

Streszczenie

Rozprawa doktorska pt. *Modelowanie 3D laminowanej szyby samochodowej uwzględniające wpływ temperatury* dotyczy zagadnień bezpieczeństwa niechronionych użytkowników ruchu drogowego (NUD), a w szczególności problematyki uderzenia głowy pieszego w szybę laminowaną. Głównym celem pracy było opracowanie numerycznego modelu oceny bezpieczeństwa NUD w trakcie uderzenia w szybę laminowaną z uwzględnieniem warunków termicznych.

Szyba laminowana zbudowana jest z polimerowej warstwy spajającej oraz co najmniej dwóch warstw szkła. Obiektem badań był enkapsulat najczęściej stosowany na samochodowe szyby laminowane - żywica PVB. W pierwszym etapie prac zajęto się zbadaniem PVB w temperaturze pokojowej. Wykonano próby doświadczalne rozciągania polimeru PVB dla różnych prędkości odkształcenia, w zakresie temperatur eksploatacji $-30^{\circ}\text{C} < T < +20^{\circ}\text{C}$. Wyniki badań wykorzystano do opracowania modeli materiałów w środowisku MES. Wykonano symulacyjne testy zniszczenia polimeru w środowisku numerycznym. Porównanie wyników doświadczalnych i uzyskanych z symulacji pozwoliło na opisanie zjawisk zachodzących w tworzywie PVB, w analizowanym zakresie temperatur, modelem materiałowym Marlow.

Przeanalizowano zjawiska kruchego pęknięcia szkła oraz opracowano metody analizy numerycznej struktury szkła poddanej wymuszeniom zewnętrznym. W środowisku MES, wykonano model i przeprowadzono test homologacyjny impaktora głowy osoby dorosłej oraz analizy uderzenia głowy pieszego w szybę laminowaną.

Ocenę zjawisk przeprowadzono w oparciu o:

- analizę płaskiej szyby laminowanej, gdzie zniszczenie oceniano na podstawie odkształceń. Zweryfikowano zagadnienie propagacji pęknięcia szkła w zależności od rodzaju połączenia warstw laminatu. Zbadano zachowanie się szyby laminowanej dla modelu sprężystego, sprężysto-plastycznego, hiperelastycznego oraz modelu „*low density foam*” materiału PVB. Dokonano oceny pęknięcia szyby laminowanej i bezpieczeństwa pieszego w trakcie testu homologacyjnego (Rozporządzenie 78/2009 WE) uderzenia impaktora głowy w pięć punktów na szybie. Oceniono wpływ rodzaju i wielkości siatki elementów skończonych na proces pęknięcia szyby laminowanej. Etap prac zakończyła ocena bezpieczeństwa pieszego przy temperaturze -5°C i $+20^{\circ}\text{C}$.
- rzeczywistego obiektu tj. szyby przedniej (o przekroju krzywoliniowym) samochodu Opel Astra II z uwzględnieniem zniszczenia. Ocenę zniszczenia szyby laminowanej

przeprowadzono weryfikując zjawiska zachodzące w strukturach: szkła i PVB rozdzielnie oraz docelowo na podstawie kompletnej szyby laminowanej. Zbadano wpływ pęknięcia szyby dla elementów sześciennych i czworościennych.

Wykonano, wykorzystując badania własne PVB, symulacje MES uderzenia głowy NUD w szybę laminowaną w różnych temperaturach, Wyniki pozwoliły na ocenę bezpieczeństwa NUD w przedziale temperatur: $+20^{\circ}\text{C} \div -30^{\circ}\text{C}$.

Wykorzystując nabyte doświadczenia, opracowany model symulacyjny oraz mając za cel zweryfikowanie metodyki oceny zjawisk w strukturach laminowanych ceramiczno – polimerowych, dokonano weryfikacji osobliwości wpływających na bezpieczeństwo NUD. Rozpatrzono szczególnie, rzeczywisty przypadek eksploatacji szyby laminowanej tj. uderzenie głowy NUD w szybę samochodową poddanej obciążeniom termicznym o gradiencie równym 20°C , z wydzieleniem stref o różnych cechach fizyko – mechanicznych.

W części podsumowującej zamieszczono wnioski ze studium literatury, przeprowadzonych badań empirycznych oraz analiz symulacyjnych MES. Dysertację zakończono wskazaniem kierunków praktycznego wykorzystania badań i możliwych kontynuacji prac obejmujących opisane w rozprawie zagadnienia.

