

Technologie MuCell® i InduMold w produkcji wysokiej jakości detali samochodowych z tworzyw polimerowych

Marek Szostak^{1),*)}, Paulina Krzywdzińska¹⁾, Mateusz Barczewski¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.2.8

Streszczenie: Przedstawiono specjalne techniki formowania wtryskowego, MuCell® i InduMold, zastosowane do produkcji wysokiej jakości części samochodowych, na przykładzie konsoli centralnej samochodu Audi Q5. Oceniano właściwości mechaniczne, termomechaniczne i termiczne wytworzonych detali, a także zmiany w strukturze materiału rejestrowane z zastosowaniem skaningowej mikroskopii elektronowej. Analizę jakości powierzchni przeprowadzono na podstawie obserwacji za pomocą mikroskopu świetlnego. Wyniki badań świadczą o możliwości łącznego wykorzystania technologii MuCell® i InduMold do produkcji wysokiej jakości części dla przemysłu motoryzacyjnego.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie, technologia MuCell®, technologia InduMold, części samochodowe.

MuCell® and InduMold technologies in production of high quality automotive parts from polymer materials

Abstract: The article presents special injection molding techniques: MuCell® and InduMold used in the production of high quality automotive part on the example of the central console of Audi Q5 car. The mechanical, thermomechanical and thermal properties of the manufactured parts were examined and discussed with respect to changes in the structure of the material evaluated by scanning electron microscopy. The measurements were supplemented by surface quality analysis performed by optical microscopy. Research has demonstrated the ability to combine MuCell® and InduMold technologies in the production of high quality parts for the automotive industry.

Keywords: injection molding, MuCell® technology, InduMold technology, car parts.

Wtryskiwanie jest obecnie najpowszechniej wykorzystywaną technologią przetwórstwa tworzyw polimerowych. To właśnie dzięki tej metodzie jest możliwe uzyskanie wyrobów o skomplikowanych kształtach, z zachowaniem dużej dokładności (powtarzalności) wymiarów. Bardzo dobrze poznany proces wtryskiwania nie zawsze jednak umożliwia uzyskanie wyrobów o oczekiwanych właściwościach i estetyce. W celu poprawy jakości wykonania wyrobów wtryskowych i ograniczenia tworzenia się miejsc szczególnie narażonych na powstawanie wad materiałowych, podwyższa się temperaturę gniazda formy. Charakterystyka zmian temperatury gniazda formy w poszczególnych fazach cyklu pracy wtryskarki stanowi jeden z kluczowych parametrów procesu wtryskiwania termoplastów. Przetwórcy tworzyw polimerowych coraz częściej zamiast stałej temperatury formy w procesie wtryskiwania stosują wartości cyklicznie się zmieniające, kierując się powszechną opinią, że wtryskiwanie tworzywa do formy o temperaturze

przekraczającej jego temperaturę zeszklenia lub krystalizacji, a następnie szybkie jej schładzanie jest korzystne zarówno dla przebiegu procesu przetwórstwa, jak i poprawy istotnych cech wypraski. Takie rozwiązania są obecnie wykorzystywane w całym spektrum zastosowań technologii wtryskiwania: od przemysłu motoryzacyjnego, poprzez opakowaniowy, aż do optycznego. Rosnące oczekiwania w zakresie jakości, estetyki, właściwości wytrzymałościowych i użytkowych wyprasek z tworzyw polimerowych stwarzają konieczność wprowadzania w procesie ich produkcji coraz bardziej innowacyjnych rozwiązań technologicznych. Wymagania stawiane przez niektóre branże (na przykład w przemyśle motoryzacyjnym) są niemożliwe do spełnienia z wykorzystaniem konwencjonalnych, tradycyjnych technik przetwórstwa. Stosowanie w procesie wtryskiwania wysokiej temperatury form wtryskowych umożliwia uzyskanie wyprasek o wyjątkowo dużym połysku, pożądanym cechach mikrostruktury powierzchni, perfekcyjnym odwzorowaniu kształtu i wymiarów gniazda formującego oraz prawie zerowym poziomem szczytkowych naprężeń własnych [1–5]. W nowoczesnych i najczęściej obecnie wdrażanych rozwiązaniach obejmujących sterowanie szybkimi cyklicznymi zmianami temperatu-

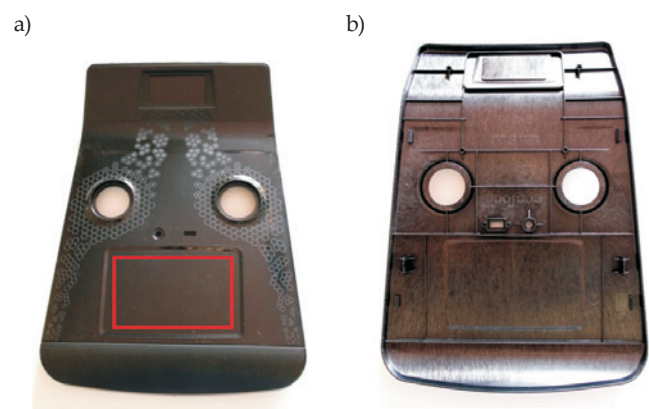
¹⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

^{*)} Autor do korespondencji:

