

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Modelowanie wytrzymałości połączenia podłoża metalowego z ceramiką dentystyczną w zależności od parametrów uprzedniej obróbki strumieniowo-ściernej

Modeling strength of the connection the metal substrate to the dental ceramics depending on the parameters of the prior abrasive blasting

KRZYSZTOF PIETNICKI
 EMILIA WOŁOWIEC-KORECKA
 LESZEK KLIMEK *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.382

W pracy zbadano możliwości zastosowania sieci neuronowych do przewidywania wytrzymałości połączenia metal – ceramika w zależności od zastosowanych parametrów uprzedniej obróbki strumieniowo-ściernej. Na podstawie badań doświadczalnych opracowano zestaw 180 wzorców uczących a następnie uczono grupę 150 losowo wytypowanych sieci neuronowych, w celu doboru sieci o najlepszym dopasowaniu. Zaprojektowana sztuczna sieć neuronowa symuluje prawidłowo rzeczywistą zależność występującą podczas obróbki strumieniowo-ściernej i może być stosowana do określenia wytrzymałości połączenia metalu z ceramiką.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka strumieniowo-ścierna, połączenie ceramika-metal, sieci neuronowe

ABSTRACT

The study investigated the possibility of using neural networks to predict the strength of the connection metal - ceramic depending upon the parameters of the prior blasting. On the basis of experiments developed a set of 180 patterns of learning and then were taught a group of 150 randomly selected neural network, for the selection of the network with

dr Krzysztof Pietnicki^{1,2} kpietnicki@ump.edu.pl
 dr hab. inż. Emilia Wołowiec-Korecka³ emilia.wołowiec@p.lodz.pl
 prof. dr hab. inż. Leszek Klimek^{3,4} leszek.klimek@p.lodz.pl

¹ Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu; Zakład Techniki i Technologii Dentystycznych; ul. Bukowska 70; Poznań

² Wyższa Szkoła Edukacji i Terapii w Poznaniu, ul. Grabowa 22, 61-473 Poznań;

³ Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź;

⁴ Zakład Techniki Dentystycznych Katedry Stomatologii Odtwórczej Uniwersytetu Medycznego w Łodzi, 92-217 Łódź, ul. Pomorska 251

the best match. Designed an artificial neural network simulates correctly the real dependence, produced during blasting and it can be used to determine the bond strength metal with ceramics.

KEYWORDS: abrasive blasting, ceramic-to-metal connection, neural network

Wprowadzenie

Obróbka strumieniowo-ścierna jest stosowana w wielu procesach produkcyjnych, w tym w kształtowaniu parametrów powierzchniowych obrabianych elementów. Powszechnie używa się jej w technologiach wytwarzania elementów protetycznych na różnych etapach, od oczyszczania powierzchni metalowego odlewu z resztek mas osłaniających, aż do procesów preparacji powierzchni dla licowania ceramiką lub materiałami kompozytowymi.

Stałe uzupełnienia protetyczne, których wymiana wiąże się z wysokimi kosztami i dużym stresem dla pacjenta powinny funkcjonować możliwie długo. Oczywiście jest, że indywidualne uwarunkowania dotyczące ogólnego zdrowia, czy stanu jamy ustnej pacjenta mają znaczący wpływ na okres użytkowania protezy. Należy również, na ile to możliwe, wyeliminować ewentualne uszkodzenia wynikające z niskiej wytrzymałości samej protezy. Stąd też trwałość podbudowy wraz z jej pokryciem ceramiką będzie w dużej mierze decydować o jej trwałości. Ze względu na wytrzymałość mechaniczną i estetykę uzupełnień metalowo-ceramicznych połączenia materiałów odgrywają ważną rolę w technikach dentystycznych dotyczących korony i mostu protetycznego, od czasu, kiedy tego rodzaju protezy zębowe są wykonywane [1]. Najłabszym ogniwem tych konstrukcji wydaje się być połączenie tych różnych materiałów [2]. Na etapie łączenia elementów konstrukcyjnych protez stałych z materia-

łem służącym do wykonania estetycznego licowania imitującego zęby własne pacjenta, stan powierzchni oraz jej przygotowanie mają decydujące znaczenie dla trwałości pracy. Jedną z podstawowych trudności występujących przy wykonaniu metalowo-ceramicznego uzupełnienia protetycznego jest zapewnienie dobrego połączenia pomiędzy materiałami o tak odmiennych właściwościach jak spiek ceramiczny i stop metalu. Dlatego też głównym celem zabiegów przygotowawczych jest zwiększenie sił odpowiedzialnych za jakość połączenia pomiędzy podbudową metalową, a materiałem licującym. Poprawa jakości połączenia pomiędzy metalem a ceramiką będzie miała istotny wpływ na czas bezawaryjnego użytkowania protezy [3, 4].

Dla uzyskania prawidłowego połączenia materiałów istotne są m.in. usunięcie delikatnych struktur płaszczynowych czy słabo powiązanych nawisów powstałych we wcześniejszych procesach obróbek z utratą materiału i nadanie powierzchni odpowiedniej chropowatości. Chropowatość jest konieczna dla uzyskania różnorodnych zaczepów (nierówności), które są wykorzystywane dla uzyskania mechanicznego połączenia. Również istotnymi parametrami są jednorodność struktury oraz rozwinięcie powierzchni zwiększające możliwe pole połączenia [5 – 7].

