

Karol BULA<sup>1)</sup>\*, Leszek RÓŻAŃSKI<sup>2)</sup>, Maciej BUCZKOWSKI<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań

<sup>2)</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań

\* Karol.Bula@put.poznan.pl

## Badania procesu wtryskiwania z wykorzystaniem termografii w podczerwieni

**Streszczenie:** W pracy zbadano możliwości wykorzystania kamery termograficznej do analizy procesu wtryskiwania na drodze pomiaru temperatury wypraski wtryskowej i gniazda formującego w funkcji ilości cykli wtryskiwania. Podczas badań wykorzystano wysokoudarowy polistyren (PS-HI), wtryskiwany do formy termostatowanej o temperaturze 22 °C. Do analizy zmian temperatury wyznaczono trzy punkty pomiarowe: T1 (w środku formy), T2 (w miejscu przebiegu układu chłodzącego) oraz T3 (położony w skrajnym narożniku). W trakcie realizacji pracy stwierdzono, że najwyższa temperatura, zarówno formy jak i wypraski występuje w punktach T1 a najniższa w T2. Odnotowano, że wraz ze zwiększaniem liczby cykli wtryskiwania temperatura formy wtryskowej wzrasta znacząco w odniesieniu do temperatury wypraski. Wykazano, że po 18 cyklach wtryskiwania nadal nie uzyskano stabilnej i niezmiennej temperatury formy (rozkład temperatury na powierzchni gniazda).

### INVESTIGATION OF INJECTION MOLDING PROCESS BY USING IR THERMOGRAPHY

**Abstract:** The work concerning the application of infrared camera to analyze the injection molding process by means of measuring the temperature of injection molded parts and injection mold cavity as a function of the number of injection cycles. Mold with single cavity and cold direct runner was used. For making parts high impact polystyrene (PS-HI) was utilized. Mold temperature was set as a 22 °C and was controlled by a water chiller. Three measuring points were determined: T1 (in the middle of the mold), T2 (in the course of the cooling system) and T3 (at the edge of the cavity). Our investigations showed that the highest temperature is localized around point T1 and the lowest temperature is in T2 point, for both investigated objects: mold and the part. Also the studies has proved that increasing of the injection cycle number leads to significant rising mold temperature rather than temperature of injection part.

### 1. Wprowadzenie

Ważną rolę w procesach przetwórstwa techniki wtryskiwania tworzyw polimerowych odgrywają parametry procesu takie jak temperatura tworzywa i narzędzia formującego, ciśnienie tworzywa w fazie wtrysku i docisku. Czynniki te najsilniej determinują właściwości oraz strukturę otrzymanych wyrobów. Wpływanie uplastycznionego polimeru do formy rozpoczyna trwający, aż do momentu usunięcia wyprasek, ciągły proces wymiany ciepła

między wypraską a formą. Dlatego właśnie procesy cieplne obok zjawisk reologicznych w największym stopniu określają zachowanie się tworzywa w formie i właściwości wtryskiwanej kształtki [1-3].

Z tego względu niezbędny staje się taki dobór poszczególnych warunków procesu technologicznego, przede wszystkim nastaw maszynowych temperatury, aby proces mógł być prowadzony efektywnie i stabilnie [1]. Ważną kwestią jest więc zagwarantowanie działania systemów pomiarowych, które pozwalają na

automatyczne wykrywanie wszelkich anomalii w procesie wytwarzania.

Jedną z możliwości monitorowania przebiegu procesu przetwórstwa jest analiza z wykorzystaniem techniki termograficznej. Termografia w podczerwieni zajmuje się detekcją, rejestrowaniem i obrazowaniem niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez ciała. Obraz termograficzny (termogram) jest bogatym źródłem informacji o stanie technicznym maszyn produkcyjnych, przebiegu procesu oraz zmianach, jakie mogą zachodzić podczas jego trwania [4].

Zastosowanie termografii do tworzenia obrazów termicznych w przetwórstwie tworzyw wydaje się szczególnie zasadne, ze względu na możliwość ustalenia i ustabilizowania zakresu zadanych wartości temperatury procesu [5,6].

W przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych metodą wtrysku wykorzystując kamerę termograficzną można dokonać szybkiego pomiaru temperatury na powierzchni formy, a zatem zoptymalizować proces wtrysku. Istnieje możliwość wykrywania węzłów cieplnych w gnieździe formy dzięki analizie termalnej narzędzia. Dokonanie zmian w układzie chłodzenia przyczynić się może do skrócenia czasu cyklu produkcyjnego oraz znacznej poprawy jakości wytwarzanych części.

Obecnie w przetwórstwie tworzyw sztucznych podstawowym wymaganiem jest redukcja kosztów produkcji, na co pozwala zastosowanie techniki termograficznej. Największe rezerwy czasów operacyjnych istnieją w fazie chłodzenia. Wartość ta uzależniona jest od wielu czynników takich jak: rodzaju stosowanego tworzywa sztucznego, konstrukcji układu chłodzenia, przewodności cieplnej elementów formujących, temperatury substancji termostatowanej, grubości ścianek wypraski czy samej jej geometrii [7].

Celem pracy było sprawdzenie zmian temperatury formy i wypraski wtryskowej od pierwszego cyklu wtryskiwania (nie poprzedzonych próbnym rozruchem procesu) z wykorzystaniem pomiarów bezstykowych za pomocą kamery termograficznej. Zaplanowano tak-

że określenie przyrostu temperatury powierzchni wypraski oraz płyty formującej w kolejnych cyklach wtryskiwania a także lokalizację węzła cieplnego.

## 2. Część eksperymentalna

Odczyty wartości temperatury formy wtryskowej jak również wyprasek wtryskowych przeprowadzono przy użyciu kamery termograficznej FLIR T620. Próbkę w kształcie płytki prostopadłościowej o grubości 4 mm wytwarzano z polistyrenu wysokiej udarności Polystyrol 486M, objętościowy wskaźnik szybkości płynięcia  $4 \text{ cm}^3/10\text{min}$ . Zakres temperatury uplastyczniana wynosił  $180 \pm 205^\circ\text{C}$ , nastawa prędkości wtryskiwania wynosiła 75 mm/s. Proces wtryskiwania prowadzono z wykorzystaniem wtryskarki Engel ES 80/20 o sile zwarcia 200 kN. Zastosowano formę zimno-kanalową z wlewem bezpośrednim, z gniazdem o wymiarach  $100 \times 100 \times 4 \text{ mm}$ . Formę chłodzono wodą w układzie kanałów „U”. Temperaturę formy regulowano termostatem z nastawą temperatury:  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Program badań dotyczył wytwarzania wyprasek w formie termostatowanej i jednoczesnej rejestracji zdjęć wyprasek w gnieździe ruchomej części formy zaraz po jej otwarciu (opóźnienie wypychania 5 sekund). Następnie, po czasie 5 sekund (zwłoka czasowa na zapis zdjęcia w pamięci kamery oraz wyformowania wypraski) wykonywano zdjęcie płyty formującej. Praca wtryskarki odbywała się w cyklu półautomatycznym z uwagi na wykonywanie sekwencji zdjęć dla każdego cyklu wtryskiwania ręcznie przez operatora kamery. Czas całkowity cyklu wtryskiwania łącznie z przerwą na wykonanie dwóch zdjęć wynosił przeciętnie 45 s. Wykonano 18 cykli wtryskiwania. Edycja zdjęć przeprowadzana została przy użyciu programu komputerowego ThermoCAM Reporter 2000. Podczas edycji uzyskanych termogramów należało uwzględnić różnicę w emisji promieniowania podczerwonego dla dwóch obserwowanych obiektów: wypraski oraz płyty formującej. W tym celu na



Rys. 1. Zdjęcie prezentujące ustawienie kamery termograficznej FLIR T620 w odniesieniu do obserwowanego obiektu, formy wtryskowej

podstawie danych literaturowych ustalono współczynniki emisyjności dla formy 0,20 (stal chromowana) oraz dla tworzywa przyjęto 0,95. Rysunek 1 przedstawia stanowisko badawcze.