e-mail: marek.szostak@put.poznan.pl

ry gniazd formujących wykorzystuje się obiegi olejowe, elektryczne grzałki oporowe, przegrzaną parę wodną, a także promienniki podczerwieni i induktory elektromagnetyczne. Technologie wtryskiwania uwzględniające szybkie, cykliczne zmiany temperatury formy pozwalają przetwórcom spełnić oczekiwania dzisiejszego rynku, dotyczące jakości powierzchni wyprasek i dokładności ich wykonania, a co najważniejsze, z zachowaniem ekonomiki produkcji. Urządzenia i układy sterujące temperaturą w cyklu wtryskiwania działają równolegle i nie tylko nie opóźniają procesu, ale nawet przyczyniają się do jego skrócenia, co wpływa na obniżenie kosztu wytworzenia wyprasek. Obecnie do nagrzewania form wtryskowych najczęściej wykorzystuje się parę wodną (np. *Rapid Temperature Cycling*, RTC), ciecze (np. *Variotherm*, *Dynamic Mold Temperature Control*, DMTC), indukcję (np. *InduMold*, *Cage System*, 3iTech), promieniowanie podczerwone (np. *Variomelt IR*) oraz grzałki elektryczne (np. *Rapid Heating Ceramics*, RHC) [6–12]. W metodzie cyklicznej regulacji temperatury gniazd formujących wysoka temperatura ścianek formy wpływa na opóźnienie schładzania wtrysniętego do formy ciekłego tworzywa i szybkiego tworzenia zestalonej zewnętrznej warstwy wypraski. Dzięki temu w procesie wtryskiwania uzyskuje się wypraski lepiej odwzorowujące powierzchnie gniazd formujących, w warunkach istotnie mniejszego oporu przepływu tworzywa w fazie wypełniania formy. Z kolei podczas fazy docisku następuje lepsza propagacja ciśnienia w całej objętości wypraski, a więc mniejsze gradienty ciśnienia pomiędzy punktem wtrysku i punktami najdalej oddalonymi od niego na drodze przepływu tworzywa. Skutkuje to zmniejszeniem naprężeń „zamrożonych” w wyprasce oraz różnic skurczu w poszczególnych jej obszarach. Wspomniany korzystny efekt jest szczególnie zauważalny wówczas, gdy cykliczną zmianą temperatury gniazd formujących są objęte obie części formy [13, 14]. Odbiorcy wyrobów z tworzyw polimerowych oczekują także minimalizacji masy wyprasek z zachowaniem lub niewielkim pogorszeniem ich właściwości mechanicznych. W tym celu wykorzystuje się opatentowaną przez firmę Trexel Inc. (USA) technologię MuCell®, którą obecnie zalicza się do jednych z najbardziej rozwojowych metod wtryskiwania. Polega ona na dostarczeniu gazu (najczęściej azotu lub ditlenku węgla) w stanie nadkrytycznym do układu uplastyczniającego wtryskarki, gdzie gaz całkowicie rozpuszcza się w tworzywie i wraz z nim przybiera postać jednofazowej mieszaniny gotowej do wtrysnięcia [15–17]. Porowanie tworzywa rozpoczyna się dopiero, gdy znajdzie się ono w gnieździe formy wtryskowej. Uwalniany się z mieszaniny gaz powoduje tworzenie się mikrokomórkowej struktury, a ciśnienie gazu porującego spełnia zadanie ciśnienia docisku. Proces nukleacji zachodzi na skutek gwałtownego i znacznego zmniejszenia ciśnienia w formie. Z bardzo dużej liczby powstających nukleantów powstaje dużo bardzo drobnych porów. W takiej wyprasce pory mają wymiary 0,1–10 μm, a liczba komórek mieści się w przedziale 10⁹–10¹⁵

w 1 cm³ materiału. Uzyskaną wypraskę cechuje jednolita powierzchnia zewnętrzna – naskórek – i wewnętrzna mikroporowata struktura rdzenia [15–17]. Jakość powstających mikroporów zależy głównie od rodzaju zastosowanego gazu i jego ilości rozpuszczonej w materiale polimerowym, istotną rolę odgrywa również ciśnienie uplastyczniania. Wykorzystanie technologii MuCell® zapewnia wiele korzyści, do jednej z nich, oprócz zmniejszenia masy wypraski, z pewnością zalicza się możliwość zastosowania maszyn wtryskowych o mniejszej sile zwarcia. Wytworzenie mikroporów w całej objętości wyrobów eliminuje powstawanie zapadnięć i jam skurczowych, bez konieczności zmiany konstrukcji wypraski, co wiąże się ze zmniejszeniem kosztów produkcji [15–17]. Podstawową zaletą technologii MuCell® jest jednak możliwość otrzymywania wyprasek o masie zmniejszonej nawet o 90 % w porównaniu z masą wyprasek wykonanych z materiału litego. Korzystna też jest możliwość wykorzystania tej metody do wytwarzania wyprasek cienkościennych (grubość ścianek 0,3–1,0 mm). Zmniejszona masa wyprasek pozwala na użycie mniejszych układów uplastyczniających. Proces wtryskiwania mikroporującego umożliwia również korektę energochłonnych parametrów przetwórstwa. Temperaturę w procesie MuCell® można obniżyć nawet o 50 % w stosunku do temperatury w standardowym wtryskiwaniu. Stosuje się również mniejsze ciśnienie wtrysku i mniejsze siły zamykania formy. Dzięki niższej temperaturze i mniejszej lepkości tworzywa oraz endotermicznej reakcji wzrostu porów, skutecznie zastępującej fazę docisku, następuje szybsze wychłodzenie wypraski, a w konsekwencji skrócenie czasu cyklu. Jak już wspomniano, wyroby produkowane opisywaną metodą są wolne od zapadnięć, a naprężenia własne są dużo mniejsze niż w wypadku wyprasek litych [15–17]. Technologia MuCell® ma jednak dwa podstawowe ograniczenia. Po pierwsze nie jest zalecana do produkcji elementów znacznie obciążonych mecha-



Rys. 1. Element konsoli centralnej Audi Q5 – powierzchnia z zaznaczonym miejscem pobrania próbek do badań: a) czołowa, b) tylna

Fig. 2. Element of Audi Q5 centre console – surface with marked place of sample collection: a) front, b) rear

nicznie, ponieważ porowata struktura wyprasek zmniejsza ich wytrzymałość mechaniczną, po drugie jakość powierzchni wyprasek porowatych jest zazwyczaj bez połysku (matowa), co często ogranicza możliwość jej wykorzystania w praktyce produkcyjnej. Oczekiwania odbiorców wymuszają ciągłe udoskonalanie już wykorzystywanych technik wytwarzania bądź stosowanie kilku metod jednocześnie. W niniejszej pracy podjęto próbę oceny możliwości wykorzystania dwóch powyżej opisanych specjalnych metod wtryskiwania w celu uzyskania jak najwyższej jakości wypraski stanowiącej element części pojazdu samochodowego.

