

STRESZCZENIE

Przedmiotem rozważań pracy doktorskiej jest analiza parametryczna dwuwarstwowych kratownic typu tensegrity. Kompletna analiza tych struktur jest procesem dwuetapowym. Pierwszy etap to ocena jakościowa, która obejmuje identyfikację cech charakterystycznych struktur tensegrity i klasyfikację do jednej z czterech grup. Drugi etap to analiza ilościowa, która koncentruje się na badaniu zachowania konstrukcji pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Oceny ilościowej dwuwarstwowych kratownic typu tensegrity dokonać można stosując podejście dyskretne lub, ze względu na powtarzalny charakter tego rodzaju konstrukcji, podejście kontynualne. W ujęciu dyskretnym struktura jest analizowana metodą elementów skończonych, natomiast w modelu kontynualnym z wykorzystaniem sześcioparametrowej teorii powłok.

W pracy rozpatrzono szerokie spektrum konstrukcji w ujęciu dyskretnym. Rozważone przykłady stanowią bazę do kolejnego etapu rozważań, czyli ujęcia kontynualnego. Do opisu zachowania struktur tensegrity przyjęty został model quasi-liniowy i geometrycznie nieliniowy, w którym uwzględniono duże gradienty przemieszczeń, ale małe gradienty odkształceń. Przeprowadzono statyczną analizę parametryczną, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu wstępnego sprężenia na przemieszczenia, nośność i sztywność konstrukcji. Udowodniono, że w przypadku konstrukcji charakteryzujących się występowaniem mechanizmu infinitezimalnego sztywność zależy nie tylko od geometrii i właściwości materiałowych, ale również od poziomu stanu samonapężenia i od obciążenia zewnętrznego. W przypadku takich konstrukcji możliwe jest sterowanie parametrami statycznymi. W literaturze mianem *tensegrity* nazywane są również konstrukcje, w których nie występuje mechanizm (w pracy takie konstrukcje nazwano *strukturami o cechach tensegrity klasy 2*) – struktury te są niewrażliwe na poziom stanu samonapężenia.

Do opracowania modelu kontynualnego przyjęto procedurę zwaną metodą równoważnej energii. Podstawą tego podejścia jest założenie, że energia odkształcenia elementów skończonych zdeformowanej kratownicy tensegrity zawiera taką samą energię jak analogiczny model kontynualny tejże kratownicy. Za pomocą procedury przedstawionej w pracy wyznaczono ekwiwalentną macierz sprężystości. Kolejnym

krokiem była walidacja otrzymanego modelu kontynualnego. W znanej autorce literaturze brak jest oceny słuszności stosowania ujęcia kontynualnego do modelowania płytowych i belkowych konstrukcji tensegrity charakteryzujących się istnieniem mechanizmu. W istniejących publikacjach sprawdzane są tylko współczynniki ekwiwalentnej macierzy sprężystości. Niniejsza praca rozwija istniejące badania i sprawdza celowość stosowania podejścia kontynualnego. Otrzymane wyniki walidacji modelu kontynualnego dają zadowalającą dokładność, ale proponowane podejście wymaga jeszcze uszczegółowienia poprzez uwzględnienie anizotropii rozpatrywanych struktur, nieliniowości pracy konstrukcji, walidację współczynników ścinania oraz dostosowanie funkcji aproksymującej przemieszczenia. Autorka planuje kontynuować prace nad modelem kontynualnym struktur tensegrity w kolejnych etapach pracy naukowej.

Na potrzeby przeprowadzonych rozważań oba zastosowane w pracy podejścia obliczeniowe, tj. model dyskretny i kontynualny, zostały zaimplementowane w środowisku *Mathematica*. W celu rozważenia struktur w ujęciu dyskretnym z uwzględnieniem teorii III rzędu, rozwiązać należało nieliniowy układ równań. W pracy zastosowano w tym celu metodę Newtona-Raphsona. W celu zastosowania modelowania kontynualnego, napisany został kolejny program, za pomocą którego, dla konstrukcji o wybranych parametrach geometrycznych i materiałowych, wyprowadzane są współczynniki ekwiwalentnej macierzy sprężystości.

Justyna
Komaszko

SUMMARY

The subject of this PhD thesis is the parametric analysis of double-layered tensegrity grids. A complete analysis of tensegrity structures is a two-step process. The first stage is the qualitative analysis, which includes the identification of the tensegrity features structures and the classification of the structures into one of four groups. The second stage is the quantitative analysis, which focuses on the behaviour of structures under the influence of external loads. The quantitative assessment of double-layered tensegrity grids can be by discrete modelling or, due to the repetitive nature of this type of structures, by continuum modelling. In the discrete approach, the structure is analysed using the finite element method, while in the continuum model, the six-parameter shell theory is used.

In the work, a wide spectrum of structures is considered using a discrete modelling. The presented examples are the basis for the next stage of considerations, i.e. the continuum approach. To describe the behaviour of tensegrity structures, a quasi-linear and geometrically non-linear model was adopted, in which large gradients of displacements and small gradients of strains were considered. The static parametric analysis was carried out, with particular emphasis on the influence of the self-stress state on displacements, load-bearing capacity and stiffness of the structure. It was proved that in the case of structures characterized by the occurrence of the infinitesimal mechanisms, the stiffness depends not only on the geometry and material properties, but also on the level of self-stress and the external load. In the case of such structures, it is possible to control the static parameters. In the literature, tensegrity is also used to refer to structures in which there is no mechanism (in this work, such structures are called *structures with tensegrity features of class 2*) – these structures are insensitive to the change of the level of self-stress.

A procedure called the energy equivalence method was adopted to develop the continuum model. The basis of this approach is the assumption that the finite element strain energy of a deformed tensegrity truss system contains the same energy as its continuum counterpart. Using the procedure presented in the work, the equivalent matrix of elasticity was determined. The next step was to validate the obtained continuum model. In the literature known to the author, there is no validation of the

continuum model of tensegrity beam-like and plate-like structures. In previous studies, only the stiffness matrix coefficients of the continuum model were verified. Therefore, this paper develops the existing research and checks the applicability of the continuum approach. The obtained results gave satisfying accuracy; however, the proposed approach still needs to be refined by considering the anisotropy of the considered structures, non-linearity of the behaviour of structures, validation of the shear coefficients and adjustment of the assumed deflection function. The author intends to continue the work on the continuum model of tensegrity structures in the next stages of her scientific career.

For the purpose of the considerations, both approaches used in the work, i.e. discrete and continuum modelling, were implemented in the *Mathematica* environment. In order to consider the structures in the discrete approach, taking into account the nonlinearity (third order theory), a non-linear system of equations had to be solved. The Newton-Raphson method was implemented. To utilize continuum modelling, another program was written, by means of which the coefficients of the equivalent matrix of elasticity were derived for structures with given geometrical and material parameters.


