czas docisku. Świadczy to o tym, że w fazie wtrysku nie następuje wyrównanie ciśnienia tworzywa w całym gnieździe, co nie jest korygowane również w czasie trwania fazy docisku.



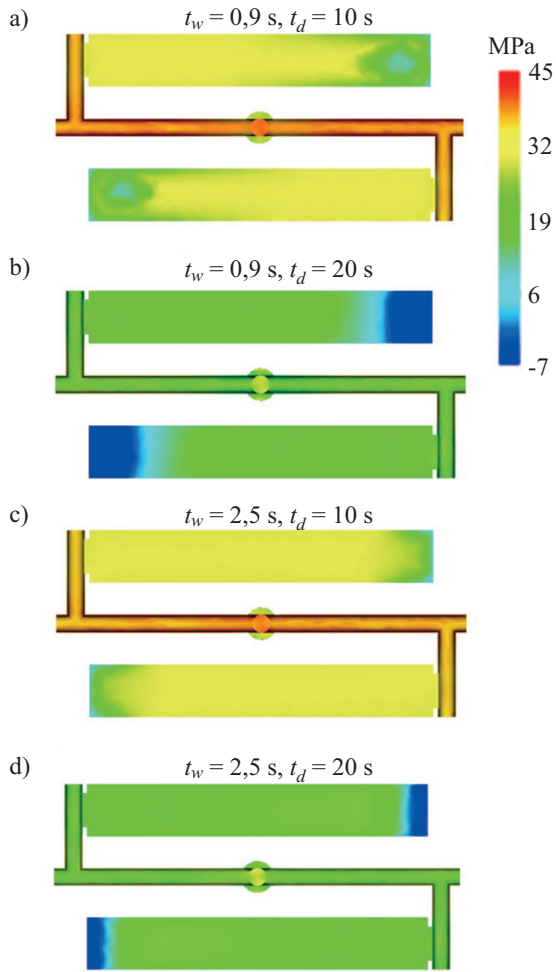
Rys. 9. Wykresy ciśnienia tworzywa w gnieździe formującym podczas wtryskiwania w warunkach $t_d = 20$ s i $t_{ou} = 60$ s oraz $t_w = 0,9$ i $2,5$ s (wypraski, odpowiednio, 6 i 9 w tabeli 3)
Fig. 9. Plot of the plastic pressure in the mould cavity during injection under the conditions: $t_d = 20$ s and $t_{ou} = 60$ s; $t_w = 0,9$ and $2,5$ s (moulded parts 6 and 9, respectively, in Table 3)

Idealny stan, z punktu widzenia rozkładu naprężeń, uzyskano dopiero wtedy, gdy zastosowano zarówno odpowiednie wartości czasu t_w jak i t_d . Do uzyskania korzystnego rozkładu naprężeń wymagany jest długi czas $t_w = 2,5$ s, powodujący sprężanie tworzywa w gnieździe. Wówczas ciśnienie w gnieździe formującym jest wyraźnie wyższe, co przedstawiono na rys. 9 porównując wykresy zmian ciśnienia podczas wytwarzania wyprasek 6 i 9 (wg tabeli 3). Do wytwarzania tych wyprasek zastosowano czas $t_d = 20$ s, ustalony jako optymalny na podstawie wyników badań pokazanych na rys. 8. Optymalną pod względem naprężeń własnych jest wypraska 9. W tym przypadku gniazdo zostało wypełnione odpowiednio szybko w fazie wtrysku i nie doszło podczas wypełniania gniazda do zróżnicowania ciśnienia i temperatury w tworzywie (co zaobserwowano w przypadku wypraski 6), a dodatkowo działanie docisku było na tyle długie, że zanim zakończono oddziaływanie ciśnienia docisku, doszło do zestalenia tworzywa w przewężce. Na skutek tego zestalenia niemożliwy był przepływ wsteczny tworzywa przez przewężkę. Jednocześnie two-