Rysunek 1 przedstawia badany element konsoli centralnej samochodu osobowego marki Audi model Q5.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Do wytworzenia konsoli użyto mieszaniny poliwęglan/akrylonitryl-butadien-styren (PC/ABS) z firmy Covestro (do września 2015 r. Bayer Material Science) o nazwie handlowej Bayblend®-grey, o gęstości $1,1 \text{ g/cm}^3$ i wskaźniku szybkości płynięcia *MFR* 15,5 g/10 min (5 kg, 260 °C).



Rys. 2. Wtryskarka ENGEL duo 550

Fig. 2. ENGEL duo 550 injection molding machine

T a b e l a 1. Podstawowe parametry techniczne procesu wtryskiwania

T a b l e 1. Basic technical parameters of injection molding process

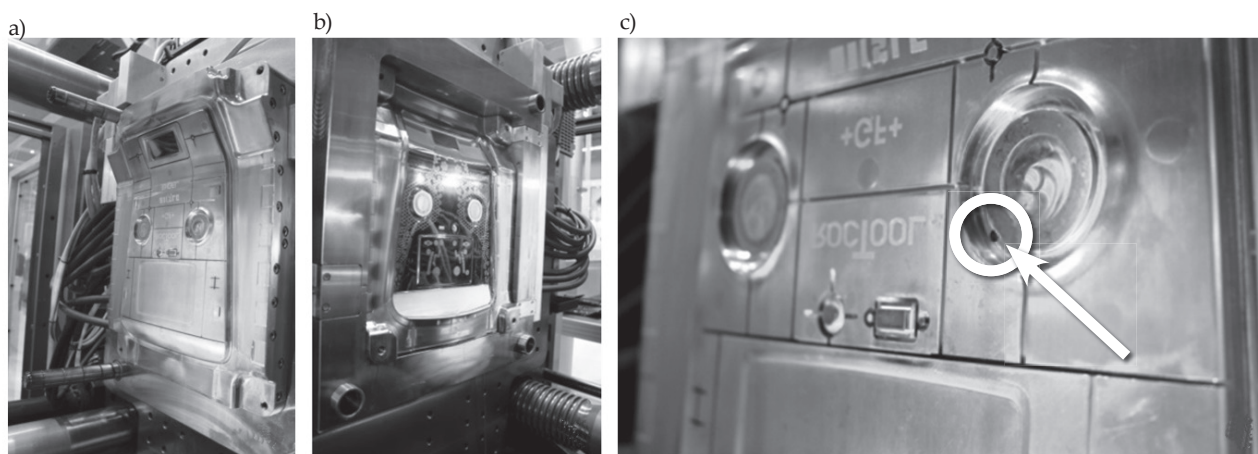
Parametr techniczny	Wartość/opis
Technologia	InduMold+MuCell®
Materiał	PC/ABS–Bayblend®-grey
Detal	Element konsoli centralnej
Siła zwarcia	5,500 kN
Maksymalna objętość wtrysku	1190 cm ³
Ślimak	Ø 60 mm MuCell®
Czas cyklu	57 s
Masa wtrysku	198 g
Forma	RocTool
Liczba gniazd	1
Automatyzacja	ENGEL viper 20
Sterownik	ENGEL CC300

Wytwarzanie próbek

Próbki do badań wycięto z elementów uzyskanych w procesie wtryskiwania z wykorzystaniem metod MuCell® oraz InduMold. Detale wytwarzano w takich samych warunkach wtryskiwania, ale w różnej temperaturze induktora (T_i), równej 100, 110, 120, 130, 140 i 150 °C. Dla porównania detal wykonano również metodą wtryskiwania bez zastosowania grzania indukcyjnego. W tabeli 1 przedstawiono parametry techniczne procesu wtryskiwania.

Elementy do badań wtryskiwano za pomocą wtryskarki ENGEL duo 550 (rys. 2) wyposażonej w formę z grzaniem indukcyjnym wewnętrznym, dostarczoną przez firmę RocTool (rys. 3), oraz w odpowiedni układ termostatujący, pracujący impulsowo.

Wykorzystano formę wtryskową wyposażoną w dwa induktory wewnętrzne: większy, umiejscowiony w ruchomej części formy, oraz induktor o znacznie mniejszej powierzchni, zamontowany w nieruchomej części formy.



Rys. 3. Widok: a) nieruchomej, b) ruchomej części formy wtryskowej z zaznaczonym c) punktem wtrysku tworzywa
Fig. 3. View of: a) stationary, b) mobile part of injection mold with marked c) injection point



Rys. 4. Induktor firmy RocTool

Fig. 4. RocTool inductor

Zmian temperatury nagrzewania formy dokonywano bezpośrednio na induktorze typu RT11-ARS firmy RocTool (rys. 4).

Podstawowe parametry wtryskiwania konwencjonalnego były następujące: ciśnienie wtrysku 220 MPa, objętościowe natężenie przepływu 300 cm³/s, czas docisku 3 s, czas chłodzenia 22 s, temperatura w układzie uplastyczniania 240–260 °C. W technologii MuCell® wykorzystywano gaz porujący – ditlenek węgla – z wydajnością 0,89 kg/h i specjalnym ciśnieniem spiętrzania wynoszącym 250 MPa. Parametry wtryskiwania z grzaniem indukcyjnym były takie jak w procesie wtryskiwania konwencjonalnego, dodatkowo zastosowano grzanie indukcyjne powierzchni gniazd formy wtryskowej (tabela 2).

Metodyka badawcza

– Właściwości mechaniczne oceniano w próbie statycznego rozciągania przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Zwick Roell Z020 TH Allround Line według normy PN-EN ISO 527-2:2012, w temp. 21 °C i wilgotności względnej 50 %. Próbkę rozciągano z prędkością 10 mm/min.

– Temperaturę mięknięcia metodą Vicata wyznaczano zgodnie z normą PN-EN ISO 306:2006 za pomocą termostatu szafkowego z szybkością przyrostu temperatury 50 °C/h i pod obciążeniem 50 N.

– Właściwości termomechaniczne oceniano metodą dynamiczno-mechanicznej analizy termicznej (DMTA) przy użyciu aparatu Anton Paar MCR 301 w trybie skręcania. Próbkę o wymiarach 50 × 8,9 × 1,7 mm obciążano mechanicznie z częstotliwością 1 Hz i ogrzewano z szybkością 2 °C/min w zakresie 30–200 °C. Próbkę do badań wycięto z detali wykonanych z wykorzystaniem grzania indukcyjnego w temperaturze induktora 100 °C oraz 150 °C, a także z detalu wytworzonego w procesie, w którym indukcyjne grzanie formy było wyłączone.

