

Analiza stanu naprężeń i przemieszczeń konstrukcji aluminiowej z wymienianymi elementami

Beata Potrzyszcz-Sut¹, Ewa Pabisek²

¹ Katedra Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska, e-mail: beatap@tu.kielce.pl

² Instytut Technologii Informatycznych, Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Krakowska, e-mail: epabisek@L5.pk.edu.pl

Streszczenie: Praca dotyczy nieliniowej analizy numerycznej naprężeń i przemieszczeń węzłów kratownicowej wieży aluminiowej. Założono model materiału Ramberga – Osgooda (RO) przedstawiający potęgową zależność między odkształceniem i naprężeniem: $\varepsilon(\sigma)$. W celu identyfikacji zależności odwrotnej – $\sigma(\varepsilon)$, dla materiału aluminiowego, zastosowano sztuczną sieć neuronową (SSN). W związku z koniecznością wzmocnienia konstrukcji, do układu wprowadzono sprężyste elementy stalowe. Przeprowadzono analizę stanu naprężeń i ekstremalnych przemieszczeń podczas cyklicznego obciążania i odciążania układu. Wykonano dwa rodzaje globalnych odciążeń – sprężyste i sprężysto – plastyczne. Przedstawione zostały zależności między wartością parametru obciążenia konfiguracyjnego, a wychyleniem wierzchołka A wieży. Analiza została wykonana za pomocą programu hybrydowego integrującego MES i SSN.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, model materiału Ramberga – Osgooda, sztuczna sieć neuronowa, neuronowy model materiału.

1. Wprowadzenie

Aluminiom jako materiał konstrukcyjny zyskuje w ostatnich latach coraz większą popularność w środowisku projektantów – architektów i konstruktorów. Przy tworzeniu niektórych projektów aluminium może być konkurencyjne dla stali, szczególnie gdy wymagane jest zastosowanie lekkiego, odpornego na korozję atmosferyczną, estetycznego materiału. Innymi zaletami konstrukcji aluminiowych są: łatwość montażu, wzmocnień i demontażu, możliwość pełnego recyklingu, duża wytrzymałość w niskich temperaturach oraz odporność na działanie wielu czynników chemicznych. Około 20% wyrobów ze stopów aluminium wykorzystuje się różnych branżach budownictwa. Pokrycia fasad i dachów to najczęstsze zastosowanie aluminium w budownictwie. Obszar projektowy to głównie konstrukcje wieżowe i masztowe, ale znane są również przykłady mostów, wiaduktów, kładek, przekryć prętowych, kopuł i zbiorników. Z uwagi na wysokie koszty wytwarzania, niską odporność na wysokie temperatury (w temperaturze 120°C wytrzymałość zmniejsza się o 50 – 75%) oraz małą sztywność ($E \approx 70\text{GPa}$) zakres zastosowań aluminium w konstrukcjach inżynierskich jest zawężony [1].

Wzmacnianie konstrukcji jest jedną z bardziej efektywnych metod zwiększania nośności oraz przedłużania okresu ich eksploatacji. Konieczność wzmocnienia często zachodzi w przypadku zmiany warunków użytkowania, wad konstrukcyjnych, zużycia eksploatacyjnego a także w związku z przypadkowymi uszkodzeniami.

