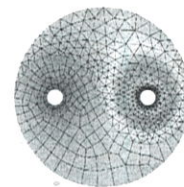




Wydawnictwo
Naukowe
AKAPIT



ZASTOSOWANIE SZTUCZNEJ SIĘCI NEURONOWEJ DO OCENY WPLYWU PIERWIASTKÓW DOMIESZKOWYCH NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE WYROBÓW STALOWYCH

ROMAN KUZIĄK
WŁADYSŁAW ZALECKI
JAN KUSIAK

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TO AN ASSESSMENT OF INFLUENCE OF RESIDUAL MICROALLOYING ELEMENTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL PRODUCTS

Abstract

The work presents some results of the research connected with the development of new approach based on the artificial intelligence to predicting of the influence of residual microalloying elements on mechanical properties of steel products. The training and testing data come from the industrial rolling of sheets, bars and profiles of different steel grades. The ANN inputs are chemical composition of a steel and main parameters of rolling technology. The dependent variable of a model are mechanical properties of rolled products.

1. WSTĘP

Systematyczny wzrost produkcji stali wytwarzanej w piecach elektrycznych oraz coraz powszechniejsze stosowanie recyklingu w produkcji materiałów technicznych są powodem narastającego wpływu pierwiastków domieszkowych na mikrostrukturę i własności mechaniczne wyrobów stalowych. Mianem pierwiastków domieszkowych określa się te pierwiastki, które nie są efektywnie usuwane w procesie stalowniczym, a w konsekwencji ich zawartość w stali może systematycznie wzrastać w kolejnych etapach recyklingu (E.T. Stephenson 1983).

Grupa dziewięciu pierwiastków domieszkowych, które już przy niewielkim stężeniu wpływają istotnie na własności mechaniczne stali obejmuje (Stephenson 1983, Hundy 1963): Cu, Ni, Cr, Mo, Sn, As, Co, Sb i W. Pierwiastki te występują jako zanieczyszczenia materiałów wsadowych stosowanych w procesie wytwarzania stali, takich jak ruda, topniki, koks, a przede wszystkim złom.

Na podstawie przeglądu literatury określić można najważniejsze obszary oddziaływania pierwiastków domieszkowych na jakość wyrobów wytwarzanych w procesach obróbki cieplno-plastycznej, które obejmują (Herman i Leroy 1996):



1. Ciągłe odlewanie stali:
 - jakość powierzchni (pęknięcia),
 - jakość wewnętrzna (segregacja, pęknięcia),
 - własności plastyczne.
2. Walcowanie:
 - jakość powierzchni,
 - opór plastyczny,
 - przebieg procesów zdrowienia i rekrytalizacji, a także rozrostu ziarna.
3. Chłodzenie po walcowaniu:
 - postęp przemian fazowych i morfologia składników strukturalnych,
 - segregacja do składników strukturalnych stali, a przede wszystkim do granic ziarn i powierzchni międzyfazowych, a w konsekwencji własności mechaniczne wyrobu.

W wyniku tych oddziaływań, pierwiastki domieszkowe wywierają bardzo silny wpływ na parametry jakościowe, a przede wszystkim na własności mechaniczne i użytkowe półwyrobów i wyrobów stalowych.

Wymienione obszary oddziaływania pierwiastków domieszkowych były przedmiotem licznych publikacji (E.T. Stephenson 1983, Hundy 1963, Herman i Leroy 1996, Melford 1962, Yamada i in. 1995, Kuziak i Żak 1999). Do oceny tego oddziaływania, Autorzy wymienionych opracowań stosowali głównie metodę regresji liniowej, co znacznie ograniczyło możliwość prawidłowej identyfikacji wpływu tych pierwiastków na własności mechaniczne.

W niniejszym opracowaniu ocenę wpływu pierwiastków domieszkowych na własności mechaniczne wyrobów stalowych przeprowadzono z zastosowaniem metody sztucznych sieci neuronowych. Podstawową zaletą tej metody jest możliwość prawidłowego zidentyfikowania zależności występujących w zbiorze danych pomiarowych, w tym zależności nieliniowych, przy niepełnej identyfikacji obiektu badań. Sztuczne sieci neuronowe znajdują coraz szersze zastosowanie w metalurgii do modelowania procesów, dla których brak jest opisu matematycznego z uwagi na nieznaną zachodzących zjawisk oraz trudności pomiarów parametrów procesu (Kusiak 1997, Bhadeshia i in. 1995, Kusiak i in. 1997, Myllykoski i in. 1996, Kusiak i Kuziak 2000, Kusiak i in. 1999a, Kusiak i Pietrzyk 1999, Kusiak i in. 1999b). Na podstawie zbioru danych wejściowych złożonych z parametrów procesu (np. odkształcenie, prędkość odkształcenia, temperatura, skład chemiczny) i zbioru danych wyjściowych (np. mikrostruktura, własności mechaniczne odkształcanego metalu), sieć poddawana jest najpierw „uczeniu”, którego celem jest prawidłowe rozpoznawanie wyjścia. Następnie „na wejście” sieci dostarczane są dane testowe nie ujęte w zbiorze danych uczących. W ten sposób sieć generuje dane wyjściowe (przewiduje wyniki) analizowanych parametrów. Dobrze „nauczona”

sieć powinna prawidłowo rozpoznać dane wejściowe i wygenerować na wyjściu właściwą odpowiedź.

