

ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW GIĘCIA PROFILI KONSTRUKCYJNYCH

PAWEŁ LITWIN, FELIKS STACHOWICZ

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO DETERMINATION OF BENDING PARAMETERS OF CONSTRUCTION PROFILES

Abstract

Determination of the bending moment and springback coefficient of thin-walled steel and aluminium alloy profiles, as a function of the bending curvature, was the main objective of the work. The time consuming process of determination of distortion of cross section, which affects bending process of thin wall products, was eliminated. This objective was achieved by an application of the artificial neural networks. Multi-layer Perceptron (MLP) was trained using measured process data of profile bending. The MLP had profile geometry and mechanical parameters of material as input, and bending moment as well as spring-back coefficient as output. It was confirmed that this system is a valid alternative for the quick responsible method of main bending parameters determination.

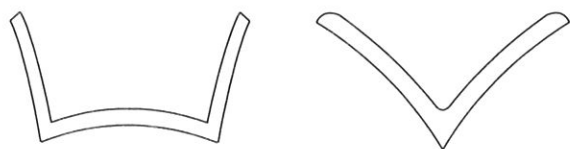
1. WSTĘP

Profile konstrukcyjne, w tym kątowniki i ceowniki znajdują szerokie zastosowanie głównie jako elementy nośne we wszelkiego rodzaju konstrukcjach. Część wyrobów wykonywanych z tych elementów kształtowana jest poprzez gięcie na zimno, niekiedy na dość znaczną krzywiznę na giętarkach lub tłocznikach gnących. Automatyzacja procesów montażu narzuca konieczność uzyskiwania wyrobów o wysokiej klasie dokładności kształtowo wymiarowej. Istotną jest również ilość operacji niezbędnych do wykonania danego detalu. Prawidłowa realizacja procesu gięcia oraz dobór odpowiednich narzędzi i urządzeń musi być poprzedzona wyznaczeniem parametrów siłowych oraz

wielkości powrotnych odkształceń sprężystych po zdjęciu obciążenia.

Podczas gięcia cienkościennych profili konstrukcyjnych obserwujemy znaczne zniekształcenie przekroju poprzecznego (rys. 1). Zjawisko zniekształcenia przekroju w połączeniu z umocnieniem odkształceniowym materiału wpływa na przebieg zależności pomiędzy krzywizną a momentem gnącym. Charakterystycznym punktem tej zależności jest krytyczna wartość krzywizny κ_{cr} . Jeśli κ jest mniejsze od wartości krytycznej, umocnienie materiału ma główny wpływ na wartość momentu gnącego, który rośnie wraz ze wzrostem krzywizny. Jeśli wartość krytyczna krzywizny zostanie prze-

kroczone, redukcja momentu bezwładności spowodowana zniekształceniem przekroju poprzecznego powoduje spadek wartości momentu gnącego przy rosnącej krzywiznie gięcia. W procesie gięcia rur o przekroju kołowym zniekształcenie przekroju poprzecznego opisywane jest stopniem owalizacji (Endow i Murota, 1984; Reid i in., 1994; Al-Qureshi, 1999). W przypadku pozostałych typów profili nie ma podobnego uniwersalnego parametru opisującego jednoznacznie zniekształcony przekrój poprzeczny. Dokładny opis stopnia i formy zniekształcenia przekroju profili konstrukcyjnych może być realizowany jedynie z określonym przybliżeniem (Świątkowski i Stachowicz, 1984; Yu i Teh, 1997).



Rysunek 1. Kształty przekroju poprzecznego profili cienkościennych po gięciu.

Podstawowym problemem w procesach gięcia na zimno jest zjawisko sprężynowania. Podczas gięcia profili cienkościennych, w biernej fazie procesu (po zdjęciu obciążenia) następuje zarówno zmiana krzywizny gięcia, jak i zmiana stopnia zniekształcenia przekroju poprzecznego. Analityczne wyznaczenie momentu gnącego i współczynnika sprężynowania jest dość skomplikowane z powodu zniekształcenia przekroju poprzecznego profilu i może być wykonane po spełnieniu określonych założeń (Stachowicz, 1990).

Dokładność obliczeń wartości współczynnika sprężynowania K uzależniona jest od dokładności określenia wartości momentu gnącego M , zgodnie z powszechnie uznawaną zależnością:

$$K = \frac{R}{R_s} = 1 - \frac{MR}{EI} \quad (1)$$

gdzie: R – promień gięcia w fazie aktywnej procesu,
 R_s – promień wygięcia po odciążeniu,
 E – moduł Younga,
 I – moment bezwładności przekroju.