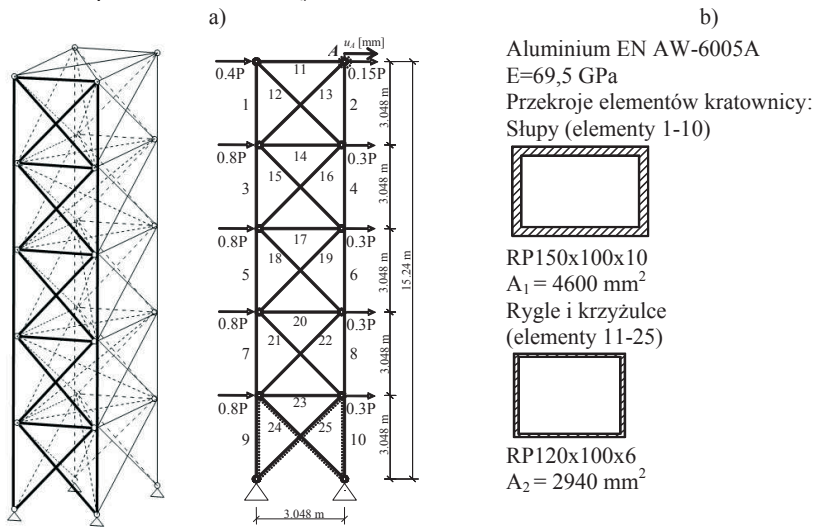
W niniejszej pracy przedstawiono dwuetapową analizę numeryczną wieży kratowej z aluminium przy założeniu nieliniowych właściwości fizycznych materiału. W pierwszej kolejności rozpatrywano pracę układu zamodelowanego w całości z aluminium. Analizie poddano naprężenia wyznaczone w elementach o największym wyężeniu oraz ekstremalne przemieszczenia. W związku z przekroczeniem II stanu granicznego zdecydowano wzmocnić konstrukcję przez wymianę kolejnych elementów ukośnych i poziomych (el.17-25, por. rys. 1a) na sprężyste stalowe. Ponownie przeprowadzono analizę dla różnych konfiguracji obciążania i odciążania układu.

2. Opis modelu numerycznego analizowanej kratownicy

2.1. Geometria i obciążenie układu

Analizowany układ prętowy jest krótszym bokiem wieży o wymiarach podstawy 3,048 m x 6,069 m i wysokości 15,24 m (rys. 1a). Konstrukcja została zamodelowana elementami kratowymi i obciążona działaniem wiatru zastąpionego węzłowymi siłami skupionymi. Schemat statyczny kratownicy został zaczerpnięty z prac J. Ghaboussiego [2], E. Pabisek [3] oraz K. Hoan-Kee [4], w których zaproponowano różne metody formułowania neuronowego modelu materiału (NMM).

W pracy zaprojektowano geometrię przekrojów elementów i dobrano materiał powołując się na normy europejskie [5, 6, 7]. Do analizy przyjęto stop aluminium EN AW-6005A, stosowany w elementach budowlanych i konstrukcyjnych, dla których wymagana jest wysoka wytrzymałość. Profile z tego stopu dobrze poddają się wszelkim rodzajom obróbki mechanicznej oraz termicznej. Szczegółowe parametry geometryczne i materiałowe przedstawiono na rysunku 1b.



Rys. 1. a) geometria i obciążenie, b) charakterystyki materiału i przekrojów analizowanego układu kratowego.

2.2. Model materiału Ramberga – Osgooda

Powołując się na normę [5], w przypadku materiałów bez wyraźnej granicy plastyczności, takich jak stopy aluminium, można stosować prawo potęgowe Ramberga – Osgooda (RO) [8]. Prawo to zakłada, że odkształcenia plastyczne występują nawet dla niskich wartości naprężeń. W ogólnym przypadku zależność RO przyjmuje następującą postać:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{o,e} \left(\frac{\sigma}{f_e} \right)^n, \quad (1)$$

gdzie:

f_e – umowna granica plastyczności,

$\varepsilon_{o,e}$ – odkształcenie trwałe dla naprężenia f_e ,

n – wykładnik potęgowy, określający stopień wzmocnienia materiału.

W przykładzie omawianym w pracy, przyjęto zmodyfikowany model RO, w którym odkształcenie $\varepsilon(\sigma)$ podczas procesu obciążania opisuje krzywa szkieletowa (2):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{2\sigma_o}{3E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n, \quad (2)$$

natomiast proces odciązania jest opisany za pomocą rodziny pętli histerezy, por. [9]:

$$\varepsilon - \varepsilon_R^e = \frac{\sigma - \sigma_R^e}{E} + \frac{4\sigma_o}{3E} \left(\frac{\sigma - \sigma_R^e}{2\sigma_o} \right)^n \quad (3)$$

gdzie:

σ_o – naprężenie odpowiadające odkształceniu trwałemu 0,2% ,

ε_R^e , σ_R^e – odkształcenia i naprężenia, w chwili rozpoczęcia procesu odciązania.

Parametry występujące w równaniach (2 i 3) przyjęto zgodnie z [2]: $\sigma_o = 71,6$ MPa; $n = 5$.