Godny podkreślenia jest również fakt, że parametry wejściowe modelu, np. skład chemiczny i parametry technologiczne, są rozproszone. Natomiast, na podstawie przeprowadzonej analizy uzyskać można informacje o wpływie pojedynczych parametrów przy ustalonych pozostałych.

2. METODYKA BADAŃ

Na podstawie danych uzyskanych z hut opracowano sieci neuronowe przewidujące własności mechaniczne następujących wyrobów i półwyrobów:

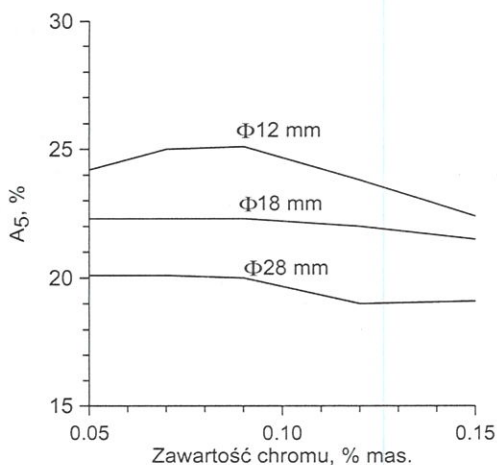
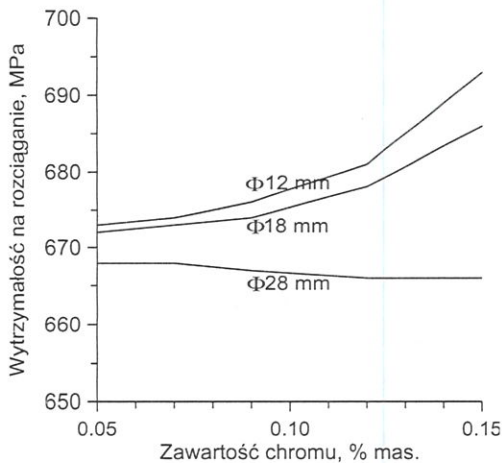
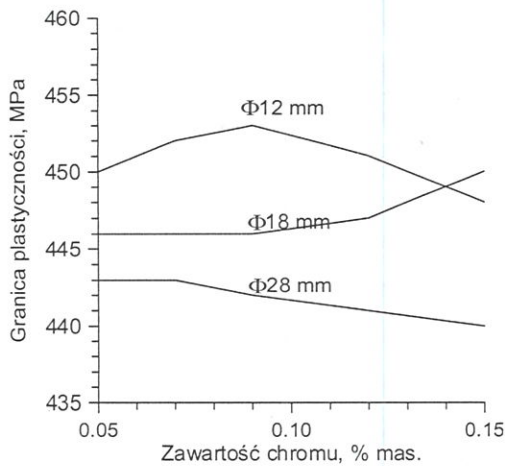
- prętów żebrowanych naturalnie chłodzonych ze stali 34GS,
- walcówki ze stali niskowęglowych,
- kształtowników,
- blach.

Zbiory będące przedmiotem analizy obejmowały około tysiąc wyników pomiaru własności mechanicznych, składu chemicznego oraz niektórych parametrów technologicznych. Ze względu na brak niektórych parametrów procesu, uzyskane dane poddano wstępnej selekcji. Mianowicie, wybrano tylko jednego producenta danego wyrobu, zaś analizę ograniczono do tych producentów, którzy deklarowali dużą stabilność procesu wytwórczego. Dla wyselekcjonowanych w ten sposób zbiorów opracowano sieci neuronowe w oparciu o metodę wstecznej propagacji błędów, dobierając optymalną architekturę sieci dla każdego analizowanego przypadku. Analizę przeprowadzono za pomocą licencjonowanego programu Statistica Neural Network. Program ten pozwala na automatyczne opracowanie optymalnej dla danego zbioru architektury sieci. W przeprowadzonej analizie przyjęto standardowe (firmowe) wartości parametrów związanych z procesem uczenia i oceną stopnia wytrenowania sieci.