– Obserwację mikrostruktury przełomów próbek, napylnych uprzednio warstwą złota, prowadzono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego TeScan Vega 5135, przy napięciu przyspieszającym równym 12 kV i w powiększeniu 100x. Oceny jakości powierzchni detali, wykonanych w różnych warunkach procesu tech-

T a b e l a 2. Parametry nastawcze generatora indukcyjnego firmy RocTool

T a b l e 2. Operating parameters of RocTool induction generator

Parametr	Wartość
Temperatura induktora 1 (Generator 1), °C	100, 110, 120, 130, 140, 150
Temperatura induktora 2 (Generator 2), °C	100, 110, 120, 130, 140, 150
Maksymalny czas grzania, s	12
Moc (Generator 1), kW	120
Moc (Generator 2), kW	20

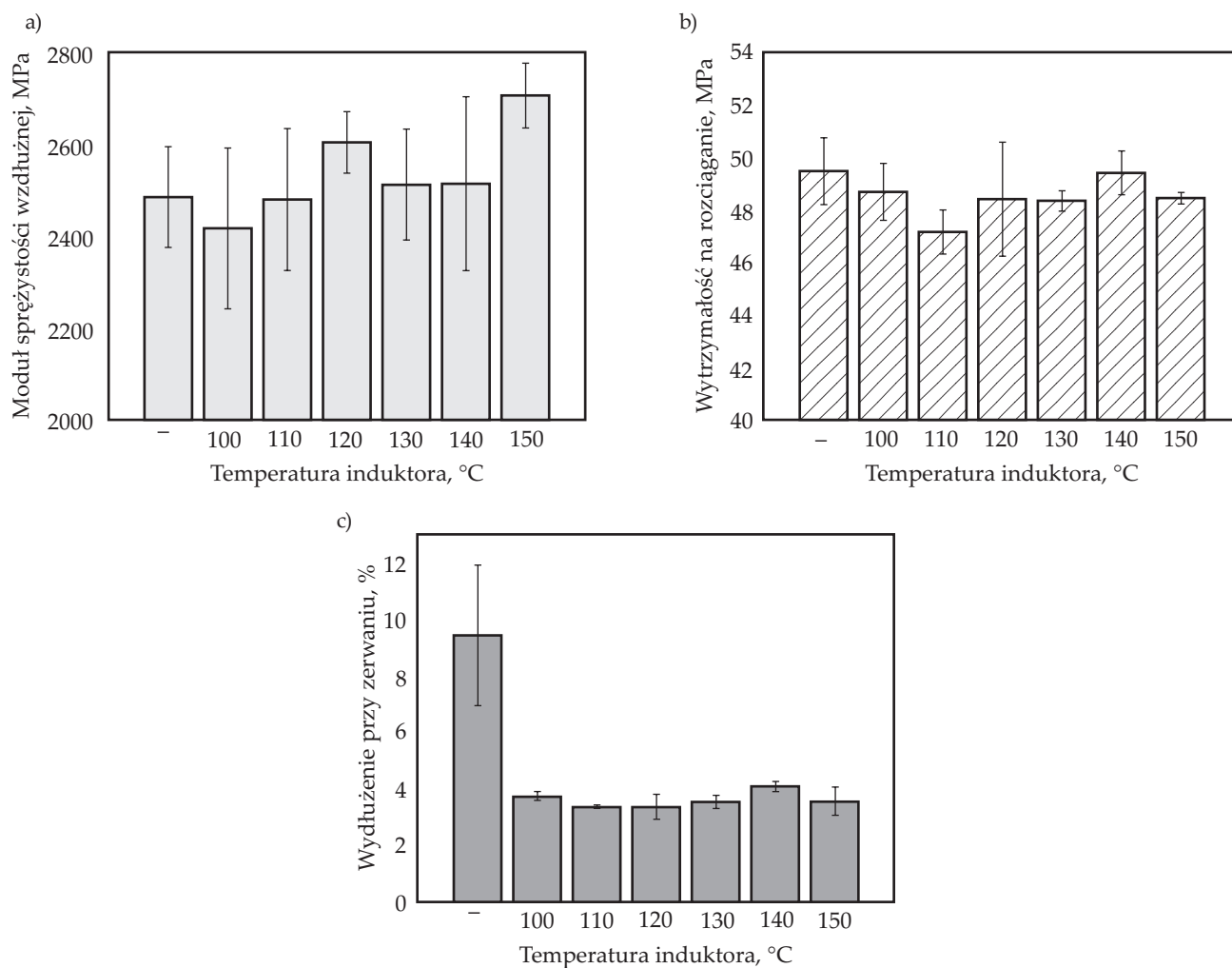
nologicznego, dokonano na podstawie obserwacji za pomocą mikroskopu stereoskopowego MSt 130, sprzężonego z systemem cyfrowej rejestracji obrazu TCA-5.0 Color, w powiększeniu 157,5x.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Na rys. 5 przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych uzyskane w statycznej próbie rozciągania próbek wytworzonych w warunkach różnej temperatury induktora. Można zaobserwować niewielki wpływ grzania indukcyjnego na moduł sprężystości wzdłużnej próbek (rys. 5a). Zmiany wartości modułu sprężystości wszystkich badanych materiałów mieszczą się w granicach błędów pomiaru. Wytrzymałość na rozciąganie (R_m) badanych próbek mieści się w przedziale 47,1–49,5 MPa (rys. 5b). Zbliżone wartości R_m wynikają z faktu, że pod wpływem grzania indukcyjnego następowały zmiany struktury jedynie na powierzchni wypraski. Wzrost temperatury induktora od 100 °C do 150 °C powodował znaczne zmniejszenie wydłużenia przy zerwaniu badanych próbek (rys. 5c). Wydłużenie przy zerwaniu wszystkich próbek wtryskiwanych w warunkach różnych temperatur induktora zmniejszyło się do wartości z przedziału 3,33–4,05 %.