Głównym celem pracy było określenie wartości momentu gnącego oraz współczynnika sprężynowania w funkcji krzywizny (promienia) gięcia, z pominięciem pracochłonnego wyznaczania stopnia i formy zniekształcenia przekroju poprzecznego podczas gięcia cienkościennych profili konstrukcyjnych. Do realizacji tego celu wykorzystano sztuczne sieci neuronowe, które znajdują ostatnio różnorodne zastosowania, w tym również do badania procesów gięcia (Lin i Tai, 1999).

2. MATERIAŁY I SPOSÓB GIĘCIA

Badania eksperymentalne zostały zrealizowane dla serii kątowników równoramiennych wykonanych ze stali St3S, St3SY oraz St3SX oraz kilku ceowników wykonanych ze stopu aluminium PA38 (tab. 1). Kątowniki wykorzystane w eksperymencie wykonane były w procesie walcowania na gorąco (oznaczone symbolem L w tablicy 1) oraz kształtowane na zimno z blach (symbol L_z).

Tablica 1. Wymiary kształtowników użytych do eksperymentu.

Ceowniki ze stopu PA38			
Oznaczenie	Wysokość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość ścianki [mm]
C 15x15x2	15	15	2
C 30x15x2	15	30	2
C 30x20x2	20	30	2
C 40x20x2	20	40	2
C 25x27x2,5	27	25	2,5
C 25x27x3	27	25	3
Kątowniki stalowe			
L 20x20x3/St3SY	20	20	3
L 25x25x3/St3SY	25	25	3
L 30x30x3/St3S	30	30	3
L 35x35x4/St3SY	35	35	4
L _z 20x20x2/St3SX	20	20	2
L _z 25x25x2/St3SX	25	25	2
L _z 30x30x2/St3SX	30	30	2
L _z 35x35x3/St3SX	35	35	3

Ze ścianek kształtowników wycięto próbki do próby jednoosiowego rozciągania. W przypadku próbek ze stopu PA38 do opisu zależności odkształcenie–naprężenie zastosowano równanie Hollomona $\sigma = C\epsilon^n$. Wartość wybranych parametrów mechanicznych materiału kształtowała się na poziomie:

- wytrzymałość na rozciąganie – $R_m = 165$ MPa;
- moduł Younga – $E = 80700$ MPa;
- współczynnik krzywej umocnienia – $C = 292$ MPa;
- wykładnik krzywej umocnienia – $n = 0,212$;

Ze względu na duży przystanek plastyczności na krzywych rozciągania próbek wyciętych z kształtowników stalowych do opisu przebiegu zależności odkształcenie–naprężenie wykorzystano krzywą sklejaną, złożoną z następujących odcinków:

1. Zakres odkształceń sprężystych opisany równaniem:
 $\sigma = E \epsilon$;

- Przystanek plastyczności z niewielkim wzrostem wartości naprężeń: $\sigma = R_c (1 + \epsilon)$;
- Faza umocnienia odkształceniowego opisana równaniem Krupkowskiego – Swifta: $\sigma = C(\epsilon_0 + \epsilon)^n$.

W tabeli 2 podane zostały wartości wybranych parametrów mechanicznych badanych materiałów stalowych. Średnia wartość modułu Younga była na poziomie $E = 205$ GPa.

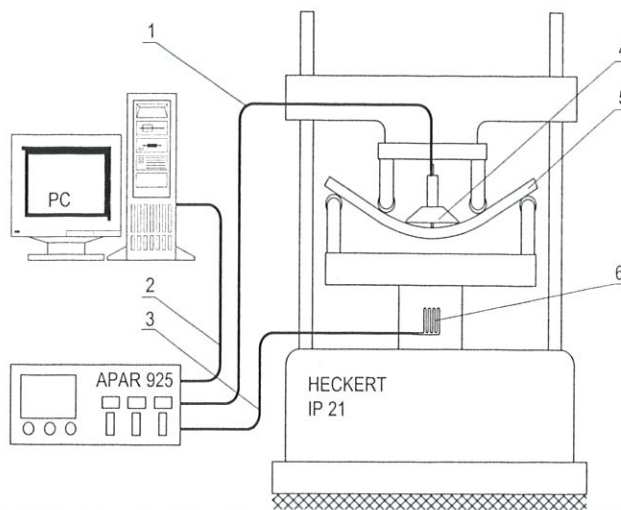
Dokładny opis krzywej rozciągania w początkowej fazie procesu jest bardzo ważny ze względu na fakt, iż w procesie gięcia rozkład naprężeń na przekroju jest odzwierciedleniem tej charakterystyki, a odkształcenia osiągają relatywnie niskie wartości.

