

Wpływ technologii otrzymywania gniazd w formach wtryskowych na efektywność przetwarzania tworzyw

Karol Pepliński¹⁾

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.9.8](https://doi.org/10.14314/polimery.2018.9.8)

Streszczenie: Analizowano wpływ technologii wytwarzania gniazd form wtryskowych – ubytkowej (CM) i addytywnej (AM) – na jakość otrzymanych form, jakość wytworów uzyskanych z ich wykorzystaniem, efektywność przetwarzania i szkodliwość oddziaływania środowiskowego zarówno produktów, jak i procesów wytwarzania form/przetwarzania tworzyw polimerowych. Oceny dokonano na podstawie wartości wskaźników stanów postulowanych odpowiadających modelom matematycznym efektywności ekonomicznej, energetycznej i ekologicznej procesu, a także szkodliwości środowiskowej produktu i procesu przetwarzania tworzyw, opartych na badaniach doświadczalnych w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: zrównoważone wytwarzanie, efektywność energetyczna, formy wtryskowe, formowanie ubytkowe, formowanie addytywne.

The influence of cavity mold making technology on the efficiency of plastics processing

Abstract: The influence of injection mold manufacturing methods – cutting (CM) and additive (AM) – on the quality of obtained molds and parts produced from them, processing efficiency and harmfulness of environmental impact of the products and mold making/plastic processing methods was investigated. The assessment was made on the basis of the indicator values for postulated states corresponding to the mathematical models of the economic, energy and ecological process efficiency as well as the environmental harmfulness of the product and plastic processing method based on experimental research under real conditions.

Keywords: sustainable manufacturing, energy efficiency, injection molds, cutting manufacturing, additive manufacturing.

Tworzywa polimerowe, stanowiące obecnie jedne z najbardziej wartościowych materiałów, odgrywają istotną rolę w gospodarce światowej [1]. W Europie w roku 2015 wykorzystano łącznie 49 mln ton tworzyw polimerowych w różnych obszarach gospodarki, w tym najliczniej w branży opakowaniowej (39,9 %), budowlanej i konstrukcyjnej, w motoryzacji, produkcji AGD i medycynie [2]. Wtryskiwanie to jeden z powszechnie wykorzystywanych procesów produkcyjnych, charakteryzujący się dużą precyzją wykonania wyrobu i zapewniający efektywność ekonomiczną masowej produkcji [1, 3]. Wytworzenie w tej technologii określonych polimerowych elementów wymaga wykonania gniazd formujących, a następnie całych form [4].

Znane są różne technologie otrzymywania form do przetwórstwa (np. wtryskiwania) tworzyw, w tym naj-

liczniejsze są technologie ubytkowe CM [5] (ok. 98 %) oraz addytywne AM (ok. 2 %, dane szacunkowe na podstawie [4, 6, 7]). Każda z tych technologii jest stosowana w zależności od pożądanej geometrii form i planowanych cech użytkowych wytworu (wypraski). Obecnie wykorzystuje się formy o bardzo zróżnicowanej masie, od 0,02 do ok. 50 Mg. W wypadku form do wytwarzania wyprasek o stosunkowo dużej złożoności geometrycznej technologii ubytkowe wykonania gniazd w formie są czaso- i energochłonne, a także bardzo często nie zapewniają odpowiedniej jakości formowanych w nich wyprasek [8]. Ostatnio zarówno narzędzia, jak i procesy przetwórstwa tworzyw projektuje się z uwzględnieniem kryteriów prośrodowiskowych [9], a także redukcji kosztów wytwarzania i polepszenia jakości produktów. Ważnym czynnikiem rozważanym na etapie projektowania jest m.in. typ układu chłodzenia – tradycyjny liniowy lub konformalny – oraz jego geometria, budowa i rozmieszczenie [10]. Wytwarzanie i następnie eksploataowanie w przetwórstwie tworzyw polimerowych energo- i dzięki temu ekoefektywnych oraz wysoko wy-

¹⁾ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Instytut Technik Wytwarzania, Zakład Inżynierii Materiałowej i Przetwórstwa Tworzyw, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 87-796 Bydgoszcz, e-mail: karolpep@utp.edu.pl

T a b e l a 1. Porównanie technologii wytwarzania, ubytkowej CM z addytywną AM, gniazd wykonanych w formie [15]

T a b l e 1. Comparison of cavity mold making technology: cutting CM and additive AM [15]