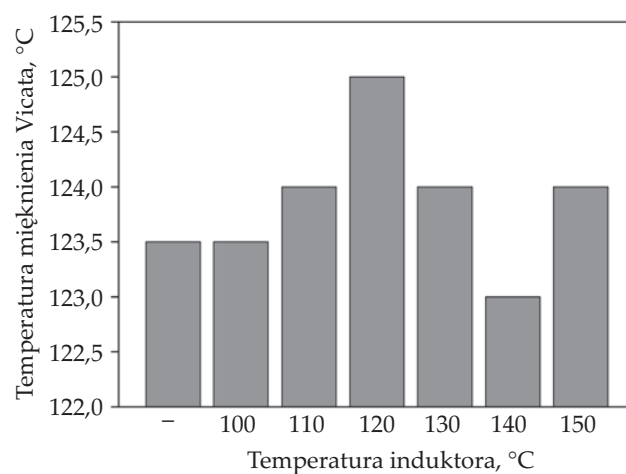
Na rys. 6 przedstawiono oznaczone wartości temperatury mięknięcia Vicata badanych próbek. Zaobserwowano nieznaczną zmianę temperatury mięknięcia Vicata próbek wykonanych w technologii porowania fizycznego MuCell® z wykorzystaniem grzania indukcyjnego w różnej temperaturze induktora. Zmiany te mogą być spowodowane różną liczbą oraz różnymi wymiarami wytworzonych w strukturze wyprasek pęcherzyków (porów), które zapadają się pod działaniem węgelnika (igły stalowej). Najwyższą temperaturę mięknięcia (125 °C) wykazywał wyrób wytworzony z zastosowaniem induktora o temp. 120 °C, natomiast najniższą (123 °C) – wynoszącą 140 °C.

Rysunek 7 przedstawia wyniki dynamiczno-mechanicznej analizy termicznej (DMTA) wybranych próbek obrazujące zmiany wartości modułu zachowawczego (G'), modułu stratności (G'') oraz tangensa kąta stratno-

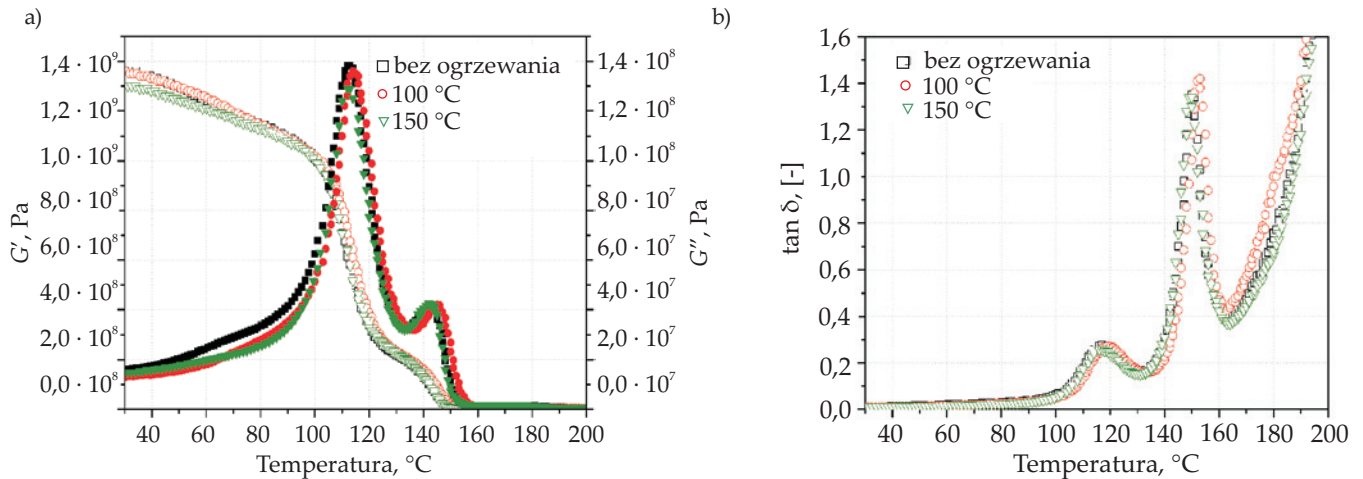


Rys. 5. Właściwości mechaniczne próbek wyciętych z detali uzyskanych przy różnej temperaturze induktora
 Fig. 5. Mechanical properties of specimens cut from the parts manufactured at various inductor temperature

ści ($\tan \delta$) w funkcji temperatury. W tabeli 3 zestawiono wartości G' oraz temperatury zeszklenia odczytanej jako maksima krzywych $\tan \delta(T)$. Próbkki wtryskiwane przy temperaturze induktora 150 °C charakteryzowały się znacznie mniejszymi wartościami modułu zachowawczego (G'). Na podstawie danych literaturowych można stwierdzić, że wiąże się to ze zwiększoną gęstością materiału w wyniku zmniejszenia wymiarów porów [18, 19]. Lokalne maksimum na krzywej $\tan \delta(T)$ ok. 117 °C odnosi się do przejścia fazowego w kopolimerze ABS, natomiast w temp. ok. 147 °C – do przejścia fazowego w PC [20, 21]. Wartości temperatury zeszklenia badanych próbek materiałowych nie różnią się w istotnym stopniu, zaobserwowano jedynie niewielkie przesunięcia krzywych $\tan \delta(T)$. W wypadku próbek wytwarzanych przy temperaturze induktora 100 °C obydwa maksima na krzywych tangensa kąta stratności odpowiadały większym wartościom temperatury zeszklenia (tabela 3). Intensywności pików na krzywej $\tan \delta(T)$ wyprasek otrzymanych bez grzania indukcyjnego oraz z zastosowaniem induktora w temperaturze 100 °C są zbliżone. Najmniejsze wartości $\tan \delta$, w punktach odpowiadających lokalnym mak-



Rys. 6. Temperatura mięknienia Vicata próbek wyciętych z detali uzyskanych przy różnej temperaturze induktora
 Fig. 6. Vicat softening temperature of specimens cut from the parts manufactured at various inductor temperature



Rys. 7. Wyniki analizy DMTA próbek wytwarzanych bez udziału induktora oraz z grzaniem indukcyjnym w temp. 100 °C i 150 °C: a) zależność modułu zachowawczego (G') oraz modułu stratności (G'') od temperatury, b) zależność tangensa kąta stratności ($\tan \delta$) od temperatury

