

Wpływ parametrów nastawnych i geometrii układu dolotowego na nagrzewanie wskutek ścinania

Influence of process parameters and runner geometry on shear heating effect

PRZEMYSŁAW POSZWA
PAWEŁ BRZEK
MAREK SZOSTAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.1.6>

Zjawisko nagrzewania się stopu polimeru na skutek ścinania może powodować istotne problemy z jakością elementów produkowanych metodą wtryskiwania tworzyw. Źródłem tego efektu jest wysoka lepkość polimerów oraz niskie przewodnictwo cieplne, wywołujące duży gradient temperatury na przekroju kanałów dolotowych. W artykule omówiono wpływ parametrów nastawnych na to zjawisko, przy czym analizowano kanały dolotowe o różnej długości i średnicy oraz dwa polimery o różnej wrażliwości termicznej.

SŁOWA KLUCZOWE: tworzywa sztuczne, nagrzewanie na skutek ścinania, niezbalansowanie indukowane ścinaniem, geometria kanałów dolotowych

Shear heating effect that occurs in melted polymers can cause serious quality problems with production of injection molded parts. The source of this effect is high viscosity of polymers and low thermal conductivity what leads to significant temperature gradients at the cross section of runners. In this work the influence of processing parameters on this phenomenon for difference runner diameters and lengths was presented for two polymers that have different thermal sensitivity
KEYWORDS: plastics, shear heating, shear induced flow imbalance, runner design

Tworzywa sztuczne są związkami wielocząsteczkowymi o długich łańcuchach. Ze względu na łatwość formowania, małą gęstość i korzystne właściwości mechaniczne stosowane są jako materiały konstrukcyjne w przemyśle. W porównaniu z innymi materiałami ulegają uplastycznieniu w stosunkowo niskiej temperaturze. W stanie uplastycznionym traktowane są jako ciecze nienewtonowskie [1]. Tworzywa odznaczają się lepkością sprężystością (co oznacza, że zachowują część właściwości sprężystych w trakcie płynięcia) oraz rozrzedzaniem ścinaniem (ich lepkość spada wraz ze wzrostem szybkości ścinania) [2].

Lepkość tworzyw silnie zależy od temperatury. Wrażliwość na zmiany temperatury (rozumiana jako zależność lepkości stopu od temperatury) jest większa lub mniejsza zależnie od rodzaju tworzywa (np. poliwęglany wykazują dużą, a poliolefiny małą wrażliwość) [3].

Lepkość stanowi miarę tarcia wewnętrznego cieczy w trakcie jej płynięcia. Tworzywa sztuczne cechują się dużą lepkością, co oznacza duże tarcie wewnętrzne w trakcie płynięcia. To tarcie powoduje rozpraszanie – w postaci energii cieplnej – pracy wykonanej przez oddziałujące ciśnienie, potrzebnej do przepłynięcia tworzywa. Zjawisko to nazywa się generowaniem ciepła wskutek ścinania (*shear heating effect*). Powoduje ono lokalny wzrost temperatury w strudze polimeru, co w skrajnych przypadkach może prowadzić do degradacji tworzywa

i powstania miejscowych przypaleń. Lokalność tego efektu wynika z bardzo małej przewodności cieplnej tworzyw sztucznych, które mają charakter izolatorów cieplnych. W miejscu największego ścinania dochodzi do znaczącego lokalnego wzrostu temperatury (rys. 1). Aby tego uniknąć, zaleca się podniesienie temperatury uplastyczniania tworzywa, by ewentualny lokalny wzrost temperatury na skutek ścinania był mniejszy.

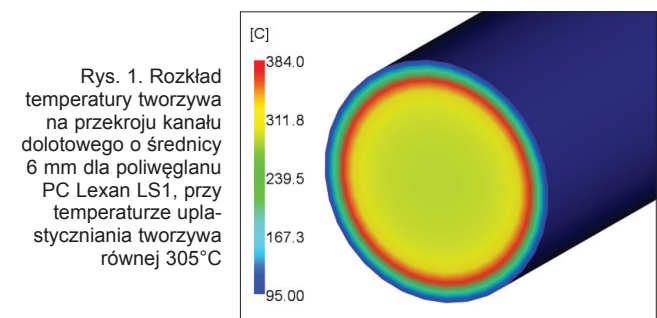
Równanie transportu ciepła zawierające człon odpowiadający generowaniu ciepła jest następujące [4]:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = - \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p \right) + \nabla \cdot (k \nabla T) + 2\eta \dot{\gamma}^2$$

gdzie: t – czas, \mathbf{u} – prędkość, p – ciśnienie, T – temperatura, ρ – gęstość, c_p – ciepło właściwe, k – przewodność cieplna, η – lepkość dynamiczna, $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania.