Wytwarzanie form wtryskowych						
Etap	Wytwarzanie gniazda w formie metodą skrawania (CM)	Średni czas operacji, h	Łącznie h	Wytwarzanie gniazda w formie metodą addytywną (AM)	Czas operacji h	Łącznie h
1	Przejęcie rysunku detalu	16	536	Projekt CAD3D wkładki gniazda formy z chłodzeniem wykorzystujący optymalizację na podstawie komputerowej symulacji wtrysku; oszacowanie skrócenia czasu cyklu w warunkach chłodzenia konformalnego	32	100–148
2	Konstrukcja technologiczna detalu	50		Przygotowanie danych STL do procesu addytywnego	8	
3	Zamówienie materiału i normalia	8		Czynności przygotowawcze na maszynie generatywnej	2	
4	Cięcie materiału i obróbka zgrubna	50		Uruchomienie procesu addytywnego budowania gniazda formy	18–64	
5	Ustalanie i programowanie obróbki ubytkowej w środowisku CAM	40		Czynności końcowe procesu addytywnego i przygotowanie detalu gniazda formującego do obróbki finalnej	9	
6	Obróbka m.in.: frezowanie, szlifowanie, drążenie, wiercenie, hartowanie	240		Obróbka finalna gniazda formy	16	
7	Prace ślusarskie, gwintowanie, zaślepianie otworów i wstawianie przegród wodnych, pasowanie, ustalanie położenia, polerowanie	70		Analiza termowizyjna i optymalizacja parametrów przepływu chłodziwa w gnieździe wykonanym w formie	4	
8	Przygotowanie formy do prób	26		Integracja wkładki formującej z całym systemem formy	10	
9	Próby formy i przekazanie formy do produkcji	36		Optymalizacja czasu cyklu wtryskowego wykonywana podczas prób na wtryskarce, przekazanie formy do produkcji	3	

dajnych ekonarzędzi wtryskowych lub rozdmuchowych nabiera coraz większego znaczenia ze względu na istotny wpływ zagadnień energetycznych na kształtowanie czynników szkodliwego oddziaływania na środowisko naturalne [11], a także na zrównoważony rozwój branży przetwórstwa tworzyw [12]. Udział technologii wtryskiwania w przetwórstwie tworzyw stale rośnie. W roku 2010 na świecie metodą wtryskiwania przetworzono 80 Gg tworzyw polimerowych, a szacuje się, że w roku 2018 będzie to poziom 116 Gg [6, 13], co oznacza średnioroczny wzrost 4,9 %. Rynek przetwórstwa wtryskowego tworzyw osiągnie w 2020 r. wartość 16,2 mld dolarów [14]. Istotnym wymogiem rynkowym jest skracanie produkowanych serii wyprasek, a jednocześnie zwiększanie częstotliwości i szybkości wprowadzania nowych wyrobów, otrzymywanych po obniżonych kosztach. Spełnienie tych uwarunkowań ułatwia zastosowanie do wytwarzania gniazd w formie technologii addytywnych. Porównanie dotychczas wykorzystywanej metody wytwarzania (ubytkowo CM) wkładek formujących z nową techniką otrzymywania gniazd wykonanych w formie (addytywnie AM) przedstawia tabela 1 [15].

Pierwsze badania naukowe i wdrożeniowe z tej dziedziny w Polsce i w Europie przeprowadzono w 2008 r. w ramach projektu Hiper moulding [16]. Kolejne wykonano w ramach wdrażania technologii addytywnych w przetwórstwie tworzyw polimerowych [4, 5]. Cechą charakterystyczną gniazd wykonanych w formach wtryskowych z zastosowaniem technologii addytywnych jest obecność kanałów chłodzących o cechach konformalnych. Takie rozwiązanie w istotnym stopniu poprawia charakterystykę chłodzenia form (skraca czas cyklu chłodzenia) i podwyższa jakość uzyskanych wyprasek [9, 15]. Z dostępnej literatury wiadomo także, że kolejne techniki addytywne (techniki nowej generacji AM_n) znajdują zastosowanie w modułowych centrach obróbki, a ich celem będzie przyspieszanie przebiegu zróżnicowanych operacji technologicznych w procesie wytwarzania narzędzi [7].

