

Tomasz Jachowicz¹⁾

TECHNOLOGIA ODLEWANIA ROTACYJNEGO

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano proces odlewania rotacyjnego tworzyw polimerowych. Przedstawiona została klasyfikacja metod odlewania tworzyw polimerowych oraz podstawy realizacji procesu technologicznego odlewania rotacyjnego. Omówiono rozwiązania konstrukcyjne poszczególnych rodzajów maszyn do odlewania rotacyjnego tworzyw. Scharakteryzowano wady i zalety tych maszyn przetwórczych oraz czynniki wpływające na rozwój konstrukcji form i maszyn do odlewania rotacyjnego.

Słowa kluczowe: odlewanie tworzyw, odlewanie rotacyjne, polimery, maszyny do przetwórstwa tworzyw.

WPROWADZENIE

Odlewaniem nazywa się przeprowadzenie tworzywa ze stanu ciekłego, plastycznego lub rzadziej stałego w stan stały bez stosowania ciśnienia bądź pod niewielkim ciśnieniem (zwykle nie przekraczającym 0,3 MPa), przy użyciu formy odlewniczej z jednym lub kilkoma gniazdami formującymi w temperaturze normalnej lub podwyższonej, po czym następuje wyjęcie z gniazda formy odlewniczej przedmiotu, zwanego w tym przypadku odlewem [11]. Odlewanie tworzyw dzieli się na normalne i obrotowe oraz wylanie i zalewanie. Wśród metod odlewania obrotowego wyróżnia się odlewania odśrodkowe oraz odlewanie rotacyjne [3, 11].

Cechą charakterystyczną odlewania normalnego jest swobodne wypełnianie gniazda formującego formy odlewniczej na skutek działania siły grawitacji (przy odlewaniu bezpośrednim, zwanym także bezciśnieniowym) bądź też efekcie działania niewielkiego ciśnienia (podczas odlewania pośredniego, zwanego niskociśnieniowym) [7, 11]. W odlewaniu normalnym wykorzystuje się tworzywa utwardzalne w stanie ciekłym lub plastycznym. Przygotowanie tworzywa odbywa się przed samym procesem odlewania i polega na zmieszaniu (przeważnie mechanicznym) oraz odgazowaniu mieszaniny. Mieszanina do odlewania zawiera dodawane w ustalonej kolejności w określonych proporcjach: polimer, utwardzacz, rozcieńczalnik, napełniacz, środki barwiące, przyspieszacz i inne niezbędne składniki dodatkowe.

Odlewanie obrotowe jest procesem przetwórczym, w którym wykorzystuje się siłę odśrodkową działającą na tworzywo odlewane, znajdujące się w gnieździe formującym formy wewnętrznej dzielonej bądź wykorzystuje się również ciśnienie zewnętrzne.

¹⁾ Katedra Procesów Polimerowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

Przy pomocy odlewania obrotowego wytwarza się przede wszystkim zbiorniki, rury i inne elementy osiowo symetryczne, w szczególności o wyjątkowo dużych wymiarach zewnętrznych, których nie można otrzymać przy zastosowaniu innych metod przetwórstwa polimerów [2, 5]. Podczas odlewania obrotowego załadowana tworzywem forma wykonuje wraz z układem narzędziowym ruch obrotowy lub planetarny, w efekcie czego na ciekłe lub uplastycznione tworzywo oddziałuje siła odśrodkowa. Jeżeli forma odlewnicza wykonuje ruch obrotowy wokół jednej osi, mamy do czynienia z odlewaniem odśrodkowym, natomiast jeśli forma odlewnicza wykonuje wokół dwóch lub więcej osi ruch planetarny, z ewentualnym kołowo-zwrotnym ruchem pomocniczym, wtedy proces takiego odlewania nazywany się odlewaniem rotacyjnym [2, 5, 11].

Wylewanie jest jedną z metod otrzymywania folii i polega na wypływie ze stałym natężeniem tworzywa w stanie plastycznym lub rzadziej ciekłym na przesuwające się podłoże. Grubość folii jest regulowana albo przez odległość między walcami albo przez szerokość szczeliny w głowicy wylewającej [11].

Zalewanie jest odmianą odlewania, którego celem jest regeneracja elementów maszyn oraz zabezpieczanie przed uszkodzeniem lub dostępem powietrza elementów konstrukcyjnych (głównie w elektronice) [11].