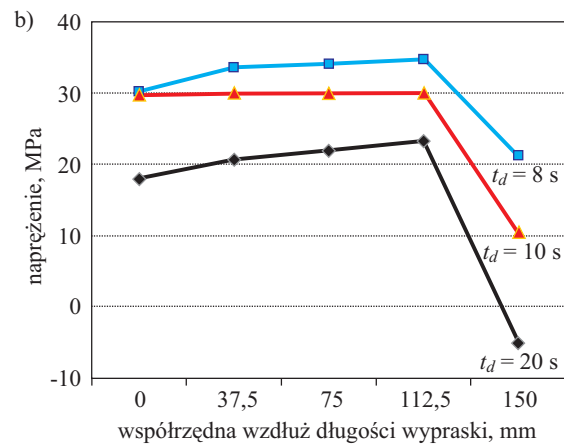
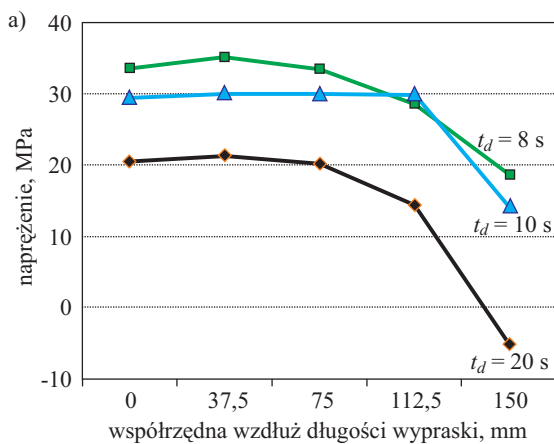
Rys. 10. Obraz stanu naprężeń w wypraskach uzyskanych z zastosowaniem $t_w = 2,5$ s, $t_d = 20$ s oraz: a) $t_{ou} = 3$ s, b) $t_{ou} = 60$ s (wypraska 9 w tabeli 3)

Fig. 10. Stress state in the parts manufactured using the processing conditions: $t_w = 2,5$ s, $t_d = 20$ s and a) $t_{ou} = 3$ s, b) $t_{ou} = 60$ s (sample 9 in Table 3)



Rys. 11. Wyniki symulacji komputerowej obrazującej stan naprężeń w wypraskach (określony w kierunku długości wypraski — oś x) uzyskanych w warunkach wtryskiwania opisanych parametrami: a) $t_w = 0,9$ s, $t_d = 10$ s, b) $t_w = 0,9$ s, $t_d = 20$ s, c) $t_w = 2,5$ s, $t_d = 10$ s, d) $t_w = 2,5$ s, $t_d = 20$ s

Fig. 11. Results of computer simulation illustrating the stress state in the moulded parts (determined along the length of the part — x axis) manufactured using the injection parameters: a) $t_w = 0.9$ s, $t_d = 10$ s, b) $t_w = 0.9$ s, $t_d = 20$ s, c) $t_w = 2.5$ s, $t_d = 10$ s, d) $t_w = 2.5$ s, $t_d = 20$ s.



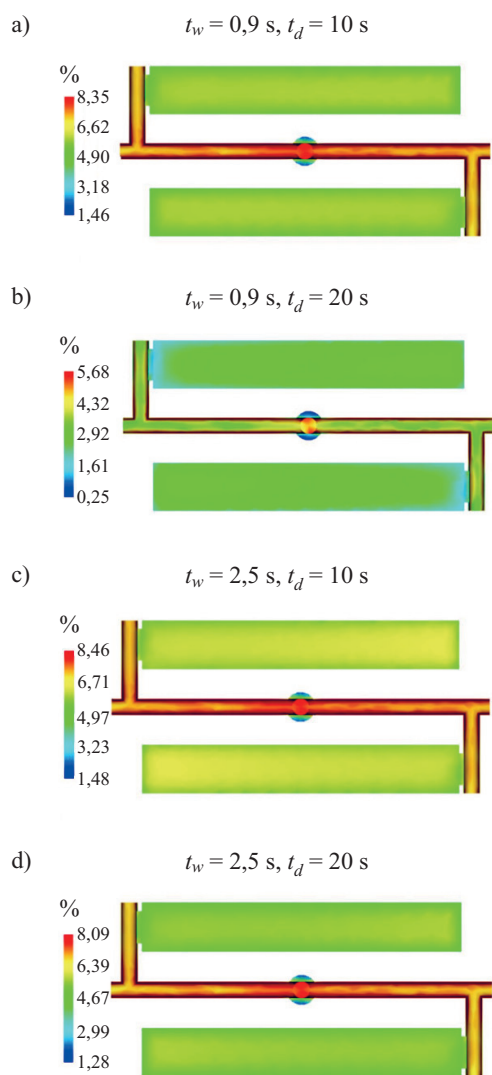
Rys. 12. Zmiana naprężenia określona w kierunku długości wyprasek wytworzonych z zastosowaniem: a) $t_w = 0,9$ s, b) $t_w = 2,5$ s
Fig. 12. Change in stress determined along the length of the parts manufactured using the processing conditions: a) $t_w = 0,9$ s, b) $t_w = 2,5$ s