Stosunkowo niedawno ukazały się publikacje dotyczące efektywności energetycznej i wpływu środowiskowego technologii wtryskiwania. Prace skupiają się głównie na ocenie procesów realizowanych z zastosowaniem form tradycyjnych i zróżnicowanego parku

T a b e l a 2. Zestawienie wybranych określeń stanów postulowanych

T a b l e 2. Selected definitions of postulated states

Lp.	Parametr	Zależność
1	Jakość	$J_{f(w)} \Rightarrow \text{maks} = 1$ $J_{f(w)} = \frac{J_{pw} - L_{bw}}{J_f = J_w}$ gdzie: L_{bw} – liczba braków wyprasek w danej technologii CM i AM, $J_{f(w)}$ – jakość wytwarzania formy i wypraski, J_{pw} – jakość postulowana wzorcem, określono jako 1
2	Wydajność	$W \Rightarrow \text{maks, obejmująca:}$ <ul style="list-style-type: none"> – zredukowanie czasu wytwarzania formy W_{tr} %, – wzrost produktywności form W_{ptr} %, – wydajność godzinową przetwórstwa tworzyw W_{gp} kg/h, – wzrost wydajności godzinowej przetwórstwa W_{gw} %, – liczba sztuk wyprasek wytwarzanych w jednej formie L_{CM}; L_{AM} szt., – ogólna liczba sztuk wytworzonych wyprasek L_{CM}; L_{AM} szt.
3	Jednostkowe zapotrzebowanie energii	$E_j \Rightarrow \text{min, obejmujące:}$ <ul style="list-style-type: none"> – jednostkowe zużycie energii wytwarzania formy E_{wtr} MWh/szt., – jednostkowe zużycie energii na cykl wtryskiwania E_{cw} Wh
4	Efektywność: – energetyczna – ekologiczna – ekonomiczna	$E_{en} = \frac{\Delta E_{en}}{n_{en}}$ $E_{eko} = \frac{\Delta E_{eko}}{n_{eko}}$ $E_{ekon} = \frac{\Delta E_{ekon}}{n_{ekon}}$ gdzie: E – wskaźnik efektywności, n – nakłady energii, finansów, zasobów środowiskowych, Δ – korzyści energetyczne, ekonomiczne, ekologiczne
5	Obciążenie procesowe α	$\alpha = \frac{E_{pt}}{W_p} \Rightarrow \text{min}$ E_{pt} – zużycie energii w przetwórstwie tworzyw, kWh, W_p – wielkość produkcji wyprasek, kg
6	Specyficzna konsumpcja energii SEC	$SEC = \frac{E_{cw}}{m} \Rightarrow \text{min}$ E_{cw} – jednostkowe zużycie energii w cyklu wtryskiwania, Wh, m – masa wypraski, g
7	Szkodliwość oddziaływania środowiskowego N	$N \Rightarrow \text{min, obejmująca:}$ <ul style="list-style-type: none"> – emisyjność CO₂ w procesie wytwarzania 1 formy N_f Mg, – redukcja emisyjności wytwarzania form N_{tr} %, – emisyjność CO₂ w procesie przetwórstwa 1 Mg tworzywa N_{ptr} Mg, – redukcja emisyjności w przetwórstwie tworzyw N_{ptr} %

wtryskarek [1, 8, 12, 13, 15, 17]. Wskazują także na wieloczynnikowość wpływu na zużycie energii w przetwórstwie wtryskowym [18], jak również na wykorzystanie oprogramowań wspomagających ocenę cyklu życia LCA (ang. *Live Cycle Assessment*) w odniesieniu do procesu wtryskiwania, np. Ecoinvent [19]. W publikacji [9] zaproponowano nowe podejście do wyznaczania całkowitego, przybliżonego zużycia energii w procesie wtryskiwania, uwzględniające nie tylko kształt, rodzaj i materiał wypraski, ale także specyfikację formy, wtryskarki i parametrów procesu, co może ułatwić uzyskiwanie form i wyprasek o cechach zrównoważonych. W pracy [20] analizowano obciążenie środowiskowe i energetyczne w odniesieniu do stosunkowo szerokiego zakresu elementów z metali i tworzyw polimerowych, wytwarzanych w technologiach addytywnych, zastosowanych w budowie statków powietrznych. Autorzy [4] podjęli

próbę porównania procesów produkcyjnych wytwarzania gniazd w technologiach ubytkowych i addytywnych z uwzględnieniem efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej zarówno ich otrzymywania, jak i eksploatacji, w szczególności w aspekcie zrównoważonego rozwoju przetwórstwa tworzyw polimerowych.

Na podstawie dostępnych analiz prognozuje się, że na skutek m.in. dynamicznego rozwoju technologii addytywnych oraz hybrydowych (AM i CM) do roku 2020 zmniejszy się zużycie energii w przetwórstwie tworzyw polimerowych [13, 17].