Tablica 2. Wybrane własności mechaniczne kątowników stalowych użytych do eksperymentu.

Typ	Material	R_c [MPa]	n	C [MPa]	ϵ_0
L 20x20x3	St3SY	295	0,062	467	-0,044
L 25x25x3	St3SY	291	0,065	471	-0,046
L 30x30x3	St3S	323	0,114	581	-0,026
L 35x35x4	St3SY	299	0,059	463	-0,041
L_z 20x20x2	St3SX	351	0,096	588	-0,096
L_z 25x25x2	St3SX	355	0,094	581	-0,093
L_z 30x30x2	St3SX	348	0,092	592	-0,098
L_z 35x35x3	St3SX	351	0,099	585	-0,0104

Próby gięcia profili konstrukcyjnych realizowano przy pomocy przyrządu własnej konstrukcji zamocowanego na maszynie wytrzymałościowej (rys. 2). Realizowane gięcia na czterech podporach zapewnia obciążenie profili czystym momentem gnącym, bez udziału sił wzdłużnych oraz tnących. Powyższy model obciążenia jest często stosowany do analitycznego określania obciążeń w procesie gięcia, ponieważ okazuje się on szczególnie dogodny do teoretycznej analizy parametrów gięcia w zakresie odkształceń plastycznych. Przedstawiony rodzaj obciążenia wybrano również ze względu na możliwość prostego i dokładnego pomiaru parametrów siłowych procesu; jak również możliwość obserwacji i pomiaru zmian krzywizny gięcia profili w trakcie eksperymentu.

Próbowi gięcia poddano kilkanaście typów kątowników i ceowników - do badań użyto odcinków długości 480 mm; długość odcinka próbki obciążonego czystym momentem gnącym wynosiła 220 mm. Aby uniknąć „obracania się” przekrojów kształtowników w trakcie gięcia próby wykonano jedynie dla kształtowników których przekrój pozwalał na ustawienie symetryczne względem płaszczyzny gięcia. Ceowniki i kątowniki gięto wyłącznie w ustawieniu zabezpieczającym je przed szybkim pofałdowaniem ścianek tzn. tak aby swobodne końce ścianek były w strefie naprężeń rozciągających.



Rysunek 2. Zestaw doświadczalny do określania parametrów gięcia: 1 – kanał pomiaru przemieszczeń, 2 – połączenie RS 232, 3 – kanał pomiaru siły, 4 – indukcyjny czujnik przemieszczeń, 5 – gięty element, 6 – tensometr pomiaru siły.

W trakcie eksperymentu wyznaczano charakterystyki siłowe procesu gięcia (zależność momentu gnącego od krzywizny) oraz wielkość odkształceń powrotnych wyrażoną przez współczynnik sprężynowania. Do pomiaru siły nacisku podpór na gięty element wykorzystano tensometryczny układ pomiarowy oraz rejestrujący wyniki zestaw komputerowy. Krzywiznę kształtowanych elementów określano na podstawie pomiarów strzałki ugięcia przy pomocy indukcyjnego czujnika przemieszczeń.

3. ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO WYZNACZANIA PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW GIĘCIA

Dla optymalnego wykorzystania sieci neuronowych niezbędne jest wydzielenie z danych zebranych podczas obserwacji procesu, parametrów wejściowych mających istotny wpływ na wybrane parametry wyjściowe. Pominięcie któregoś z ważnych parametrów może spowodować obniżenie jakości odpowiedzi zwracanych przez sieć neuronową, lub całkowicie uniemożliwić jej poprawną pracę. Także uwzględnienie parametrów nieistotnych nie jest korzystne – efektem jest nadmierny rozrost struktury sieci neuronowej oraz wprowadzenie zbędnego szumu informacyjnego. Intelligent Problem Solver pakietu Statistica Neural Networks (Statistica Neural Networks, 1999) po analizie dostarczonego zestawu danych proponował usunięcie tych składowych wektora wejściowego, które nie miały istotnego wpływu na dane wyjściowe.