ROZWÓJ ODLEWANIA ROTACYJNEGO

Pierwsze przykłady zastosowania odlewania rotacyjnego miały miejsce już kilkaset lat temu, czego przykładem było wytwarzanie przez szwajcarskich cukierników czekoladowych, pustych w środku, jaj [12, 16]. Dziewiętnastowieczny rozwój metalurgii wykorzystał metodę odlewania rotacyjnego do wytwarzania odlewów ze żeliwa i metali nieżelaznych, czego przykładem może być brytyjski patent Petersa z 1855 r. na wytwarzanie pocisków artyleryjskich [15]. Na początku ubiegłego stulecia w Stanach Zjednoczonych przy pomocy odlewania rotacyjnego wykonywano przedmioty z wosku oraz gipsu. W obszarze przetwórstwa tworzyw polimerowych odlewanie rotacyjne po raz pierwszy wykorzystano w latach dwudziestych i trzydziestych XX w. do przetwórstwa polichlorku winylu w postaci plastizolu i wytwarzania początkowo niewielkich elementów z tworzyw, między innymi rękawic, butów i główek lalek, zaś w późniejszym okresie części o większych wymiarach, takich jak słupki drogowe, boje i zderzaki samochodowe [15, 16]. Przykłady przedmiotów wykonanych metodą odlewania rotacyjnego zostały przedstawione na rysunku 1.

Technologia odlewania rotacyjnego najpierw rozwijała się w USA, w Europie rozpowszechniła się w latach sześćdziesiątych XX w. W początkowym okresie szerszy rozwój tej metody przetwórstwa tworzyw ograniczało przekonanie o jej małej wydajności, ograniczonej ilości tworzyw możliwych do przetwórstwa i niewielkiej różnorodności kształtów możliwych do uzyskania. Zdecydowanym przełomem w rozpowszechnieniu się odlewania rotacyjnego w branży tworzyw było opracowanie w końcu lat pięćdziesiątych technologii wytwarzania polietylenu w postaci proszku (Pallmann),



Rys. 1. Przykłady przedmiotów wykonanych metodą odlewania rotacyjnego: lalka z lat pięćdziesiątych XX w. [16], przenośna toaleta, zbiornik i kajak [9]

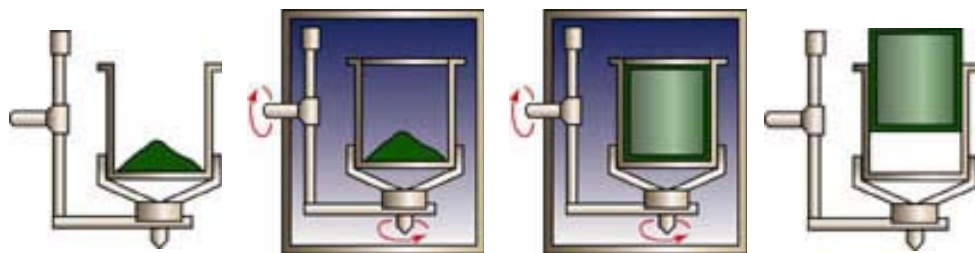
specjalnie na potrzeby odlewania rotacyjnego [15]. W latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych następował stały wzrost wykorzystania odlewania rotacyjnego, spowodowany zwiększeniem się ilości odmian polietylenu możliwego do zastosowania w omawianej technologii, a także wprowadzeniem do niej nowych tworzyw, takich jak PA, PC, PP, PS, ABS. Istotne znaczenie miało pojawianie się nowych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn do odlewania rotacyjnego, czego przykładami są maszyny typu karuzelowego (McNeil), *Rock'n'Roll* (Engel) oraz ogrzewane gorącym olejem (Krauss Maffei) [14]. Lata dziewięćdziesiąte przyniosły skokowy wzrost zastosowania odlewania rotacyjnego, co wiązało się przede wszystkim z możliwością uzyskiwania wyrobów o coraz bardziej skomplikowanych kształtach oraz opracowaniem specjalnych tworzyw dla tej technologii. Wyraźny wpływ na wzrost dynamiki rozwoju odlewania rotacyjnego mają nowoczesne komputerowe systemy sterowania i regulacji oraz pojawienie się programów komputerowych do symulacji i optymalizacji procesu odlewania rotacyjnego (Rotolog™) [9, 10]. Na początku XXI wieku pojawiły się maszyny do odlewania rotacyjnego, w których cały proces wytwórczy udało się zautomatyzować, począwszy do zasypania tworzywa do formy odlewniczej na wyjęciu gotowego odlewu skończywszy (Persico) [9]

