

Ryszard PERŁOWSKI, Władysław ZIELECKI
Politechnika Rzeszowska

MODELOWANIE WPLYWU STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI NA WYTRZYMAŁOŚĆ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH Z WYKORZYSTANIEM SIECI NEURONOWYCH

W pracy przedstawiono analizę wpływu struktury geometrycznej powierzchni na wytrzymałość na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych ze stali S235JR. Powierzchnie stali przygotowano do klejenia metodami obróbki mechanicznej konstytuującymi powierzchnię o strukturze jednokierunkowej, wielokierunkowej i bezkierunkowej punktowej. Wykorzystując metodę korelacji liniowej oraz prognozowania z zastosowaniem sieci neuronowych, stwierdzono, że właściwości wytrzymałościowe badanych połączeń klejowych wykazują znaczne uzależnienie od rozwinięcia powierzchni, charakteryzowanego parametrami chropowatości R_{lr} , R_{da} , R_{dq} .

Słowa kluczowe: chropowatość powierzchni, połączenie klejowe, wytrzymałość na ścinanie, sieci neuronowe

Wprowadzenie

Proces technologiczny klejenia rozpoczyna ciąg operacji, których celem jest właściwe przygotowanie powierzchni łączonych elementów. Przygotowanie powierzchni do klejenia powinno zapewnić zadziałanie wszystkich mechanizmów wiążących (natury fizycznej, chemicznej i mechanicznej). Uzyskanie mocnych wiązań adhezyjnych w połączeniu klejowym jest możliwe wówczas, gdy proces przygotowania powierzchni spowoduje:

- usunięcie z łączonych elementów wszystkich zanieczyszczeń powierzchniowych,
- uzyskanie największego rozwinięcia powierzchni,
- uzyskanie dobrego uaktywnienia powierzchni.

W warunkach produkcyjnych uzyskanie wymienionych efektów jest realizowane różnymi metodami obróbki chemicznej lub mechanicznej.

Obróbka mechaniczna umożliwia ukonstytuowanie struktury geometrycznej powierzchni zapewniającej maksymalne jej rozwinięcie, lecz nie gwarantuje dobrego uaktywnienia powierzchni. Realizowana jest ona różnymi metodami (piaskowanie, obróbka strumieniowo-ścierna, śrutowanie, kulkowanie, szlifowanie, szczotkowanie, skrobanie), których opis, warunki realizacji oraz wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych przedstawiono w licznych pracach [1-4]. Zawierają one najczęściej analizę wpływu parametrów technologicznych (np. wielkości ziaren elektrokorundu stosowanego do obróbki strumieniowo-ściernej, ziarnistości papieru ściernego) na wytrzymałość połączeń klejowych. Rzadziej natomiast właściwości wytrzymałościowe wiązano z parametrami chropowatości powierzchni. W nielicznych pracach [5-7] podjęto próbę powiązania wytrzymałości połączeń klejowych z parametrami wysokościowymi chropowatości powierzchni. Stwierdzono w nich, że najlepsze właściwości wytrzymałościowe uzyskują złącza, w których powierzchnia łączonych elementów posiada chropowatość $R_t = 7 \div 25 \mu\text{m}$.

W budowie maszyn struktura stereometryczna powierzchni jest opisywana za pomocą wielu parametrów chropowatości i falistości. Parametry chropowatości opisują cechy wysokościowe i horyzontalne (wzdłużne) profilu chropowatości oraz kształt nierówności. Najczęściej stosowane parametry chropowatości powierzchni to średnie arytmetyczne odchylenie profilu – R_a oraz średnie kwadratowe odchylenie profilu – R_q . Do parametrów opisujących cechy ekstremalne profilu chropowatości można zaliczyć maksymalną wysokość profilu chropowatości – R_t , wysokość wzniesień profilu – R_p , głębokość wgłębień profilu – R_v oraz wysokość profilu chropowatości wg 10 punktów – R_z . Cechy wzdłużne (horyzontalne) profilu mogą być określane przez średni odstęp chropowatości – R_{Sm} oraz średni odstęp miejscowych wzniesień profilu – R_S . Kształt nierówności profilu charakteryzują parametry opisujące jego pochylenie: średnie arytmetyczne pochylenie profilu – R_{da} , średnie kwadratowe pochylenie profilu – R_{dq} . Do oceny rzeczywistej długości profilu (tzw. rozwinięcia profilu) jest stosowany parametr, zwany współczynnikiem długości profilu R_{lr} , równy stosunkowi rzeczywistej (rozwinętej) długości profilu do długości odcinka elementarnego lub pomiarowego, na którym została ona wyznaczona. Dysponując aż tak dużą liczbą parametrów opisujących strukturę geometryczną powierzchni, można zastanowić się, które z nich najlepiej odzwierciedlają przygotowanie powierzchni do procesu klejenia, a za pomocą których można byłoby najdokładniej prognozować wytrzymałość połączeń klejowych.