3. WYNIKI BADAŃ

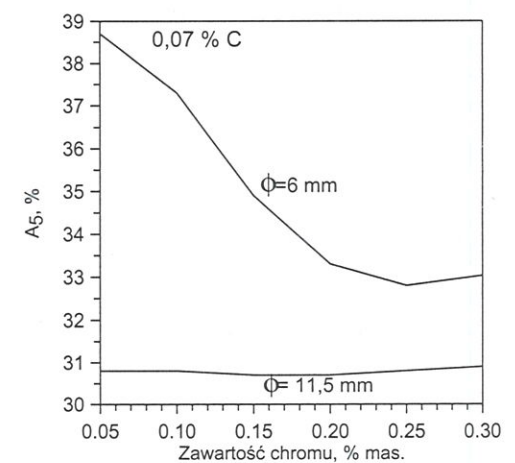
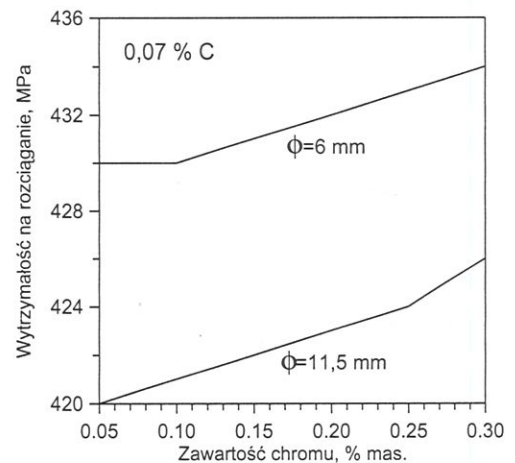
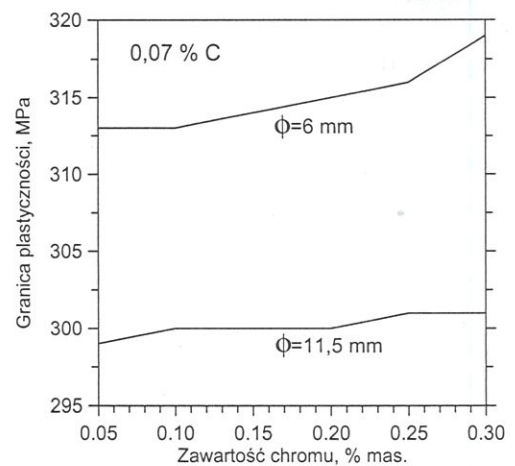
Za pomocą opracowanych sieci określono wpływ następujących pierwiastków: Cr, Ni, Cu, Mo, Sn na własności mechaniczne rozpatrywanych wyrobów i półwyrobów. Na rysunkach 1÷3 przedstawiono przykładowe wyniki oceny wpływu zawartości chromu, niklu i miedzi na własności mechaniczne prętów, walcówki i blach. Analizę przeprowadzono przyjmując średni skład chemiczny stali z której wykonywany jest dany wyrób/półwyrób, zmieniając następnie zawartość jednego pierwiastka będącego przedmiotem analizy. Na podstawie rysunków 1÷3 można stwierdzić, że większość pierwiastków domieszkowych silnie wpły-





Rysunek 1 (a). Wpływ chromu na własności mechaniczne prętów żebrowanych ze stali 34GS o średnicach 12, 18 i 28 mm.

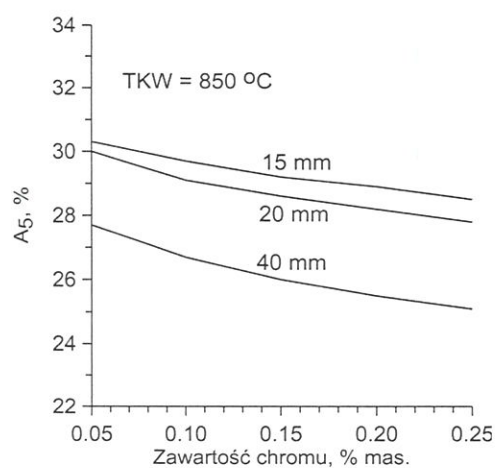
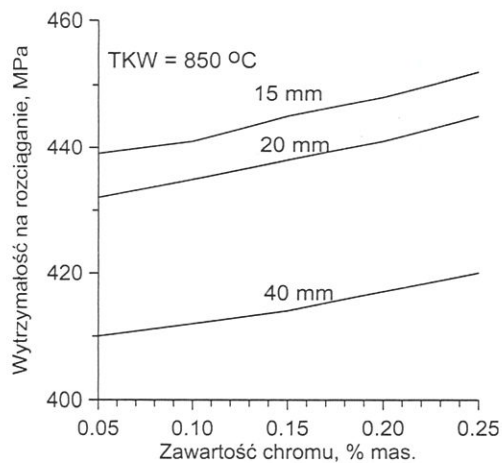
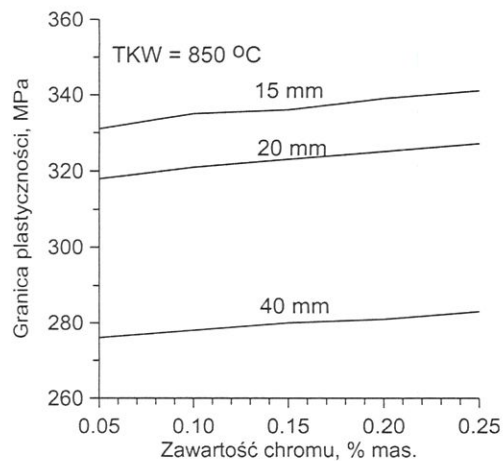
wa na własności plastyczne stali niż na własności wytrzymałościowe. Wpływ pierwiastków domieszkowych na plastyczność w zdecydowanej większości przypadków jest negatywny. Szczególnie widoczne jest to w przypadku miedzi. Wzrost zawartości tych pierwiastków powoduje bowiem silniejszy wzrost naprężenia uplastyczniającego niż współczynnika umocnienia stali, co sprzyja utracie stateczności podczas odkształcenia plastycznego. Wyjątek stanowi nikiel – wzrost zawartości tego pierwiastka w niektórych wy-



Rysunek 1 (b). Wpływ chromu na własności mechaniczne walcówki o średnicach 6 i 11,5 mm ze stali niskowęglowych.

