

Dr inż. Krzysztof Mrozek, Mgr inż. Paweł Muszyński, Mgr inż. Przemysław

Poszwa

Faculty of Mechanical Engineering

Poznan University of Technology

Marii Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, Poland

E-mail: Krzysztof.mrozek@put.poznan.pl, pawel.h.muszynski@doctorate.put.poznan.pl

przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl,

Wpływ nagrzewania indukcyjnego form wtryskowych na niezawodność złączy elektrycznych

Influence of induction heating of injection molds on reliability of electrical connectors

Słowa kluczowe: *forma wtryskowa, nagrzewanie indukcyjne, eksploatacja i niezawodność wyprasek, złącza elektryczne*

Keywords: *injection mold, induction heating, maintenance and reliability of moldings, electrical connectors*

Streszczenie: Ciągłe zwiększanie popytu na energię elektryczną powoduje, że przemysł elektrotechniczny znajduje się pod nieustanną presją rozwoju technologicznego. Konieczne jest ograniczanie kosztów przy równoczesnym zwiększaniu niezawodności produkowanych wyrobów. Powszechna miniaturyzacja oraz ograniczanie masy wyrobów montowanych w pojazdach lądowych, statkach i samolotach wymaga stosowania innowacyjnych metod produkcyjnych. W ramach publikacji przedstawiono problem eksploatacji złączy elektrycznych montowanych na szynach w zakresie niezawodności ich montażu i demontażu. Autorzy zaproponowali technologię selektywnego nagrzewania indukcyjnego formy wtryskowej do produkcji obudów złączy elektrycznych w celu poprawy ich niezawodności. Aby ujawnić genezę problemu, w ramach pracy przeprowadzono badania symulacyjne wypełniania formy wskazujące na niewłaściwą lokalizację linii łączenia płynących strug tworzywa. Następnie przedstawiono wyniki symulacji i eksperymentu nagrzewania indukcyjnego, które były niezbędne do właściwego zaprojektowania i wykonania formy wtryskowej. W końcowym etapie wykonano badania eksperymentalne montażu i demontażu wyprodukowanych obudów w warunkach odpowiadających rzeczywistym. Uzyskane wyniki pokazały, że selektywne nagrzewanie indukcyjne w znaczącym stopniu wpłynęło na poprawę niezawodności obudów złączy elektrotechnicznych montowanych na szynach.

Abstract: Continuous increase in demand for electricity causes that electrotechnical industry is relentlessly under pressure of technological development. It is necessary to reduce costs while increasing a reliability of manufactured products. Common miniaturization of products mounted in land vehicles, vessels and airplanes along with limitation of their weight requires the use of innovative production methods. This publication presents the problem of exploitation related with reliable assembly and disassembly of rail-mounted electrical connectors. In order to improve the reliability of injected electrical connector housings, the authors proposed the selective induction heating technology as a heating method of injection mould. To reveal the origin of the problem, in case of this work, the simulation studies of filling the mould cavity were carried out. They show an incorrect localization of polymer streams weld line. Then the results of the simulation and induction heating experiment are presented. They were necessary for the proper design and make of the injection mould. In the final stage, the experimental tests of the manufactured housings assembly and disassembly were performed in conditions corresponding to the actual conditions. The obtained results show, that selective

induction heating technology has significantly improved the reliability of rail-mounted electrical connector housings.

1. Wprowadzenie

Elementy elektryczne i elektroniczne stanowią obecnie nieodłączne komponenty budowy maszyn, urządzeń i pojazdów. Zważywszy na fakt, że często bezpośrednio odpowiadają za bezpieczeństwo użytkowników, wymaga się od nich wysokiej niezawodności [28]. Wobec ciągłych dążeń do miniaturyzacji rośnie liczba problemów związanych z zachowaniem niezawodności tychże elementów [25, 30]. Autorzy, B. Sun, A. Wymysłowski et al. badali problemy eksploatacyjne elementów elektroniki, które wynikają bezpośrednio z miniaturyzacji. Problemy związane z miniaturyzacją nie dotyczą tylko i wyłącznie elektroniki. Redukcja masy i wymiarów gabarytowych stanowi duże utrudnienie dla konstruktorów i wykonawców obudów, które zazwyczaj są wykonywane z tworzywa w technologii wtryskiwania [24]. Z uwagi na swoje właściwości izolacyjne, łatwość formowania i niską cenę tworzywa sztuczne stały się podstawowym materiałem wykorzystywanym do produkcji obudów właśnie w technologii wtryskiwania.

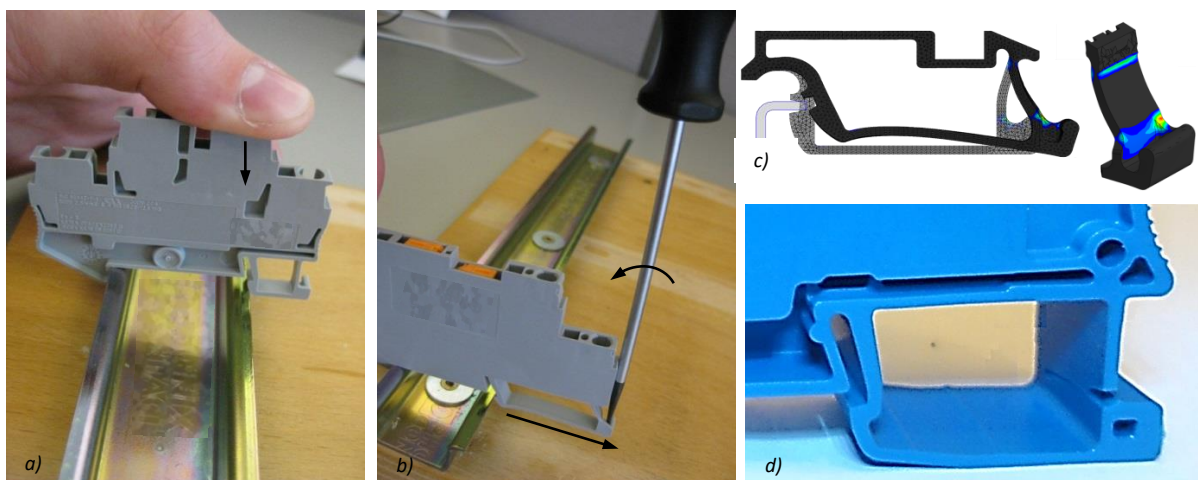
Spośród wszystkich parametrów wtryskiwania kluczowa jest temperatura powierzchni formujących podczas wypełniania gniazda przez płynące tworzywo [1, 2, 20, 27]. W pracy [17] przedstawiono wpływ nagrzewania indukcyjnego na proces produkcji cienkościennych wyrobów z tworzyw sztucznych. Również Chang et al. dowiedli, że zastosowanie wysokiej temperatury gniazda formującego pozwala na produkcję wyrobów o dobrej estetyce [5-8]. Podczas konwencjonalnego procesu wtryskiwania wykorzystuje się stałotemperaturowe formy wtryskowe. Różnica temperatur między płynącą strugą tworzywa a powierzchnią formującą powoduje, że wraz z przebytą drogą stop wychładza się i wzrasta jego lepkość. Z drugiej strony, w pracy [26] zauważono, że utrata ciepła wtrysniętego tworzywa maleje wraz ze wzrostem prędkości wtrysku, co świadczy o ważności tego parametru podczas przebiegu procesu konwencjonalnego. Powstawanie przymarzniętych warstw redukuje przekrój gniazda, co uniemożliwia wypełnienie najbardziej oddalonych od punktu wtrysku obszarów formowania. Problemy związane z niecałkowitym wypełnieniem gniazda formującego pojawiają się w szczególności podczas przetwórstwa tworzyw o podwyższonej lepkości lub uzupełnionych o różnego rodzaju środki wypełniające (włókna wzmacniające, proszki magnetyczne, talk, uniepalniacze itp.) [32]. Bardzo często temu zjawisku towarzyszą błędy odwzorowania mikrostruktur oraz wady związane z niewłaściwym ukształtowaniem linii łączenia płynących strug tworzywa [3, 13]. Wady będące efektem zastosowania zbyt niskiej temperatury formy oraz podwyższonego ciśnienia wtrysku mogą zostać usunięte w dodatkowych procesach technologicznych. Należy jednak wziąć pod uwagę, że z punktu widzenia ekonomii oraz ekologii wytwarzania korzystniejsze jest prowadzenie produkcji kompleksowej, zawartej w jednej operacji wtryskiwania.