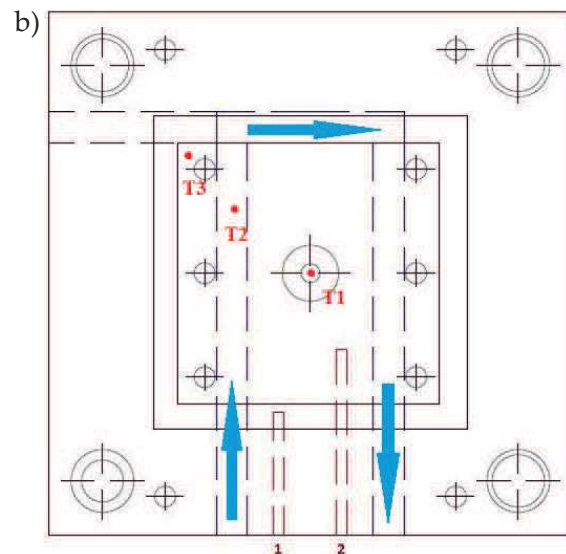
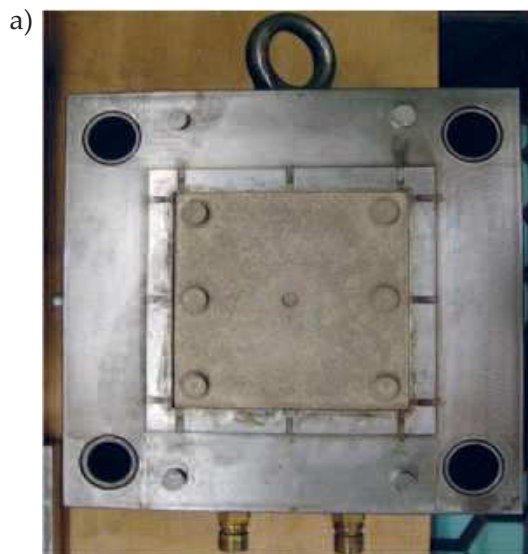
Punkty odczytu temperatury zarówno na powierzchni wypraski, jak i formy umieszczono w części centralnej, w miejscu przebiegu kanału chłodzącego oraz w narożniku. Punkty odczytu temperatury do analizy zmian w

funkcji warunków wtryskiwania ilustruje rysunek 2.

Dokonano pomiarów skurczu wzdłużnego w dwóch kierunkach wzajemnie prostopadłych, wyznaczających dwie osie symetrii wypraski, za pomocą suwmiarki Mitutoyo z dokładnością pomiaru 0,03 mm w zakresie 0-150 mm, po czasie 24h od chwili odformowania wyprasek.

### 3. Wyniki badań

Prezentacja wyników badań zawiera termografy wykonane dla formy wtryskowej oraz dla wypraski znajdującej się w gnieździe formy tuż po jej otwarciu. Na każdym termografie zaznaczono temperatury w trzech punktach zgodnych z lokalizacją podaną na rys. 2b. Opis położenia punktów odczytu temperatury można scharakteryzować następująco: punkt odczytu T1 – środek geometryczny wypraski, miejsce wlewu głównego, zakończenie wlewka, punkt T2 – położenie odpowiadające rzutowi kanału chłodzącego na przecięciu odcinka od środka gniazda do lewego górnego narożnika gniazda formującego, punkt T3 – górny lewy narożnik wypraski oraz gniazda.



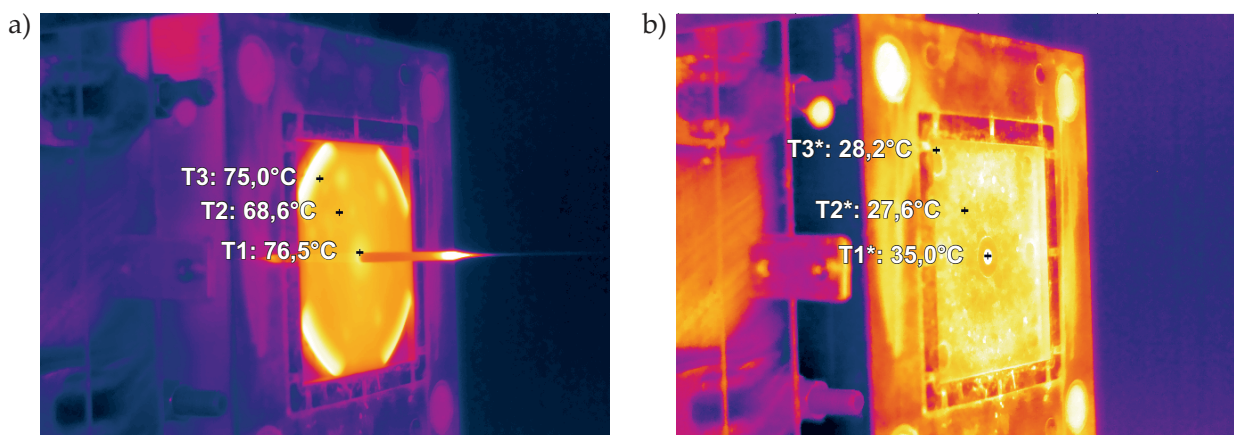
Rys. 2. Ilustracje poglądowe, a) Zdjęcie płyty formującej z zaznaczonymi wypychaczami oraz zabierakiem wlewka, b) rzut płyty formującej wraz z rozmieszczeniem kanałów chłodzących oraz lokalizacją punktów odczytu temperatury (T1, T2, T3)