Celem artykułu była analiza wpływu technologii wytwarzania gniazd w formach wtryskowych (metodą ubytkową CM i addytywną AM) na jakość form i wytworów z tworzyw, efektywność przetwarzania i szkodliwość oddziaływania na środowisko produktów oraz przebiegających procesów.

MODEL I STANY POSTULOWANE

Do realizacji postawionego celu zaproponowano autorskie postaci wskaźników [określonych wzorami (1), (2), (3)] odnoszących się do stanów postulowanych miar jakości, wydajności, efektywności i szkodliwości oddziaływania na środowisko procesu wytwarzania gniazd w formach oraz przetwarzania tworzyw polimerowych (tabela 2).

$$SPF(J, W, E, N)_{CM(AM)} = J_f \cdot W_f \cdot \frac{1}{E_{wf}} \cdot \frac{1}{N_f} \cdot E_{ef} > 0 \quad (1)$$

$$SPPT(J, W, E, N)_{CM(AM)} = J_w \cdot W_{gpt} \cdot \frac{1}{E_{pt}} \cdot \frac{1}{N_{pt}} \cdot E_{pt} > 0 \quad (2)$$

gdzie: SPF – wskaźnik stanów postulowanych dla gniazda wytworzonego w formie metodą CM i AM, $SPPT$ – wskaźnik stanów postulowanych dla przetwarzania tworzyw polimerowych z wykorzystaniem form CM i AM, $J_{f(w)}$ – jakość form lub wyprasek, $W_{f(gp)}$ – wydajność produkcji form lub przetwórstwa tworzyw polimerowych, $E_{wf(pt)}$ – zużycie energii na wytwarzanie formy lub w przetwórstwie tworzyw, $N_{f(pt)}$ – emisyjność CO_2 w procesie wytwarzania formy lub w przetwórstwie tworzyw, $E_{ef(ept)}$ – efektywność ekonomiczna wytwarzania formy lub przetwórstwa tworzyw polimerowych.

Do opisu tzw. całkowitego stanu postulowanego wprowadzono wskaźnik SPC , odnoszący się zarówno do wytwarzania form w technologii CM i AM, jak i przetwarzania tworzyw polimerowych z zastosowaniem tych form:

$$SPC(J, W, E, N)_{CM(AM)} = 1 - \frac{SPPT_{CM(AM)}}{SPF_{CM(AM)}} > 0 \quad (3)$$

Stany postulowane dotyczące technologii AM wytwarzania gniazd w formach i produktów tworzywowych (AM) zakładają:

- wyższą jakość form (J_f) i wyprasek (J_w), a także wydajność wytwarzanych form (W_{pt}) i wyprasek (W_{gpt}),
- większą efektywność energetyczną (np. zużycie energii na wytwarzanie formy E_{wf} , jednostkowe zużycie energii w cyklu wytryskiwania E_{cw} itp.), ekologiczną (np. emisyjność CO_2 w procesie wytwarzania form N_f i przetwórstwa tworzyw N_{pt}) i ekonomiczną (np. efektywność ekonomiczna wytwarzania form E_{ef} i przetwórstwa tworzyw E_{ept}) działania narzędzi i procesów technologicznych,
- mniejszą szkodliwość oddziaływania produktu i przebiegających procesów na środowisko (np. emisyjność CO_2 wytwarzania formy N_f i przetwórstwa tworzyw N_{pt}).

Do oceny jakości formy i produktu przetwórstwa służą parametry określone zależnościami nr 1 w tabeli 2, obejmujące zarówno wzorzec, jak i wielkości rzeczywiste wytwarzania form/przetwarzania tworzyw. Jakość wytworzonych form J_f i wyprasek J_w w rozważanym przypadku jest związana ze średnią liczbą braków wyprasek powstałych w wyniku zastosowania w warunkach produkcyjnych danego typu form (ubytkowych, addytywnych). Wysoka jakość wpływa na minimalizację zużycia materiału i energii niezbędnej do produkcji wyprasek. Można też mówić o wzroście jakości wytwarzanych form (J_{wf}) i wyprasek (J_{ww}).