rzywo w całym gnieździe zestalało się w zbliżonych warunkach — podobne wartości ciśnienia tworzywa. Takie wartości parametrów t_w i t_d procesu są optymalne i t_{ou} nie ma już widocznego wpływu na naprężenia, co udokumentowano na rys. 10, porównując wypraski wytworzone przy optymalnych, pod względem uzyskanych naprężeń, wartościach t_w i t_d , ale przy różnych wartościach czasu opóźnienia uplastyczniania.

Wyniki symulacji komputerowych przeprowadzonych z użyciem programu Autodesk Moldflow 2013 obrazujące naprężenia własne w wypraskach przedstawiono na rys. 11. Potwierdzają one wyniki uzyskane z doświadczeń tzn. fakt, że w wypraskach, które uzyskano przy $t_d = 20$ s występują najmniejsze naprężenia oraz najmniej zróżnicowane na całej długości wypraski. Najmniejsze różnice naprężeń w symulacjach uzyskano w przypadku wypraski otrzymanej w warunkach $t_w = 2,5$ s oraz $t_d = 20$ s (rys. 11d). Przedstawione wyniki z symulacji obrazują naprężenia w momencie usuwania wypraski z formy. Dłuższy czas docisku sprawia, że wypraska opuszczająca formę ma mniejsze naprężenia, które na końcu wypraski nawet zmieniają znak, co uwidoczniło na wykresach na rys. 12.

Skurcz wyprasek jest bardzo ważnym czynnikiem z punktu widzenia praktycznego i jest on jednocześnie zależny od naprężeń. Wraz z rozkładem naprężeń przyjmuje on różne wartości w różnych miejscach wypraski, dlatego w symulacjach komputerowych przedstawia się skurcz objętościowy, który jest około trzykrotnie większy od liniowego.

Długi czas $t_d = 20$ s zapewnia uzyskanie małego skurczu, co widać na rys. 13 i 14. Pomimo dłuższego przebywania w formie spowodowanego dłuższym czasem cyklu, tworzywo poddane długiemu czasowi docisku wykazuje mniejszy skurcz, co jest korzystne z punktu widzenia wytwarzania wyrobów do zastosowań optycznych, ze względu na lepszą stabilność wymiarową i mniejszą tendencję do powstawania wad wyprasek na skutek odkształceń spowodowanych skurczem.

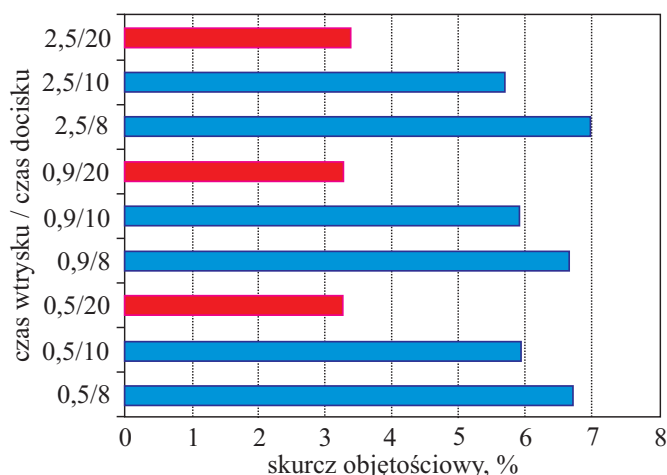


Rys. 13. Zmiana skurczu objętościowego określona w kierunku długości wyprasek wytworzonych w różnych warunkach wtryskiwania opisanych parametrami: a) $t_w = 0,9 \text{ s}, t_d = 10 \text{ s}$, b) $t_w = 0,9 \text{ s}, t_d = 20 \text{ s}$, c) $t_w = 2,5 \text{ s}, t_d = 10 \text{ s}$, d) $t_w = 2,5 \text{ s}, t_d = 20 \text{ s}$, Fig. 13. Change in the volumetric shrinkage determined along the length of the parts manufactured under different injection conditions described by the parameters: a) $t_w = 0,9 \text{ s}, t_d = 10 \text{ s}$, b) $t_w = 0,9 \text{ s}, t_d = 20 \text{ s}$, c) $t_w = 2,5 \text{ s}, t_d = 10 \text{ s}$, d) $t_w = 2,5 \text{ s}, t_d = 20 \text{ s}$