Fig. 7. Results of DMTA measurements for samples manufactured without using an inductor and with induction heating at 100 °C and 150 °C: a) temperature dependence of storage (G') and loss (G'') modulus, b) temperature dependence of loss angle tangent ($\tan \delta$)

T a b e l a 3. Zestawienie wybranych wartości modułu zachowawczego (G') oraz temperatury zeszklenia (T_g) badanych próbek
T a b l e 3. Selected values of storage modulus (G') and glass transition temperature (T_g) of examined samples

Temperatura induktora	$G'_{30^\circ\text{C}}$	$G'_{60^\circ\text{C}}$	$G'_{120^\circ\text{C}}$	T_{g1}	$\tan \delta(T_{g1})$	T_{g2}	$\tan \delta(T_{g2})$
	Pa			°C	–	°C	–
Bez ogrzewania	$1,36 \cdot 10^9$	$1,24 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^8$	117	0,276	150	1,35
100 °C	$1,35 \cdot 10^9$	$1,25 \cdot 10^9$	$3,87 \cdot 10^8$	119	0,271	153	1,42
150 °C	$1,29 \cdot 10^9$	$1,18 \cdot 10^9$	$2,12 \cdot 10^8$	117	0,257	149	1,34

simom, odnoszą się do próbek wytworzonych przy najwyższej temperaturze induktora (150 °C). Wiąże się to z najmniejszą zdolnością do tłumienia drgań mechanicznych oraz zwiększoną sztywnością struktury tych próbek w porównaniu z cechami pozostałych analizowanych materiałów. Wspomniane obserwacje są zgodne z wynikami badań modułu sprężystości wzdłużnej w próbie statycznego rozciągania. Jedynie w wypadku wyprasek otrzymanych w warunkach grzania indukcyjnego w temperaturze 150 °C odnotowano przesunięcie wartości T_g w kierunku niższych wartości temperatury. Materiały polimerowe o strukturze mikrokomórkowej zazwyczaj wykazują mniejszy moduł sprężystości i przesunięcie T_g w kierunku mniejszych wartości niż materiały charakteryzujące się większymi wymiarami porów. Warto przy tym podkreślić, że im mniejsze wymiary porów i bardziej jednolity rozkład dużych porów, tym większe przesunięcie wartości T_g w kierunku niższej temperatury [15].

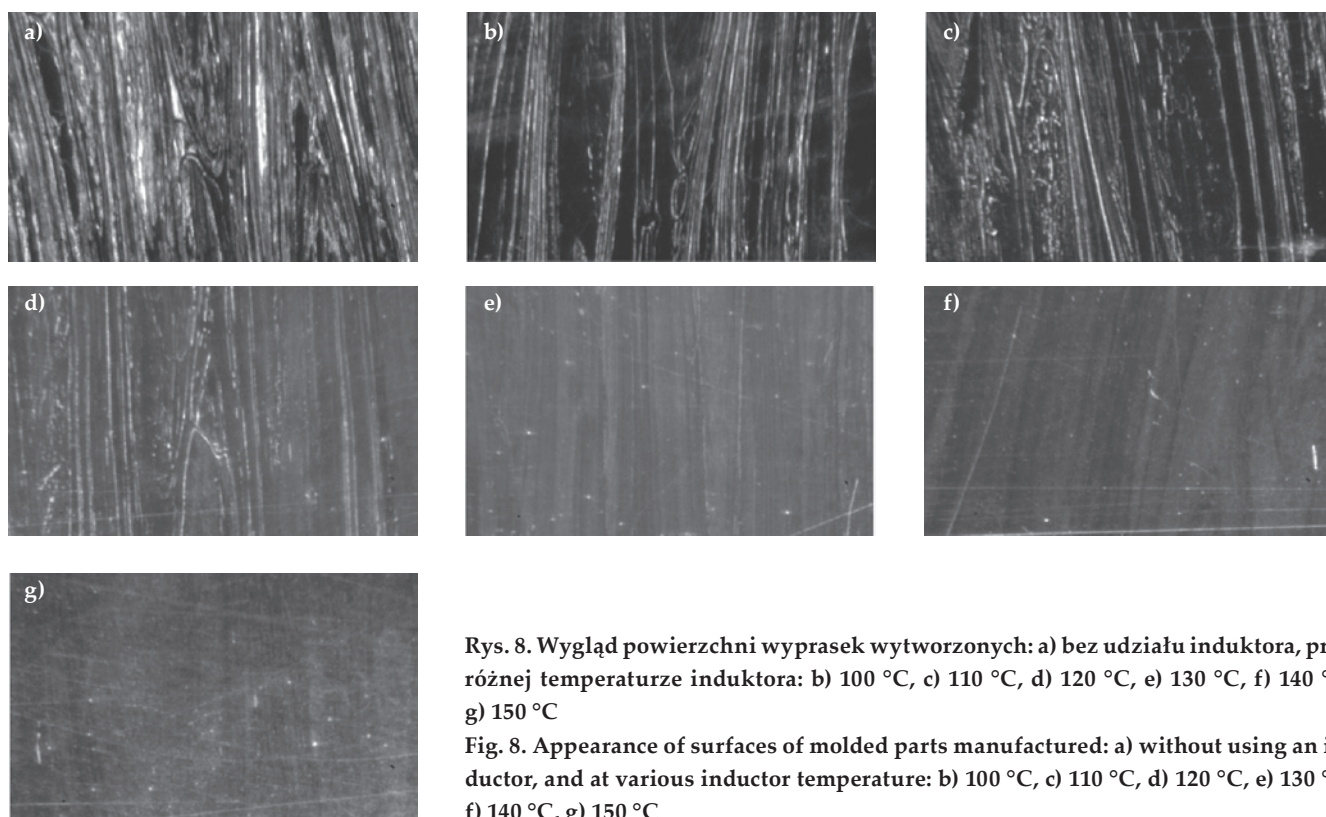
Z punktu widzenia użytkownika główną cechą użytkiwanych elementów jest jakość ich powierzchni. Coraz większe wymagania odbiorców dotyczą już nie tylko właściwości mechanicznych czy użytkowych. Dużą wagę przywiązuje się obecnie do estetyki gotowego detalu. Dzięki zastosowaniu technologii wtryskiwania z dynamicznymi zmianami temperatury formy można uzyskać wypraski o gładkiej powierzchni lub o określonej jej teksturze. Wykorzystanie specjalnych technologii wtryskiwania, takich jak: Variotherm, Variomould IR, RTC, DMTC, RHC