Wydajność całkowita W (zależność nr 2, tabela 2) określa możliwość zwiększenia rocznej produkcji form wtryskowych (wzrost produktywności W_{pt}), a także zwiększenia wydajności przetwarzania tworzyw polimerowych (np. wydajność godzinowa przetwórstwa W_{gpt} i jej wzrost W_w) w wyniku zastosowania udoskonalonych gniazd wytwa-

T a b e l a 3. Dane wejściowe do analizy wartości stanów postulowanych w odniesieniu do technologii ubytkowych (CM) i addytywnych (AM) [23]

T a b l e 3. Input data for analysis of postulated state values with respect to cutting (CM) and additive (AM) technologies [23]

Czynnik	Wartość	
	CM	AM
Liczba wytwarzanych form (zdolność wytwarzania, wydajność wytwarzania form) (W_f), szt./r.	35	95
Średni czas wytwarzania formy (t_f), h	536	124
Całkowite zużycie energii potrzebnej do wytworzenia form (E_{ct}), MWh	105	96,9
Czas pracy wtryskarek w odniesieniu do 148 dni (t_w), h	3552	3552
Masa przetwarzanego tworzywa (m), Mg	496	661
Całkowite zużycie energii potrzebnej do przetwórstwa tworzyw (E_{cpt}), GWh	1,172	1,190
Nakłady na produkcję form, PLN	1 354 300	3 100 000
Zysk z produkcji form (przychód), PLN	1 850 300	3 500 000
Nakłady na produkcję wyprasek, PLN	12 296 000	20 000 000
Zysk z produkcji wyprasek, PLN	13 022 200	23 000 000
Liczba braków wyprasek (L – średnia), %; Mg	5; 24,8	0,5; 3,3
Średnia masa wypraski (m_w), kg; g	0,021; 21	0,024; 24
Średni czas cyklu (t_c), s	55,2	38,6
Stopień złożoności wyprasek	Średni i wysoki	Średni i wysoki

rzanych w konformalnych formach wtryskowych. Wydajność całkowitą definiuje się jako liczbę form wytworzonych w roku oraz masę przetworzonego tworzywa (wydajność roczna) lub jako wydajność godzinową produkcji wyprasek.

Jednostkowe zapotrzebowanie energii na proces roboczy E_j (cykl wtryskiwania, wytwarzanie formy itp.) jest jednym z parametrów określających efektywność procesu (zależność nr 3 w tabeli 2), szczególnie istotnym w odniesieniu do procesów masowych oraz procesów bardzo precyzyjnej obróbki [22].

Efektywność energetyczna E_{en} , ekologiczna E_{eko} i ekonomiczna E_{ekon} określają zależności nr 4 w tabeli 2, pośrednio na podstawie wyznaczonych wydajności, zapotrzebowania energii, emisji gazów, kosztów działania. Efektywność energetyczną można również określić na podstawie obciążenia procesowego α i wartości specyficznej konsumpcji energii SEC [23] (zależności nr 5 i 6 w tabeli 2).

Stopień szkodliwości oddziaływania procesu wytwarzania form i przetwarzania tworzyw (produkcji wyprasek) na środowisko (N) można określić na podstawie emisyjności CO_2 (zależność nr 7 w tabeli 2). Każda za-

oszczędzona 1 GWh energii elektrycznej to zmniejszenie o 960,2 Mg emisji CO_2 [21, 22].

Dane wejściowe

Na potrzeby realizacji zamierzonego celu pozyskano dane wejściowe (tabela 3) na podstawie wyników badań zrealizowanych przez autora [24], z wykorzystaniem metod i technik przedstawionych w publikacjach [23, 25]. Opierając się na danych wejściowych (tabela 3), wyznaczono wartości elementarnych wskaźników postulowanych SPF , $SPPT$ i SPC , jakości, wydajności, efektywności i wpływu środowiskowego w odniesieniu do technologii CM i AM wytwarzania form wtryskowych.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Wynikowe wartości wskaźników stanów postulowanych zestawiono w tabeli 4.

Zastosowanie form wytwarzanych metodą AM każdorazowo umożliwia uzyskanie korzystniejszych niż

T a b e l a 4. Dane wynikowe w odniesieniu do technologii ubytkowych (CM) i addytywnych (AM)

T a b l e 4. Result data with respect to cutting (CM) and additive (AM) technologies