W przypadku technologii dynamicznych zmian temperatury formy gniazdo formujące nie ma jednej stałej temperatury pracy. Temperatura w formie zmieniana jest celowo w sposób zsynchronizowany z pracą wtryskarki, zgodnie z założonym przez technologa profilem. W momencie wtrysku powierzchnie formujące są nagrzane do temperatury bliskiej wartościom temperatury wtryskiwanego stopu tworzywa. Po wtrysku rozpoczyna się proces intensywnego schładzania formy. Dzięki temu możliwa jest produkcja części o wysokim stopniu połysku pozbawionych deformacji i widocznych linii płynięcia tworzywa [31] oraz elementów cienkościennych, w przypadku których często dochodzi do niecałkowitego wypełniania gniazda formującego. Reologia tworzyw sztucznych, z powodu ich nienewtonowskiego charakteru, bezpośrednio wiąże się z temperaturą przetwórstwa [33]. W przeciwieństwie do płynów newtonowskich, lepkość płynącego stopu nie jest wartością stałą

w warunkach izobarycznych, lecz zmienia się wraz ze zmianą prędkości ścinania [34]. Techniki cyklicznej regulacji temperatury gniazda formy dają wytwórcy możliwość świadomego wpływania na przebieg i rozkład temperatur w gnieździe. Zgodnie z opracowaniem Huang et al., poprzez zwiększoną temperaturę ścian formujących zatrzymuje się proces przedwczesnego wychładzania tworzywa, co umożliwia całkowite wypełnienie gniazda oraz zapewnia wysoką jakość odwzorowania mikrostruktur [14, 19]. Dzięki temu uzyskuje się w procesie wtrysku dokładniejsze odwzorowanie powierzchni przy znacząco niższym oporze wypełniania formy tworzywem [29]. Jakość odwzorowania powierzchni stanowi obecnie coraz większe wyzwanie [11]. Z kolei podczas fazy docisku występuje lepsza propagacja ciśnienia w całej objętości wypraski. Występują więc mniejsze gradienty ciśnienia pomiędzy punktem wtrysku i najdalej oddalonymi od niego miejscami na drodze płynięcia tworzywa. Zgodnie z analizą przeprowadzoną przez Liparoti et al. przekłada się to na obniżenie zamrożonych w wyprasce naprężeń oraz mniejsze wartości, a także różnice orientacji skurczu [15]. Korzyść ta staje się widoczna szczególnie wtedy, gdy cyklicznym sterowaniem temperaturą gniazd formujących objęte są obie połówki formy. Spośród wielu metod szybkiego nagrzewania wiele korzyści daje nagrzewanie indukcyjne [9]. Główną zaletą wysokoczęstotliwościowego nagrzewania indukcyjnego jest przede wszystkim możliwość grzania powierzchniowego (bez dużych objętości), co jest nazywane efektem naskórkowości. Istnieje wiele publikacji opisujących wpływ nagrzewania indukcyjnego na jakość wyprasek i proces produkcyjny [22, 23]. Szeroko badane są również mechanizmy powstawania linii łączenia płynących strug tworzywa [3, 4]. Literatura jest jednak pozbawiona opracowań na temat wpływu nagrzewania indukcyjnego na eksploatację i niezawodność wyrobów z tworzyw sztucznych. W ramach pracy Autorzy podjęli się zdefiniowania problemu eksploatacji obudów złączy elektrycznych montowanych na szynie. Opracowanie zawiera wyniki badań symulacyjnych produkcji obudów, nagrzewania indukcyjnego wybranych obszarów formujących i badań eksperymentalnych polegających na wyprodukowaniu i eksploatacji grupy 1000 wyprasek badawczych.

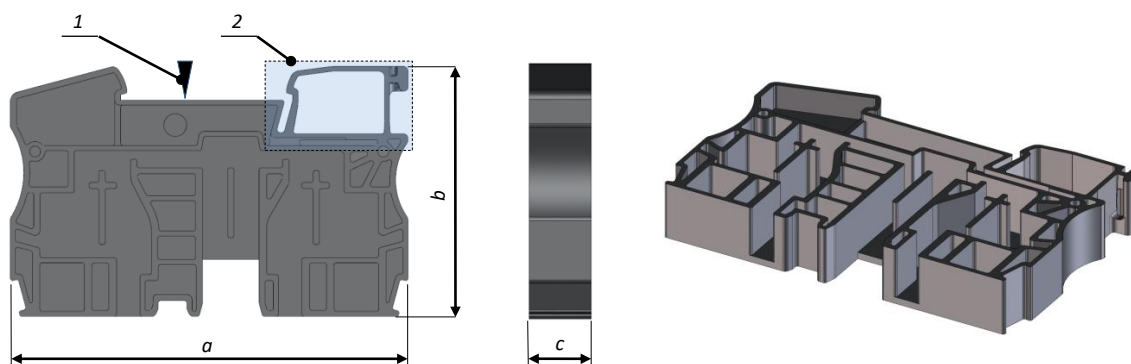
2. Definicja problemu

Na rysunku 1 przedstawiono proces montażu oraz demontażu złącza elektrycznego na szynie. Obudowa złącza została wyposażona w zamknięty zaczepek elastyczny, który powszechnie wykorzystywany jest w przemyśle elektrotechnicznym.



Rys. 1. Przykładowe złącze elektryczne wyposażone w zaczepek elastyczny: a) montaż złącza na szynie, b) proces demontażu wyrobu przy użyciu wkrętaka, c) koncentracja naprężeń w stopie montażowej w trakcie procesu demontażu, d) zjawisko pęknięcia stopy montażowej podczas deformacji zaczepeku

Docisnięcie obudowy do szyny powoduje chwilowe odkształcenie sprężyste stopy (rys. 1a). Demontaż odbywa się poprzez odciągnięcie zaczepu wkrętakiem lub innym narzędziem (rys. 1b). Jak można zaobserwować (rys. 1c), największe naprężenia gromadzą się w obszarze stopy (badania symulacyjne naprężeń przedstawiono w sposób poglądowy). Problem stanowi fakt, iż miejscem koncentracji naprężeń staje się obszar łączenia płynących strug tworzywa. W przypadku, gdy czoła płynącego stopu są zbyt przechłodzone, wytworzenie wystarczająco mocnych wiązań polimerowych jest niemożliwe. Skutkuje to pękaniem zaczepu podczas demontażu, co w efekcie dyskwalifikuje wyrób z dalszego użytku (rys. 1d). Wypraska przedstawiona na rysunku 2 stanowi prototypową obudowę złącza elektrycznego. Gęste uźebrowanie pozwala na uzyskanie dużej sztywności wyrobu oraz umożliwia montaż elementów przewodzących.



Rys. 2. Model obudowy złącza elektrycznego wyposażonego w elastyczne elementy złączne: $a = 80,2$ mm, $b = 50,6$ mm, $c = 12,2$ mm, 1 – punkt wtrysku, 2 – obszar formowania elastycznej stopy montażowej zakwalifikowany do selektywnego nagrzewania indukcyjnego

Wyrób został zaprojektowany w taki sposób, aby maksymalnie zredukować jego masę. Górną część wypraski wyposażono w zespół mocowania. Elastyczna stopa montażowa umożliwia wpinanie i wypinanie złącza na szynie montażowej.