Rysunki 3-5 przedstawiają kolejno uzyskane termografy dla 5, 10, oraz 15 cyklu wtryskiwania z zaznaczonymi trzema punktami pomiaru temperatury oznaczonymi symbolicznie T1, T2 oraz T3. Pomiar temperatury T1 wyznaczony jest w środku formy i wypraski, T2 w miejscu przebiegu układu chłodzącego, natomiast T3 w punkcie najbardziej oddalonym od środka.

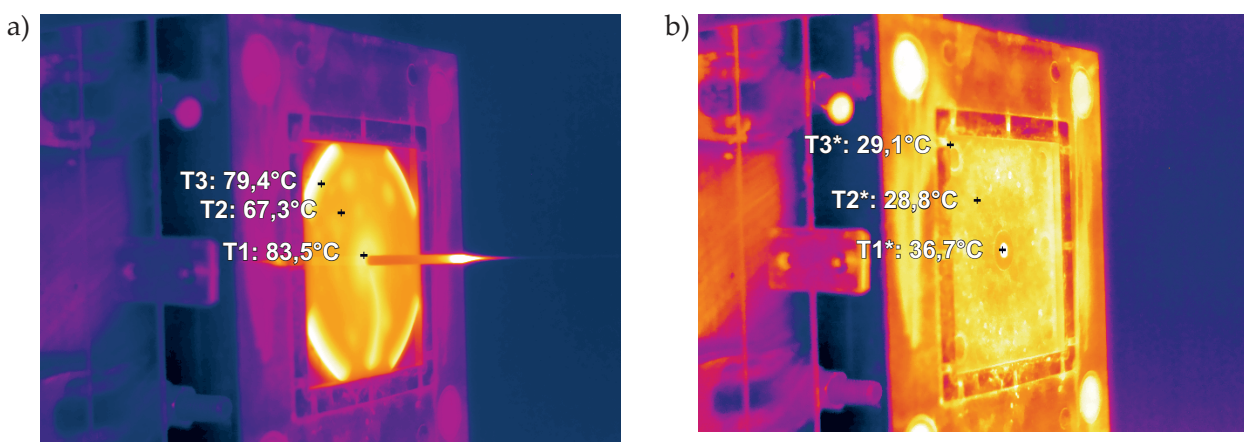
Analizując powyższe termografy można zauważyć, że najwyższa temperatura występuje w punktach T1, najniższa w T2, natomiast wartości pośrednie w punktach T3 zarówno dla formy wtryskowej, jak i dla wyprasek. Punkt T2 znajduje się w miejscu położenia układu chłodzenia, stąd prawdopodobnie naj-

niższa temperatura rejestrowana na termografach. Punkt T1 umiejscowiony jest w centralnej części formy, w miejscu gdzie zlokalizowano zabierak wlewka. Najczęściej zabierak wlewka wyposażony jest w wypychacz trzpieniowy i nie może być bezpośrednio chłodzony przez kanał wiercony w płycie formującej. Dlatego jest to fragment wypraski a także formy o najwyższej temperaturze (węzeł cieplny).