PROCES ODLEWANIA ROTACYJNEGO

Odlewanie rotacyjne (ang. *rotational moulding* lub *rotomoulding*) jest jedną z nielicznych metod przetwórstwa tworzyw polimerowych, która umożliwia otrzymywanie elementów z tworzyw typu powłokowego, to znaczy pustych w środku, w jednej operacji technologicznej, bez szwu i śladów łączenia. Cechą charakterystyczną odlewania rotacyjnego jest równomierne rozprowadzenie stopionego tworzywa po ściankach gniazda formującego na skutek działania siły odśrodkowej. W celu wytworzenia siły odśrodkowej o odpowiedniej wartości forma odlewnicza wykonuje ruch obrotowy lub planetarny, co najmniej wokół dwóch osi [2, 6]. Kształt gniazda formującego formy

do odlewania rotacyjnego odzwierciedla zewnętrzną powierzchnię odlewanej zbiornika, podczas gdy powierzchnia wewnętrzna jest kształtowana swobodnie na skutek ruchu tworzywa pod wpływem siły odśrodkowej. W omawianej technologii forma jest dzielona i składa się z kilku części, a jej budowa jest uzależniona od kształtu odlewu i konieczności takiego ułożenia linii podziału formy, aby umożliwić poprawne usunięcie gotowego odlewu z formy [3, 5, 6]. Tworzywo jest wprowadzane do formy najczęściej w postaci proszku lub mikrogranulek, po czym na skutek ogrzewania formy odlewniczej ulega stopieniu w jej gnieździe. Forma do odlewania rotacyjnego jest ogrzewana przy pomocy gazów spalinyowych lub gorącego powietrza. Ruch spalin ogrzewających formę wzmagany jest przez wentylator, co powoduje wyrównanie temperatury w całej komorze i poprawę współczynnika wnikania ciepła do formy. Forma odlewnicza posiada gniazdo o kształcie i wymiarach odpowiadających kształtowi i wymiarom zewnętrznym odlewu, dzięki czemu gotowy odlew nie zawiera naddatków materiału po wyjęciu z formy, bowiem ewentualny nadmiar (lub niedomiar) tworzywa nie zmienia kształtu odlewu, a jedynie wpływa na grubość ścianek. Zestalenie (lub utwardzenie) tworzywa następuje w obracającej się formie, którą po zastygnięciu odlewu zatrzymuje się, otwiera i z jej gniazda wyjmuje gotowy element [2, 6, 13]. Otrzymywane odlewy, niekoniecznie wydrążone, dają możliwość efektywnego konkurowania tej technologii w niektórych obszarach zastosowań z technologiami wtryskiwania lub wytłaczania z rozdmuchiowaniem.

Odlewanie rotacyjne jest procesem cyklicznym i wyróżnia się w nim następujące fazy: załadunek, ogrzewanie, chłodzenie oraz wyładunek, przedstawione na rysunku 2 [5, 6, 13]. W fazie załadunku do otwartej formy wsypywana jest odważona porcja tworzywa, najczęściej w postaci proszku. Jeżeli tworzywo przed rozdrobieniem do postaci proszku nie było barwione, wówczas barwnik w postaci proszku jest mieszany z proszkiem tworzywa przed załadunkiem. W fazie nagrzewania forma jest już zamknięta i rozpoczyna się jej nagrzewanie w sposób zależny od rodzaju maszyny. Wtedy sproszkowane tworzywo przechodzi w stan plastyczny lub ciekły i na skutek siły odśrodkowej wywołanej ruchem obrotowym formy zaczyna przylegać do powierzchni ścianek formy. Najczęściej stosowanymi zamknięciami do formy są szybko zwalniane zaciski. Faza chłodzenia zaczyna się w momencie, w którym zakończy się etap równo-



Rys. 2. Fazy procesu odlewania rotacyjnego: od lewej – załadunek, ogrzewanie, chłodzenie i wyładunek [9]

miernego pokrywania ścianek formy odlewniczej tworzywem, zapewniający osiągnięcie założonej uprzednio grubości ścianki odlewu. Po wyłączeniu grzania i rozpoczęciu chłodzenia (zazwyczaj zimnym powietrzem) ruch planetarny formy wciąż jest kontynuowany, a tworzywo stopniowo zestala się przyjmując ostateczny kształt odlewu. W fazie wyładunku, po czasie, gdy tworzywo ostygnie do temperatury, w której utrzymuje stały kształt i możliwe jest wyciągnięcie wyrobu bez jego odkształcenia, forma jest otwierana, a odlew zostaje usunięty z formy. Następnie kolejna odmierzona porcja proszku tworzywa jest wprowadzana do formy i proces się powtarza [5, 13].