Jak widać, zależność szybkości generowania ciepła od lepkości jest liniowa, a w przypadku szybkości ścinania – kwadratowa.

Konsekwencją zjawiska grzania jest tzw. niezrównoważenie przepływu wywołane ścinaniem.



Niezrównoważenie przepływu

W praktyce przemysłowej stosuje się wielogniazdowe formy wtryskowe w celu zwiększenia wydajności produkcji. Aby uniknąć problemów produkcyjnych, konstruuje się je tak, by do najodleglejszych krańców gniazd formujących tworzywo dopływało w tym samym czasie. Mówi się wtedy o geometrycznym zbalansowaniu narzędzia.

Może się jednak okazać, że w przypadku niektórych tworzyw część gniazd będzie się wypełniać szybciej, a część – wolniej. Przyczyną tego może być nagły, lokalny wzrost temperatury na skutek ścinania. Jest to bardzo niekorzystny efekt, utrudniający uzyskanie wyrobów o wymaganej jakości. Zjawisko to dotyczy również form jednokrotnych – na skutek zmian lepkości w określonych miejscach tworzywo płynie zdecydowanie szybciej niż w innych, co jest przyczyną zmian profilu wypełniania gniazda i powstawania wad jakościowych [5].

* Mgr inż. Przemysław Poszwa (przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl); mgr inż. Paweł Brzek (pawel.brzek@put.poznan.pl); dr hab. inż. Marek Szostak, prof. nadzw. PP (marek.szostak@put.poznan.pl) – Instytut Technologii Materiałów Politechniki Poznańskiej

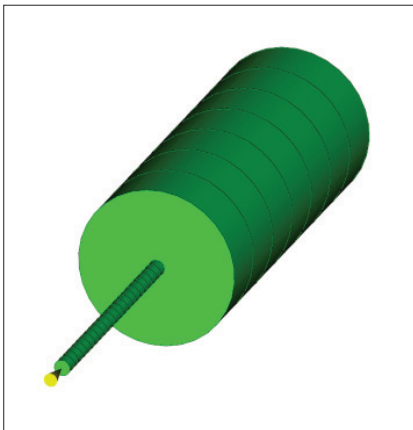
Opis eksperymentu

Do analizy zjawiska niezrównoważenia przepływu wywołanego ścinaniem wykorzystano oprogramowanie Autodesk Moldflow Insight 2018. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch tworzyw:

- PC (Lexan LS1) – o wysokiej wrażliwości na zmiany temperatury,
- PP (Moplen HP500N) – o niskiej wrażliwości na zmiany temperatury.

W analizie skoncentrowano się na wpływie szybkości wtrysku (mierzonej poprzez objętościowe natężenie przepływu v w cm^3/s) oraz temperatury tworzywa T_m (w $^\circ\text{C}$) na występowanie efektu nagrzewania tworzywa, prowadzącego do niezrównoważenia przepływu indukowanego ścinaniem. Wybrano te dwa parametry, ponieważ szybkość ścinania (zależna od v) oraz temperatura tworzywa mają podstawowy wpływ na lepkość tworzywa. Natężenie objętościowe przepływu wynosiło odpowiednio 50, 100 oraz 200 cm^3/s , a wpływ temperatury badano, zmniejszając i zwiększając bazową temperaturę tworzywa (odpowiednio 235 $^\circ\text{C}$ dla PP oraz 300 $^\circ\text{C}$ dla PC) każdorazowo o 10 $^\circ\text{C}$.