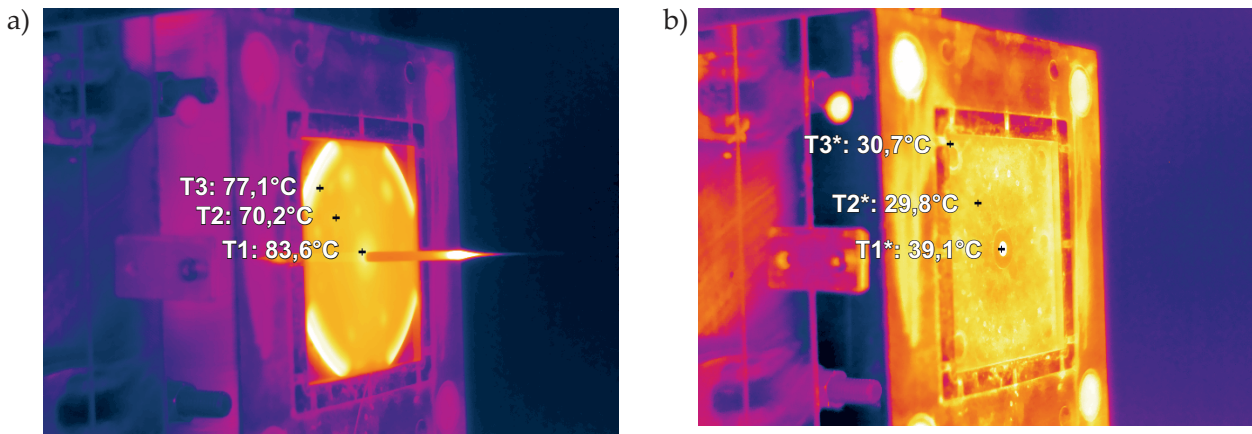
Poniżej przedstawiono wykresy ilustrujące przebieg zmian temperatury formy wtryskowej (rys. 6) oraz zmiany temperatury wyprasek (rys. 7) w wyznaczonych punktach pomiarowych T1, T2 i T3 w kolejnych cyklach wtryskiwania polistyrenu.



Rys. 3. Termografy uzyskane po 5 cyklu wtryskiwania wraz z punktowym odczytem temperatury, a) termogram płyty formującej wraz z wypraską, b) termogram płyty formującej

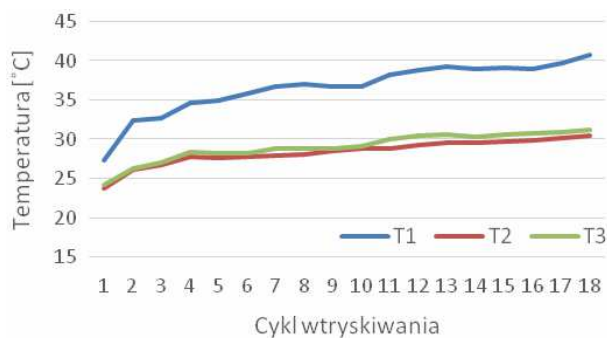


Rys. 4. Termografy uzyskane po 10 cyklu wtryskiwania wraz z punktowym odczytem temperatury, a) termogram płyty formującej wraz z wypraską, b) termogram płyty formującej



Rys. 5. Termografy uzyskane po 15 cyklu wtryskiwania wraz z punktowym odczytem temperatury, a) termogram płyty formującej wraz z wypraską, b) termogram płyty formującej

Z analizy termogramów oraz zbudowanych na ich podstawie wykresów (rys. 6) wynika, iż w kolejnych cyklach wtryskiwania obserwuje się wzrost temperatury odpowiednio we wszystkich punktach pomiarowych zarówno w przypadku formy wtryskowej, jak i wyprasek. Jednak zmiany temperatury nie są proporcjonalne, dla formy wtryskowej obserwuje się największą dynamikę wzrostu temperatury dla centralnego punktu formy T1 (zabierak wlewka), dla punktów T2 i T3 zmiana temperatury jest porównywalna. Natomiast obserwacja zmiany temperatury wypraski (rys. 7) wskazuje, że warunki termiczne w punktach najbardziej oddalonych od siebie, a więc T1 i T3 są bardzo zbliżone. Prawdopodobnie, rela-

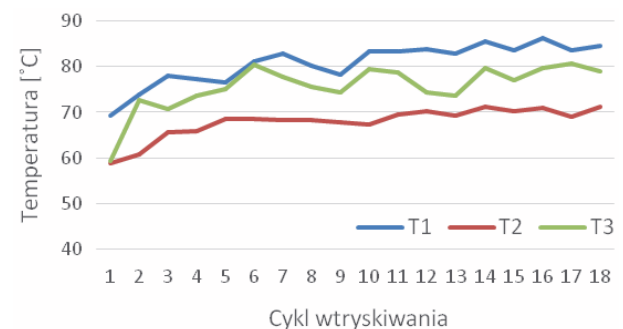


Rys. 6. Zmiana temperatury formy wtryskowej w funkcji cykli wtryskiwania dla zadanych punktów odczytu temperatury z termogramów