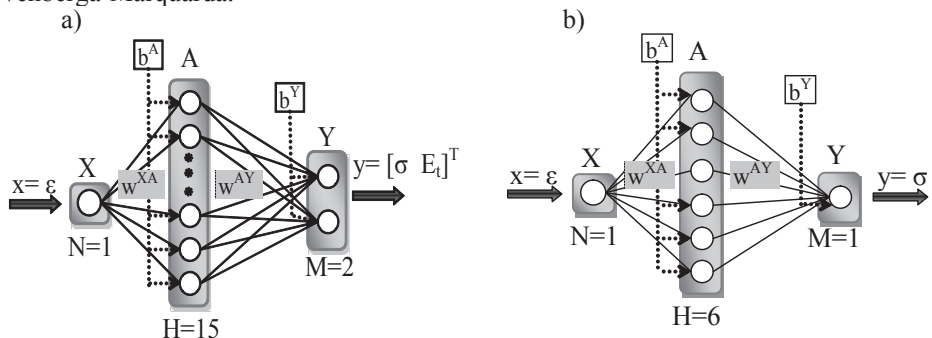
3. Identyfikacja neuronowego modelu materiału

Sieci neuronowe, ze względu na swój sposób działania są bardzo efektywne w analizie problemów identyfikacji. W pracy zastosowano jedną z możliwych kategorii sieci: jednokierunkową sieć warstwową (ang. multilayer perceptron) – powszechnie znaną jako sieć ze wsteczną propagacją błędów (SWPB).

Sieci SWPB charakteryzują się jednokierunkowym przepływem sygnałów – od wejścia do wyjścia sieci. Można w nich wyróżnić następujące warstwy: wejściową, wyjściową oraz warstwy ukryte. Ten typ sieci jest często przedstawiany jako uniwersalny aproksymator zdolny do modelowania (przy odpowiedniej liczbie warstw i neuronów) funkcji

o prawie dowolnej złożoności. Modelowanie za pomocą SWPB polega na iteracyjnym poszukiwaniu nieliniowego związku rozważanego modelu za pomocą zadanego zbioru danych bez konieczności podania założeń dotyczących struktury modelu.

W analizowanym zadaniu do identyfikacji zależności $\sigma(\varepsilon)$ zastosowano sieć SWPB, formułowaną za pomocą wzorców wygenerowanych na podstawie potęgowego prawa RO przedstawiającego zależność $\varepsilon(\sigma)$. Wygenerowano 100 wzorców uczących oraz 60 wzorców testujących sieć SWPB. Po wykonaniu obliczeń wstępnych, do dalszej analizy zaakceptowano dwie architektury sieci SWPB (por. rys. 2.). W obu sieciach założono bipolarne sigmoidalne funkcje aktywacji dla neuronów warstwy ukrytej oraz liniowe skrzynki narzędziowej (Neural Network Toolbox), pracującej w środowisku obliczeniowym MATLAB [10]. Do uczenia zastosowano pseudogaussowską metodę Levenberga-Marquarda.



Rys. 2. Architektura sieci MLP: a) wariant I, b) wariant II.

W każdym przypadku identyfikacji sygnałem wejściowym do sieci było odkształcenie ε . Odpowiedź sieci zależała od rozpatrywanego wariantu obliczeń:

- wariant I – naprężenie σ oraz moduł styczny E_t (por. rys. 2a),
- wariant II – naprężenie σ (por. rys. 2b). W tym podejściu, moduł styczny E_t został

wyznaczony na podstawie wcześniej sformułowanego modelu materiału (sieci SWPB), opisującego związek między odkształceniami i naprężeniami por. Y. Hashash et al.[2].

Dla wariantu II wyjściowe sygnały neuronów kolejnych warstw A i Y sieci przyjmują następujące wartości:

$$A_i = \tanh(w_{i1}^{XA}x + b_i^A), \quad y = \sum_{i=1}^H (w_{i1}^{AY} A_i) + b^Y, \quad \text{dla } i=1,2, \dots, H \quad (4)$$

gdzie:

H – liczba neuronów w warstwie ukrytej,

w_{i1}^{XA}, w_{i1}^{AY} – wagi połączeń warstw sieci,

b_i^A, b^Y – biasy neuronów kolejnych warstw.