Analiza została przeprowadzona dla różnych średnic kanałów dolotowych – od $\varnothing 4$ do $\varnothing 8$ mm, gdyż ten czynnik obok liniowej prędkości stopu wpływa na szybkość ścinania. Układ składał się z elementów belkowych, stanowiących kanały dolotowe, oraz objętości o małych oporach płynięcia (cylindra o średnicy $\varnothing 40$ mm i długości 100 mm), co przedstawiono na rys. 2. Długość kanału dolotowego L wynosiła 70, 170 lub 270 mm w zależności od oporów, jakie stawiało tworzywo – jeżeli wymagane ciśnienie przekraczało założone maksymalne ciśnienie wtrysku (180 MPa), redukowano długość drogi płynięcia. Średnice oraz długości kanałów zostały dobrane dla poliwęglanu PC jako materiału o wyższej lepkości [6].



Rys. 2. Geometria badanego układu

Rezultaty

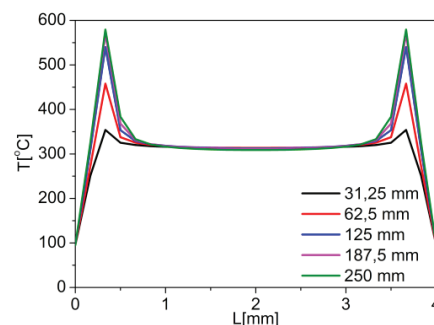
Na rys. 3 i 4 pokazano rozkład temperatury tworzywa w przekroju kanału dolotowego w funkcji drogi L (w mm), którą tworzywo – PP i PC – pokonuje w trakcie wypełniania formy wtryskowej dla $v = 100 \text{ cm}^3/\text{s}$ i temperatury o 10 $^\circ\text{C}$ niższej od zalecanej dla tych tworzyw temperatury przetwórstwa. Z wykresu wynika, że przy ścianach występuje niska temperatura związana z odbiorem ciepła przez ściany kanału dolotowego, a w niewielkiej odległości od ściany – bardzo wysoka temperatura. Pokrywa się to z wynikami badań doświadczalnych dotyczących lokalizacji największych wartości ścinania w kanale o przekroju kołowym [3].

Dalej analizowano wpływ parametrów nastawnych na zmiany temperatury.

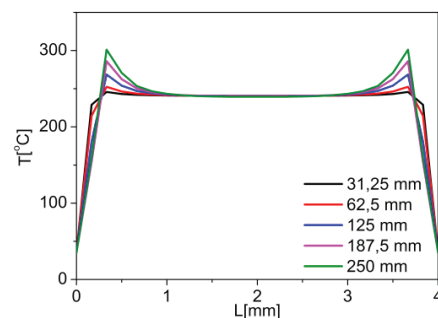
Poliwęglan jest tworzywem o dużej lepkości, dlatego wymaga zastosowania kanałów dolotowych o średnicy większej niż w przypadku poliolefin. Znajduje to odzwierciedlenie na rys. 5 – w przypadku względnie dużych prędkości przepływu można na nim zaobserwować bardzo duży wzrost temperatury (zostaje przekroczona temperatura zniszczenia T_{destr} równa ok. 480 $^\circ\text{C}$) oraz spadek ciśnienia, uniemożliwiający analizę dłuższych dróg płynięcia. W przypadku PC zauważono bardzo duży wzrost T_{max} wraz ze wzrostem v . Dla poliwęglanu cechą charakterystyczną jest dążenie do określonej temperatury maksymalnej na drodze płynięcia L , zależnej od szybkości ścinania. Ze wzrostem średnicy i spadkiem v ta graniczna wartość temperatury maleje (rys. 5–7). W przypadku \varnothing równej 4 i 6 mm zaobserwowano relatywnie mały wpływ T_m na T_{max} . Jest on wyraźny dopiero przy $\varnothing 8$ mm przy dużej wartości v . Na rys. 6 i 7 zaobserwowano punkt graniczny drogi płynięcia, powyżej którego niższa T_m skutkowałą wyższą T_{max} – dla największego kanału taki punkt jest niewidoczny, gdyż niższa temperatura praktycznie od samego początku generuje wyższe wartości T_{max} .