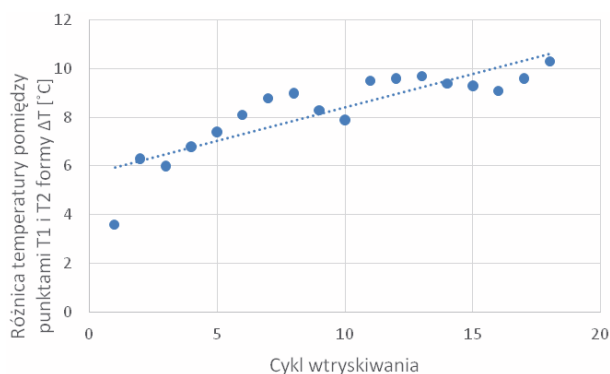
tywnie wysoka temperatura w punkcie odczytu T3 jest wynikiem dogrzewania krawędzi wypraski w pobliżu miejsca pomiaru przez gorące powietrze zamknięte w formie w narożnikach gniazda formującego. Niepełne uformowanie wypraski jest widoczne na termogramach w postaci sześciokątnego zarysu kształtu wypraski.

Dla każdego cyklu wtryskiwania polistyrenu wyznaczono także wartość różnicy temperatury pomiędzy najcieplejszym (T1) i najzimniejszym (T2) punktem formy wtryskowej oraz wypraski wtryskowej, wartość ta oznaczona jako  $\Delta T$  została i zilustrowana na rysunkach 8 i 9.

Analiza przebiegu linii trendu (rys. 8, 9) sugeruje, iż w kolejnych cyklach wtryskiwania



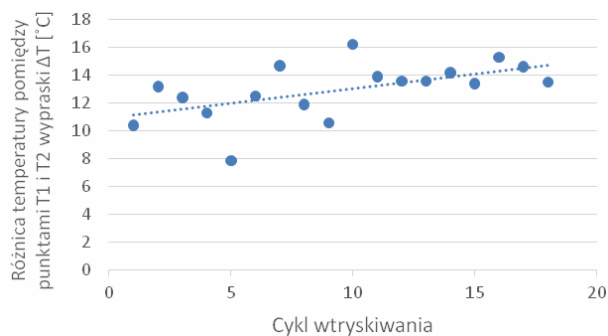
Rys. 7. Zmiana temperatury wypraski wtryskowej (płytki z wlewem bezpośrednim) w funkcji cykli wtryskiwania dla zadanych punktów odczytu temperatury z termogramów



Rys. 8. Zmiana wartości różnicy temperatury gniazda formującego w punktach T1 oraz T2 (różnica pomiędzy najcieplejszym a najzimniejszym punktem pomiaru) w funkcji cykli wtryskiwania

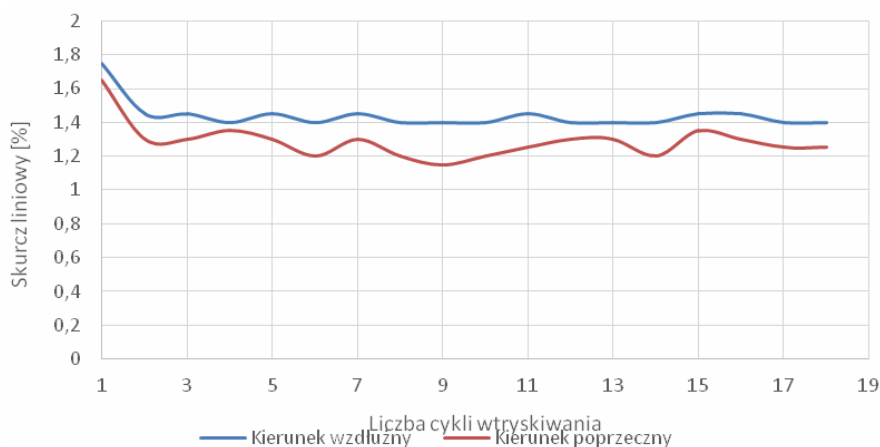
wartość  $\Delta T$  wzrasta zarówno w przypadku formy, jak i wyprasek. Przyrost temperatury formy pomiędzy pierwszym a 18 cyklem wtryskiwania wyniósł prawie 100%, co oznacza, że istnieje bardzo duży gradient temperatury elementów formujących. Niemniej ważne jest również to, że nadal po 18 cyklach wtryskiwania przedział temperatury pomiędzy najcieplejszym miejscem formy a najzimniejszym będzie się powiększał, co oznacza, że proces nadal nie jest ustabilizowany.