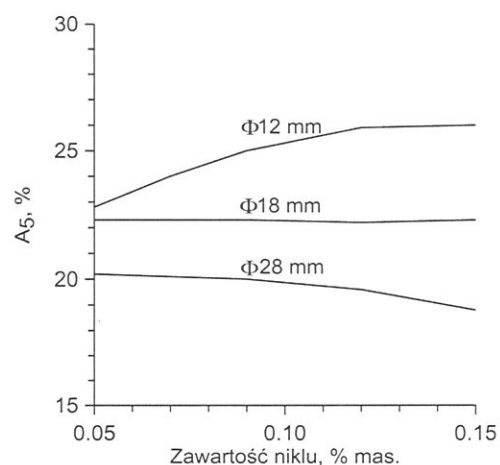
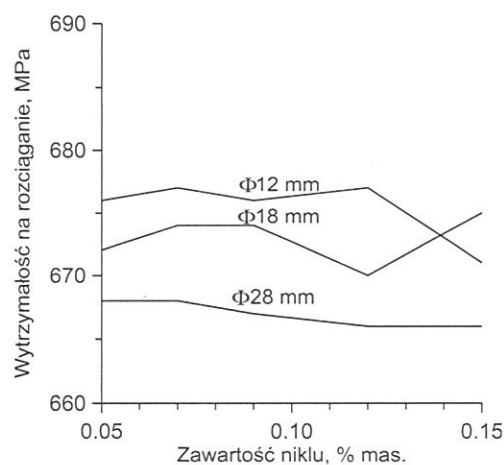
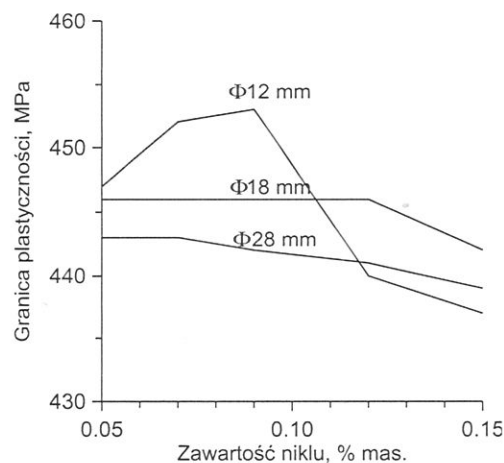
robach powoduje wzrost plastyczności.

Pierwiastki domieszkowe wpływają istotnie na wytrzymałość wyrobów i półwyrobów; silniejszy jest jednak ich wpływ na wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu z ich wpływem na granicę plastyczności. Należy przy tym podkreślić, że charakter oddziaływania pierwiastków domieszkowych zależy silnie od podstawowego składu chemicznego oraz od profilu wyrobu/półwyrobu.



Rysunek 1 (c). Wpływ chromu na własności mechaniczne blach o grubości 15, 20 i 40 mm. Temperatura końca walcowania (TKW) wynosiła 850°C.

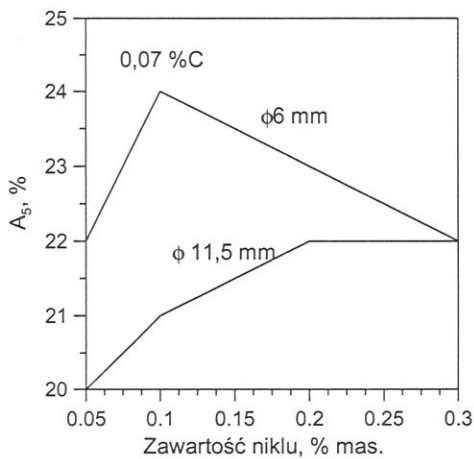
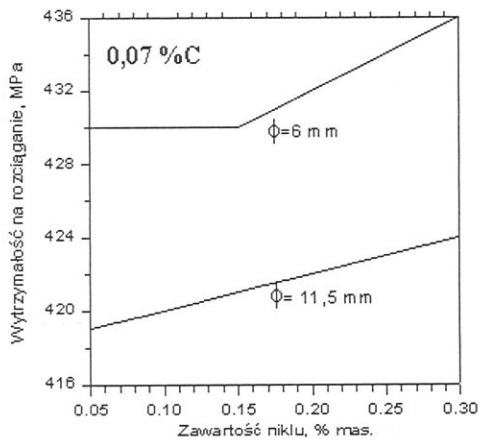
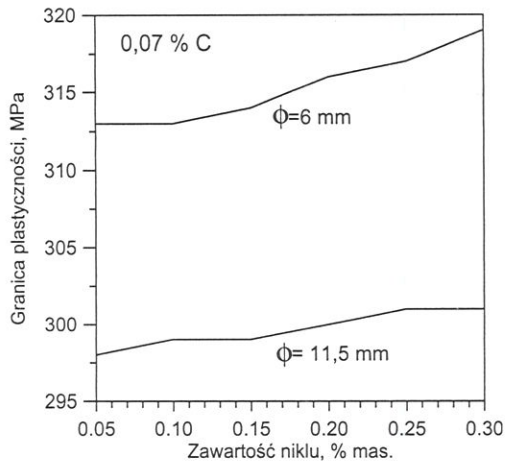
Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że najsilniejszy wpływ na własności mechaniczne rozważanej grupy wyrobów wywiera miedź. Jest niemal regułą, że wzrost zawartości tego pierwiastka w stali powoduje wzrost własności wytrzymałościowych i spadek własności plastycznych. Tak silne oddziaływanie miedzi może być związane ze stosunkowo wysoką zawartością tego pierwiastka w stalach, która mieści się w przedziale 0,2÷0,4%.