Zweryfikowano model 3D laminowanej szyby samochodowej uwzględniający wpływ temperatury. Opracowano metodykę analizy uderzeń głowy Niechronionych Użytkowników Dróg z układami laminowanymi szyb z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. Udowodniono tezę, że bezpieczeństwo głowy pieszego w trakcie uderzenia w szybę laminowaną jest nieliniowo zależne i zmniejsza się wraz z obniżaniem temperatury.

Zestawiony materiał badawczy oraz przeprowadzone analizy pozwoliły na: uzupełnienie stanu wiedzy na temat mechanoskopii uderzeń NUD o struktury ceramiczno – polimerowe, rozwój wiedzy w dyscyplinie inżyniera mechaniczna oraz zrozumienie zjawisk wpływających na problematykę bezpieczeństwa Niechronionych Użytkowników Dróg w trakcie wypadów, w zmiennych warunkach pogodowych.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo pieszych, szyba laminowana, Poliwinyl Butyral, wpływ temperatury, zniszczenie szkła.

Abstract

The dissertation, entitled *Modelling of 3D laminated windshield taking into account the effects of temperature*, is concerned with the safety of vulnerable road users (VRU), in particular with the issue of pedestrians' head hitting a laminated windshield. The main goal of the dissertation was to develop a numerical model for assessing the safety of a VRU during an impact with laminated glass, taking into account the thermal conditions.

The laminated glass consists of a polymer bonding layer and at least two layers of glass. The research object was the encapsulate most commonly used for automotive laminated glass - the PVB resin. The first stage of work dealt with the study of PVB at room temperature. The experimental tensile tests on PVB polymer were performed for different strain rates, in the operating temperature range of $-30^{\circ}\text{C} < T < +20^{\circ}\text{C}$. The results were used to develop material models in an FEM environment. The simulation tests of polymer failure in a numerical environment were performed. The comparison of the experimental results and those obtained from simulations made it possible to describe the phenomena occurring in the PVB material in the analysed temperature range using the Marlow material model.

The phenomena of brittle fracture of glass were analysed and methods were developed for the numerical analysis of glass structures subjected to external forces. In an FEM environment, the model was built, and the homologation test of the adult head impactor, as well as the analysis of the pedestrian's head impact on the laminated glass were carried out.

The assessment of the phenomena was based upon:

- analysis of flat laminated glass, where failure was assessed by deformation. The issue of glass fracture propagation depending on the type of bonding of the laminate layers was verified. The behaviour of laminated glass was investigated for the elastic, elastic-plastic, hyperelastic, and "*low density foam*" models of PVB material. An assessment of fracture of the laminated glass and the safety of the pedestrian during the approval test (Regulation 78/2009 EC), when the headform impactor hits five points on the glass, was made. The influence of finite element mesh type and size on the fracture process of laminated glass was evaluated. The work phase was completed with a pedestrian safety assessment at -5°C and $+20^{\circ}\text{C}$.
- of the real object, i.e. the windscreen (of curvilinear cross-section) of the Opel Astra II car, including damage. The assessment of laminated glass failure was carried out by verifying

the phenomena occurring in the structures of glass and PVB separately, and ultimately upon the basis of a complete laminated windshield. The effect of glass cracking was investigated for cubic and quadrilateral elements.

The FEM simulations of VRU head impact on laminated glass at different temperatures were performed using PVB's own research. The results allowed the safety of VRU to be assessed in the temperature range of $+20^{\circ}\text{C} \div -30^{\circ}\text{C}$.

Using the experience gained, the simulation model developed, and with the aim of verifying the methodology for assessing phenomena in laminated ceramic-polymer structures, the peculiarities affecting the safety of VRU were verified. A special, real-life case of laminated glass exploitation was considered, i.e. the impact of VRU head on a car windshield subjected to thermal loads with a gradient of 20°C , with separation of zones of different physical and mechanical characteristics.

The summary section provides conclusions from the literature study, the empirical research carried out, and FEM simulation analyses. The dissertation ends with an indication of the directions of practical application of the research and possible continuation of work covering the issues described in the dissertation.

A 3D model of a laminated car windshield taking into account the effect of temperature was verified. A methodology to analyse the head impacts of Vulnerable Road Users with laminated glazing systems using the Finite Element Method was developed. The thesis that the safety of the pedestrian's head during impact with laminated glass is non-linearly dependent and decreases with decreasing temperature has been proven.

The compiled research material and conducted analyses allowed to supplement the state of knowledge on mechanoscopy of VRU impacts with ceramic-polymer structures, to develop knowledge in the discipline of mechanical engineering, and to understand the phenomena affecting the safety of Vulnerable Road Users during accidents in variable weather conditions.

Keywords: pedestrian safety, laminated windshield, Polyvinyl Butyral, temperature effect, glass failure.