3. Badania symulacyjne wypełniania gniazda formującego

Aby poprawnie odczytać problem związane z montażem i demontażem złączy elektrycznych konieczne było przeprowadzenie symulacji płynięcia tworzywa wewnątrz gniazda formującego. W tym celu oparto się na modelu Cross-WLF. Polimery są cieczami nienewtonowskimi i ich właściwości ściśle zależą od temperatury [33]. W przeciwieństwie do cieczy newtonowskich ich lepkość η nie jest wartością stałą i zależy od naprężenia tnącego τ i szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ (1):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

Lepkość polimerów η spada wraz ze wzrostem szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ [10, 34]. W celu wyznaczenia lepkości użyto modelu Crossa (2):

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (2)$$

Do wyznaczenia zależności lepkości η od temperatury T zastosowano zależność Williamsa-Landela-Ferry'ego (3):

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[-\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)} \right] \quad (3)$$

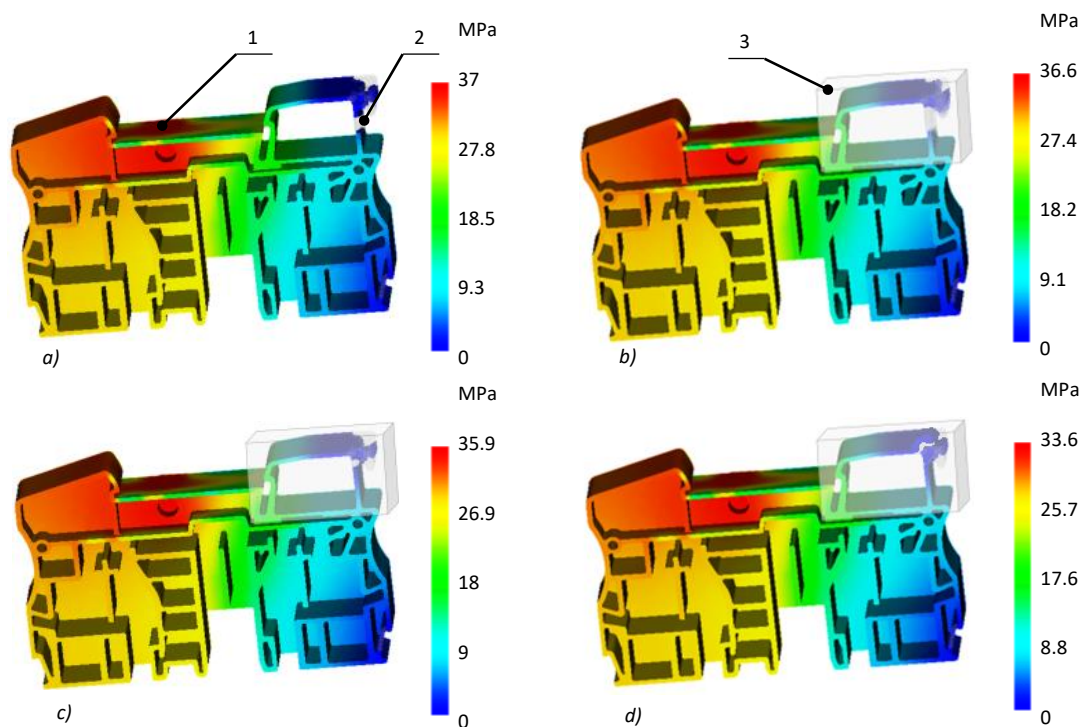
gdzie D_1 , A_1 , A_2 są stałymi materiałowymi, T^* jest temperaturą odniesienia. Równania 1-3 są nazywane modelem Cross-WLF.

Badania symulacyjne przeprowadzono przy użyciu programu Autodesk Moldflow Insight 2013. Parametry do badań symulacyjnych wypełnienia gniazda formującego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry wejściowe do badań symulacyjnych dla trzeciego modelu badawczego

	Technologia konwencjonalna	Nagrzewanie indukcyjne
Materiał wtryskiwany:	PA 66 (Frianyl A63 RV0 Frisetta)	PA 66 (Frianyl A63 RV0 Frisetta)
Temperatura tworzywa [°C]:	270	270
Temperatura formy [°C]:	70 – całe gniazdo	70 - gniazdo/ 130; 150; 170 - nagrzewanie indukcyjne
Czas wypełniania [s]:	0,8	0,8
Czas dopakowania [s]:	2	2
Czas chłodzenia [s]:	8	8,1
Ciśnienie wtrysku [MPa]:	37	36,6; 35,9; 33,6
Ciśnienie dopakowania [MPa]:	29,6	28,7

Płynące strugi tworzywa w pierwszej kolejności wypełniają korpus wypraski, a dopiero w końcowej fazie formowana jest stopa montażowa. Stopa swym kształtem stanowi pętlę zamkniętą, co oznacza, że w jej obwodzie następuje łączenie się dwóch strug (rys. 3).



Rys. 3. Badania symulacyjne wypełnienia gniazda formującego dla obudowy złącza elektrycznego, a) proces konwencjonalny ze stałą temperaturą formy, b) temperatura obszaru nagrzewanego indukcyjnie wynosi 130 °C, c) temperatura obszaru nagrzewanego indukcyjnie wynosi 150 °C, d) temperatura obszaru nagrzewanego indukcyjnie wynosi 170 °C, 1 – punkt wtrysku, 2 – obszar łączenia płynących strug tworzywa, 3 – obszar formy nagrzewany indukcyjnie

Ponieważ proces ten zachodzi w końcowej fazie wtrysku, ich czoła są już na tyle wychłodzone, że nie ma możliwości utworzenia wytrzymałych wiązań polimerowych. Jako że obszar ten jest narażony na koncentrację naprężeń podczas montażu i demontażu wyrobu, często dochodzi do jego pęknięcia. W teorii rozwiązaniem problemu byłaby lokalizacja

przewężki bezpośrednio na stopie montażowej, jednak z przyczyn technologicznych jest to ekonomicznie nieuzasadnione. Złącza elektryczne tego typu produkowane są w tak dużych ilościach, że układ wtrysku zimno-kanalowego został wyparty przez system wtrysku bezpośredniego (gorąco-kanalowego). Z przyczyn ekonomicznych, na potrzeby eksperymentu zastosowano układ zimno-kanalowy. Na podstawie zrealizowanych badań symulacyjnych stwierdzono, że lokalne podwyższenie temperatury w obszarze formowania stopy montażowej spowodowało przesunięcie linii łączenia poza obszar koncentracji naprężeń. Nastąpiła nieznaczna redukcja ciśnienia, co wynika z niewielkiego udziału obszaru o podwyższonej temperaturze względem całej powierzchni wnęki formującej. Wyniki pokazują, że eksploatacja złączy elektrycznych powinna ulec poprawie po nagraniu obszaru formowania stopy montażowej do temperatury 170 °C.

4. Badania nagrzewania indukcyjnego formy

Proces projektowania i budowy formy wtryskowej do produkcji obudowy złącza elektrycznego (rys. 2) wymagał przeprowadzenia badań symulacyjnych i eksperymentalnych procesu nagrzewania indukcyjnego. Analiza symulacyjna została przeprowadzona z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) zaimplementowanej w pakiecie QuickField 6.3.1. Wszystkie badania przeprowadzono w przestrzeni 2D (xy) w modułach *AC Magnetics (analiza elektromagnetyczna)* w celu wyznaczenia gęstości prądu, natężenia pola magnetycznego oraz gęstości strumienia magnetycznego na powierzchni wkładki metalowej, a następnie *Transient Heat Transfer (analiza termiczna niestacjonarna)* w celu określenia zmian temperatury na powierzchni w funkcji czasu. Model 2D stanowi przekrój przez wkładkę nagrzewaną i cewkę indukcyjną w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu prądu przez cewkę. Z uwagi na mnogość nieliniowych relacji między poszczególnymi parametrami trudno jest przewidzieć dokładną wartość temperatury podczas nagrzewania indukcyjnego [21]. Ponadto na proces nagrzewania indukcyjnego wpływ mają nie tylko właściwości materiałowe. Naprężenia wywołane obróbką mechaniczną i obróbką cieplną mogą w znaczący sposób wpłynąć na przebieg procesu nagrzewania. Podstawą rozwiązywania problemów zjawisk elektromagnetycznych są równania Maxwella (4 - 7) [12, 16, 18]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} = J_s + J_e + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (6)$$