Rysunek 2 (a). Wpływ niklu na własności mechaniczne prętów żebrowanych ze stali 34GS o średnicy 12, 18 i 28 mm.

Zawartości pozostałych pierwiastków w stalach były dużo mniejsze od zawartości miedzi, co może sugerować, że nie wpływały one istotnie na wytrzymałość wyrobów. Należy jednak zwrócić uwagę, że pierwiastki domieszkowe oddziałują synergicznie na własności mechaniczne. W efekcie ich wkład w kształtowanie własności mechanicznych może być bardzo istotny, nawet przy niskich zawartościach w stali.

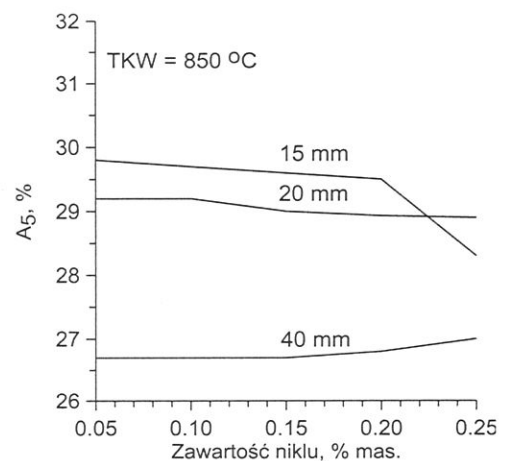
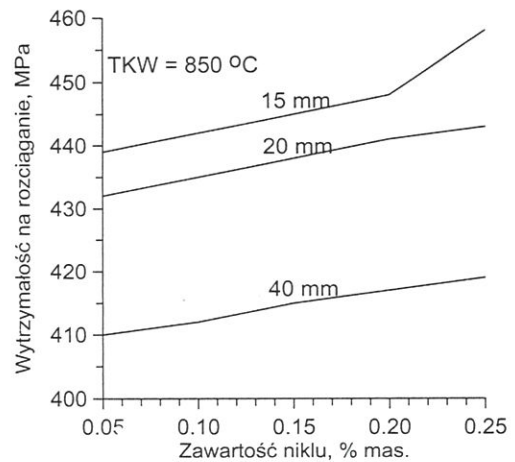
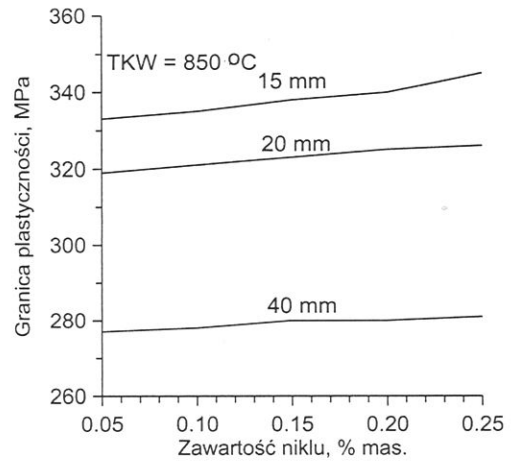




Rysunek 2 (b). Wpływ niklu na własności mechaniczne walcówki ze stali niskowęglowych o średnicy 6 i 11,5 mm.

