

## STRESZCZENIE

Technologia wtryskiwania tworzyw sztucznych jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod przetwórstwa materiałów polimerowych, umożliwia w sposób powtarzalny produkcję wyrobów o bardzo skomplikowanych kształtach przy zachowaniu wąskich tolerancji wymiarowych. W dzisiejszych czasach specjaliści w branży wtryskiwania tworzyw termoplastycznych dysponują wiedzą inżynierską z zakresu konstrukcji wyprasek oraz rozwiązywania poszczególnych problemów jakościowych. W branży powszechnie wykorzystuje się zaawansowane narzędzia symulacyjne pozwalające na przewidywanie m. in. skurczu i deformacji wyprasek. Szybki rozwój branży tworzyw sztucznych, zwiększenie stopnia skomplikowania wyrobów połączone z dużą złożonością zjawiska skurczu materiałów polimerowych doprowadziło do sytuacji, że wciąż nie opracowano modeli analitycznych pozwalających na wstępne przewidzenie problemów z deformacjami wyprasek oraz walidację uzyskiwanych wyników symulacji, co stanowi normę w dziedzinie wytrzymałości konstrukcji.

Analiza literatury wskazuje, że bardzo duży nacisk kładzie się na minimalizację deformacji wypraski poprzez optymalizację parametrów procesu wtryskiwania oraz warunków chłodzenia. Stanowi to jednak rozwiązywanie skutku problemu a nie jego przyczyny, gdyż bezpośrednią przyczyną deformacji jest niepoprawne zaprojektowanie wypraski lub formy wtryskowej.

W niniejszej rozprawie opracowano stosowne modele analityczne dające możliwość wstępnego przewidzenia problemów z deformacjami oraz walidację uzyskanych wyników symulacyjnych. W tym celu przeanalizowano wpływ poszczególnych parametrów procesu na wielkość skurczu i deformacji oraz określono, które z nich mają największy wpływ na badane zjawiska. Efektem analizy była mapa zależności parametrów procesu wraz z wpływem poszczególnych parametrów na siebie, po czym wspomniana mapa zależności została zredukowana do mapy zawierającej najważniejsze parametry wpływające na skurcz i deformację. Na podstawie usystematyzowanego zestawu czynników 5 wybrano geometrii stanowiących elementy składowe wyprasek z tworzyw sztucznych: płaską powierzchnię, krawędź, uźebrowaną krawędź, łuk oraz uźebrowany łuk. W ramach analizy uwzględniono nie tylko parametry procesowe (profil docisku), ale również parametry geometrii wypraski (grubość ścianki, wysokość żebra, promień zaokrąglenia). W pracy przeprowadzono szereg symulacji, co nie byłoby możliwe bez wykorzystania narzędzi do automatyzacji działań. Jest to jeden z powodów, dla których do dnia dzisiejszego nie powstała żadna praca, która tak dokładnie próbowałaby zbadać i opisać zjawisko deformacji wyprasek. Dotychczas publikowane prace wykorzystywały metody statystyczne w celu przewidzenia wpływu parametrów procesu w oparciu o niewielką liczbę analiz.

Na podstawie uzyskanych wyników zaprezentowano charakterystykę zależności między analizowanymi czynnikami oraz badanymi wielkościami (skurcz liniowy, pochylenie ścianki, zmiana promienia łuku, zmiana kąta łuku). Zaproponowano również szereg modeli matematycznych dla zbadanych geometrii. W przypadku każdej z geometrii zaobserwowano liniową zależność między wielkością skurczu oraz wielkością deformacji a wartością ciśnienia docisku.

Do oceny dokładności narzędzia symulacyjnego wykorzystano geometrię stelaża przyłbicy. W ramach walidacji narzędzia przeprowadzono analizę wrażliwości dla szeregu parametrów materiałowych charakteryzujących badany materiał – oceniono wpływ ich

zmiany na wielkość uzyskanych deformacji. Na podstawie uzyskanych wyników symulacji stwierdzono, że ewentualne różnice w danych materiałowych nie będą miały istotnego wpływu na wielkość uzyskanych deformacji. Dalsza część weryfikacji wiązała się z porównaniem wyników eksperymentalnych i symulacyjnych. Korzystając z parametru najmniejszej odległości między wyznaczonymi krzywymi oraz przemieszczeń wybranych punktów między potwierdzono zadowalającą dokładność narzędzia symulacyjnego, stanowiącego podstawę do sformułowania poszczególnych modeli analitycznych.

## ABSTRACT

Injection molding is a plastics processing technology widely used for complex parts' manufacturing with repeatable properties (especially dimensional tolerances). Nowadays injection molding specialists possess engineering knowledge of plastic parts' design and methods for solving of quality problems. In the industry, it is common to use advanced simulation tools for predicting shrinkage and warpage of plastic parts. The rapid development of the plastics industry, increased complexity of designed parts along with complex properties of polymeric materials led to the situation, where no analytical models were prepared for initial prediction of plastic parts' warpage and validation of numerical simulations (such models are standard in the structural engineering).

According to the analyzed literature, the reduction of the deformation is usually done by the optimization of processing parameters and cooling of the injection mold. This way solves the consequences of the problem, not its cause because the direct cause of the warpage is the incorrect design of the plastic part or injection mold.

In the thesis the analytical models for the initial prediction of warpage problems and validation of obtained simulation results have been prepared. For this purpose the influence of processing parameters on the shrinkage and warpage were analyzed and the crucial parameters for this phenomena were chosen. The result of the analysis was the dependency map between specific parameters along with their influence on each other parameter. This map was simplified to the map with the essential parameters that influence shrinkage and warpage of plastic parts. Based on the essential parameters the 5 geometries were chosen which are common shapes of plastic parts: plane surface, edge, ribbed edge, arc, and ribbed arc. In the analyses, not only processing parameters were examined (packing profile), but also geometric properties (thickness of the part, height of the rib, fillet radius of the edge). In this thesis, thousands of simulations were done, what were not possible without automation tools. It is the reason why there was no such profound research for investigation and depiction of the warpage phenomenon. The research papers published so far used statistical tools to predict the influence of processing parameters with a small number of analyses performed.

Based on the obtained results the relation between investigated parameters and examined quantities (linear shrinkage, inclination of the wall, change of the arc's radius and angle) were presented in this thesis. The analytical models were proposed for investigated geometries. For each geometry, the linear relationship between shrinkage, warpage, and packing pressure was observed.

For accuracy evaluation of simulation tool the geometry of headgear frame was use because of its similarity to one of the investigated geometries. In the validation the sensitivity analysis was performed for the series of material parameters that characterizes the specific material – its influence on warpage results was estimated. According to results the change of material properties had insignificant influence on warpage magnitude. Further evaluation was associated with comparison of experimental and numerical results. Using the smallest distance indicator along with displacements of specific points the satisfactory accuracy of simulation tool was confirmed which was the basis for the development of analytical models.