Istotą tej odmiany odlewania jest odpowiednia zależność między prędkościami obrotowymi wokół poszczególnych osi, gwarantująca zachowanie właściwej grubości ścianek odlewu i jego żadaną jakość. Wzajemny stosunek prędkości ruchu obrotowego wokół poszczególnych osi ma podstawowy wpływ na kierunek ruchu tworzywa wewnątrz formy, jednorodność jego rozprowadzenia oraz równomierność grubości ścianek [3, 4, 13]. Często stosunek tych prędkości jest określany w warunkach produkcyjnych dla poszczególnych rodzajów odlewów wyłącznie metodą doświadczalną i jest objęty ścisłą tajemnicą firmową.

MASZyny DO ODLEWANIA ROTACYJNEGO

Występowanie wielu odmian maszyn do odlewania rotacyjnego wynika z wielu czynników, wśród których do ważniejszych zalicza się: duże zróżnicowanie pod względem kształtu i wymiarów elementów z tworzyw wykonywanych tą metodą przetwórstwa, wpływające bezpośrednio na wielkość formy odlewniczej i współpracującej z nią maszyny przetwórczej; następnie sposób nagrzewania form odlewniczych oraz zastosowany rodzaj ich napędu, a także ilość form, decydującą o wydajności odlewania [8, 14]. Nowoczesne maszyny do odlewania rotacyjnego różnią się także stopniem zautomatyzowania procesu.

Można zatem wyróżnić ważniejsze z kryteriów podziału maszyn do odlewania rotacyjnego, którymi są: rozwiązanie konstrukcyjne, sposób nagrzewania formy odlewniczej oraz stopień automatyzacji. Ponadto niektóre z rodzajów maszyn odlewniczych dzielą się dodatkowo według ilości wrzecion (lub zespołów wrzecionowych), wzajemnego ich położenia oraz sposobu sterowania tymi zespołami [8, 14].

Ze względu na rozwiązanie konstrukcyjne maszyny do odlewania rotacyjnego można podzielić na [8, 9]:

- wrzecionowe (*Spinner*), w których na wrzecionie jest mocowana pojedyncza forma, otrzymując z układu napędowego jeden ruch wokół własnej osi oraz drugi ruch obrotowy wokół osi wrzeciona,
- karuzelowe (*Carousel*), w których na wrzecionie znajduje się rama lub ramy mocujące; na których osadza się kilka lub kilkanaście form odlewniczych; formy odlewnicze nie są napędzane bezpośrednio, tylko razem z ramą wykonują ruch planetarny pochodzący od wrzeciona,

- liniowo-wahadłowe (*Shuttle*), w których układy wrzecionowe zsynchronizowane parami zajmują określone położenie w stosunku do komory grzejnej,
- skorupowe (*ClamShell*), w których zamykana od góry komora służy zarówno do nagrzewania jak i do chłodzenia,
- kołyskowe (*Rock'n'Roll*), w których forma odlewnicza obraca się wokół swojej osi wewnątrz komory grzejnej, wykonującej jednocześnie ruch wahadłowy, w nowszej wersji maszyn kołyskowych przeznaczonych do mniejszych odlewów komora grzejna nie występuje, a ogrzewana przy pomocy palników forma odlewnicza jest osadzona na poruszającym się wahadłowo łożu.

Przykłady konstrukcji maszyn do odlewania rotacyjnego przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5. Z uwagi na sposób nagrzewania formy odlewniczej wśród maszyn do odlewania rotacyjnego występują maszyny z formami ogrzewanymi pośrednio (w komorze grzejnej przy pomocy gorącego powietrza) lub bezpośrednio (rezystancyjnie lub płomieniowo, bez występowania komory grzejnej).

Z punktu widzenia stopnia zautomatyzowania procesu przeważająca część maszyn do odlewania rotacyjnego umożliwia tylko częściową automatyzację (napełnianie formy i usuwanie odlewu może być wykonywane jedynie ręcznie), natomiast nieliczne najnowsze rozwiązania konstrukcyjne umożliwiają całkowitą automatyzację, począwszy od napełnienia formy odlewniczej, a skończywszy na odbieraniu gotowego odlewu przy pomocy robotów.