4. DYSKUSJA WYNIKÓW

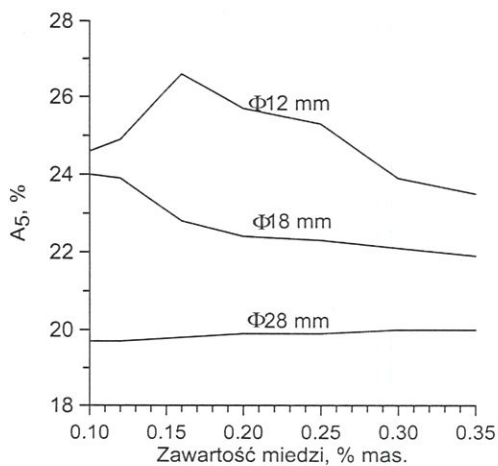
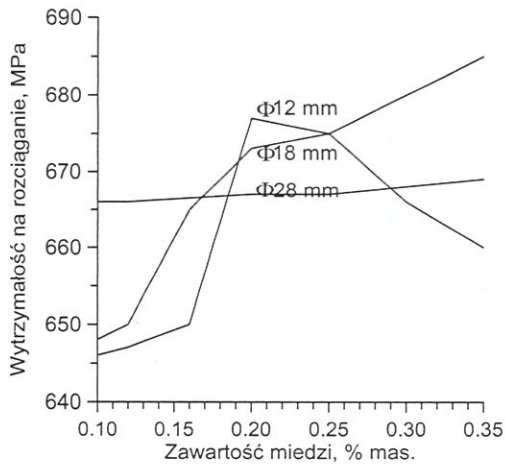
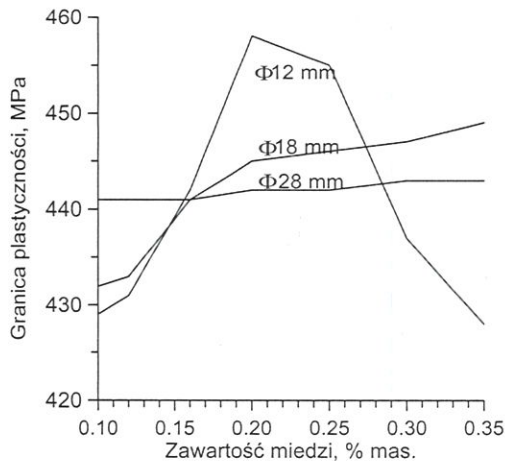
Jedną z podstawowych obserwacji wynikających z przeprowadzonej analizy jest możliwość wystąpienia bardzo złożonego i zróżnicowanego wpływu pierwiastków domieszkowych na własności mechaniczne wyrobów. Dotyczy to przede wszystkim pierwiastków takich, jak chrom, nikiel i molibden. Przy czym, na podstawie przeprowadzonej oceny nie jest możliwe zweryfikowanie poprawności większości uzyskanych



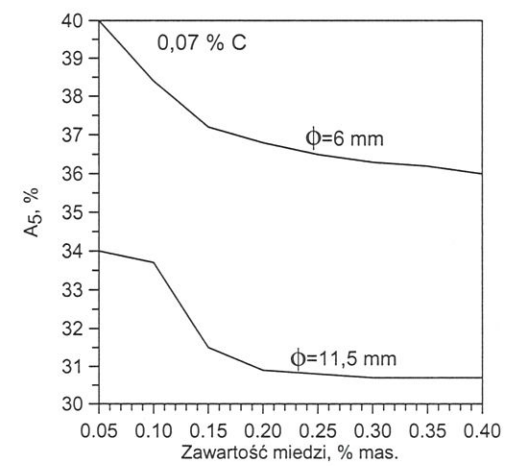
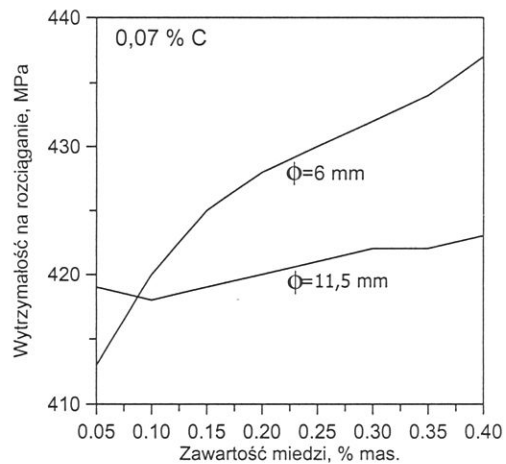
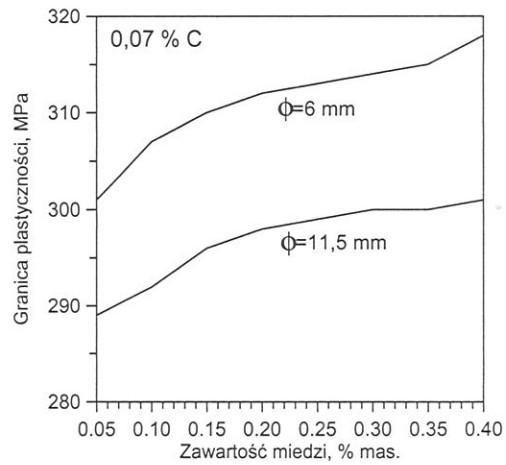
Rysunek 2 (c). Wpływ niklu na własności mechaniczne blach o grubości 15, 20 i 40 mm. Temperatura końca walcowania (TKW) wynosiła 850°C.

wyników, bez przeprowadzenia dokładnych badań metaloznawczych. Z tego powodu przeprowadzone badania należy traktować przede wszystkim jako przykład możliwości sieci neuronowych.

Z metaloznawczego punktu widzenia, złożoność oddziaływania pierwiastków domieszkowych najlepiej scharakteryzować można na przykładzie chromu i miedzi. Chrom obniża wytrzymałość ferrytu oraz podwyższa wytrzymałość perlitu. Zatem pierwiastek ten podwyższać będzie wytrzymałość wyrobów ze stali o



Rysunek 3 (a). Wpływ miedzi na własności mechaniczne prętów żebrowanych ze stali 34GS o średnicy 12, 18 i 28 mm.