Powyższe wzory wskazują, że neuronowy operator styczny E_i wyprowadzony z neuronowego modelu materiału (4), przyjmuje postać:

$$E_i = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{S_\sigma}{S_\varepsilon} \sum_{i=1}^H [w_{i1}^{AY} (1 - A_i^2) w_{i1}^{XA}] \quad (5)$$

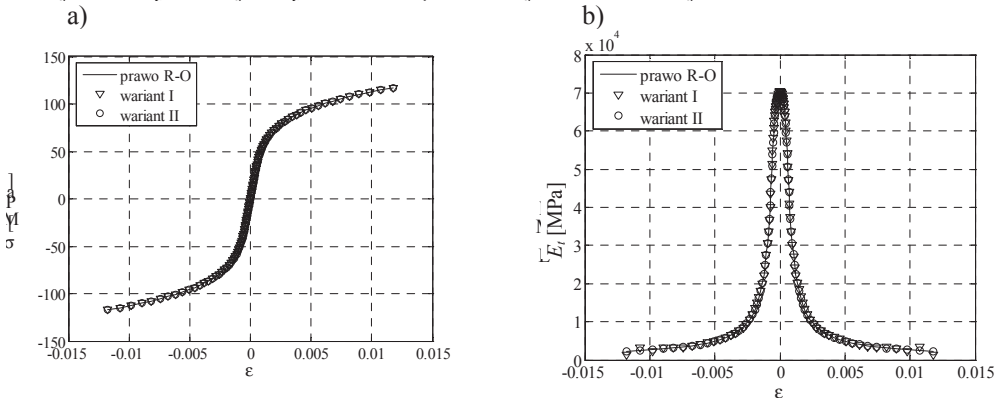
gdzie:

S_σ, S_ε – czynniki skalujące.

Warto podkreślić, że wartości składowych równania (5) są w sposób jawny określone przez znane wartości parametrów sieci (wagi i biasy). W tym sensie sieć neuronowa przestaje być „czarną skrzynką”.

Proces formułowania sieci SWPB: 1-15-2 (por. rys. 2a) został zakończony po $S = 362$ epokach uczenia dla wartości błędów średniokwadratowych uczenia i testowania: $MSE_l = MSE_t = 3,97e-7$ oraz błędów względnych procentowych $AP_l = 0,12\%$, $AP_t = 0,11\%$. Sieć SWPB: 1-6-1 została zbudowana po wykonaniu $S = 28$ epok oraz odpowiednio $MSE_l = MSE_t = 3,69e-6$, $AP_l = 0,49\%$, $AP_t = 0,48\%$.

Na rysunku 3a,b przedstawiono wzorcowe i prognozowane wartości naprężeń – $\sigma(\varepsilon)$, oraz operatora stycznego – $E_i(\varepsilon)$, wyznaczone za pomocą dwóch sformułowanych sieci SWPB. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że obie opracowane sieci poprawnie odtwarzają prawo fizyczne RO oraz moduł styczny. W związku z większą efektywnością numeryczną wariantu II, do dalszych obliczeń wybrano sieć SWPB: 1-6-1.



Rys.3. Porównanie danych wzorcowych i symulacji sieci: a) zależności: $\varepsilon(\sigma)$, $\sigma(\varepsilon)$, b) zależność $E_t(\varepsilon)$.

Przygotowaną w trybie *off line* sieć SWPB: 1-6-1 włączono do programu MES. W ten sposób powstał program hybrydowy MES/SSN integrujący obliczenia numeryczne i neuronowe. Program ten został zastosowany do analizy wcześniej zaprojektowanej konstrukcji kratowej.

4. Analiza kratownicy

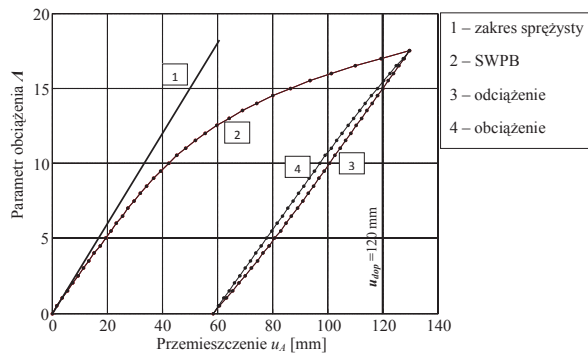
4.1. Obliczenia numeryczne zaprojektowanego układu

Przygotowaną w trybie *off line* sieć SWPB: 1-6-1 włączono do programu MES. W ten sposób powstał program hybrydowy MES/SSN integrujący obliczenia numeryczne i neuronowe. Program ten został zastosowany do analizy wcześniej zaprojektowanej konstrukcji kratowej.