Wskaźnik	Wartość	
	CM	AM
(J) Jakość wytwarzanych form i wyprasek, $J_{f(w)}$	0,95	0,995
(J) Wzrost jakości wytwarzanych form i wyprasek, $J_{wt(ww)}$ %	4,5	
(W) Zredukowanie czasu wytwarzania formy, W_{ter} %	77	
(W) Zredukowanie czasu cyklu wtryskiwania, W_{cw} %	30	
(W) Wzrost produktywności form, W_{pt} %	63	
(W) Wydajność godzinowa przetwórstwa tworzyw, W_{gpt} kg/h	4,11	5,47
(W) Wzrost wydajności godzinowej przetwórstwa, W_w %	25	
(W) Liczba sztuk wyprasek wytwarzanych w jednej formie, $L_{CM}; L_{AM}$ szt.	674 809	289 912
(W) Ogólna liczba sztuk wytworzonych wyprasek w dostępnych formach, $L_{CM}; L_{AM}$ szt.	23 618 315	27 541 640
(E_{en}) Zużycie energii na wytwarzanie formy, E_{wt} MWh/szt.	3	1
(E_{en}) Redukcja zużycia energii na wytwarzanie formy, E_{tw} %	66	
(E_{en}) Zużycie energii na przetwarzanie tworzywa, E_{pt} MWh/Mg	24	17
(E_{en}) Redukcja zużycia energii na przetwórstwo tworzyw, E_{tp} %	29	
(E_{en}) Jednostkowe zużycie energii na cykl wtryskiwania, E_{cw} Wh	4,45	3,158
(E_{en}) SEC , Wh/g	0,21	0,147
(E_{en}) Współczynnik obciążenia procesowego α przetwórstwa tworzyw, kWh/kg	2,4	1,7
(E_{en}) Zredukowanie współczynnika, α_r %	29	
(E_{eko}) (N) Emisyjność CO_2 w procesie wytwarzania 1 formy, N_p Mg	28,81	9,79
(E_{eko}) (N) Redukcja emisyjności w procesie wytwarzania form, N_{fr} %	66	
(E_{eko}) (N) Emisyjność CO_2 w procesie przetwórstwa 1 Mg tworzywa, N_{pt} Mg	2,26	1,73
(E_{eko}) (N) Redukcja emisyjności w procesie przetwórstwa tworzyw, N_{ptr} %	24	
(E_{ekon}) Efektywność ekonomiczna wytwarzania form, E_{ef}	1,36	1,12
(E_{ekon}) Efektywność ekonomiczna przetwórstwa tworzyw, E_{ept}	1,05	1,15

J – jakość, W – wydajność, E_{en} – efektywność energetyczna, E_{eko} – efektywność ekologiczna, E_{ekon} – efektywność ekonomiczna, N – szkodliwość oddziaływania środowiskowego.

J – quality, W – productivity, E_{en} – energy efficiency, E_{eko} – ecological efficiency, E_{ekon} – economic efficiency, N – harmfulness of environmental impact.

w wypadku zastosowania metody CM wartości wskaźników stanów postulowanych.

W odniesieniu do analizowanej jakości stwierdzono wzrost o 4,5 % jakości gniazd w formach wykonanych metodą AM, co bezpośrednio skutkuje zminimalizowaniem liczby braków produkowanych wyprasek.

Wyznaczone wartości wydajności świadczą o tym, że wykorzystanie technologii addytywnych przyczynia się do znacznego zwiększenia całkowitej wydajności produkcji form (o 63 %), a także do wzrostu wskaźnika godzinowej wydajności masowej przetwórstwa tworzyw z 4,11 do 5,47 kg/h (tj. 25 %). Zastosowanie większej liczby gniazd w formach wykonanych techniką AM w odniesieniu do liczby gniazd w formach wykonanych techniką CM pozwala na wytworzenie wyprasek o bardziej zróżnicowanym kształcie geometrycznym, zmniejszenie liczebności partii dla jednej formy, przy jednoczesnym zwiększeniu całkowitej rocznej liczby sztuk produkowanych wyprasek (tabela 4). Jest to zgodne z aktualnymi oczekiwaniami rynkowymi, dotyczącymi coraz częstszych i szybszych zmian profilów produkcyjnych i zmian cech geometrycznych wyprasek.

Zestawione wyniki wskazują możliwości zwiększania efektywności energetycznej fazy zarówno produkcji gniazd w formach wykonanych metodą AM, jak i przetwórstwa tworzyw z ich wykorzystaniem. Zastosowanie technologii addytywnych przyczynia się do zredukowania o 66 % zużycia energii potrzebnej do wytworzenia jednego gniazda w formie (z 3 do 1 MWh/szt), a także zużycia energii w jednym cyklu wtryskiwania (tj. z 4,45 do 3,16 Wh). Zależność tę wyraża także malejąca wartość specyficznej konsumpcji energii *SEC* (przypadającej na 1 gram przetwarzanego tworzywa) z 0,21 do 0,15 Wh/g, co daje 29 % oszczędności. Zwiększenie efektywności energetycznej określono również na podstawie obciążenia procesowego (α) w przetwórstwie tworzyw polimerowych. Średnia wartość α (wyrażona w przeliczeniu na kilogram tworzywa) zmniejszyła się z 2,4 do 1,7 kWh/kg, co daje zredukowanie wartości obciążenia procesowego o 29 %.