Na rys. 8–10 przedstawiono wzrost maksymalnej temperatury T_{max} na drodze L dla PP. W przypadku tego materiału przebieg jest zdecydowanie inny – nie zaobserwowano asymptotycznego dążenia tworzywa do określonej temperatury w badanym zakresie. Może to wynikać z faktu, że dla tego tworzywa możliwe jest zastosowanie większych szybkości ścinania.

W całym badanym zakresie, niezależnie od średnicy kanału, wzrost T_m powodował, że T_{max} miała wyższą wartość. Świadczy to o bardzo niewielkim wpływie temperatury na lepkość tworzywa. W przypadku średnicy kanału równej 6 mm dla niższych prędkości, a w przypadku średnicy 8 mm – w całym zakresie można zaobserwować, że zmiana T_m o 10 $^\circ\text{C}$ powoduje identyczną zmianę T_{max} – to oznacza brak pozytywnego wpływu temperatury na redukcję grzania na skutek ścinania.

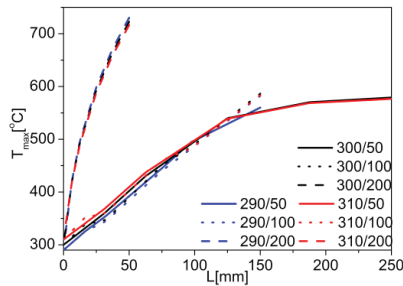


Rys. 3. Rozkład temperatury T tworzywa PC na przekroju kanału dolotowego wzdłuż średnicy kanału dla różnej drogi płynięcia

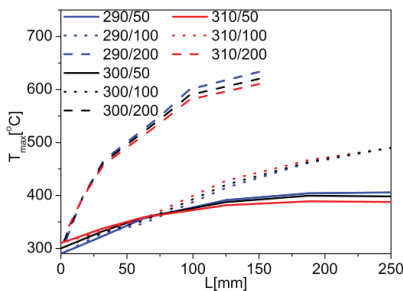


Rys. 4. Rozkład temperatury T tworzywa PP na przekroju kanału dolotowego wzdłuż średnicy kanału dla różnej drogi płynięcia

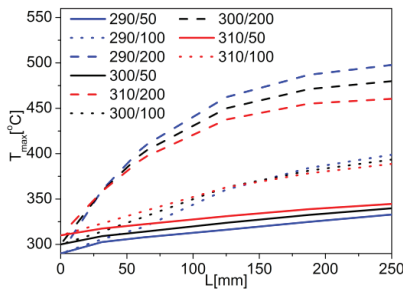
W przypadku obu tworzyw skrajnie niekorzystne warunki (mała średnica i duże natężenie przepływu) spowodowały bardzo duży wzrost temperatury – znacznie przekraczający temperaturę degradacji tworzywa (480°C dla PC [7] oraz 325°C dla PP [8]).



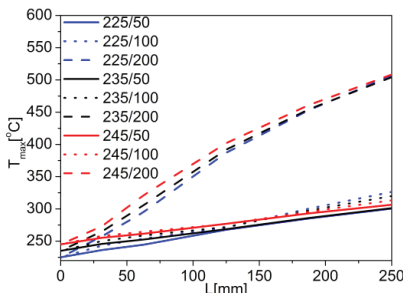
Rys. 5. Wzrost maksymalnej temperatury T_{max} w kanale dolotowym o średnicy $\varnothing 4$ mm na drodze L dla PC przy różnych wartościach T_m/v



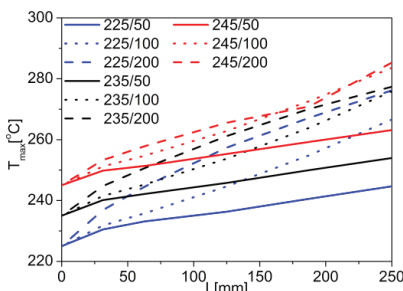
Rys. 6. Wzrost maksymalnej temperatury T_{max} w kanale dolotowym o średnicy $\varnothing 6$ mm na drodze L dla PC przy różnych wartościach T_m/v