Z funkcjonalnego punktu widzenia perceptron wielowarstwowy można traktować jako układ do aprok-

symacji nieliniowej funkcji wielu zmiennych $y = f(h)$. Wykazano, że dowolną nieliniową wielowymiarową funkcję można aproksymować z dostateczną dokładnością przy użyciu sieci neuronowej zawierającej jedynie dwie warstwy ukryte, przy czym zakłada się dostatecznie dużą liczbę neuronów w każdej warstwie ukrytej (Hertz i in., 1995). Dużym problemem w przypadku stosowania sieci neuronowych jest brak uniwersalnych zasad doboru ich struktury. Struktura optymalnej sieci neuronowej jest częściowo określona przez liczbę istotnych sygnałów wejściowych (determinujących liczbę jednostek warstwy wejściowej), oraz liczbę sygnałów wyjściowych (poszukiwanych wartości na wyjściu sieci, pozostaje jedynie znalezienie właściwej liczby neuronów należących do jednej lub dwóch warstw ukrytych sieci. Istotnym ułatwieniem tych poszukiwań był moduł Intelligent Problem Solver pakietu Statistica Neural Networks, który przeszukiwał populację sieci typu perceptronowego i budował zestaw najlepszych sieci). Program ten po podaniu proponowanego zestawu sygnałów wejściowych i określeniu zestawu sygnałów wyjściowych poprzez testowanie różnych sieci odnajdywał sieci o architekturze zapewniającej wysoką jakość procesu uczenia. Kryterium jakości to np. dokładność sieciowej regresji, wyrażona przez wielkość błędu, odchylenie standardowe, czy też współczynnik korelacji między pożądaną a wyznaczoną wartością na wyjściu sieci. Intelligent Problem Solver wspomagał również określanie zestawu efektywnych sygnałów wejściowych sieci, wskazując sygnały które nie mają istotnego wpływu na wartość parametrów wejściowych.

Na potrzeby procesu uczenia sieci tworzono zbiór uczący zawierający pary sygnałów wejściowych i odpowiadających im sygnałów wyjściowych (odpowiedzi) sieci neuronowej. Dodatkowo w celu weryfikacji jakości generowanych przez sieć odpowiedzi utworzono zbiór weryfikujący, zawierający przypadki spoza zestawu danych wykorzystywanego podczas trenowania sieci. Jako parametr opisujący jakość procesu uczenia przyjęto błąd RMS (Round Mean Square) wyrażony wzorem:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_i - y_i)^2}{N}} \quad (2)$$

gdzie: N – liczba wektorów zbioru uczącego; y_i – sygnał neuronu wyjściowego dla i -tego wzorca; z_i – oczekiwany sygnał neuronu wyjściowego dla i -tego wzorca.

Jako kryterium zakończenia procesu uczenia przyjęto fakt braku spadku błędu RMS weryfikacji sieci. Po przekroczeniu pewnego „krytycznego” punktu w procesie uczenia, ciągle można obserwować spadek błędu uczenia, przy jednoczesnym braku spadku lub

wzroście wartości błędu weryfikacji. Kontynuowanie procesu uczenia prowadzi w takim przypadku do przecuczenia sieci (zbytniego dopasowania do wzorców uczących).