Badania własne

Zmierając do dokładniejszego określenia wpływu struktury stereometrycznej powierzchni klejonych części na wytrzymałość złącza klejowego, przeprowadzono badania, których celem było określenie parametrów chropowatości

powierzchni najmocniej skorelowanych z właściwościami wytrzymałościowymi połączeń adhezyjnych.

Próbki do badań wykonano ze stali S235JR (St3S). Połączono je kompozycją klejową Epidian 5 z utwardzaczem PAC (w proporcji 80 części wagowych utwardzacza PAC na 10 części wagowych żywicy epoksydowej). Proces sieciowania przebiegał w temperaturze otoczenia (293 ± 3 K) w ciągu 48 godzin, z zachowaniem przez cały okres utwardzania nacisku 0,05 MPa (w przyrządzie mechanicznym). Powierzchnie klejonych próbek poddano wstępnej obróbce mechanicznej metodami, do których należą:

- polerowanie (wariant POL) tarczą polerską z proszkiem diamentowym,
- szlifowanie wzdłużne (wariant SZLIFW) i poprzeczne (wariant SZLIFP) tarczą ścierną typu T1A200x20x51/99A-60-K-6-V,
- obróbka ścierna wzdłużna (wariant TDIAMW) i poprzeczna (wariant TDIAMP) tarczą z nasypem diamentowym,
- szczotkowanie wzdłużne (wariant SZCZW) i poprzeczne (wariant SZCZP) tarczą drucianą $\phi 150 \times 30$,
- obróbka strumieniowo-ścierna pneumatyczna (wariant Korp) elektrokorundem 95A o ziarnistości 60,
- obróbka strumieniowo-ścierna mechaniczna odśrodkowa (wariant KORM) elektrokorundem, realizowana w 4 wariantach,
- obróbka strumieniowo-ścierna odśrodkowa (wariant CEVA) materiałem ceramicznym CEVA,
- śrutowanie strumieniowe mechaniczne odśrodkowe (wariant ŚRUT) śrutem stalowym,
- kulowanie strumieniowe mechaniczne odśrodkowe (wariant KUL) kulami stalowymi, realizowane w 4 wariantach,
- frezowanie (wariant FR), realizowane w 4 wariantach,
- frezowanie i obróbka strumieniowo-ścierna elektrokorundem (wariant FREK), realizowane w 4 wariantach.

Jako wariant wyjściowy W (odniesienia) przyjęto próbki z powierzchnią nieobrabianą mechanicznie, posiadającą strukturę powstałą w procesie walcowania blachy. Powierzchnie ukonstruowane wymienionymi metodami obróbki mechanicznej poddano kompleksowym badaniom chropowatości powierzchni, w trakcie których wyznaczono następujące parametry chropowatości: maksymalną głębokość wgłębień profilu chropowatości R_v , maksymalną wysokość chropowatości R_t , wysokość chropowatości wg 10 punktów R_z , średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości R_a , średni odstęp chropowatości R_{Sm} , współczynnik długości profilu chropowatości R_{lr} , średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości R_{da} , średnie kwadratowe pochylenie profilu R_{dq} . Badania wytrzymałości na ścinanie R_{tw} połączeń klejowych przeprowadzono zgodnie z PN-69/C-89300 na maszynie wytrzymałościowej FP-100 firmy Hec-

kert z prędkością obciążania $v_0 = 24$ mm/min. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni stali S235JR przygotowywanych do klejenia różnymi metodami, wyniki badań wytrzymałości na ścinanie R_{tw} połączeń sklejonnych kompozycją Epidian 5 + PAC

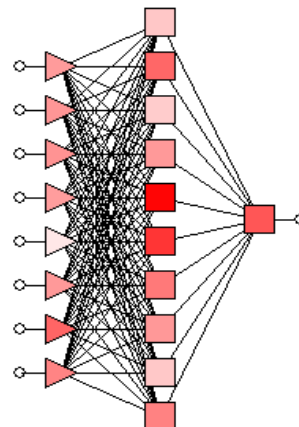
Table 1. Results of roughness measurement of steel S235JR samples prepared to gluing by various methods, results of shear strength R_{tw} tests of joints glued by composition Epidian 5 + PAC