W analizowanym przykładzie kratownicy (rys. 1), obliczenia wykonano za pomocą przyrostowej metody Newtona-Raphsona. Przyjęto obciążenie konfiguracyjne $P^*=1,95$ kN oraz 35 jednakowych przyrostów parametru obciążenia $\Delta A=0,5$. Obciążenie $P=AP^*$ osiągnęło maksymalną wartość 34,125 kN podczas obciążania układu oraz 0 kN dla całkowitego odciążenia. Po zrealizowaniu cyklu obciążenia badano naprężenia w najbardziej wyężonych elementach układu, czyli elementach: 9, 10, 25, 24 oraz przemieszczenie poziome – u_A węzła A kratownicy, por. rys. 1a. W tym przypadku warunek nośności ze względu na wyboczenie elementów ściskanych został spełniony, natomiast przekroczony został II stan graniczny, dla którego wg [5] maksymalne przemieszczenie $u_{dop}=120$ mm. Wyniki analizy oraz obliczone wartości graniczne zestawiono w tabeli 1. Na rysunku 4 porównano ścieżki równowagi $A(u_A)$ wyznaczone za pomocą obiektywnego (nieliniowego) neuronowego modelu materiału oraz materiału sprężystego.

Tabela 1. Zestawienie naprężeń i przemieszczeń dla zaprojektowanego układu

Wartości graniczne wg [5]		Wartości ekstremalne $P_{max}=34,125$ kN	Wartości po odciążeniu $P=0$ kN
Nr el.	$\sigma_{cr}/\sigma_{b,Rd}$ [MPa]	Naprężenia $\sigma_{x,Ed}$ [MPa]	Naprężenia resztkowe [MPa]
9	216,33 / 103,86	85,86	-0,10
10	216,33 / 103,86	-85,71	-0,10
24	76,24 / 43,27	-41,83	0,22
25	76,24 / 43,27	41,50	0,22
Przemieszczenie u_{dop} [mm]		Przemieszczenie u_A [mm]	Przemieszczenie trwałe u_A [mm]
120,0		129,8	58,5



Rys. 4. Ścieżki równowagi $A(u_A)$ obliczone za pomocą programu MES/SSN dla zaprojektowanej konstrukcji aluminiowej.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że przy założeniu materiału RO, układ pracuje w zakresie bliskim sprężystego w stanie granicznym nośności. Największe naprężenie resztkowe stanowi 0,54% początkowego naprężenia w elemencie. Natomiast ekstremalne przemieszczenie plastyczne stanowi 45,07% wartości przemieszczenia obliczonego w chwili rozpoczęcia odciążania. Ze względu na przyjęcie jednoparametrowego, proporcjonalnego obciążenia, po ponownym obciążeniu konstrukcji otrzymano wartości przemieszczeń i naprężeń takie same jak dla pierwszego cyklu obciążenia.

4.2. Obliczenia dla układu z wymienionymi elementami

W drugim etapie analizy zmodyfikowano numeryczny obraz kratownicy aluminiowej. Modyfikacja polegała na wymianie kolejnych elementów aluminiowych układu na stalowe wykonane ze stopu S215 ($E_s=210$ GPa). Dla tych elementów założono materiał liniowo-sprężysty. Profile stalowe zaprojektowano zgodnie z wytycznymi Eurokodu 3 [11], tak aby naprężenia w wymienionych elementach nie przekroczyły dopuszczalnych. Zastosowane profile stalowe miały na celu zredukowanie przemieszczenia poziomego węzła *A* kratownicy. Parametry wprowadzonych elementów oraz chronologię wymiany przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Etapy modyfikacji modelu kratownicy

Etap wzmocnienia	Nr el. (rys. 1)	Materiał	Przekrój
I	1-10	Aluminium EN AW-6005A	RP150x100x10
	11-22		RP120x100x6
	23-25	Stal S215	RK100x100x6
II	1-10	Aluminium EN AW-6005A	RP150x100x10
	11-19		RP120x100x6
	20-25	Stal S215	RK100x100x6
III	1-10	Aluminium EN AW-6005A	RP150x100x10
	11-16		RP120x100x6
	17-25	Stal S215	RK100x100x6