Najczęściej występujące maszyny o konstrukcji wrzecionowej oraz karuzelowej klasyfikuje się ponadto według ilości wrzecion (funkcjonujących także jako niezależne zespoły wrzecionowe). Według tego kryterium maszyny do odlewania rotacyjnego tworzyw polimerowych można podzielić na pojedyncze (wyposażone w jeden zespół, po kolei obsługujący kolejne stanowiska robocze); podwójne (wyposażone w dwa zespoły, występują w maszynach o konstrukcji liniowo-wahadłowej), potrójne (najczęściej spotykane, wyposażone w trzy zespoły, obsługujące jednocześnie każde ze stanowisk roboczych maszyny do odlewania rotacyjnego) oraz wielokrotne (występujące w rozwiniętych konstrukcjach maszyn o konstrukcji liniowo-wahadłowej lub rewolwerowej) [9, 14].



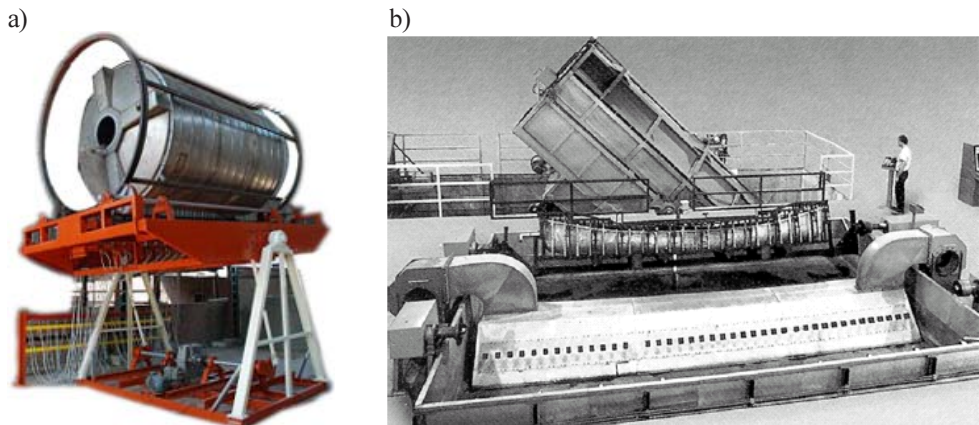
Rys. 3. Maszyny do odlewania rotacyjnego: od lewej – wrzecionowa i karuzelowa [9]



Rys. 4. Maszyny do odlewania rotacyjnego: od lewej – wahadłowa i skorupowa [9]

Zgodnie z kryterium wzajemnego położenia układów wrzecionowych maszyny do odlewania rotacyjnego mogą być rewolwerowe (wrzeciona lub zespoły wrzecionowe poruszają się względem głównej osi maszyny, zazwyczaj pionowej, w niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych także poziomej) lub szeregowe (zespoły wrzecionowe wykonują ruch liniowy w stosunku do komory grzejnej).

Ze względu na sposób sterowania zespołów wrzecionowych maszyny do odlewania rotacyjnego mogą mieć zespoły wrzecionowe sterowane i napędzane centralnie (kiedy wszystkie wrzeciona są konstrukcyjnie osadzone w jednym zespole wrzecionowym, a jego źródło napędu stanowi główny wał napędowy) oraz na sterowane i napędzane niezależnie (wówczas każde wrzeciono posiada niezależne źródło napędu i jest osadzone w odrębnym zespole wrzecionowym) [8].



Rys. 5. Maszyny do odlewania rotacyjnego typu Rock'n'Roll: a) bez komory grzejnej z formą ogrzewaną bezpośrednio palnikami gazowymi, b) z komorą grzejną [9]