Ponadto dokonano pomiarów skurczu liniowego wyprasek w dwóch płaszczyznach wzajemnie prostopadłych, przecinających środek próbki (rys. 10-12). Wykres zmiany skur-

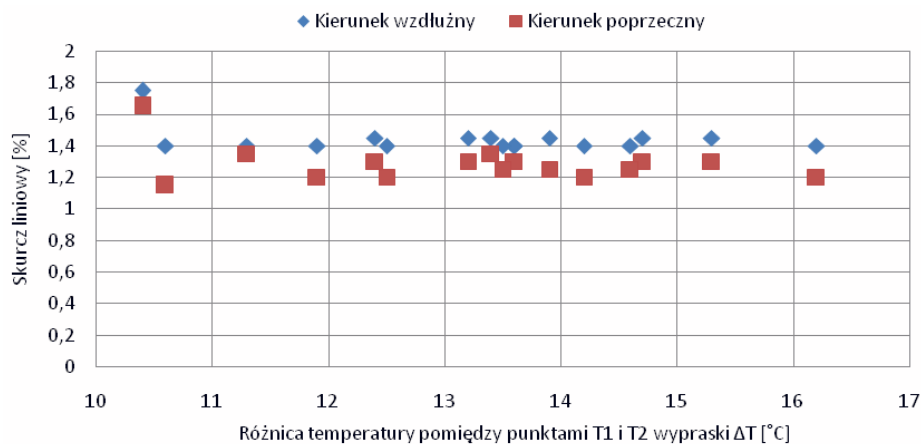


Rys. 9. Zmiana wartości różnicy temperatury wypraski w punktach T1 oraz T2 (różnica pomiędzy najcieplejszym a najzimniejszym punktem pomiaru) w funkcji cykli wtryskiwania

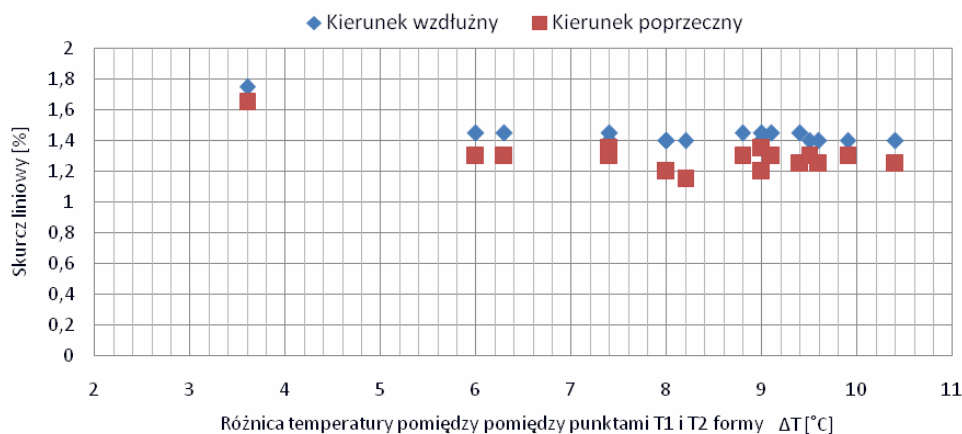
czu liniowego dokumentuje, że w pierwszym cyklu uzyskano większy skurcz (prawdopodobnie wskutek przegrzania tworzywa w układzie uplastyczniającym). Dodatkowo można zauważyć, że największy skurcz towarzyszy najmniejszemu rozrzutowi temperatury zanotowanej na wyprasce i w formie (rys. 11, 12). Ponadto w miarę zwiększania się różnicy temperatury na wyprasce i w formie pomiędzy punktami T1 i T2, największym zmianom podlega wymiar wypraski kierunku poprzecznym. Oznacza to, że zaistniała trwała różnica pomiędzy skurczem w dwóch prostopadłych osiach wypraski. Prawdopodobnie wypraska będzie wykazywała deformacje określaną często jako efekt „chipsa”, a związaną z anizo-