Oznaczenie	R_{tw} [MPa]	Parametr chropowatości Pch							
		R_v [μm]	R_t [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	RSm [μm]	Rlr	Rda	Rdq
W	11,84	13,37	20,77	10,62	2,22	137,7	1,018	0,094	0,322
POL	9,80	2,46	3,42	2,76	0,87	523,3	1,000	0,015	0,022
SZLIFW	10,36	5,25	9,04	4,16	1,05	144,4	1,006	0,035	0,131
SZLIFP	11,09	10,13	17,89	14,25	3,14	113,7	1,028	0,187	0,241
TDIAMW	11,85	14,03	29,62	22,29	5,07	245,9	1,023	0,168	0,216
TDIAMP	12,16	21,19	38,19	28,26	4,86	128,1	1,056	0,266	0,347
SZCZW	9,76	3,38	8,47	6,05	1,37	108,2	1,005	0,066	0,099
SZCZP	9,31	4,01	8,84	7,33	1,51	74,4	1,013	0,121	0,161
KORP	20,46	12,43	24,78	20,28	3,93	108,9	1,044	0,240	0,305
KORM1	19,96	23,14	43,39	34,48	7,90	164,4	1,065	0,300	0,377
KORM2	19,46	17,26	38,92	29,83	6,26	143,0	1,057	0,275	0,347
KORM3	17,46	15,53	29,64	20,91	3,61	99,2	1,047	0,247	0,317
KORM4	17,57	12,25	26,12	21,03	3,68	87,6	1,052	0,263	0,333
CEVA	18,57	11,01	24,68	17,49	3,18	104,4	1,043	0,231	0,302
ŚRUT	18,15	15,51	32,04	28,51	5,06	110,8	1,073	0,306	0,483
KUL1	14,29	16,60	42,36	27,95	8,44	360,3	1,024	0,173	0,221
KUL2	11,49	24,06	44,38	31,44	9,59	463,2	1,028	0,189	0,243
KUL3	10,06	11,08	27,71	21,56	4,75	193,9	1,023	0,173	0,217
KUL4	11,65	13,57	26,79	21,88	4,90	160,9	1,029	0,188	0,269
FR1	10,78	7,103	15,243	11,496	2,365	143,15	1,012	0,111	0,161
FR1EK	22,62	8,175	15,219	12,629	2,443	77,18	1,035	0,213	0,270
FR2	12,99	7,352	17,242	14,128	3,181	154,22	1,015	0,126	0,178
FR2EK	20,29	8,912	18,921	15,880	3,150	87,51	1,039	0,225	0,287
FR3	12,03	10,003	18,106	16,362	3,574	264,11	1,007	0,090	0,122
FR3EK	20,32	10,261	18,943	16,866	3,283	102,95	1,030	0,194	0,250
FR4	11,46	9,932	19,587	15,713	4,619	564,22	1,008	0,094	0,129
FR4EK	18,62	10,876	20,207	16,108	4,207	119,80	1,029	0,190	0,245

Analiza wyników badań

Alternatywną metodą, coraz powszechniej stosowaną w złożonych zagadnieniach regresyjnych, są sieci neuronowe [8]. Pozwalają one na łatwe modelowanie złożonych funkcji z dużą liczbą zmiennych niezależnych, przy czym stopień złożoności funkcji jest kontrolowany przez liczbę neuronów. Stopień zło-

żoności sieci został określony automatycznie. Proces uczenia sieci przeprowadzono iteracyjnie, testując 423 sieci. Zbiór danych wejściowych obejmował 8 zmiennych niezależnych (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), (tab. 3.) oraz 81 wariantów (przypadków), spośród których sześciokrotnie w sposób losowy dobierano podzbiór uczący, walidujący i testujący. Na podstawie prób określono, że preferowaną siecią w tym przypadku jest sieć trzywarstwowa o strukturze MLP 8:8-10-1:1 (rys. 1.), uczona metodą wstecznej propagacji błędów (BP) z logistyczną funkcją aktywacji neuronów warstwy ukrytej, liniową dla warstwy wejściowej i wyjściowej oraz liniową funkcją pobudzenia neuronu (PSP).