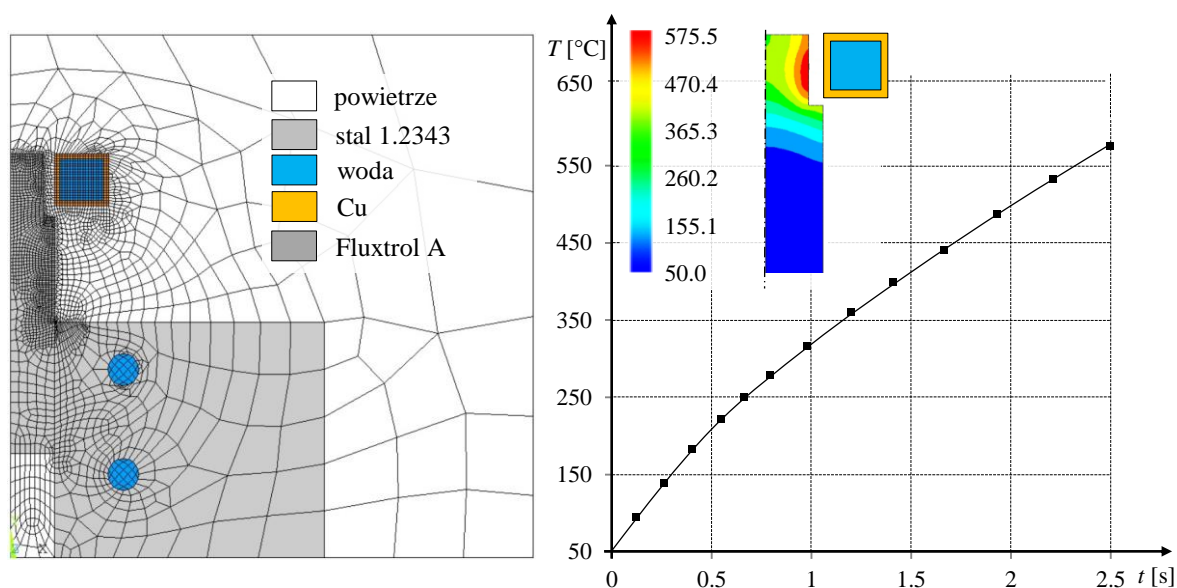
$$\nabla \cdot B = 0 \quad (7)$$

gdzie E to natężenie pola elektrycznego, B to gęstość strumienia magnetycznego, H natężenie pola magnetycznego, J to gęstość prądu, D to gęstość strumienia elektrycznego, J_s to wektor prądu źródłowego, J_e to wektor indukcji, ρ to gęstość ładunku elektrycznego.

Cewkę indukcyjną w kształcie pętli zamkniętej spozycjonowano w taki sposób, aby wkładka formująca stanowiła nagrzewany rdzeń (rys. 4a). Jest to najefektywniejsza metoda nagrzewania indukcyjnego, ponieważ strumień pola magnetycznego przenika w kierunku prostopadłym lub zbliżonym do prostopadłego do powierzchni nagrzewanego wsadu. Zgodnie

z założeniami uzyskano bardzo wysokie przyrosty temperatury w krótkim czasie (rys. 4b). Średnia szybkość nagrzewania w czasie 2,5 s wyniosła 210 °C/s. Po czasie 1 s zmianie uległ charakter krzywej nagrzewania. Otrzymany przebieg jest wyraźnie zbliżony do zależności liniowej.

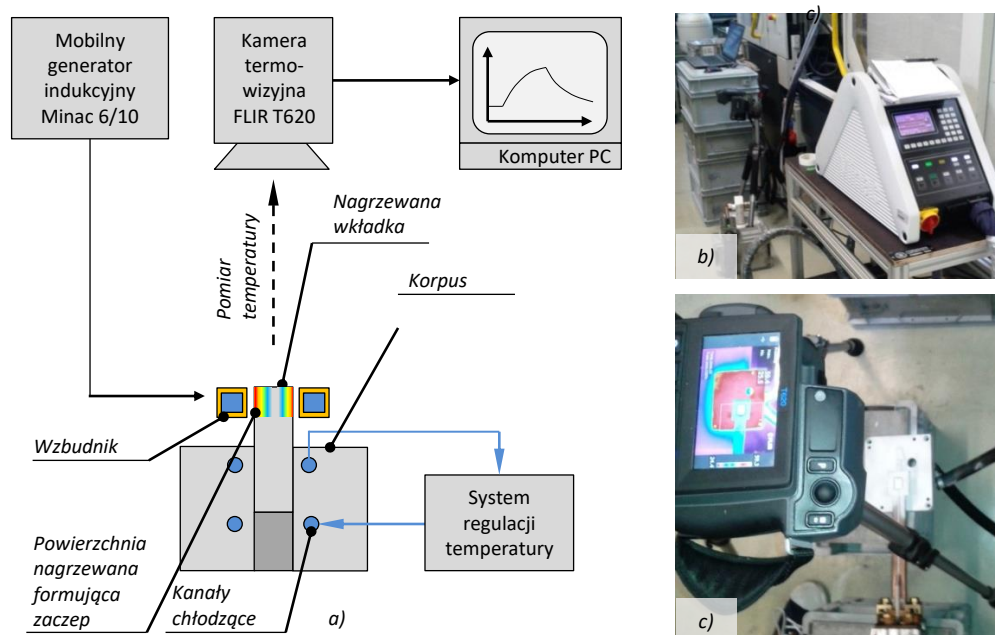
W celu weryfikacji wyników uzyskanych drogą symulacyjną, przed opracowaniem konstrukcji i budową prototypu formy wtryskowej, wykonano badania eksperymentalne. Do badań wykorzystano specjalnie przygotowane stanowisko, w którego skład wchodził generator indukcyjny EFD Minac 6/10, dwie wymienne cewki indukcyjne, kamera termowizyjna FLIR T620, komputer, system regulacji temperatury PSG i oprawa z wymiennymi nagrzewanymi wkładami (rys. 5).



Rys. 4. Badania symulacyjne procesu nagrzewania indukcyjnego wkładki formującej zaczepek wypraski: a) schemat z zadaną dyskretyzacją w programie QuickField, b) otrzymane wyniki

Tabela 2. Dane materiałowe do badań symulacyjnych

Material	1.2343	Fluxtrol A	Cu	Woda	Powietrze
Względna przenikalność magnetyczna μ_r	55	130	1	1	1
Przewodność elektryczna $\sigma \left[\frac{S}{m} \right]$	1e7	5e-5	5,6e7	2e-4	5e-15
Przewodność cieplna $K \left[\frac{W}{mK} \right]$	45	23	380	0,58	0,025
Gęstość $\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	7,8	6,6	8,7	1	0,001
Ciepło właściwe $C \left[\frac{J}{kgK} \right]$	460	430	380	4190	1005



Rys. 5. Badania eksperymentalne procesu nagrzewania indukcyjnego wkładki formującej zacpek wypraski: a) schemat, b), c) stanowisko badawcze

W analizach uwzględniono parametry zebrane w Tabeli 3.