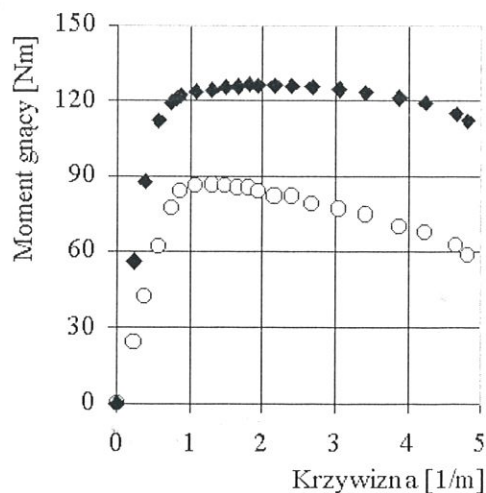
4. WYNIKI EKSPERYMENTU NEURONOWEGO DLA SERII KĄTOWNIKÓW STAŁOWYCH

Podczas prób gięcia zaobserwowano większą deformację przekroju poprzecznego kątowników kształtowanych na zimno, co powodowało szybsze osiągnięcie krzywizny krytycznej. Po przekroczeniu krytycznej wartości krzywizny obserwowano mocno opadającą charakterystykę gięcia profili kształtowanych w procesie walcowania na zimno (rys. 3). Duże różnice przebiegu charakterystyk gięcia kątowników zimno i gorąco walcowanych były podstawą wprowadzenia na wejście sieci neuronowej dodatkowego sygnału w postaci informacji o typie profilu (0 – profile kształtowane na zimno; 1 – profile kształtowane na gorąco). Ponieważ kątowniki będące przedmiotem eksperymentu wykonano z różnych materiałów, na wejściu sieci podano własności mechaniczne materiałów: moduł Younga, granica plastyczności, współczynniki krzywej umocnienia oraz wielkość przystanku plastyczności. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem programu Neuronix (Litwin i Stachowicz, 1999), oraz wyniki zastosowania modułu Intelligent Problem Solver, wykazują istotny wpływ na parametry procesu gięcia następującego zestawu czynników, które podawano na wejście sieci:

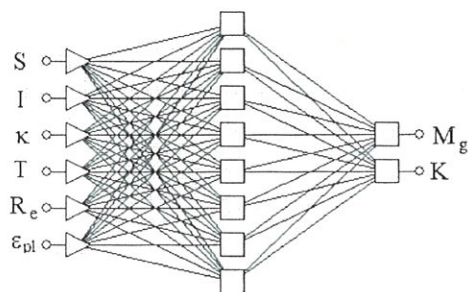
S – pole powierzchni przekroju poprzecznego giętego elementu,

I – moment bezwładności przekroju,

κ – chwilowa wartość krzywizny,



Rysunek 3. Porównanie zależności moment gnący – krzywizna dla kątownika wytwarzanego w procesie walcowania na zimno (o) oraz 20x20x3 walcowanego na gorąco (♦).



Rysunek 4. Sieć neuronowa zastosowana do wyznaczania parametrów gięcia serii kątowników stalowych.

T – typ kształtownika,
 R_e – granica plastyczności,
 ϵ_{pl} – wielkość przystanku plastyczności.

Sieć neuronowa wykorzystana do określania parametrów procesu gięcia kątowników miała sześć jednostek w warstwie wejściowej, osiem w warstwie ukrytej i dwa neurony w warstwie wyjściowej (rys. 4). Proces uczenia sieci charakteryzuje szybki spadek wartości błędu uczenia RMS w początkowej fazie uczenia, (poziom poniżej 0,05 został osiągnięty po około 10000 epok uczenia) i stabilizacją po około 30000 epok na poziomie ok. 0,035 (tab. 3). Należy podkreślić, że przy użyciu typowego dzisiaj komputera PC (Pentium III 800 MHz) proces uczenia przedstawionej sieci nie jest czasochłonny – zajmuje ok. 15 minut.

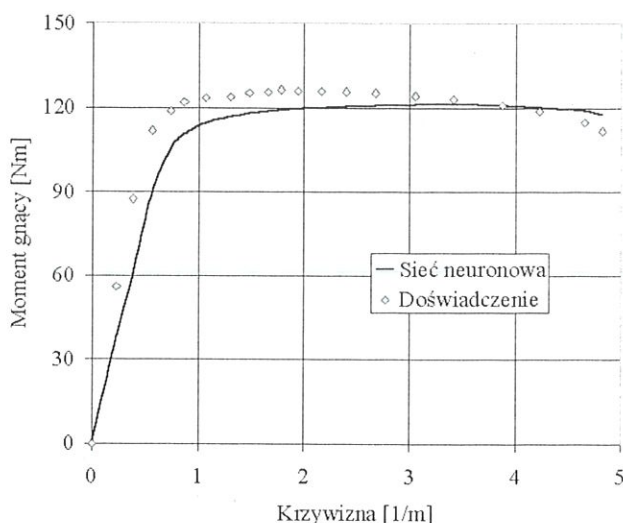
Przedstawione wartości błędu RMS uczenia oraz testowania sieci potwierdzają zasadność stosowania perceptronu wielowarstwowego do wyznaczania parametrów procesu gięcia w przypadku kształtowania kątowników.