Dla kolejno modyfikowanej konstrukcji wykonano powtarzalne obliczenia za pomocą programu MES/SSN, w którym dwukrotnie zrealizowano proces: obciążenia → odciążenia → obciążenia, gdzie przyjęto:

1. NMM dla całej analizy,
2. NMM podczas obciążania oraz materiał liniowo sprężysty podczas odciążania konstrukcji.

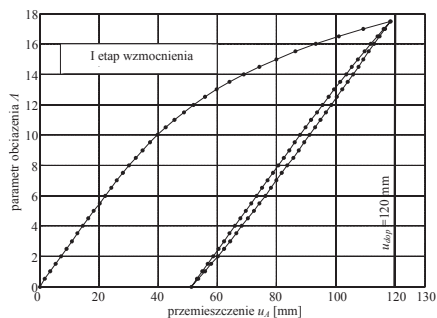
Tabela 3. Zestawienie naprężeń i przemieszczeń wyznaczonych za pomocą SWPB:1-6-1

Nr el.	Naprężenia $\sigma_{x,Ed}$ [MPa], $P_{max}=34,125$ kN			Naprężenia resztkowe σ_x [MPa], $P=0$ kN		
	I etap	II etap	III etap	I etap	II etap	III etap
9	83,69	83,69	83,69	-0,09	-0,09	-0,09
10	-83,59	-83,59	-83,59	-0,09	-0,09	-0,09
24	-53,95	-53,95	-53,95	0,28	0,27	0,27
25	53,65	53,66	53,66	0,28	0,27	0,27
u_{dop} [mm]	Przemieszczenie u_A [mm]			Przemieszczenie trwałe u_A [mm]		
120,0	118,5	116,8	115,7	51,3	51,2	51,2

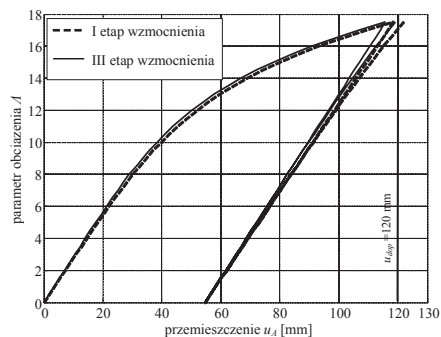
Tabela 4. Zestawienie naprężeń i przemieszczeń wyznaczonych podczas obciążania SWPB:1-6-1, odciążania sprężystego

Nr el.	Naprężenia $\sigma_{x,Ed}$ [MPa], $P_{max}=34,125$ kN			Naprężenia resztkowe σ_x [MPa], $P=0$ kN			Naprężenia $\sigma_{x,Ed}$ [MPa], $P_{max}=34,125$ kN (II cykl)		
	I etap	II etap	III etap	I etap	II etap	III etap	I etap	II etap	III etap
9	83,69	83,69	83,69	-0,09	-0,09	-0,09	83,67	83,67	83,67
10	-83,59	-83,59	-83,59	-0,09	-0,09	-0,09	-83,63	-83,61	-83,61
24	-53,95	-53,95	-53,95	0,28	0,27	0,27	-53,89	-53,89	-53,89
25	53,65	53,66	53,66	0,28	0,27	0,27	53,72	53,72	53,72
u_{dop} [mm]	Przemieszczenie u_A [mm]			Przemieszczenie trwałe u_A [mm]			Przemieszczenie u_A [mm]		
120	118,5	116,8	115,7	54,7	54,6	54,6	122,0	120,2	119,1

a)



b)



Rys. 5. Ścieżki równowagi $A(u)$: a) obciążenie i odciążenie materiał SWPB:1-6-1, b) obciążenie materiał SWPB:1-6-1 - odciążenie sprężyste

W tabelach 3 i 4 zestawiono wybrane naprężenia i przemieszczenia obliczone po wykonaniu całego procesu obciążenia, a na rysunku 5 przedstawiono wyznaczone ścieżki równowagi $A(u_A)$. Wyniki przedstawione w tabelach wskazują, że 1 proces obciążenia nie powoduje przekroczenia stanów granicznych. Natomiast proces 2 typu ma istotny wpływ na II stan graniczny konstrukcji wyznaczony dla pierwszego i drugiego etapu wzmocnienia kratownicy (por. rys. 5b). W tym przypadku 3 etap wzmocnienia układu spełnia stan graniczny użytkowania.