Rys. 1. Struktura sieci neuronowej MLP 8:8-10-1:1

Fig. 1. Structure of the neural network MLP 8:8-10-1:1

Analizę błędów statystyk regresyjnych otrzymanej sieci przedstawiono w tabeli 2. Największe znaczenie dla oceny jakości modelu regresyjnego, odpowiadającego otrzymanej sieci, ma iloraz odchyleń standardowych oraz korelacja wartości rzeczywistych i prognozowanych. Iloraz odchyleń standardowych

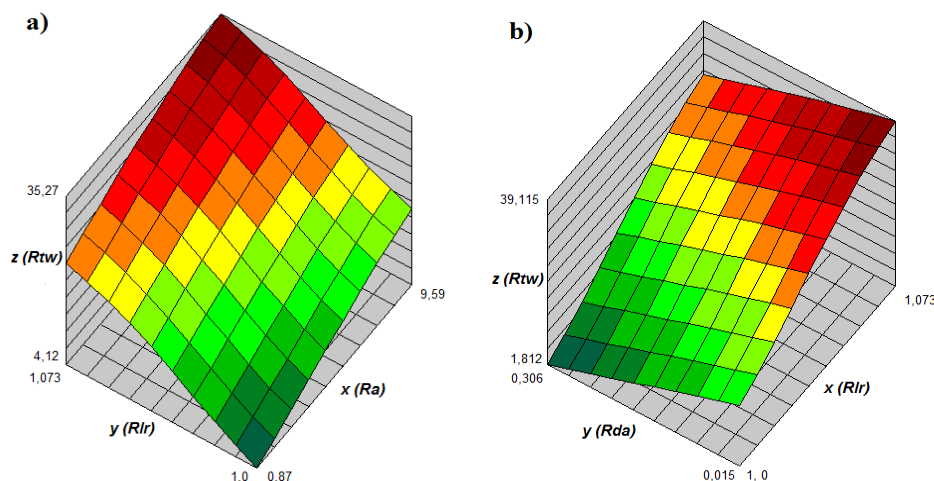
Tabela 2. Statystyki regresyjne wartości wytrzymałości na ścinanie R_{tw} zakładkowych połączeń klejowych dla sieci MLP (8:8-10-1:1)

Table 2. Regression statistics of shear strength R_{tw} values of overlapping glue joints for network MLP (8:8-10-1:1)

Parametr statystyczny	Zbiór uczący	Zbiór walidujący	Zbiór testowy
Średnia wartość zmiennej wyjściowej	14.70303	12.20222	16.18778
Odchylenie standardowe wartości zmiennej wyjściowej	4.594564	3.2803	4.48321
Średni błąd zmiennej wyjściowej	-0.06394	0.5485344	-0.301636
Odchylenie standardowe błędu dla zmiennej wyjściowej	2.629963	1.550173	1.434473
Średni błąd bezwzględny	2.026273	1.170034	1.256724
Iloraz odchyleń standardowych dla błędów i danych	0.572407	0.472570	0.319965
Korelacja R	0.81997	0.884587	0.974641

wskazuje o ile błąd predykcji jest mniejszy od rozrzutu średniokwadratowego wyjściowych wyników wokół ich wartości średniej. Jeśli sieć zbudowała właściwy model, to ten ilościowy wskaźnik powinien osiągać jak najmniejsze wartości. Jeżeli jest on większy od jedności lub jej bliski, to wynikowy model należy odrzucić. W analizowanym przypadku, biorąc pod uwagę złożoność problemu (8 parametrów wejściowych), uzyskana wartość ilorazu 0,47 oraz współczynnika korelacji 0,88 świadczy o stosunkowo dobrym dopasowaniu modelu regresyjnego. Błąd RMS (średni kwadratowy błąd) dla wskazanej sieci wynosi 1,56 MPa, a uzyskany średni błąd bezwzględny wynosi około 9,5% wartości średniej.