Tabela 3. Parametry procesu w trakcie badań eksperymentalnych

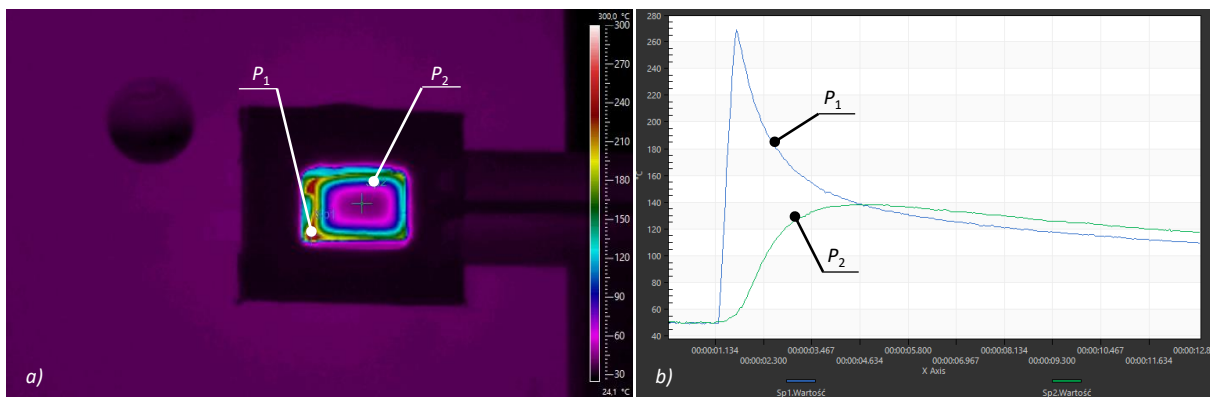
Parametr	Wartość
Temperatura otoczenia [°C]	24.8
Natężenie prądu w cewce [A]	828*
Pole przekroju poprzecznego cewki [m ²]	3,6e-5
Gęstość prądu elektrycznego wzbudnika [$\frac{A}{m^2}$]	2,3e7
Częstotliwość wzbudnika [kHz]	25
Przepływ wody przez cewkę [l/min]	6
Temperatura wody na wejściu do cewki [°C]	35
Temperatura początkowa korpusu i wkładki [°C]	50
Przepływ wody przez korpus [l/min]	6
Temperatura na wejściu do korpusu [°C]	50
Średnica kanałów chłodzących [mm]	6
Czas nagrzewania [s]	2.5
Czas pomiaru [s]	4.5

* Wartości prądu dobrano zgodnie z zaleceniem producenta generatora indukcyjnego dla danego typu cewki

Cewkę podłączoną do zasilania oraz układu chłodzenia generatora pozycjonowano względem powierzchni nagrzewanych zgodnie ze schematem przedstawionymi na rysunku 4. Kamery termowizyjną podłączoną do rejestratora wyników zainstalowanego na komputerze umieszczono na statywie w odległości 700 mm od nagrzewanych powierzchni. Korpus wykonany ze stali 1.2343 oraz wymienne wkładki z tego samego materiału pokryto specjalną kredą w celu uzyskania jednakowego współczynnika emisyjności na wszystkich powierzchniach pomiarowych. Układ chłodzenia korpusu, który stanowiły dwa rzędy wierconych kanałów o średnicy 6 mm, podłączono do systemu regulacji temperatury. Przed rozpoczęciem procesu nagrzewania indukcyjnego korpus oraz wkładkę nagrzano do temperatury o wartości 50 °C odpowiadającej warunkom przetwórstwa poliamidu. Proces nagrzewania, a także temperatura i wartość przepływu wody przez cewkę kontrolowane były z pulpitu sterującego generatora. Temperaturę oraz przepływ chłodziwa przez korpus ustalano z poziomu systemu chłodzenia PSG. Proces badawczy prowadzono w hali wtryskowni w warunkach odpowiadających rzeczywistej produkcji (rys. 5).

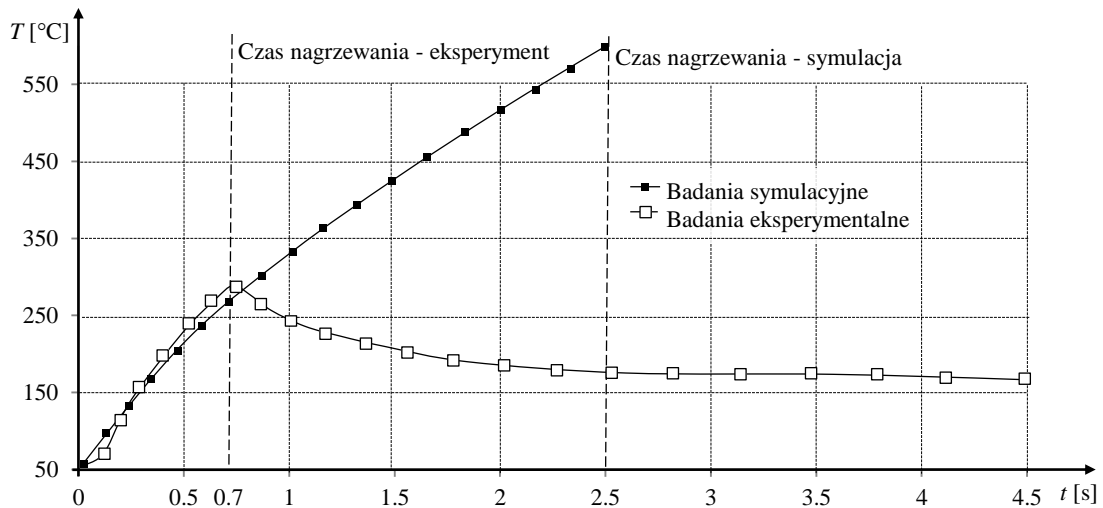
W trakcie badań eksperymentalnych wydłużono czas pomiaru z 2,5 do 4,5 s w celu uwzględnienia strat ciepła zachodzących podczas wycofywania cewki indukcyjnej i zamykania formy przy założeniu, że czas ten wyniesie 2 s. Zdjęcia stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 5b i 5c.

Zarejestrowane przez kamerę obrazy przesyłano do komputera PC, na którym zainstalowano oprogramowanie FLIR ResearchIR MAX. Program umożliwia wyświetlenie wyników w postaci termogramów obrazujących rozkład temperatur na powierzchniach pomiarowych oraz w formie wykresów temperatury w czasie. Podobnie jak w przypadku programu QuickField istnieje możliwość wyboru punktów, dla których odczytywane mają być wartości przyrostu temperatury. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy termogram oraz wykres procesu nagrzewania dla dwóch punktów referencyjnych: P_1 – leżący bezpośrednio na ścianie nagrzewanej oraz P_2 – w odległości 1 mm od powierzchni nagrzewanej w głąb materiału. W przeciwieństwie do badań eksperymentalnych badania symulacyjne pozwoliły wyznaczyć rozkład temperatury w przekroju poprzecznym nagrzewanej wkładki. Zatem otrzymany wykres (rys. 4) przedstawia maksymalne wartości temperatur w objętości wkładki, natomiast w trakcie badań eksperymentalnych rejestrowano maksymalne temperatury na powierzchni czołowej (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowe wyniki wyświetlane w programie FLIR ResearchIR MAX: a) termogram, b) wykres, P_1 – punkt pomiarowy leżący na ścianie nagrzewanej, P_2 – punkt pomiarowy leżący w odległości 1 mm od powierzchni nagrzewanej

Podczas badań symulacyjnych nie uwzględniono procesu chłodzenia wkładki po zakończeniu procesu nagrzewania. Proces ten zarejestrowano jednak podczas badań eksperymentalnych. W trakcie badań symulacyjnych po czasie 2,5 s osiągnięto temperaturę bliską 600 °C. Aby uniknąć zniszczenia wkładki formującej, w trakcie pierwszego pomiaru czas nagrzewania ograniczono do 0,5 s. Stal 1.2343 odpuszcza się w zakresie temperatur 400 - 550 °C, dlatego maksymalną temperaturę pracy w tym przypadku ustalono na wartość 300 °C. Drugim kryterium było otrzymanie temperatury zbliżonej do 150 °C po czasie 2 s od momentu zakończenia nagrzewania. Założenia zostały spełnione dla czasu nagrzewania równego 0,7 s, osiągając temperaturę maksymalną równą 278 °C oraz 178,5 °C po upływie 2 s od momentu wyłączenia wzbudnika.