Tabela 3. Wyniki eksperymentu neuronowego dla kątowników stalowych

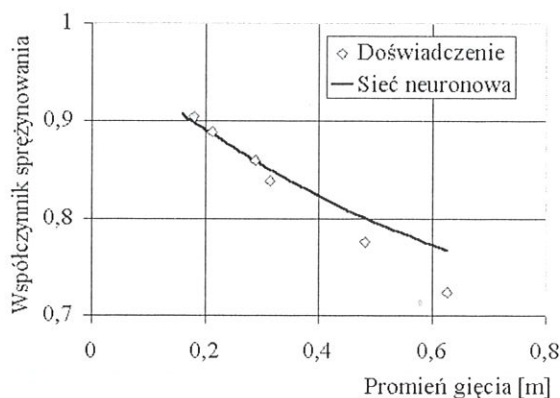
Typ profilu	RMS (Uczenie)	RMS (testowanie)
L 20x20x3/St3SY	0,035	0,058
L 25x25x3/St3SY	0,037	0,055
L 30x30x3/St3S	0,043	0,049
L 35x35x4/St3SY	0,042	0,061
L _z 20x20x2/St3SX	0,038	0,063
L _z 25x25x2/St3SX	0,041	0,058
L _z 30x30x2/St3SX	0,039	0,062
L _z 35x35x3/St3SX	0,036	0,057

Przykładowa charakterystyka gięcia (rys. 5) uzyskana w eksperymencie neuronowym wykazuje wysoką zgodność z rezultatami próby gięcia. Różnica w maksymalnych wartościach momentu gnącego wynosi mniej niż 5%, inne natomiast są krytyczne warto-

ści krzywizny gięcia: 2,18 [m⁻¹] w doświadczeniu i 3,41 [m⁻¹] w rezultacie zastosowania sieci neuronowej. Wysoka zgodność wyników charakteryzuje również doświadczalną i podaną przez perceptron wielowarstwową charakterystykę sprężynowania (rys. 6).



Rysunek 5. Porównanie doświadczalnej oraz wyznaczonej przez sieć neuronową charakterystyki gięcia kątownika L 20x20x3/St3SY.



Rysunek 6. Porównanie wartości współczynnika sprężynowania osiągniętego w próbach gięcia z wynikami eksperymentu neuronowego kątownika L 20x20x3/St3SY.

5. WYNIKI EKSPERYMENTU NEURONOWEGO DLA SERII CEOWNIKÓW ALUMINIOWYCH

Ceowniki aluminiowe stanowiły kolejną grupę profili o przekroju otwartym, dla której w eksperymencie neuronowym wyznaczono moment gnący i sprężynowanie. Do procesu uczenia oraz testowania sieci neuronowej wykorzystane zostały zbiory zawierające zarejestrowane w doświadczeniu parametry procesu gięcia oraz wybrane wielkości opisu przekroju poprzecznego.

Na wejście sieci (rys. 7) dostarczano następujące sygnały:

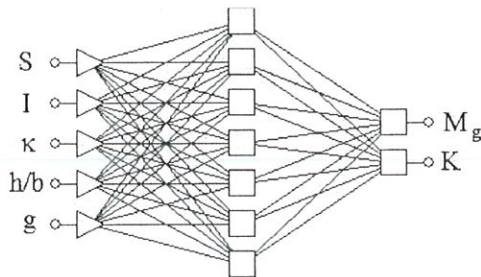
S – pole powierzchni przekroju poprzecznego giętego elementu;

I – moment bezwładności przekroju;

κ – chwilowa wartość krzywizny;

h/b – stosunek wysokości do szerokości przekroju kształtownika;

g – grubość ścianki przekroju.



Rysunek 7. Model sieci neuronowej wykorzystany do wyznaczenia parametrów gięcia ceowników aluminiowych.

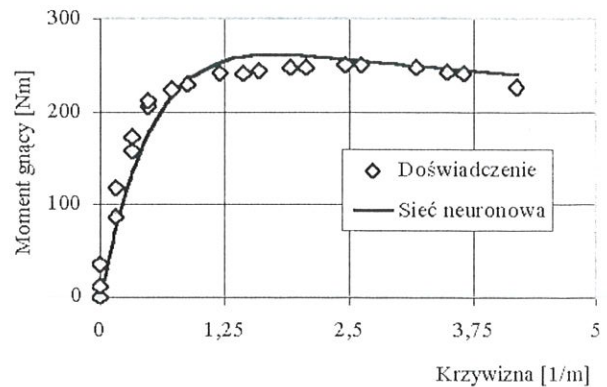
W eksperymencie neuronowym do uczenia sieci wykorzystywano zbiór uczący zawierający wyniki prób gięcia pięciu typów ceowników, a następnie testowano zgodność wartości na wyjściach sieci z wynikami próby gięcia szóstego (nieobecnego w zbiorze uczącym) typu ceownika. Całą procedurę powtarzano sześciokrotnie (dla wszystkich typów ceowników). Podobnie jak w przypadku badania poprzednich typów profili, obserwowano zbieżny proces uczenia, ze szczególnie szybkim zmniejszaniem wartości błędu RMS w pierwszych 20000 epok uczenia. Ostatecznie błąd uczenia ustabilizował się po około 60000 epok na wartości około 0,04. Błąd testowania był dla badanych ceowników wyższy o mniej niż 20% od błędu uczenia (tab. 4).