i InduMold, pozwala w większym stopniu wpływać na jakość powierzchni i kształtować ją w zależności od potrzeb. Na rys. 8 przedstawiono zdjęcia mikroskopowe powierzchni wytworzonych wyprasek wykonane w powiększeniu 157,5x. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury induktora znacznie poprawia się jakość powierzchni detalu. Linie płynięcia polimeru stają się mniej widoczne i powierzchnia staje się błyszcząca. Można stwierdzić, że zwiększenie temperatury formy wpływa na polepszenie jednorodności struktury naskórka wytworzonego detalu i eliminację niedolewów, a materiał polimerowy łatwiej wypełnia i odwzorowuje wewnętrzne kształty formy. Zastosowanie grzania indukcyjnego eliminuje też problem powstawania „zamrożonej” przyściennej warstwy.

Rysunek 9 przedstawia obrazy SEM mikrostruktury przełomów próbek wyciętych z wytworzonych detali: warstwy naskórkowej, przejściowej i rdzenia wyrobu. Ze wzrostem temperatury induktora struktura warstwy naskórkowej i przejściowej wypraski jest bardziej jednolita, natomiast struktura mikroporowata rdzenia się nie zmienia.

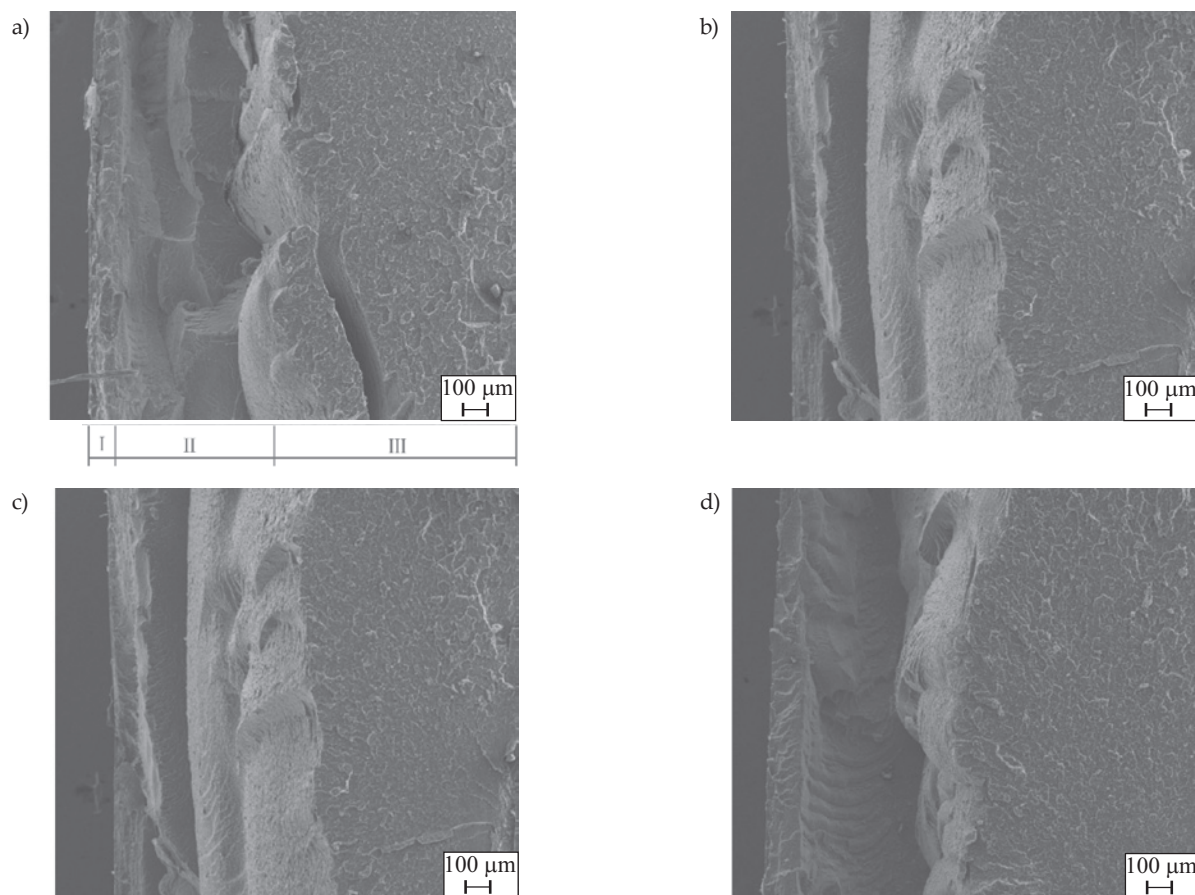
PODSUMOWANIE

Możliwość uzyskania wyrobów charakteryzujących się znacznie lepszą jakością powierzchni, a w konsekwencji lepszą estetyką, skłania przetwórców do wdrażania technologii wtryskiwania wykorzystujących dynamiczne zmiany temperatury (odmiany Variotherm). Technologia MuCell®



Rys. 8. Wygląd powierzchni wyprasek wytworzonych: a) bez udziału induktora, przy różnej temperaturze induktora: b) 100 °C, c) 110 °C, d) 120 °C, e) 130 °C, f) 140 °C, g) 150 °C

Fig. 8. Appearance of surfaces of molded parts manufactured: a) without using an inductor, and at various inductor temperature: b) 100 °C, c) 110 °C, d) 120 °C, e) 130 °C, f) 140 °C, g) 150 °C



Rys. 9. Zdjęcia SEM przełomów próbek wyprasek wytworzonych: a) bez udziału induktora, zaznaczono warstwy: I – naskórek, II – warstwa przejściowa, III – rdzeń, przy temperaturze induktora: b) 100 °C, c) 120 °C, d) 150 °C (powiększenie 100x)

Fig. 9. SEM images of sample fractures of molded parts manufactured: a) without using an inductor (marked layers: I – skin layer, II – transient layer, III – core) and at inductor temperature: b) 100 °C, c) 120 °C, d) 150 °C (magnification 100x)

zapewnia ponadto możliwość wytworzenia wyprasek lżejszych, o dokładniej odwzorowanych kształtach i tańszych, co przyczynia się do coraz szerszego jej zastosowania w różnych branżach przemysłu, ostatnio nawet w opakowaniowej.