Szkodliwość oddziaływania narzędzi i procesu przetwórstwa tworzyw na środowisko wyrażono w odniesieniu do jednego wytworzonego gniazda w formie i do procesu przetwórstwa tworzyw polimerowych. W wypadku form wytwarzanych w technologii CM emisyjność CO₂ wyniosła 28,8 Mg. Wytwarzanie form w technologii AM pozwoliło na zredukowanie emisyjności o 66 %. Zastosowanie gniazd w formach wykonanych metodą AM pozwoliło na zredukowanie emisyjności CO₂ o 25 % w odniesieniu do procesów przetwórstwa tworzyw, z 2,26 do 1,73 Mg w przeliczeniu na każdą tonę przetwarzanego materiału.

Gniazda w formie produkowane w technologiach addytywnych są droższe niż wytwarzane metodami ubytkowymi. Wartość współczynnika E_{ef} jest mniejsza (1,12), niż E_{ef} uzyskana w technologiach ubytkowych (1,36). Natomiast efektywność ekonomiczna w fazie realizacji produkcji wyprasek, w wypadku zastosowania gniazd w formie otrzymanych addytywnie, wyniosła 1,15, a w wypad-

ku form wytwarzanych metodami tradycyjnymi – 1,05. Gniazda w formach wykonane metodą AM pozwalają na uzyskanie korzystniejszych wartości rozpatrywanych wskaźników stanu postulowanego (wartości korzystniejsze to bliższe lub większe od jedności), co potwierdzają wyniki obliczeń (4)–(9) na podstawie danych w tabeli 4.

$$SPF(J,W,E,N)_{CM} = J_f \cdot W_f \cdot \frac{1}{E_{wf}} \cdot \frac{1}{N_f} \cdot E_{ef} = 0,19 \quad (4)$$

$$SPF(J,W,E,N)_{AM} = J_f \cdot W_f \cdot \frac{1}{E_{wf}} \cdot \frac{1}{N_f} \cdot E_{ef} = 0,95 \quad (5)$$

$$SPPT(J,W,E,N)_{CM} = J_w \cdot W_{gpt} \cdot \frac{1}{E_{pt}} \cdot \frac{1}{N_{pt}} \cdot E_{ept} = 0,08 \quad (6)$$

$$SPPT(J,W,E,N)_{AM} = J_w \cdot W_{gpt} \cdot \frac{1}{E_{pt}} \cdot \frac{1}{N_{pt}} \cdot E_{ept} = 0,22 \quad (7)$$

$$SPC(J,W,E,N)_{CM} = 1 - \frac{SPPT_{CM}}{SPF_{CM}} = 0,58 \quad (8)$$

$$SPC(J,W,E,N)_{AM} = 1 - \frac{SPPT_{AM}}{SPF_{AM}} = 0,77 \quad (9)$$

Wyznaczanie określonej wartości dla zaproponowanych wskaźników stanów postulowanych umożliwia wstępną ocenę wytwarzania gniazd w formach wykonanych w technologii CM i AM (wskaźnik *SPF*), a także ocenę realizacji procesu przetwarzania tworzyw (wskaźnik *SPPT*) z zastosowaniem tych form. Możliwe jest także dokonanie całkowitej oceny stanu postulowanego (*SPC*) w odniesieniu do danej technologii wytwarzania form i przetwórstwa tworzyw z ich udziałem.

PODSUMOWANIE

Oceniono wpływ dwóch wybranych sposobów wytwarzania gniazd formujących: tradycyjnej metody ubytkowej CM i addytywnej AM, na jakość otrzymanych form i wytworów z tworzyw, wydajność i efektywność przetwarzania tworzyw polimerowych oraz szkodliwość oddziaływania na środowisko produktów, procesów wytwarzania form i przetwarzania tworzyw.

Zastosowanie technik AM do wytwarzania gniazd w formach pozwala na uzyskanie stosunkowo dużych korzystnych zmian wartości rozważanych wskaźników stanów postulowanych.

Proekologicznym efektem wykorzystania technik AM do wytwarzania gniazd w formie i następnie użycia w warunkach produkcyjnych jest mniejsza szkodliwość oddziaływania na środowisko naturalne w wyniku redukcji zużycia energii i emisji CO₂.