Wartości błędu RMS uzyskane dla nauczonej sieci neuronowej, a szczególnie fakt zbliżonych wartości błędu dla wszystkich typów profili świadczą o poprawnym przebiegu procesu uczenia. Potwierdzeniem dobrej jakości procesu uczenia są porównawcze charakterystyki siłowe oraz sprężynowania (rys. 8, 9). W przedstawionym przypadku „neuronowa” charakterystyka gięcia poza początkową fazą gięcia (fazą od-

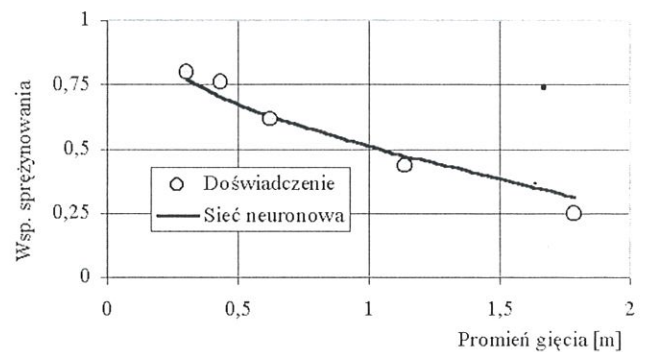
Tabela 4. Wyniki eksperymentu neuronowego ceowników ze stopu PA38.

Typ profilu	RMS (Uczenie)	RMS (testowanie)
C 15x15x2	0,043	0,049
C 30x15x2	0,038	0,044
C 30x20x2	0,041	0,046
C 40x20x2	0,04	0,043
C 25x27x2,5	0,038	0,044
C 25x27x3	0,043	0,048

kształceń sprężystych), jest niemal identyczna z charakterystyką otrzymaną w wyniku doświadczalnej próby gięcia. Podobnie wysoka zgodność charakteryzuje wyniki współczynnika sprężynowania (rys. 9).



Rysunek 8. Porównanie doświadczalnej oraz wyznaczonej przez sieć neuronową charakterystyki gięcia ceownika 25x27x3 ze stopu PA38.



Rysunek 9. Zależność wartości współczynnika sprężynowania od promienia gięcia ceownika aluminiowego 25 x 27 x 3 mm – porównanie danych doświadczalnych z wynikami eksperymentu neuronowego

6. WNIOSKI

Analityczne określanie podstawowych parametrów procesu gięcia jest dość skomplikowane i może być przeprowadzone po spełnieniu określonych założeń. Sztuczne Sieci Neuronowe są alternatywną metodą, zapewniającą osiąganie zadowalających dokładności przy określaniu momentu gnącego jak również wartości współczynnika sprężynowania. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów neuronowych charakteryzuje wysoka zgodność z wynikami badań doświadczalnych, możliwe jest zatem stworzenie bazy danych zawierającej wyniki zrealizowanych procesów gięcia, na podstawie których Perceptron Wielowarstwowy będzie „prognozował” parametry procesu gięcia profili konstrukcyjnych bez konieczności stosowania złożonych, czasochłonnych i kosztownych badań doświadczalnych.