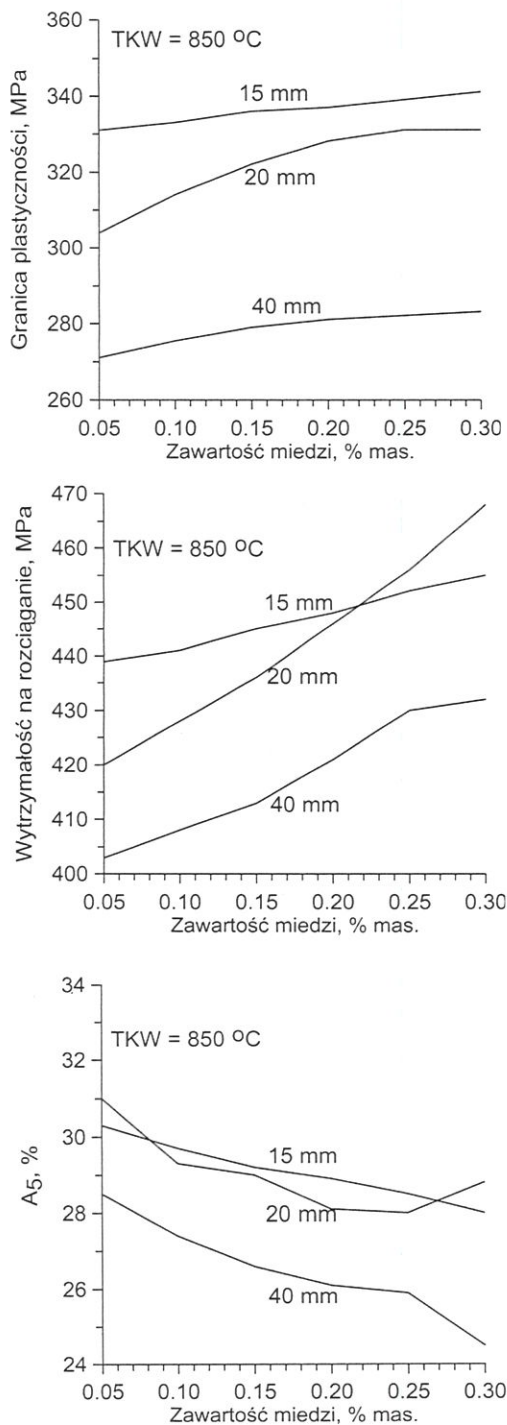
Rysunek 3 (b). Wpływ miedzi na własności mechaniczne walcówki ze stali niskowęglowych o średnicy 6 i 11,5 mm.

średniej i wysokiej zawartości węgla. Obniża on natomiast wytrzymałość wyrobów ze stali niskowęglowych. Sytuacja jednak komplikuje się w przypadku wyrobów intensywnie chłodzonych po walcowaniu, jak na przykład walcówka, lub w przypadku zastosowania niskich temperatur końca walcowania, jak w przypadku blach. Dokładne badania strukturalne wykazały, że w przypadku gdy w stali występują podwyższone zawartości Cr, Ni, Mo i Sn, w walcówce o średnicy $\phi 5,5$ i 6 mm mogą występować obszary ba-

initu. Natomiast podczas walcowania blach z zastosowaniem niskich temperatur końca walcowania, poniżej 900°C, nawet niewielkie ilości chromu powodują istotne opóźnienie rekrytalizacji statycznej austenitu. Oddziaływanie to powoduje rozdrobnienie ziarna ferrytu po zająciu przemian fazowych.

Wpływ miedzi na własności mechaniczne wyrobów może być również bardzo złożony. Tworzenie się fazy ciekłej bogatej w ten pierwiastek podczas nagrzewania wsadu do walcowania jest często powodem ini-





Rysunek 3 (c). Wpływ miedzi na własności mechaniczne blach o grubości 15, 20 i 40 mm. Temperatura końca walcowania wynosiła 850°C.

cjonowania pęknięć przy powierzchni pasma w początkowych przepustach walcowania. Pęknięcia te nie zgrzewają się w kolejnych etapach walcowania (Herman i Leroy 1996). Inne przyczyny silnego wpływu miedzi na własności mechaniczne związać można z tworzeniem się w stali wydzielen siarczku miedzi, fazy ϵ , lub też z oddziaływaniem tego pierwiastka w roztworze stałym.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona analiza z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych wykazała istotny wpływ pierwiastków domieszkowych na własności mechaniczne wyrobów stalowych, zaś pierwiastkiem, który najsilniej kształtował te własności w badanej grupie wyrobów jest miedź. Wzrost zawartości tego pierwiastka w stali silnie podwyższa własności wytrzymałościowe i obniża plastyczność wyrobów. Wynik ten należy traktować jako sygnał ostrzegawczy, gdyż zawartość miedzi w analizowanej grupie wyrobów dochodziła nawet do 0,4% i może wzrastać przy niekontrolowanym stosowaniu złomu w procesie stalowniczym. Z przeprowadzonych studiów literatury wynika, że czynniki, które istotnie wpływają na charakter wpływu pierwiastków domieszkowych na własności mechaniczne wyrobów obejmują:

- podstawowy skład chemiczny stali, w tym przede wszystkim, zawartość węgla, manganu i krzemu,
- parametry obróbki cieplno-plastycznej, a przede wszystkim temperatura nagrzewania wsadu do walcowania i temperatura końca walcowania oraz prędkość chłodzenia wyroby po walcowaniu,
- proporcje między zawartościami pierwiastków domieszkowych w stali.