WADY I ZALETY

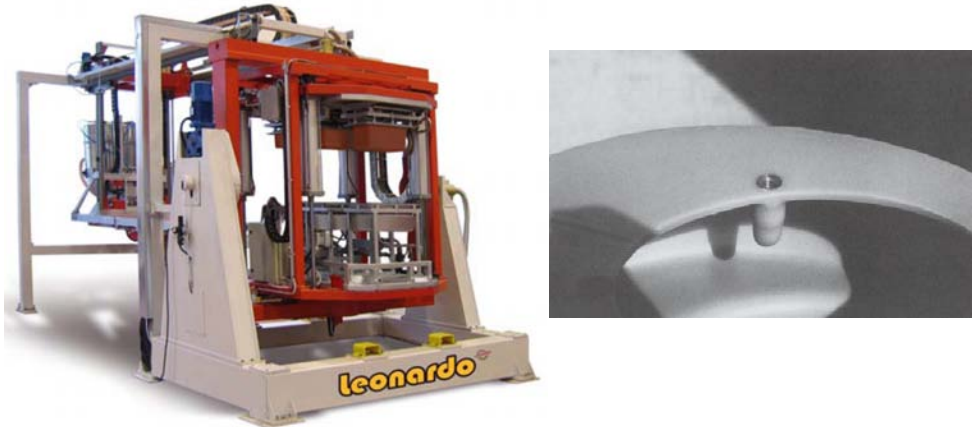
Odlewanie rotacyjne jest jedyną z metod przetwórstwa tworzyw umożliwiającą wytwarzanie elementów powłokowych o dużych i bardzo dużych wymiarach, których przykładami mogą być zbiorniki, pojemniki, kosze na śmiecie, rury z kołnierzem, korpusy, obudowy i inne. Części odlewane rotacyjnie są jednorodne, bez szwu i linii łączenia. Swoboda przemieszczania się tworzywa po ściankach formy i powolne ochładzanie powodują eliminację zniekształceń powodowanych skurczem przetwórczym oraz minimalizują naprężenia wewnętrzne w otrzymanych odlewach, natomiast zmniejszanie się wymiarów odlewu podczas ochładzania ułatwia późniejsze wyjmowanie odlewu z formy. Przy pomocy odlewania rotacyjnego można otrzymywać elementy z tworzyw o masie od kilkudziesięciu do kilkuset kilogramów, co jest niemożliwe do osiągnięcia ani przy wtryskiwaniu ani przy wytłaczaniu, z uwagi na konstrukcyjne ograniczenia tych maszyn przetwórczych [3, 6, 13].

Wśród pozostałych metod przetwórstwa tworzyw polimerowych odlewanie rotacyjne wyróżnia się stosunkowo niskim kosztem przygotowania produkcji, spowodowanej niższym kosztem wykonania form odlewniczych (o wiele niższym niż form wtryskowych) oraz niższym kosztem maszyny. Dzięki temu odlewanie rotacyjne jest wyjątkowo korzystne w przypadku produkcji jednostkowej lub małoseryjnej oraz do wytwarzania części prototypowych.

Podczas odlewania rotacyjnego można w prosty sposób regulować grubość ścianek zbiornika, jedynie przez zmianę masy tworzywa zasypywanego do formy, bez konieczności długotrwałej i kosztowej modyfikacji konstrukcji formy. Zmiana grubości ścianek w poszczególnych obszarach kształtowanego zbiornika może być regulowana przez zmianę wzajemnego stosunku prędkości obrotowej formy wokół osi pionowej i osi poziomej. We wnętrzu formy mogą być mocowane dodatkowe elementy, takie jak tuleje lub trzpienie gwintowane, tarcze, króćce i pierścienie, które zostają pokryte topiącym się tworzywem i po zakończeniu procesu odlewania stają się integralną częścią odlewu (rys. 6). W ten sposób można także zwiększać sztywność ścianek bardzo dużych odlewów, umieszczając w formie żebra usztywniające [3].

Odlewanie rotacyjne jest bezodpadową metodą przetwórstwa. Dzięki temu, że powierzchnia gniazda formującego odzwierciedla finalny kształt zewnętrznej powierzchni odlewu oraz przy prawidłowej konstrukcji formy odlewniczej po zakończeniu odlewania nie występuje odpad technologiczny, tak jak ma to miejsce przy wtryskiwaniu (tworzywo w układzie wlewowym), formowaniu próżniowym (resztki tworzywa po wykrawaniu) czy podczas wytłaczania z rozdmuchiwaniami (okrawane resztki rękawa). Formy odlewnicze są łatwe w konserwacji i czyszczeniu, co pozwala na wytwarzanie kolejnych odlewów z tworzywa o różnych kolorach lub z innego rodzaju tworzywa, bez konieczności żmudnego i czasochłonnego czyszczenia, jak ma to miejsce w przypadku układu uplastyczniającego wtryskarki i kanałów doprowadzających w formie wtryskowej [1, 6, 13].