LITERATURA

- [1] Elduque A., Elduque D., Javierre C. i in.: *Journal of Cleaner Production* **2015**, 108, 80.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.119>
- [2] Plastics – the Facts 2016, Plastics Europe, Brussels – Belgium 2016. www.plasticseurope.org
- [3] Kazmer D.O.: “Plastics Manufacturing Systems Engineering. A Systems Approach”, Carl Hanser Verlag, Munich 2009.
<http://dx.doi.org/10.3139/9783446430143>
- [4] Huang R., Riddle M.E., Graziano D. i in.: *Journal of Industrial Ecology* **2017**, 21, 130.
<http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12641>
- [5] Ahn D.G.: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **2011**, 12, 925.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12541-011-0125-5>
- [6] Brøtan V., Berg O.A., Sørby K.: *Procedia CIRP* **2016**, 54, 186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.074>
- [7] Berger R.: Additive Manufacturing – next generation AMnx study 2016.
https://www.rolandberger.com/en/Publications/pub_additive_manufacturing.html (data dostępu 15.01.2018)
- [8] Madan J., Mani M., Lee J.H., Lyons K.W.: *Journal of Cleaner Production* **2015**, 105, 157.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.060>
- [9] Matarrese P., Fontana A., Sorlini M. i in.: *Journal of Cleaner Production* **2017**, 168, 1505.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.144>
- [10] Pepliński K., Bieliński M.: *Polimery* **2015**, 60, 747.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.747>
- [11] European Commission, Energy 2020: “A Strategy for Competitive, Sustainable and Secure Energy”, Luxembourg.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0639:FIN:En:PDF> (data dostępu 15.01.2018)
- [12] Schlüter A.B., Rosano M.: *Journal of Cleaner Production* **2016**, 118, 19.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.037>
- [13] “The New Plastics Economy Rethinking the Future of Plastics”, World Economic Forum, Genewa 2016.
- [14] Allied Market Research: “Injection Molded Plastic Market is Expected to Reach \$162 Billion, Globally, by 2020”.
<http://www.prnewswire.com> (data dostępu 18.01.2018)
- [15] Pepliński K.: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych: aspekty technologiczne i nowe trendy. Część 2” (red. Sasimowski E.), Politechnika Lubelska, Lublin 2016, str. 154.
- [16] “Extreme Cycle Time Reduction of Injection Moulding Processes by Using High Performance Injection Moulds and Moulding Processes”, Hipermoulding raport, 2008, ID: 500319.
- [17] Ruijter E.: “Industry takes the lead: voluntary agreement on energy efficiency in the EU plastic converting sector”, “ECEEE 2012 Summer Study on energy efficiency in industry”, str. 325.
- [18] Spiering T., Kohlitz S., Sundmaeker H., Herrmann C.: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **2015**, 36, 45.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2014.12.010>
- [19] www.ecoinvent.org (data dostępu 18.01.2018)
- [20] Huang R., Riddle M., Graziano D. i in.: *Journal of Cleaner Production* **2016**, 135, 1559.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.109>
- [21] Flizikowski J.: *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* **2011**, 3, 22.
- [22] Flizikowski J., Bieliński K.: “Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency, and Optimization”, IGI GLOBAL, USA 2013.
- [23] Kent R.: “Energy Management in Plastics Processing. Strategies, Targets, Techniques and Tools”, Plastics Information Direct, London 2013.
- [24] Badania zlecone BZ-97/2014/WIM: „Badania określające efektywność wytwarzania gniazd form wtryskowych i przetwarzania tworzyw”, UTP Bydgoszcz.
- [25] Pepliński K.: *Journal of Polish CIMAC* **2011**, 6, 227.

Otrzymano 7 XI 2017 r.

Instytut Chemii Przemysłowej
im. prof. I. Mościckiego
w Warszawie

opracował ogólnokrajową

BAZĘ APARATURY DO OKREŚLANIA CHARAKTERYSTYKI I PRZETWÓRSTWA POLIMERÓW

będącej w posiadaniu uczelni, instytutów PAN i instytutów badawczych.

Baza jest wyposażona w funkcje umożliwiające wyszukiwanie wg zadanych parametrów: nazwy, typu lub modelu aparatu, roku produkcji, producenta, charakterystyki parametrów technicznych, zastosowania do badań, lokalizacji, słów kluczowych, sposobu wykonywania badań, numerów norm, wg których prowadzi się badania, oraz adresu i kontaktu z osobą odpowiedzialną za dany aparat.

Baza jest ciągle uaktualniana.

Dostęp do danych i wyszukiwanie informacji w bazie jest bezpłatne.

Instytucje i firmy zainteresowane zamieszczeniem w bazie informacji o posiadanej aparaturze prosimy o przesłanie danych na adres polimery@ichp.pl

aparaturapolimery.ichp.pl