PODSUMOWANIE

Uzyskane w procesie wtryskiwania wypraski z tworzyw transparentnych powinny cechować się niskim stanem naprężeń własnych oraz równomiernym ich rozkładem, co można sprawdzić badając gotowe wyroby metodą elastoptyczną, która pozwala na ocenę rozkładu różnicy naprężeń normalnych.

Podczas wytwarzania metodą wtryskiwania elementów z tworzywa MABS proces należy prowadzić z zachowaniem odpowiednich warunków, zwłaszcza czasu wtrysku i czasu docisku. Już w fazie wtrysku tworzywo w gnieździe powinno być odpowiednio skompresowane, aby uzyskać po procesie równomierny rozkład naprę-



Rys. 14. Wartość skurczu objętościowego w wypraskach wytworzonych z zastosowaniem różnych warunków wtryskiwania określonych jako t_w / t_d

Fig. 14. Volumetric shrinkage values in the parts manufactured under different injection conditions described as t_w / t_d

żeń własnych. W tym celu należy zastosować odpowiednio długi czas wtrysku – nawet przekraczający czas wystarczający do wypełnienia gniazda. Proces wtryskiwania powinien być prowadzony także z odpowiednio długim czasem fazy docisku – takim, aby doszło do zakrzepnięcia tworzywa w przewężce. Pozwala to zapobiec ewentualnemu przepływowi tworzywa przez przewężkę i powstaniu dużych naprężeń w obszarze za przewężką. Podobny efekt, występowania znacznych naprężeń, jest spowodowany przez sprężanie tworzywa w fazie uplastyczniania i jego przepływ do gniazda, gdy tworzywo w przewężce jest jeszcze niezestalone, czyli przy zbyt krótkim czasie docisku. Zastosowanie odpowiednich warunków procesu pozwala również na zminimalizowanie skurczu wyprasek.

Ze względu na zastosowanie określonych, stałych warunków wtryskiwania oraz jednej, wybranej formy wtryskowej o określonych wymiarach gniazda formującego i konstrukcji układu doprowadzania tworzywa oraz układu chłodzenia, wyniki nie powinny być traktowane jako wytyczne dla ogólnego przypadku procesu wtryskiwania dla tego rodzaju tworzywa. Wyniki badań wytworów z tworzywa MABS nie mogą być również przeniesione na inne tworzywa, ponieważ każde tworzywo ma charakterystyczne właściwości optyczne i jest w różnym stopniu podatne na zjawisko powstawania naprężeń własnych w trakcie procesu przetwórstwa.

LITERATURA

1. Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992.
2. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.