Jedną z podstawowych wad odlewania rotacyjnego jest stosunkowo długi czas cyklu wytworzenia odlewu i niska wydajność, spowodowana między innymi ręcznym



Rys. 6. Z lewej – całkowicie zautomatyzowana maszyna do odlewania rotacyjnego firmy Persico, z prawej – element z tworzywa odlewany rotacyjnie z metalową tuleją z gwintem [9]

załadunkiem tworzywa i wyjmowaniem gotowego odlewu. Rozwój konstrukcji maszyn do odlewania, głównie wielorzecionowych i liniowo-wahadłowych, pozwala na wzrost wydajności, dzięki jednoczesnej realizacji niektórych faz procesu, najczęściej wyładunku gotowego odlewu z jednej formy połączonego z załadunkiem tworzywa do następnej formy. Inną z wad jest niska sprawność i duża energochłonność procesu, głównie z powodu nagrzewania i chłodzenia formy przy pomocy powietrza. W celu poprawienia bilansu energetycznego opracowano bezpośrednie nagrzewanie formy przy pomocy palników gazowych (w maszynach typu Rock'n'Roll) oraz stosuje się formy odlewnicze z drażnionymi ściankami, w które tłoczony jest gorący olej [5, 6, 13].

Kolejnym ograniczeniem technologii odlewania rotacyjnego jest wąski zakres tworzyw możliwych do przetwórstwa tą metodą. Początkowo jedynym materiałem używanym do odlewania rotacyjnego był polichlorek winylu, współcześnie wiodącą rolę odgrywają różne odmiany polietylenu (ponad 80% udziału), uzupełniane przez inne poliolefiny, głównie polistyren i polipropylen, a także poliwęglan i ABS [3, 9]. Koszt przygotowania tworzyw do odlewania zwiększa dodatkowo konieczność doprowadzenia ich do postaci proszku lub mikrogranulek. Procesy przygotowawcze oraz późniejsze długie przebywanie tworzywa w podwyższonej temperaturze podczas formowania odlewu mogą powodować jego degradację, co może obniżyć właściwości mechaniczne tworzywa, a w konsekwencji pogorszyć właściwości użytkowe odlewu.

Na etapie projektowania specyfika odlewania rotacyjnego wymusza odpowiednią konstrukcję odlewów, w której należy unikać ostrych krawędzi i gwałtownych zmian wymiarów (na przykład średnicy). Z tego powodu odlew musi być zaprojektowany w taki sposób, by tworzywo miało swobodny dostęp do wszystkich powierzchni gniazda formującego, co gwarantuje prawidłowy przebieg procesu odlewania rotacyjnego i bezpieczne wyjęcie gotowego odlewu. W przypadku umieszczania w formie dodatkowych elementów (ze stopów metali lub innych tworzyw) należy zwrócić uwagę na

współczynnik rozszerzalności cieplnej tych materiałów, aby podczas późniejszego ochładzania i kureczenia się odlewu nie dochodziło do spowodowanych nadmiernymi naprężeniami pęknięć lub deformacji [2, 5, 13].

PODSUMOWANIE

Odlewanie rotacyjne należy aktualnie do najintensywniej rozwijających się metod odlewania tworzyw polimerowych. Traktowane początkowo jako jedyna z metod umożliwiających otrzymywanie w jednym procesie wielkogabarytowych pojemników z tworzyw o jednorodnej konstrukcji (bez szwów i linii łączenia), w ostatnich latach stało się konkurencyjną dla innych metodą przetwórstwa, pozwalającą na wytwarzanie nie tylko osiowosymetrycznych pojemników o wyjątkowo dużych wymiarach, ale także części drażonych o skomplikowanych kształtach i niewielkich wymiarach, wykonywanych zarówno z tworzyw sztywnych jak i elastycznych.

Ostatnie lata przyniosły wyraźny rozwój technologii odlewania rotacyjnego, niekiedy określanego jako innowacyjny proces przetwórczy [1], choć w istocie jest znany, jako taki, od wielu lat. Na takie oceny wpływają głównie nowoczesne metody sterowania i regulacji procesu odlewania rotacyjnego, wprowadzenie nowych rodzajów tworzyw możliwych do przetwarzania tą metodą oraz nowe rozwiązania konstrukcyjne maszyn do odlewania i form odlewniczych. Dzięki temu odlewanie rotacyjne przestało być uważane za zastępczą metodę przetwórstwa, uzasadnioną tylko w nielicznych, specjalnych zastosowaniach, ale stało się metodą konkurencyjną w stosunku do wtryskiwania z rozdmuchiwaniami i wyłaczania z rozdmuchiwaniami, jednocześnie zachowując wszystkie dotychczasowe zalety związane z wykorzystaniem w produkcji jednostkowej i małoseryjnej wytworów niemożliwych do wytworzenia innymi metodami przetwórstwa.