Wypraski wytwarzane z wykorzystaniem grzania indukcyjnego wykazują znacznie lepsze właściwości mechaniczne i użytkowe niż elementy wykonane w konwencjonalnej technologii wtryskiwania. Nie dotyczy to wyprasek wytwarzanych w technologii spieniania MuCell®, w której modyfikacja warstwy przypowierzchniowej wyrobu nie wpływa w istotnym stopniu na jego właściwości mechaniczne, zależnie od liczby oraz wymiarów powstających w całej objętości wypraski wewnętrznych porów. Stwierdzono niewielkie zwiększenie modułu Younga próbek detali wytworzonych w technologii InduMold, brak zmian wytrzymałości na rozciąganie oraz ponad dwukrotne zmniejszenie wydłużenia przy zerwaniu. Wyniki dynamicznej analizy termomechanicznej dowodzą, że zastosowanie odpowiednio dobranej temperatury induktora może mieć znaczny wpływ na strukturę mikroporowatą elementów wytwarzanych z wykorzystaniem obu odmian technologii wtryskiwania. Wypraski uzyskane w warunkach wyższych wartości temperatury induktora (150 °C) wykazywały zmniejszony moduł zachowawczy, a jednocześnie zmniejszenie wartości tangensa kąta stratności.

W wypadku zastosowania grzania indukcyjnego powierzchnia uzyskanego wyrobu odznaczała się zdecydowanie lepszym wyglądem, bez widocznych linii płynięcia tworzywa i bardzo wysokim połyskiem, w porównaniu z powierzchnią wypraski wytworzonej w procesie wtryskiwania bez udziału induktora.

Badania potwierdziły możliwość wykorzystania łącznie obu technologii (MuCell® i InduMold) do produkcji wysokiej jakości elementów dla przemysłu motoryzacyjnego.

PODZIĘKOWANIA

Autor dziękuje firmom ENGEL i RocTool za udostępnienie maszyny, formy i induktora do wytworzenia wyprasek do opisanych w powyższym artykule badań.

LITERATURA

- [1] Giessauf J., Pillwein G., Steinbichler G.: *Kunststoffe International* **2008**, 8, 57.
- [2] Hinzpeter U.: *Kunststoffe International* **2009**, 1, 11.
- [3] Jaroschek C., Cernjak D.: *Kunststoffe International* **2010**, 4, 29.
- [4] Ridder H., Heim H.P., Jarka S.: *Kunststoffe International* **2009**, 5, 22.
- [5] Materiały informacyjne Gas Injection Worldwide Ltd.: "Rapid Temperature Cycling Solutions RTC", FAKUMA 2008, Friedrichshafen, Niemcy, 14–18 października 2008.
- [6] Chen S.-C., Minh P.S., Chang J.-A. i in.: *International Communications in Heat and Mass Transfer* **2012**, 39, 216. <https://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.11.006>
- [7] Guerrier P., Hattel J.H.: "Numerical modeling of magnetic induction and heating in injection molding tools", Materiały International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies NEWTECH, Stockholm, Szwecja, 27–30 października 2013, str. 35–45.
- [8] Mrozek K.: "Optimization of the injection mold design by means of external selective induction heating", Materiały ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Boston, Stany Zjednoczone, 2–5 sierpnia 2015, nr art. DETC2015-46440.
- [9] Mrozek K., Staniek R., Szostak M.: "Research on external and internal induction heating effectiveness of injection molds by means of thermovision measurements", Materiały ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Kopenhaga, Dania, 25–27 lipca 2014, nr art. ESDA2014-20317.
- [10] Mrozek K., Chen S.C.: *Journal of Applied Polymer Science* **2017**, 134, 44 992. <http://dx.doi.org/10.1002/app.44992>
- [11] Mrozek K., Staniek R.: "Simulations and verifications of selective induction heating of injection mold cavity insert", Proceedings of the 6th International Conference on "Structural Engineering, Mechanics and Computation SEMC" 2016, Cape Town, str. 1830–1835.
- [12] Zawilski R., Szostak M.: *Przetwórstwo Tworzyw* **2013**, 153, 292.
- [13] Materiały informacyjne Gesellschaft Wärme Kälte GmbH: "Dynamische Formnesttemperierung. Direkt beheizte Hochleistungswerkzeuge", FAKUMA 2009, Friedrichshafen, Niemcy, 13–17 października 2009.
- [14] Schröbel S.: *Kunststoffe International* **2010**, 1, 52.
- [15] Bledzki K., Kühn J., Kirschling H., Pitscheneder W.: *Cellular Polymers* **2008**, 27, 91.
- [16] Materiały informacyjne Engel GmbH: „Wprowadzenie do technologii MuCell”, Schwertberg, Austria, 2016.
- [17] Materiały informacyjne Trexel Inc.: "A Guide to the MuCell Microcellular Foam Injection Molding Process", Woburn, Stany Zjednoczone, 2016.
- [18] Rodriguez-Perez M.A., De Saja J.A.: *Polymer Testing* **2000**, 19, 831. [https://dx.doi.org/10.1016/S0142-9418\(99\)00054-9](https://dx.doi.org/10.1016/S0142-9418(99)00054-9)
- [19] Almanza O., Rodriguez-Perez M.A., De Saja J.A.: *Polymer* **2001**, 42, 7117. [https://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00107-0](https://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00107-0)
- [20] Li H., Zhao J., Liu S., Yuan Y.: *RSC Advances* **2014**, 20, 10 395. <https://dx.doi.org/10.1039/C3RA45617J>
- [21] Wei X., Li D., Jiang W. i in.: *Scientific Reports* **2015**, 5, 11 181. <https://dx.doi.org/10.1038/srep11181>

Otrzymano 12 VI 2017 r.