5. Wnioski

Z punktu widzenia mechaniki budowli wymiana prętów wpływa istotnie na naprężenia w nich występujące, w odniesieniu do naprężeń dopuszczalnych. Natomiast wymiana prętów wykratowania nie ma większego wpływu na globalną sztywność kratownicy, ponieważ największe siły osiowe oraz naprężenia dla układu występują w słupach (el. 7,8,9,10).

W pracy sformułowano sieci SWPB, pełniącą rolę neuronowego modelu materiału (NMM) oraz pokazano jej praktyczne zastosowanie. Model NMM był zdefiniowany w trybie *off line* za pomocą wzorców wygenerowanych z potęgowego prawa Ramberga – Osgooda. Oprócz predykcji zależności $\sigma(\varepsilon)$ dla kratowego elementu skończonego, sieć NMM umożliwiła także analityczne obliczenie modułu stycznego E_t . Przygotowana sieć posłużyła do zbudowania programu hybrydowego MES/SSN. Program MES/SSN został zastosowany do analizy kratownicy płaskiej, która ze względu na przekroczenie II stanu granicznego była modyfikowana przez wymianę prętów aluminiowych na stalowe. Przeprowadzona analiza wskazuje, że sieć SWPB jest efektywna numerycznie i może z powodzeniem zastępować prawo fizyczne RO w programie MES.

6. Kierunki dalszych prac

Planowane jest rozwinięcie zagadnienia przez wprowadzenie dwuparametrowego obciążenia, które pozwoli na analizę procesu przystosowania konstrukcji pod działaniem obciążeń nisko-cyklicznych.

Literatura

- 1 Gwóźdź M. Problemy projektowe współczesnych konstrukcji aluminiowych. Czasopismo techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej z. 4-A/2007, s. 281 – 286.

- 2 Hashash Y. M., Jung S. and Ghaboussi J. Numerical implementation of a neural network based material model in finite element analysis, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 59:989-1005, 2004.
- 3 Pabisek E. Systemy hybrydowe integrujące MES i SSN w analizie wybranych problemów mechaniki konstrukcji i materiałów, Monografia 369, Politechnika Krakowska, Seria Inżynieria Lądowa, Kraków, 2008.
- 4 Hoan-Kee Kim, Multi-scale nonlinear constitutive models using artificial neural networks. Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, 2008.
- 5 PN-EN 1999-1-1:2011 Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1-1: Reguły ogólne.
- 6 PN-EN 1991-1-4:2008 Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
- 7 PN-EN 1993-3-1:2008/AC Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.
- 8 Ramberg W., Osgood W. R. Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No 902, National Committee for Aeronautics, Washington DC., 1943.
- 9 Akazawa T, Nakashima M, Sakaguchi O., Simple model for simulating hysteretic behavior involving significant strain hardening. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 264.
- 10 Neural Network Toolbox for Use with MATLAB. User's Guide. The MathWorks, Inc., 2011.
- 11 PN-EN 1993-1-1:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

The analysis of stresses and displacements in the aluminium structure with replaceable elements

Beata Potrzyszcz-Sut¹, Ewa Pabisek²

¹ *Department of Mechanics, Metal Structures and Computer Methods, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: beatap@tu.kielce.pl*

² *Institute for Computational Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology, e-mail: epabisek@L5.pk.edu.pl*

Abstract: The paper concerns the non-linear analysis of stresses and displacements in an aluminium truss tower. The Ramberg – Osgood material model was assumed. This model introduced power type relation between stresses and strains. In order to identify the inverse relation, a neural network was used. Because of the need to strengthen the tower, a number of aluminium bars was replaced by steel bars. The perfect elastic material model was assumed for the steel bars. The analysis of stresses and extreme displacements was performed during the cyclic loading and unloading of the system. Two global unloading processes were considered: elastic and elastic-plastic processes. The relationship between the load factor and deflection of the top of the tower is shown. Analysis was performed using a hybrid FEM/ANN program.

Keywords: numerical analysis, Ramberg – Osgood material model, artificial neural network, neural material model.