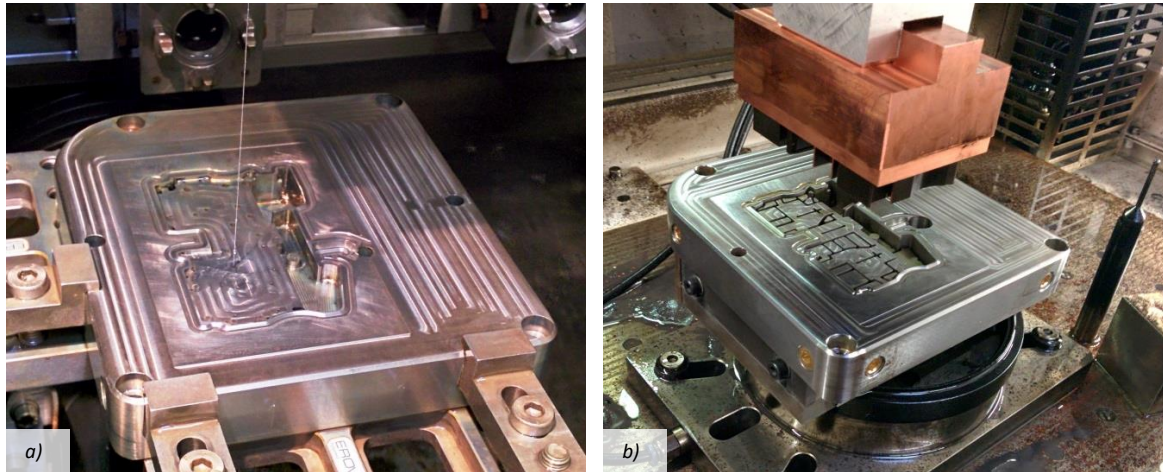
Rys. 7. Przebiegi porównawcze procesu nagrzewania dla badań symulacyjnych i eksperymentalnych przy zachowaniu 1 mm szczeliny między cewką a powierzchnią nagrzewaną

Nieznaczne różnice temperaturowe dla badań symulacyjnych i eksperymentalnych wynikają najprawdopodobniej z nieuwzględnienia w modelu teoretycznym parametrów materiałowych powiązanych z przeprowadzoną wcześniej obróbką cieplną i mechaniczną. Niejednorodność struktur krystalograficznych wynikających z dyslokacji, naprężeń szczątkowych i defektów składu fizyko-chemicznego utrudniają przemieszczanie się ścian domenowych pod wpływem zmian pola magnetycznego. Zjawisk tych nie można wyznaczyć w sposób symulacyjny, a przeprowadzenie ich metodami doświadczalnymi wymaga zastosowania specjalistycznego sprzętu laboratoryjnego. Niemniej jednak badania eksperymentalne odzwierciedlają zależności uzyskane drogą symulacyjną i po czasie 0.7 s osiągnięto temperaturę powyżej 270 °C.

5. Badania eksperymentalne

W oparciu o badania symulacyjne opracowano konstrukcję i zbudowano formę wtryskową do produkcji obudów złączy elektrotechnicznych montowanych na szynie. Forma pozwala na produkcję wyrobów w technologii konwencjonalnej – ze stałą temperaturą gniazda lub z wykorzystaniem selektywnego nagrzewania indukcyjnego.

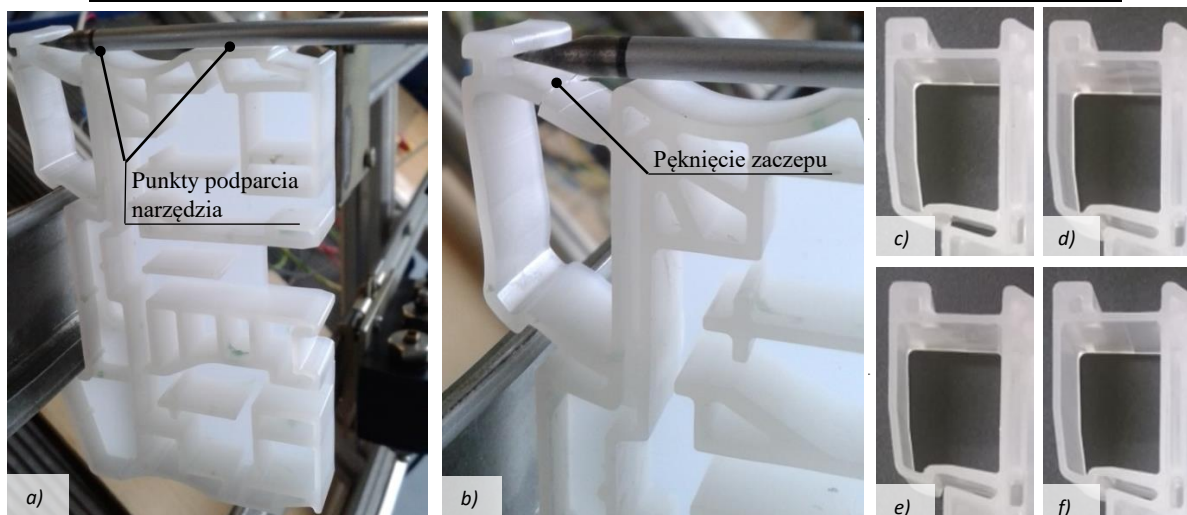
Gniazdo formujące zaprojektowano w taki sposób, aby możliwe było nagrzewanie tylko wytypowanego obszaru formowania elastycznego zaczepek do zadanej temperatury. Próbkę eksperymentalną wykonano na wtryskarce Demag 35 o średnicy ślimaka wynoszącej 22 mm. Parametry technologiczne przedstawiono w tabeli 4. Dla celów badawczych wykonano 1000 wyprasek (w 4 grupach po 250 sztuk, rys. 9). Pierwsza grupa to obudowy wyprodukowane wg konwencjonalnej technologii ze stałą temperaturą formy wynoszącą 50 °C (rys. 9c). Druga grupa to 250 wyrobów wykonanych z wykorzystaniem selektywnego nagrzewania indukcyjnego do temperatury 130 °C w obszarze formowania zaczepek (rys. 9d). W dwóch kolejnych grupach nagrzewano obszar formujący zaczepek do temperatur odpowiednio 150 i 170 °C (rys. 9e, 9f). Otrzymane wyroby, pomimo zastosowania różnych temperatur, nie wykazywały znaczących różnic wizualnych (rys. 9c – 9f).



Rys. 8. Przygotowanie gniazda formującego: a) wykonanie otworów pod wypychacze w technologii elektrodrążenia drutowego, b) wykonanie kształtów formujących uźebrowanie wypraski

Tabela 4. Parametry procesu w trakcie badań eksperymentalnych

Parametr i jednostka	Wartość
Temperatura zasypu [°C]	75
Temperatura tworzywa [°C]	275
Temp. Formy – Matryca [°C]	50
Temp. Formy - Stempel [°C]	50
Temp. Formy – obszar formowania zaczepu [°C]	130 / 150 / 170
Ciśnienie wtrysku – limit [MPa]	50
Ciśnienie docisku – limit [MPa]	400
Siła zwarcia formy [kN]	250
Czas wtrysku [s]	0,62
Czas docisku [s]	1,5
Czas chłodzenia [s]	5,8

