

## **STRESZCZENIE**

### **MODELOWANIE PROPAGACJI SZCZELINY W MATERIAŁACH KRUCHYCH**

Głównym celem niniejszej pracy było stworzenie własnej metody przewidywania propagacji szczeliny z użyciem tzw. subrutyn (podprogramów) użytkownika w systemie Abaqus z wykorzystaniem wzbogacania funkcji kształtu elementów metodą X-FEM. Zaimplementowano 4 metody przewidywania kierunku propagacji szczeliny: kryterium maksymalnych naprężeń głównych, kryterium Ottosena-Podgórskiego, własne kryterium oparte na przemieszczeniach wokół wierzchołka szczeliny oraz kryterium maksymalnego obwodowego naprężenia stycznego (MTS). W pracy zweryfikowano skuteczność działania autorskiej metody w porównaniu do metody wbudowanej, na podstawie czterech rodzajów symulacji: badanie trójpunktowego zginania belki z nacięciem, badanie czteropunktowego zginania belki z nacięciem, badanie wrywania kotwy (test „pull-out”) i badanie rozciągania przy rozłupywaniu metodą „brazylijską”.

W ramach przeglądu literatury opisano podstawowe pojęcia dotyczące mechaniki pękania, przedstawiono metody komputerowego symulowania pękania, ze szczególnym uwzględnieniem metody X-FEM, opisano najbardziej powszechne kryteria zniszczenia materiału oraz zaprezentowano szereg aktualnych publikacji dotyczących implementacji własnych kryteriów propagacji szczeliny w programie Abaqus. Opisywane metody są w wielu przypadkach nieskomplikowane, a większość przedstawionych badań dotyczy pękania modeli wykonanych z kompozytów lub stali. Brakuje prac opisujących symulacje pękania materiałów kruchych, zwłaszcza skał.

W pracy przedstawiono analizę teoretyczną dwóch badań: badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu metodą „brazylijską” i badanie wrywania kotwy (test „pull-out”). Rozważania te posłużyły do wyprowadzenia prawidłowych założeń dotyczących autorskiej metody przewidywania propagacji szczeliny. Analiza testu „brazylijskiego” pozwoliła stworzyć metodę wyznaczania prawidłowej wytrzymałości na rozciąganie dla dowolnego materiału kruchego, która daje dokładniejsze wyniki niż wzory normowe. Analiza testu „pull-out” została wykorzystana na potrzeby weryfikacji wyników otrzymanych w symulacjach komputerowych. Opracowano prostą metodę poszukiwania siły wrywającej kotwę w tym badaniu.

Na potrzeby rozprawy przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych. Przedstawione badania pozwoliły otrzymać parametry mechaniczne porowatego gipsu i wybranych rodzajów

piaskowca oraz porfiru. Badania porowatego gipsu wykonano na potrzeby weryfikacji skuteczności działania opracowanej metody wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie zmodyfikowaną metodą „brazylijską”. Otrzymane wyniki są zbliżone do wyników otrzymanych z badania czystego zginania belek. Badania piaskowca i porfiru pozwoliły otrzymać parametry wytrzymałościowe, które zostały wykorzystane do prawidłowego zamodelowania testu „pull-out” w symulacjach komputerowych. Na potrzeby symulacji wykorzystano wyniki otrzymane dla piaskowca z kopalni Brenna.

W przypadku analiz numerycznych przeanalizowano skuteczność metody wbudowanej przewidywania propagacji szczeliny w systemie Abaqus. Domyślne kryterium decydujące o pęknięciu działa w prosty sposób – pęknięcie skierowane jest w kierunku maksymalnych naprężeń głównych. Niestety wyniki otrzymane tą metodą są nieprawidłowe. Szczelina od pewnego momentu w niektórych badaniach zaczyna nierealistycznie skręcać, a w innych obliczenia są przerywane błędem. Kryterium maksymalnych naprężeń głównych zaprogramowano w języku Fortran pod postacią subrutyny użytkownika UDMGINI. Metoda opiera się na rozwiązaniu Westergaarda szczeliny Griffitha. W każdym przyroście obciążenia odczytywane są naprężenia w kilkudziesięciu punktach Gaussa wokół wierzchołka szczeliny, następnie obliczane są naprężenia główne w tych punktach, sprowadzane są do jednostkowego promienia i szczelina kierowana jest pod kątem, dla którego funkcja zależności wartości naprężeń głównych od kąta wokół wierzchołka szczeliny przyjmuje lokalne minimum. W podobny sposób zaimplementowano wymienione wcześniej pozostałe kryteria. Autorska metoda pozwala otrzymać wyniki o wiele bliższe rzeczywistości niż uzyskane metodą wbudowaną. W większości przypadków z wykorzystaniem każdego kryterium można uzyskać linię pęknięcia zbliżoną do linii w rzeczywistych badaniach. Autorska metoda ma wiele zalet: obliczenia trwają względnie krótko, są niemal całkowicie niezależne od rozmiaru siatki elementów skończonych, a jej implementacja jest łatwa dla doświadczonego użytkownika systemu Abaqus. Metoda ta ma jednak kilka ograniczeń, wynikających głównie z braku pełnego dostępu użytkownika do solvera systemu Abaqus. W przyszłości planowane jest wykonanie symulacji innych badań i materiałów oraz rozbudowanie metody o inne kryteria zniszczenia materiału.