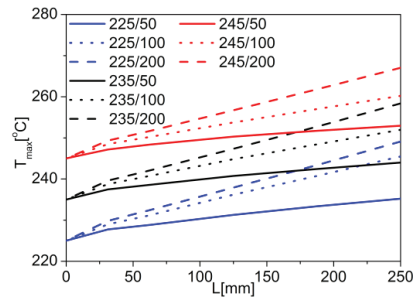
Rys. 7. Wzrost maksymalnej temperatury T_{max} w kanale dolotowym o średnicy $\varnothing 8$ mm na drodze L dla PC przy różnych wartościach T_m/v



Rys. 8. Wzrost maksymalnej temperatury T_{max} w kanale dolotowym o średnicy $\varnothing 4$ mm na drodze L dla PP przy różnych wartościach T_m/v



Rys. 9. Wzrost maksymalnej temperatury T_{max} w kanale dolotowym o średnicy $\varnothing 6$ mm na drodze L dla PP przy różnych wartościach T_m/v



Rys. 10. Wzrost maksymalnej temperatury T_{max} w kanale dolotowym o średnicy $\varnothing 8$ mm na drodze L dla PP przy różnych wartościach T_m/v

Podsumowanie

Ilość ciepła generowanego wskutek ścinania stopu oraz możliwość jej zredukowania ściśle zależą od rodzaju tworzywa. Podstawowym sposobem na uniknięcie problemów z degradacją i przypaleniami jest zmniejszenie szybkości wtrysku lub zmiana geometrii układu dolotowego (skrócenie długości/zwiększenie średnicy kanałów).

W przypadku PC (rys. 6 i 7) zaobserwowano możliwość obniżenia maksymalnej wartości temperatury osiągniętej podczas płynięcia dla największego wydatku objętościowego przepływu. Poza tym temperatura tworzywa ma pomijalny wpływ na to zjawisko. Mimo że PC jest tworzywem o dużej wrażliwości termicznej [1], istotny wpływ temperatury stopu na lepkość był zauważalny jedynie dla dużej średnicy kanału dolotowego.

W przypadku PP podniesienie temperatury tworzywa prowadziło jedynie do wzrostu maksymalnej temperatury na przekroju kanału dolotowego. Dla tego tworzywa zmiana temperatury przetwórstwa miała znikomy wpływ w badanym zakresie.

Kluczową przyczyną miejscowych przegrzań jest niska przewodność cieplna tworzyw, powodująca znaczący lokalny wzrost temperatury (wygenerowane ciepło nie jest szybko odprowadzane do ścianki kanału). Zwiększenie przewodności cieplnej – dzięki zastosowaniu odpowiednich dodatków – powinno spowodować wzrost średniej temperatury z jednoczesną redukcją lokalnych maksimów.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że przez odpowiedni dobór geometrii układu dolotowego (tj. jego średnicy oraz długości) można uniknąć zbyt dużego wzrostu temperatury tworzywa, będącego przyczyną zarówno degradacji, jak i niezrównoważenia wypełnienia gniazd formujących.

LITERATURA

- Zamani N., Kaufmann R., Kosinski P., Skaug A. "Mechanisms of non-newtonian polymer flow through porous media using Navier–Stokes approach". *Journal of Dispersion Science and Technology*. 36, 3 (2015): s. 310–325.
- Steller R. „Nowe modele cieczy lepkich oparte na równaniu Carreau”. *Polimery*, 58, 11–12 (2013): s. 913–919.
- Beament J.P. "Runner and gating design handbook – tool for successful injection molding – 2nd ed.". Ohio, USA: Hanser Gardner Publications, 2007.
- Ilinca F., Hetu J.F. "Three dimensional filling and post-filling simulation of polymer injection molding". *International Polymer Processing*. 16, 3 (2001): s. 291–301.
- Dokumentacja programu Autodesk Moldflow.
- Bryce D.M. "Plastic Injection Molding – mold design and construction fundamentals". Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers 1998.
- Apaydin-Varol E., Polat S., Putun A.E. "Pyrolysis kinetics and thermal decomposition behavior of polycarbonate – a TGA-FTIR study". *Thermal Science*. 18, 3 (2014): s. 833–842.
- Kroschwitz J.I. "Encyclopedia of Polymer Science and Engineering". John Wiley & Sons, 1988.