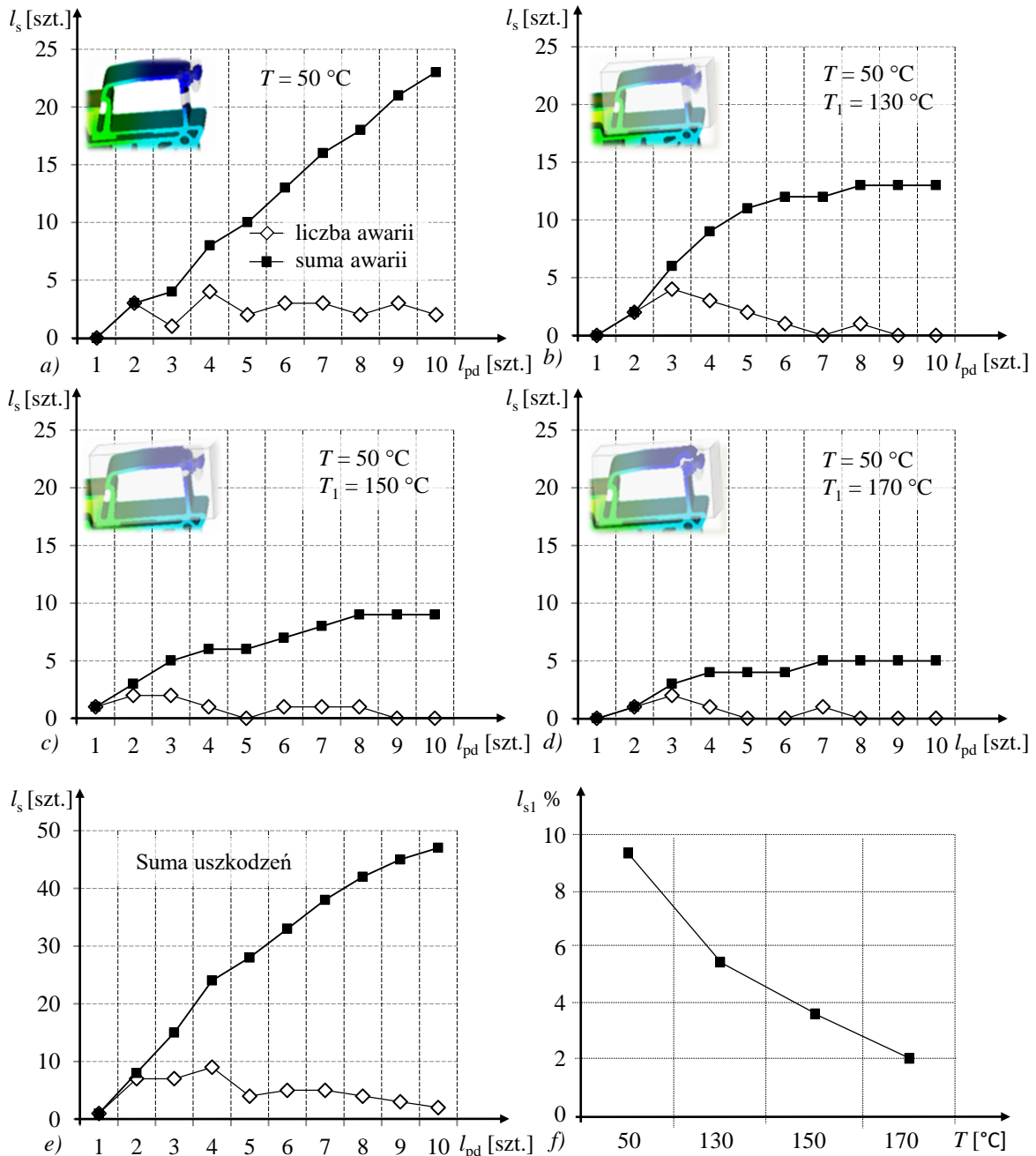


Rys. 9. Próbkę wykonaną na potrzeby badań montażowych: a) proces demontażu obudowy z szyny, b) zjawisko pęknięcia zaczepu elastycznego podczas demontażu obudowy, c) widok zaczepu wykonanego w technologii konwencjonalnej, d) widok zaczepu wykonanego z wykorzystaniem nagrzewania indukcyjnego, $T = 130\text{ °C}$, e) $T = 150\text{ °C}$, f) $T = 170\text{ °C}$

Wszystkie wyroby kondycjonowano w temperaturze 25 °C i wilgotności 90% przez czas 72 h . Kolejnym krokiem było przeprowadzenie badań eksperymentalnych montażu i demontażu wyrobów z szyn w warunkach odzwierciedlających rzeczywistą eksploatację

złączy elektrycznych. Do tego celu użyto szyny o wymiarach 35x7x500 mm utwierdzonej na obu końcach i wkrętaka z płaskim grotem o wymiarach 6 x 1.5 mm. Każdą wypraskę osadzano na szynie i demontowano ją. Cykl ten powtarzano do momentu pęknięcia zaczepru lub osiągnięcia 10 powtórzeń.

Podczas demontażu na każdy zaczepr był deformowany w takim samym stopniu, co zapewnia konstrukcja wyrobu i sposób podparcia wkrętaka w dwóch punktach w końcowym etapie ruchu. Otrzymane wyniki pokazują, że zastosowanie selektywnego nagrzewania indukcyjnego przyniosło efekt w postaci spadku uszkodzeń obudów podczas ich demontażu. Podczas montażu – nałożenia wyrobu na szynę nie doszło do żadnego przypadku uszkodzenia zaczepru. Jest to efekt mniejszego odkształcenia zaczepru podczas montowania wyrobu niż w przypadku jego demontażu. W przypadku pierwszej grupy wyrobów, wykonanych w technologii konwencjonalnej (rys. 10a) zauważalny jest utrzymujący się trend wzrostowy uszkodzeń z każdym kolejnym cyklem montażowym. Podczas testowania pierwszej grupy wyrobów uszkodzeniu uległy 23 zaczepry, co daje 9.2 %. Zastosowanie nagrzewania indukcyjnego w obszarze zaczepru do temperatury 130 °C pozwoliło na spadek uszkodzeń do 13 na 250 badanych próbek (rys. 10b). Również spadek uszkodzeń można zaobserwować dla temperatur 150 i 170 °C. Wiąże się to z poprawą warunków łączenia się dwóch płynących strug tworzywa (rys. 4). Zwiększenie temperatury powoduje, że zahamowany jest proces stygnięcia tworzywa i wzrostu jego lepkości. Potwierdza to nieznaczny spadek ciśnienia wtrysku dla każdego wzrostu temperatury w obszarze formowania zaczepru. Spadek uszkodzeń do 4 na 250 próbek (1.6 %) w ostatnim przypadku jest również wynikiem przesunięcia linii łączenia poza zakres największych odkształceń zaczepru powstających przy demontażu. Rysunek 10e przedstawia sumę uszkodzeń dla wszystkich badanych grup. Największą wartość defektów zaczepru zanotowano przy czwartej próbie demontażu. Na bazie ostatniego wykresu (rys. 10f) można zaryzykować stwierdzenie, że badania dla wyższych temperatur przyniosłyby asymptotyczny charakter rozkładu uszkodzeń zaczepru.



Rys. 10. Wyniki badań eksploatacyjnych – liczba uszkodzonych obudów podczas procesu demontażu w funkcji liczby wykonanych cykli: a) grupa wyprasek wykonanych w technologii konwencjonalnej ze stałą temperaturą formy, b), c), d) wypraski wykonane z zastosowaniem selektywnego nagrzewania indukcyjnego w obszarze zaczeput z temperaturą odpowiednio 130, 150 i 170 $^\circ\text{C}$, e) suma uszkodzeń zaczeput dla wszystkich temperatur w funkcji wykonanych cykli demontażu, f) procentowy rozkład uszkodzeń zaczeput w zależności od temperatury; l_s – liczba uszkodzonych sztuk, l_{pd} – liczba cykli demontażu, $l_{s1}\%$ – procentowy rozkład uszkodzonych wyrobów w zależności od badanej grupy, T – temperatura

Zastosowanie nagrzewania indukcyjnego wyraźnie zmieniło rozkład uszkodzonych elementów w zależności od liczby powtórzeń demontażu. Jest to bezpośrednio związane z przesunięciem lokalizacji powstawania linii łączenia zaczeput.

6. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono problem eksploatacji złącz elektrycznych montowanych na szynach w zakresie niezawodności ich montażu i demontażu. Temat został podjęty w odpowiedzi na problemy produkcyjne jednego z największych producentów złączy elektrycznych w Europie.

Elementem konstrukcyjnym złącza, które zostało poddane analizie, była jego prototypowa obudowa wyposażona w zaczepek elastyczny. Aby przedstawić genezę problemu w pierwszym etapie opracowania przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wypełnienia gniazda formującego obudowę. Skupiono się na obszarze formowania zaczepeku, który jest kluczowym elementem decydującym o niezawodności obudowy. Otrzymane wyniki pokazały, że zwiększenie temperatury tego obszaru pozwala na przesunięcie miejsca powstawania linii łączenia płynących strug tworzywa poza ramię zaczepeku, które jest najbardziej obciążone podczas demontażu. Po zadaniu temperatury wynoszącej 170 °C miejsce spotkania się dwóch płynących strug tworzywa zostało przesunięte z newralgicznego obszaru produktu. Dodatkowym pożądanym efektem było zahamowanie wzrostu lepkości tworzywa na czole płynięcia. Zgodnie z oczekiwaniami powinno to przyczynić się do poprawy jakości łączenia strug tworzywa i spadku uszkodzeń podczas demontażu wyrobów.