Zbudowana sieć pozwala na ocenę wpływu poszczególnych zmiennych na zmienną wyjściową dla zbioru uczącego i walidacyjnego (tab. 3.). Zgodność rang dla obu zbiorów jest kolejnym wskaźnikiem poprawności modelu. Przedstawiona kolejność odpowiada istotności wpływu poszczególnych zmiennych na wielkość wyjściową. Największy wpływ na wartość wyjściową ma Rlr (sieć najwięcej traci po odrzuceniu tej zmiennej). Wpływ najistotniejszych parametrów chropowatości (Rlr, Ra, Rda) na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych R_{tw} przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Modele wpływu parametrów struktury geometrycznej powierzchni na wytrzymałość na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych: a) wpływ parametrów Rlr i Ra, b) wpływ parametrów Rlr i Rda

Fig. 2. Models of the effect of surface roughness parameters on strength of lap glued joints: a) influences of parameters Rlr i Ra, b) influences of parameters Rlr i Rda

Przeprowadzona analiza jakości procesu przewidywania pozwala stwierdzić, że sieć neuronowa jest skutecznym narzędziem do prognozowania wy-

Tabela 3. Analiza wrażliwości dla zmiennych wejściowych

Table 3. The analysis of sensibility for input variables

-	Rv	Rt	Rz	Ra	RSm	Rlr	Rda	Rdq
Zbiór uczący								
Ranga	6	7	4	2	8	1	3	5
Błąd	3.4252	3.3723	5.9125	9.0259	2.9064	13.777	7.5896	3.4925
Iloraz	1.3124	1.2921	2.2655	3.4585	1.1136	5.2789	2.9081	1.3382
Zbiór walidujący								
Ranga	6	7	4	2	8	1	3	5
Błąd	3.5133	3.1484	6.4130	8.5499	2.8790	12.9296	8.0818	4.2908
Iloraz	2.2506	2.0168	4.1080	5.4769	1.8442	8.2825	5.1771	2.7486

trzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych stali S235JR sklejoną kompozycją klejową Epidian 5 + PAC w funkcji parametrów chropowatości powierzchni.

Podsumowanie

Wykonana w pracy kompleksowa ocena wpływu struktury geometrycznej powierzchni łączonych elementów na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych pozwoliła zweryfikować i uzupełnić wiedzę na temat adhezji mechanicznej pomiędzy spoiną klejową a łączonymi częściami. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że wytrzymałość na ścinanie R_{tw} zakładkowych połączeń klejowych sklejoną kompozycją klejową, ulegającą destrukcji w następstwie zerwania więzi adhezyjnych pomiędzy spoiną klejową a powierzchnią łączonych części (spoina Epidian 5 + PAC, spoina elastyczna), wykazuje znaczne uzależnienie od rozwinięcia powierzchni, charakteryzowanego parametrami chropowatości Rlr, Rda, Rdq. Można je zatem wykorzystać do kontroli poprawności przygotowania powierzchni oraz prognozowania wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych sklejoną elastycznymi kompozycjami klejowymi, ulegającymi zniszczeniu adhezyjnemu lub adhezyjno-kohezyjnemu.

Literatura

- [1] Cagle Ch.V.: Handbook of Adhesive Bonding, McGraw-Hill, New York 1973.
- [2] Petrie E.M.: Handbook of Adhesives and Sealants, McGraw-Hill Professional, New York 2006.
- [3] Habenicht G.: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Springer, Berlin-Heidelberg 2006.
- [4] Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielko-cząsteczkowych, WNT, Warszawa 2000.
- [5] Dutkiewicz E. T.: Fizykochemia powierzchni. WNT, Warszawa 1998.

- [6] Вакула В.Л., Притикин Л.М.: Физическая химия адгезии полимеров, Издательство „Химмия”, Москва 1984.
- [7] Pizzi A., Mittal K.L.: Handbook of Adhesive Technology. Marcel Dekker Inc., 2003.
- [8] Masters T.: Sieci neuronowe w praktyce, WNT, Warszawa 1996.

Financial support of Structural Funds in the Operational Programme - Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund - Project No POIG.0101.02-00-015/08 is gratefully acknowledged.



PROBABILISTIC NEURAL NETWORKS MODELING OF THE EFFECT OF SURFACE TOPOGRAPHY ON STRENGTH OF LAP GLUED JOINTS

The paper presents the analysis of the effect of surface topography on shear strength of overlapping glue joints from steel 235JR. Steel surfaces were prepared to gluing using various methods of mechanical treatment. As the consequence surface topographies of one-directional, multi-directional and point wise non-directional structures were obtained. It was found after using linear correlation method and forecasting with neural networks applications that strengthening properties of tested glued joints show substantial dependence on development of a surface characterized by the following parameters: R_{lr}, R_{da} and R_{dq}.

Keywords: surface topography, glued joints, shear resistance, neural networks

Złożono w Redakcji w listopadzie 2009 r.