## **MODELING OF FRACTURE PROPAGATION IN BRITTLE MATERIALS**

The main goal of this study was to create an own method of predicting the fracture propagation using the so-called user subroutines in the Abaqus system with the method of enriching the shape function of elements (X-FEM). Four methods of predicting the crack propagation direction have been implemented: the criterion of maximum principal stresses, the Ottosen-Podgórski criterion, own criterion based on displacements around the crack tip, and the maximum tensile hoop stress criterion (MTS). The study verified the effectiveness of the author's method in comparison to the built-in method, on the basis of four types of simulations: three-point bending of a notched beam, four-point bending of a notched beam, anchor "pull-out" test and tensile splitting by "Brazilian" test.

As part of the literature review, the basic concepts of fracture mechanics are described, as well as several methods of computer fracture simulation, with particular emphasis on the X-FEM method are presented. The most common material failure criteria are described. A number of current papers concerning the implementation of own fracture propagation criteria in the Abaqus program are presented. The described methods are in many cases uncomplicated, and most of the presented research concerns cracking of composites or steel. There are no studies describing the simulations of fracture of brittle materials, especially rocks.

The dissertation presents a theoretical analysis of two tests: the tensile-splitting test using the "Brazilian" method and the anchor "pull-out" test. These considerations were used to derive the correct assumptions regarding the own method of predicting the crack propagation angle. The analysis of the "Brazilian" test allowed to create a method for determining the correct tensile strength for any brittle material, which gives more accurate results than the standard formulas. The analysis of the "pull-out" test was used to verify the results obtained in computer simulations. A simple method of searching for the anchor "pull-out" critical force in this test was found.

For the purposes of the dissertation, a number of laboratory tests were conducted. The presented research allowed to obtain the mechanical parameters of porous gypsum and selected types of sandstone and porphyry. The tests of porous gypsum were carried out to verify the effectiveness of the developed method of determining the tensile strength by the modified "Brazilian" method. The obtained results are similar to those obtained from the beam bending test. The tests of sandstone and porphyry allowed to obtain strength parameters, which were used to correctly model the "pull-out" test in computer simulations. For the purposes of the simulation, the results obtained for sandstone from the Brenna mine in Poland were used.

In the case of numerical analyzes, the effectiveness of own method of predicting the crack propagation in the Abaqus system was analyzed. The default fracture propagation criterion works in a simple manner - the fracture is directed towards the maximum principal stress direction. Unfortunately, the results obtained with this method are incorrect. From a certain point, the crack begins to twist unrealistically in some simulations, and in others the calculations are interrupted by an error. The author programed the maximum principal stress criterion in Fortran as the user subroutine UDMGINI. Author's method is based on the Westergaard solution of the Griffith's crack. In each load increment, the stresses at several dozen integration points around the crack tip are read, then the principal stresses at these points are calculated, reduced to a unit radius and the fracture is directed at an angle for which the function of the dependence between the principal stresses and the angle around the crack tip is takes a local minimum. The other criteria mentioned above were implemented in a similar way. The author's method allows to obtain results much closer to reality than those obtained with the built-in method. In most cases, each criterion can predict a crack path close to the path in actual tests. The author's method has many advantages: calculations are relatively quick, they are almost completely independent of the size of the finite element mesh, and its implementation is easy for an experienced user of the Abaqus system. However, this method has some limitations, mainly due to the lack of full user access to the Abaqus solver. In the future, it is planned to simulate other tests and materials, and to expand the method with other material failure criteria.