3. Bachmacz W., Werner K.: „Wytrzymałość materiałów: studium doświadczalne”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
4. Greener J., Wimberger-Friedl R.: „Processing Injection Molding. Process, Materials and Applications”, Hanser Publisher, Munich 2006.
5. Postawa P., Lubczyńska K., Stachowiak T.: „Impact of processing conditions and shape of moldings on residual stress in injection molded parts”, The Polymer Processing Society, Europe/Africa Regional Meeting, Larnaca, Cyprus 2009.
6. Postawa P., Koszkuł J.: „Warunki przetwórstwa a naprężenia własne w wypraskach wtryskowych wytworzonych z polistyrenu”, Zeszyty naukowe nr 246 – Chemia i technologia chemiczna, 2006, 11, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz, str. 115.
7. Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”, WNT, Warszawa 1984.
8. Adamski M.: „Naprężenia własne, Przykład pomiarów ultradźwiękowych”, Biuro Gamma, Warszawa 1999.
9. Ysayew A. I., Shyu D., Li C. T.: *J. Polym. Sci.* 2006, 44, 622.
10. Postawa P., Kwiatkowski D.: *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 2006, 18, 171.
11. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989.
12. Turnbull A., Maxwell A. S., Pillai S.: *J. Mater. Sci.* 1999, 34, 451.
13. Bachmacz W., Werner K.: „Wytrzymałość materiałów: studium doświadczalne”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
14. Doroszkiewicz R. S.: „Elastoptyka, Stan i rozwój polaryzacyjnooptycznych metod doświadczalnej analizy naprężeń”. PWN, Warszawa 1975.
15. Timoshenko S., Goodier J. N.: „Teoria sprężystości”, Arkady, Warszawa 1962.
16. http://limba.wil.pk.edu.pl/~az/lab/ela_podst.pdf
17. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: „Wytrzymałość materiałów”, t. II, WNT, Warszawa 1997.
18. Wolny A.: „Wytrzymałość materiałów”, t. IV, Wydawnictwo AGH, Kraków 2005.
19. Jaruga T.: „Ustalanie czasu docisku w procesie wtryskiwania” w „Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych” (red. Koszkuł J., Bociąga E.), Częstochowskie Wydawnictwo Archidiecezjalne REGINA POLONIAE, Częstochowa 2006, 100.
20. Radner A. S., Hoffman B.: „Residual stress testing for transparent polymers” w „Medical device and diagnostic industry”, March 1999.
21. Weng T. H., Young W. B., Jiang B. Y.: *Int. Commun. Heat Mass* 2009, 36, 213.
22. Bociąga E., Jaruga T.: *Polimery* 2009, 54, 342.
23. Bociąga E., Jaruga T., Sikora R.: *Polimery* 2009, 54, 522.
24. Postawa P.: *Polimery* 2005, 50, 201.
25. Azdast T., Behravesch A. H., Mazaheri K., Darvishi M. M.: *Polimery* 2008, 53, 304.
26. www.basf.pl
27. www.packaging.basf.com
28. Piechnik S.: „Laboratorium wytrzymałości materiałów”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2002.

Otrzymano 6 VII 2012 r.

W kolejnym zeszycie ukaza się m.in. następujące artykuły:

- A. Dworak, S. Słomkowski, T. Basinska, M. Gosecka, W. Walach, B. Trzebicka — Poliglicydol — synteza i zastosowanie (*j. ang.*)
- K. Jelonek, J. Kasperczyk — Poliestry i poliestrowęgłany w systemach kontrolowanego uwalniania leków. Cz. I. Kontrola uwalniania leków (*j. ang.*)
- K. Kurzepa, K. Różycki, M. Bochyńska, M. Konop, Z. Urbanczyk-Lipkowska, A.W. Lipkowski — Molekularne układy szkieletowe do trójwymiarowych hodowli komórek i tkanek (*j. ang.*)
- K. Jaszcz, J. Łukaszczyk, M. Śmiga-Matuszowicz — Nowe biodegradowalne polimery biomedyczne na bazie kwasu bursztynowego
- J. Kucińska-Lipka, I. Gubańska, H. Janik — Poliuretany modyfikowane polimerami naturalnymi do zastosowań medycznych. Cz. I. Poliuretan/chitozan i poliuretan/kolagen (*j. ang.*)
- A. Utrata-Wesołek — Powierzchnie przeciwdziałające osadzaniu się związków biologicznie aktywnych w zastosowaniach medycznych (*j. ang.*)
- M. Motyl, D. Drozd, K. Kamiński, D. Bielska, A. Karewicz, K. Szczubiałka, M. Nowakowska — Hydroksypropyloceluloza-graft-poli(n-izopropylacryloamid) — nowy rozpuszczalny w wodzie kopolimer wykazujący podwójną termoczułość (*j. ang.*)
- C. Diehl, H. Schlaad — Oddziaływania glikopolioksazolina-lektyna: wpływ struktury ligandu na kinetykę powstawania klastrów (*j. ang.*)
- I. D. Simonov-Emelianov, A. V. Markov, N. I. Prokopov, I. A. Gritskova, N. I. Munkin, L. Hexel — Wpływ samonagrzewania podczas przetwarzania sztywnego i uplastycznionego poli(chloru winylu) na jego stabilność termiczną (*j. ang.*)