Rys. 10. Zmiana wartości skurczu liniowego wyprasek w dwóch płaszczyznach wzajemnie prostopadłych (o długości boku próbki), przecinających środek próbki



Rys. 11. Zmiana wartości skurczu liniowego wyprasek w dwóch płaszczyznach wzajemnie prostopadłych w funkcji różnicy temperatury wypraski wtryskowej w punktach T1 T2



Rys. 12. Zmiana wartości skurczu liniowego wyprasek w dwóch płaszczyznach wzajemnie prostopadłych w funkcji różnicy temperatury formy wtryskowej w punktach T1 T2

tropią skurczu wzdłuż drogi płynięcia. Dla określenia deformacji bardzo użytecznym narzędziem byłaby optyczna maszyna współrzędnościowa, np. skaner 3D. Jednak pomiarów tych nie wykonano z uwagi na czasowy brak dostępu do takiego urządzenia.

#### 4. Wnioski

Wykorzystanie kamery termograficznej do monitorowania zmian temperatury formy i wypraski wtryskowej od pierwszego cyklu wtryskiwania polistyrenu o wysokiej udarności do formy termostatowanej (nastawa 22 °C) wykazało, że najbardziej dynamiczny wzrost

temperatury dotyczy formy wtryskowej w okolicy zabieraka wlewka.

Najważniejszym wnioskiem uzyskanym po analizie wyników jest to, że po 18-tym cyklu wtryskiwania nadal nie uzyskano stabilnej i niezmiennej temperatury formy (rozkładu temperatury na powierzchni gniazda), na co wskazują odczyty temperatury. Stąd praktyczny wniosek, że nie można na podstawie uzyskanych danych, w warunkach produkcyjnych zwolnić produkcji po rozruchu i wytworzeniu 18 wyprasek. Potwierdzono, że najcieplejszym miejscem wypraski i formy jest miejsce skojarzone z zabierakiem wlewka i końcem układu wlewowego, co bezspornie związane jest

z węzłem termicznym i brakiem kanału chłodzącego zlokalizowanego bezpośrednio w pobliżu wlewka.

Wyniki oznaczenia skurczu liniowego dla dwóch wzajemnie prostopadłych osi symetrii wypraski wskazały, że nadal po 18 cyklach wtryskiwania występuje anizotropia skurczu wzdłużnego (rozpatrywanego w dwóch prostopadłych osiach), co prawdopodobnie będzie powodowało deformacje wypraski i naprężenia własne.

Należy przypuszczać, że prezentowane wyniki mogą być obarczone błędem odczytu temperatury (zjawisko odbicia promieniowania cieplnego od przeciwległej płyty formującej) oraz przyjętymi wskaźnikami emisyjności. Jednak przydatność metody termografii została głównie potwierdzona poprzez ujawnienie tendencji zmian temperatury zarówno wypraski jak i płyty formującej, co ma bezpośredni związek z właściwościami użytkowymi wypraski (wymiary liniowe, skurcz wtórny).

#### Podziękowania

Praca została sfinansowana ze środków pochodzących z 02/25/DSPB/4111.

#### Literatura

- [1] Smorawiński A. *Technologia wtrysku*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1989.
- [2] Postawa P., *Skurcz przetwórczy wyprasek a warunki wtryskiwania*, 2005, *Polimery*, vol. 50, str. 201-207.
- [3] Zwierzyński A. *Wtryskiwanie termoplastów a układy chłodzenia form wtryskowych*. Cz. 1. *Mechanik* nr 4/2003, str. 225-228.
- [4] Praca zbiorowa pod redakcją H. Madury. *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Agenda Wydawnicza PAKu, Warszawa 2004.
- [5] Tor-Świątek A., Samujło B. *Wykorzystanie badań termowizyjnych do analizy stabilności procesu wytłaczania mikroporującego poli(chlorku winylu)*, *Eksploatacja i Niezawodność* Vol. 15 nr 1/2013.
- [6] Samujło B. *Selected aspects of thermovision in extrusion process*, ICPP-2007, International Conference on Polymer Processing, Beijing China 2007; str. 126-128.
- [7] Praca zbiorowa pod redakcją K. Wilczyńskiego. *Przetwórstwo tworzyw sztucznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.