Opracowane sieci neuronowe na ogół przewidywały nieliniowy wpływ zawartości pierwiastków na własności mechaniczne wyrobów. Ponadto stwierdzono wzajemne oddziaływanie między tymi pierwiastkami, które prowadziło do intensyfikacji procesów kształtujących strukturę i własności mechaniczne stali. Pod tym względem metoda oparta o sztuczne sieci neuronowe daje znacznie większe możliwości identyfikacji oddziaływania pierwiastków domieszkowych w stalach niż stosowana dotychczas metody konwencjonalne.

Uznając korzyści wynikające z zastosowania sieci neuronowych, należy jednak podkreślić, że w celu jednoznacznego rozwiązania zagadnień będących przedmiotem niniejszego opracowania konieczne byłoby przeprowadzenie bardziej zaawansowanych badań, podczas których wykonywane rutynowo w hutach czynności związane z kontrolą jakości wzbogacone zostałyby w pomiary wszystkich, istotnych z punktu widzenia kształtowania struktury wyrobów, parametrów technologicznych. W wielu przypadkach konieczne byłoby również przeprowadzenie zaawansowanych badań metaloznawczych, które doprowadziłyby do zidentyfikowania mechanizmów oddziaływania pierwiastków domieszkowych na własności mechaniczne wyrobów z uwzględnieniem wszystkich etapów technologicznych.

Uwaga końcowa

Pracę zrealizowano w ramach projektów finansowanych przez Komitet Badań Naukowych Nr 2466/C.T08-7/99 oraz 7 T08B 062 20.

LITERATURA

- Bhadeshia H.K.D.H., MacKay D.J.C., Svensson L.-E., 1995, Impact toughness of C-Mn steel arc welds – Bayesian neural network analysis. *Mat. Sci. Techn.*, 11, 1046-1051.
- Herman J.C., Leroy V., 1996, Influence of Residual Elements on Steel Processing and Mechanical Properties, *Iron & Steelmaker*, 35-43.
- Hundy B.B., 1963, Metallurgical Developments in Carbon Steels, Publication 81, *Iron Steel Inst.*, London, 75 – 80.
- Kusiak J., 1997, Wybrane przykłady zastosowania sztucznych sieci neuronowych w inżynierii materiałowej i metalurgii, *Mat. I Seminarium NeuroMet'97*, ed. Pietrzyk M., Akapit, Kraków, 61-72.
- Kusiak J., Pietrzyk M., Wilk K., 1997, Zastosowanie sztucznych neuronowych do przewidywania wyginania się blachy w procesie asymetrycznego walcowania. *Mat. IV Konf. „Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali”*, ed., Piela A., Pietrzyk M., Kusiak J., Akapit, Ustroń-Jaszowiec, 207-214.
- Kusiak J., Pietrzyk M., 1999, Artificial Intelligence Approach to the Internal Variable-Based Rheological Model for Steels, *Proc. 2nd International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials*, Hawaii, 773-778.
- Kusiak J., Kuziak R., Zalecki, W., 1999a, Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do badania wpływu składu chemicznego i parametrów obróbki cieplno-plastycznej na mikrostrukturę i własności mechaniczne wyrobów stalowych. *Mat. III Seminarium NeuroMet'99*, ed., Kusiak J., Akapit, Kraków, 57-69.
- Kusiak J., Lenard J.G., Dudek K., 1999b, Artificial Intelligence Approach to the Modeling of Rolling Loads in Technology Design for Cold Rolling Processes. *Proc. 2nd International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials*, Hawaii, 543-547.
- Kusiak J., Kuziak R., 2000, Modelling of microstructure and mechanical properties of steel using the artificial neural network, *J. Mat. Proc. Technology*, (przyjęte do druku).
- Kuziak R., Żak A., 1999, Określenie wpływu pierwiastków domieszkowych na własności mechaniczne wyrobów ze stali wytapianych w procesie elektrycznym, *sprawozdanie IMŻ Nr S-00282/1/99/BM*, niepublikowane.
- Melford D.A., 1962, Surface Hot Shortness in Mild Steels, *J. Iron Steel Inst.*, 200, 290-299.
- Mylykoski P., Larkiola J., Nylander J., 1996, Development of prediction model for mechanical properties of batch annealed thin steel strip by using artificial neural network modelling, *J. Mat. Proc. Techn.*, 60, 399-404.
- Stephenson E.T., 1983, Effect of Recyclic on Residuals, Processing, and Properties of Carbon and Low-Alloy Steels, *Metall. Trans. A*, 14A, 343-353.
- Yamada T., Oda M., Akisue O., 1995, Effect of Copper, Nickel, Chromium and in on Mechanical Properties of Titanium-bearing Extra-low-carbon Steel Sheets, *ISIJ Int.*, 35, 1422-1429.