Niezaprzeczalny wpływ na intensywny rozwój technologii odlewania rotacyjnego tworzyw mają zmiany w konstrukcji maszyn odlewniczych. Wśród podstawowych czynników generujących nowe rozwiązania konstrukcyjne maszyn do odlewania rotacyjnego wymienić należy skrócenie czasu trwania poszczególnych faz procesu i poprawienie wydajności, zmniejszenie zużycia energii oraz udoskonalenie sterowania i regulacji parametrów technologicznych. Konstrukcja maszyn do odlewania oraz form do odlewania rotacyjnego – mimo postępującego rozwoju – jest nadal prostsza i tańsza niż wtryskarek i wyłaczarek, co jest podstawową zaletą przy rozpoczynaniu produkcji w skali małoseryjnej, jednostkowej i prototypowej. Pojawiające się metody numeryczne symulacji odlewania rotacyjnego [10] pozwalają na uniknięcie dotychczas długotrwałych prób w doborze stosunku prędkości obrotowych wokół właściwych osi obrotu, analizę rozkładu temperatury tworzywa i formy oraz ruchu stapianego tworzywa, co pozwala na oszacowanie równomierności grubości ścianki wykonywanych odlewów bez strat materiałowych. Rosnąca wciąż ilość tworzyw możliwych do przetwórstwa metodą odlewania rotacyjnego stanowi dodatkowy stimulator rozwoju konstrukcji maszyn realizujących ten proces przetwórczy oraz współpracujących z nimi form odlewniczych, mający na celu zapew-

nienie zachowania coraz bardziej zaawansowanych warunków przetwórstwa oraz sprośanie rosnącym wymaganiom dotyczącym jakości odlewów i opłacalności wytwarzania elementów z tworzyw otrzymywanych metodą odlewania rotacyjnego.

PIŚMIENNICTWO

1. Bursa J. Rotacyjne formowanie polimerów – ponownie docenione. Seminarium Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn. *Mechanika*, 103, 6-M, 2006: 85.
2. Anandha Rao M., Throne J.M. Principles of rotational molding. *Polymer Engineering and Science*, 12, 4, 2004: 237–264.
3. Beall G. *Rotational Molding. Design, Materials, Tooling and Processing*. Hanser Gardner Publications, Munich 1998.
4. Cramez M.C., Oliveira M.J., Crawford R.J. Optimization of the rotational moulding process for polyolefins. *Proceedings of the I MECH E. Journal of Engineering Manufacture*, 217, 3, 2003: 323.
5. Crawford R.J., Kearns M.P. *Practical Guide to Rotational Molding*. Chem. Tech. Publishing 2003.
6. Crawford R., Throne J.L. *Rotational Moulding Technology*. William Andrew Inc., New York 2002.
7. Heim H.P., Potente H. *Specialized Molding Techniques*. William Andrew Inc., New York 2002.
8. Jachowicz T. Rodzaje maszyn do odlewania rotacyjnego. *Tworzywa Sztuczne i Chemia*, 3, 2009: 72–76.
9. Materiały katalogowe ze stron internetowych firm Clips Poly Engineering, Fixopan, Nartoto, Persico, Plástigi, Rotoline, Rotomachinery Group, Roto Plastic International, Roto Plastics, R.S. Engineers i innych.
10. Olson L.G., Gogos G., Pasham V. Axisymmetric finite element models for rotational molding. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 9, 5, 1999: 515–542.
11. Sikora R. (red.) *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
12. Strona internetowa Rotational Moulding: Process, Polymers & History (www.rotational-moulding.ca).
13. Szostak M. Technologia odlewania rotacyjnego. *Plastics Review*, 4, 17, 2002: 60–68.
14. Szostak M. Maszyny w technologii odlewania rotacyjnego. *Plastics Review*, 2, 21, 2003: 63–65.
15. Szostak M. Krótka historia formowania rotacyjnego. *Association of Rotational Molders International, Biuletyn CEEDtalk 2006*, 2, 4 (wydanie internetowe).
16. Ward N.M. A History of Rotational Moulding. *Plastiquarian – Journal of Plastics Historical Society* 1997, 17. Wersja internetowa z: www.plastiquarian.com.

ROTATIONAL MOULDING TECHNOLOGY

Summary

Information about rotational moulding have been presented in this article. Main principles of this technology and his development have been introduced. Types of rotational moulding machines have been characterized also with rotational moulding tools. The main applications have been introduced and the advantages and disadvantages of rotomoulding have been told over.

Keywords: polymers moulding, rotational moulding, polymers, machines for polymer processing.