Projekt formy powstał w oparciu o symulacyjne i eksperymentalne badania nagrzewania indukcyjnego. Na podstawie serii pomiarów otrzymano charakterystykę procesu nagrzewania, natomiast wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły rezultaty uzyskane na drodze symulacji. Po czasie 0.7 s temperatura na powierzchni formowania zaczepeku wyniosła 272 °C. Po 2 s od momentu rozpoczęcia procesu nagrzewania temperatura wyniosła 175 °C po odłączeniu wzbudnika w czasie 0.7 s. Na zbudowanym prototypie formy wtryskowej wykonano 1000 szt. wyprasek w czterech grupach różniących się temperaturą formowania zaczepeku. Badania eksperymentalne i otrzymane wyniki pokazują, że zastosowanie selektywnego nagrzewania indukcyjnego przyniosło oczekiwany efekt w postaci spadku uszkodzeń obudów podczas ich demontażu, a dynamika procesu nagrzewania indukcyjnego pokazuje, że wyższe temperatury formy mogą przynieść spadek awaryjności wyprasek przy nieznacznym wydłużeniu czasu cyklu. Wyższa temperatura formy nie wpłynie również na wydłużenie czasu chłodzenia formy, ponieważ nagrzewane zostają jedynie warstwy powierzchniowe gniazd formujących, co bezpośrednio wynika z efektu naskórkowości procesu nagrzewania indukcyjnego [18].

Źródło: Praca powstała w oparciu o wyniki badań realizowanych w ramach projektów:

1. INNOTECH-K2/IN2/60/182932/NCBR/13, 2013 – 2015
2. LIDER/13/0049/L-9/17/NCBR/2018, 2019 – 2021
3. 0614/SBAD/1529, 2020

References

1. Białasz S, Klepka T. Simulation of the medical syringe injection moulding process. MATEC Web of Conferences 2019; 252.
2. Bociąga E. Wpływ temperatury formy wtryskowej i prędkości wtryskiwania na wybrane właściwości wyprasek polietylenowych. Polimery 2000; 11-12(45): 830-836.

3. Bociąga E, Kaptacz S, Duda P, Rudawska A. The influence of the type of polypropylene and the length of the flow path on the structure and properties of injection molded parts with the weld lines. *Polymer Engineering and Science* 2019; 59(8): 1710-1718.
4. Bociąga E, Skoneczny W. Characteristics of injection molded parts with the areas of weld lines. *Polimery* 2020; 65(5): 337–345.
5. Chang P C, Sheng J H. Simulation of infrared rapid surface heating for injection molding. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2006; 49: 3846-3854.
6. Chen S C, Jong W R, Chang J A. Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line. *Journal of Applied Polymer Science* 2006; 101: 1174-1180.
7. Chen S C, Jong W R, Chang Y J, Chang J A, Cin J C. Rapid mold temperature variation for assisting the micro injection of high aspect ratio micro-feature parts using induction heating technology. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2006; 16(9): 1783-1791.
8. Chen S C, Lin Y W, Chien R D, Li H M. Variable mold temperature to improve surface quality of microcellular injection molded parts using induction heating technology. *Advances in Polymer Technology* 2008; 27(4): 224-232.
9. Chen S C, Minh P S, Chang J A, Huang S W, Huang C H. Mold temperature control using high-frequency proximity effect induced heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2011; 39(2): 216-223.
10. Claudel D, Gelin J C, Sahli M, Barriere T. Method to identify rheological constitutive model adapted for powder injection moulding process using inverse method. *Computer Methods In Materials Science* 2015; 15(1): 1-6.
11. Czyżewski P, Sykutera D, Bieliński M, Troszyński A. The impact of laser radiation on polypropylene molded pieces depending on their surface conditions. *Polymers* 2019; 11(10).
12. Eom H, Park K. Fully-coupled numerical analysis of high-frequency induction heating for thin-wall injection molding. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 2009; 48(10): 1070-1077.
13. Feng J, Yang W, Zhang R Y, Wu J J, Wang L, Zhang C L, Yang M B. Effect of viscosity ratio on the crystalline morphologies and mechanical property of multi-melt

- multi-injection molded parts. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 2014; 53: 1272–1282.
14. Huang C T, Hsien I S, Tsai C H, Chiou Y C, Tang C C. The effects of various variotherm processes and their mechanisms on injection molding. *International Polymer Processing* 2011; 26(3): 265-274.
 15. Liparoti S, Sorrentino A, Titomanlio G. Temperature and pressure evolution in fast heat cycle injection molding, *Materials and Manufacturing Processes* 2019; 34(4): 422-430.
 16. Liu X H. Rigid plastic fem and its application in rolling. *Metallurgy Industry Press* 1994: 300-324.
 17. Mrozek K, Chen S C. Selective induction heating to eliminate the fundamental defects of thin-walled moldings used in electrical industry. *Journal of Applied Polymer Science* 2017; 134(26).
 18. Mrozek K. Simulation study of induction heating of multi-metallic injection moulds. *International Journal of Simulation Modelling* 2018; 17(2): 220-230.
 19. Mrozek K, Poszwa P, Muszyński P. Numerical study on the influence of Rapid Temperature Cycling (RTC) on polymer flow at maximum injection pressure. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 2020; 77(9): 821-839.
 20. Poszwa P, Szostak M, Influence of scale deposition on maintenance of injection molds. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(1): 39-45.
 21. Rapoport E, Pleshivtseva Y, Optimal control of induction heating process. New York: first ed. CRC Press, 2006; 4-7.
 22. Shih S Y, Nian S C, Huang M S. Comparison between single- and multiple-zone induction heating of largely curved mold surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2019; 75: 24-35.
 23. Shih S Y, Nian S C, Huang M S, Huang R C, Chen C H. Nonplanar mold surface heating using external inductive coil and magnetic shielding materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2016; 71 44-55.
 24. Soltani M, Kulkarni R, Scheinost T, Groezinger T, Zimmermann A. A novel approach for reliability investigation of leds on molded interconnect devices based on fe-analysis coupled to injection molding simulation. *IEEE Access* 2019; 7: 56163-56173.

25. Sun B, Li Y, Wang Z, Li Z, Xia Q, Ren Y, Feng Q, Yang D, Qian C. Physics-of-failure and computer-aided simulation fusion approach with a software system for electronics reliability analysis. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2020; 22 (2): 340–351.
26. Sykutera D, Wajer Ł, Kościuszko A, Szewczykowski P P, Czyżewski P. The influence of processing conditions on the polypropylene apparent viscosity measured directly in the mold cavity. *Macromolecular Symposia* 2018; 378(1).
27. Szostak M, Krzywdzińska P, Barczewski M. Technologie MuCell® i InduMold w produkcji wysokiej jakości detali samochodowych z tworzyw polimerowych. *Polimery* 2018; 63(2): 145-152.
28. WANG ZB, SHANG S, WANG JW, HUANG ZL, SAI F. Accelerated storage degradation testing and failure mechanisms of aerospace electromagnetic relay. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (4): 530–541.
29. Wang G L, Zhao G Q, Li H P, Guang Y J. Research on a new variotherm injection molding technology and its application on the molding of a large lcd panel. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 2009; 48(7): 671-681.
30. Wymysłowski A, Jankowski K. Strength analysis of solder joints used in microelectronics packaging. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2020; 22 (2): 297–305.
31. Xie L, Ziegmann G. Influence of processing parameters on micro injection molded weld line mechanical properties of PP (Polypropylene). *Microsystem Technology* 2009; 15: 1427- 1435.
32. Yottha S, Turng L S. Microcellular injection molding of recycled poly(ethylene terephthalate) blends with chain extenders and nanoclay. *Journal of Polymer Engineering* 2014; 34(1): 5-13.
33. Zamani N, Kaufmann R, Kosinski P, Skauge A. Mechanisms of non-newtonian polymer flow through porous media using navier–stokes approach. *Journal of Dispersion Science and Technology* 2015; 36(3): 310-325.
34. Zhu H, Kim Y D, De Kee D. Non-Newtonian fluids with a yield stress. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 2005; 129: 177-181.