LITERATURA

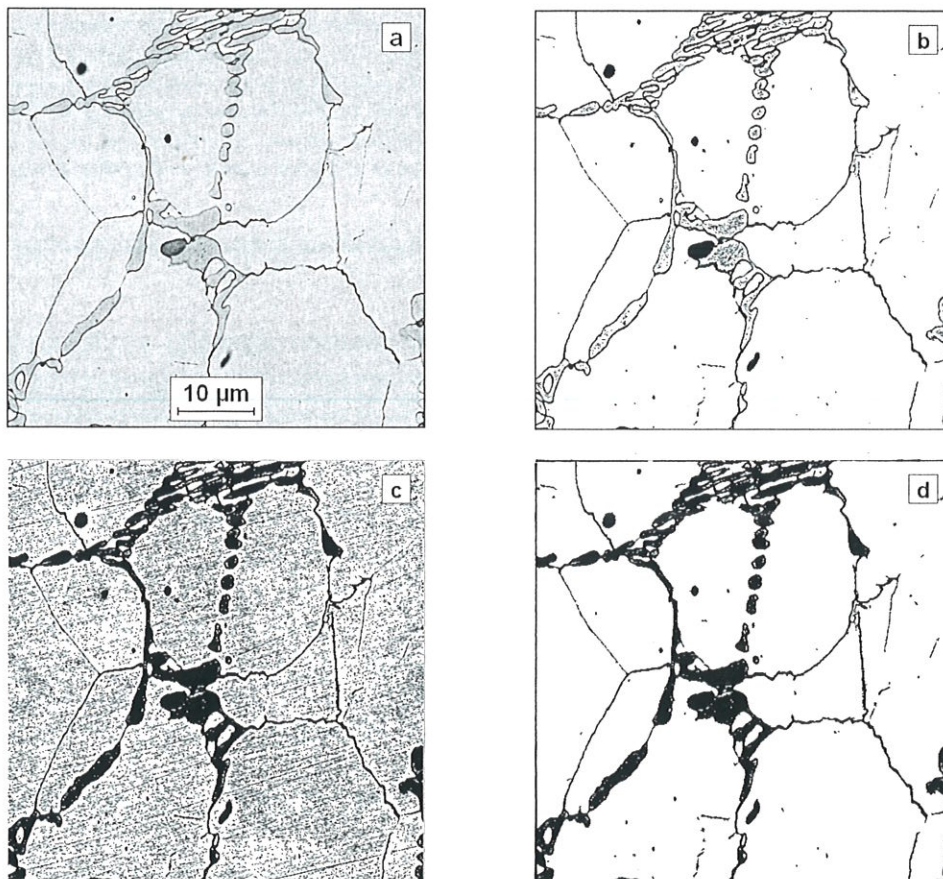
- Al-Qureshi, H.A. 1999, Elastic-plastic analysis of tube bending, *Int. J. Machine Tools and Manufacturing*, 39, 87-104.
- Endow, J., Murota, T., 1984, On the fluttering of cross-section of circular tubes in uniform bending, *Adv. Technol. Plasticity*, 1, 285-290.
- Hertz, J., Krogh, A., Palmer, R.G., 1995, *Wstęp do teorii obliczeń neuronowych*, WNT, Warszawa 1995.
- Lin, J.C., Tai, C.C., 1999, The application of neural network in the prediction of spring-back in an L-shaped bend, *Int. J. Adv. Manufact. Technol.*, 15, 163-170.
- Litwin, P., Stachowicz, F., 1999, Artificial intelligence identification of profile bending parameters, *Conf. Proc. Technology '99*, Bratislava, 351-355.

- Reid, S.R., Yu, T.X., Yang, J.L., 1994, Hardening – softening behavior of circular pipes behaviour of circular pipes under bending and tension, *Int. J. Mech. Sci.*, 36, 1073-1085.
- Stachowicz, F., 1990, Moment gnący i sprężynowanie po gięciu profili skrzynkowych ze stopu PA38 – z uwzględnieniem zniekształcenia przekroju, *Rudy Metale*, 34, 115-120.
- Statistica Neural Networks*, 1999, Addendum for version 4, Statsoft, Tulsa.
- Świątkowski, K., Stachowicz, F., 1984, Analysis of the cross-sectional deformation of box profiles subjected to bending, *J. Mech. Work. Technol.*, 10, 103-116.
- Yu, T.X., Teh, L.S., 1997, Large plastic deformation of beams of angle-section under symmetric bending, *Int. J. Mech. Sci.*, 39, 829-239.

Artykuł otrzymano 15 kwietnia 2003 r.

Errata

Redakcja przeprosza Czytelników i Autora artykułu pt.: „Komputerowa analiza obrazu w metalografii ilościowej”, opublikowanego w numerze 1/2003 naszego kwartalnika za niezamieszczenie w rysunku 5 podpunktów a i b. Poniżej podajemy pełną wersję tego rysunku.



Rysunek 5. Wykorzystanie metody binaryzacji z histerezą do detekcji węglików oraz granic ziarn byłego austenitu w stali narzędziowej do pracy na gorąco. Opis w tekście.