Ponieważ podczas pracy, jaką wykonuje układ stomatognatyczny zęby oraz ich substytuty (protezy) podlegają dużym obciążeniom, aspekt ich wytrzymałości i możliwego zniszczenia jest coraz częściej przedmiotem szczegółowych badań [8 – 10]. Badane są sposoby zniszczenia uzupełnień protetycznych, pod kątem analizy przyczyn zniszczeń oraz możliwości ich ograniczenia.

Celem niniejszej pracy było sprawdzenie możliwości użycia sieci neuronowych do określenia wytrzymałości siły wiązania porcelany dentystycznej z podłożem metalowym po uprzedniej obróbce strumieniowo-ściernej.

Materiał i metodyka badań

Do badań wykorzystano stop kobaltowo-chromowy Heaenium® o składzie przedstawionym w tabeli 1, [11] z którego wykonano próbki o kształcie walców o średnicy 8 mm i wysokości 7 mm. Powierzchnia próbek została ujednoczona przez mechaniczne szlifowanie papierami ściernymi o rozmiarach od numeru 120 do numeru 1000. Następnie wykonano mechaniczne polerowanie diamentową pastą polerską o wielkości ziaren 1 μm . Tak przygotowane próbki poddano obróbce strumieniowo-ściernej stosując różne jej parametry. Procesy te realizowano na urządzeniu Renfert Basic Profesional, przy następujących parametrach procesu: gradacja ziarna ścierniwa: 50, 110, 250 μm ; kąt ustawienia powierzchni próbki: 30°, 45°, 60°; ciśnienie strumienia powietrza: 0,2; 0,4; 0,6 MPa.

Tab. 1. Skład stopu kobaltowo-chromowego

Zawartość pierwiastków [% wagowe]						
Pierwiastek	Co	Cr	W	Mo	Si	Mn
Wg producenta	59,0	25,0	10,0	4,0	1,0	0,8
Badany	reszta	26,34	9,73	4,11	0,89	0,63

Na tak przygotowane podłoża metalowe napalano ceramikę dentystyczną InLine (producent: Ivoclar Vivadent). Kolejno nakładano dwie warstwy ceramicznego opakera, w celu pokrycia koloru metalu, które osobno wypalano w piecu do ceramiki. Następnie dwukrotnie nakładano materiał ceramiczny licujący, który pojedynczo wypalono w piecu w dwóch różnych temperaturach, zgodnie z wytycznymi producenta. Ostatnią nałożoną warstwą była warstwa glazury,

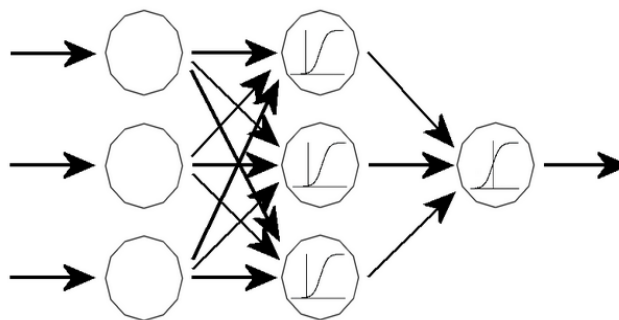
którą również poddano wypaleniu. Wszystkie etapy nakładania i wypalania warstw ceramicznych zostały wykonane zgodnie z zaleceniami producenta materiału [12].

Otrzymane w ten sposób próbki poddano badaniom wytrzymałościowym. Określano wytrzymałość na ścinanie połączenia metal-ceramika. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z005. Szybkość przesuwu belki podczas testów wynosiła 2 mm/min. Próbki były obciążane do chwili uszkodzenia połączenia materiałów. Wartością mierzoną była siła powodująca uszkodzenie badanego połączenia, a następnie wyznaczano wytrzymałość połączenia. Wyniki badań wytrzymałościowych próbek po różnych wariantach obróbki strumieniowo-ściernej przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2 Wybrane wyniki badań wytrzymałościowych po różnych wariantach obróbki strumieniowo-ściernej oraz wartości przewidywane przez sieć neuronową.

Ziarno μm	Ciśnienie MPa	Kąt °	R_t MPa (pomiar)	R_t MPa (sieć n.)	R_t MPa (różnice)
110	0,4	90	36,00	37,34	1,34
110	0,4	45	47,80	38,72	9,08
110	0,4	30	37,90	36,93	0,97
110	0,4	60	43,00	39,58	3,42
250	0,4	90	34,30	28,14	6,16
250	0,4	45	35,20	27,44	7,76
250	0,4	45	26,10	27,44	1,34
250	0,4	30	23,90	26,96	3,06
110	0,2	90	39,10	41,00	1,90
110	0,6	30	28,30	38,00	9,70
50	0,6	45	32,80	24,81	7,99
50	0,6	45	23,20	24,81	1,61
50	0,6	45	24,20	24,81	0,61
50	0,6	45	29,50	24,81	4,69
250	0,6	30	26,40	28,81	2,41
250	0,6	60	21,30	29,19	7,89
250	0,6	60	29,40	29,19	0,21
50	0,2	45	31,30	28,97	2,33
50	0,2	45	29,40	28,97	0,43
50	0,2	45	24,30	28,97	4,67
250	0,2	45	22,80	25,55	2,75
250	0,2	45	31,80	25,55	6,25
60	0,6	60	15,30	23,58	8,28

Na podstawie wyników badań doświadczalnych opracowano zestaw 180 znormalizowanych wzorców.



Rys. 1. Schemat sieci neuronowej typu MLP (Multilayer Perceptron)

Zostały one wykorzystane do uczenia 150 losowo wyłonionych sieci neuronowych. W wyniku procesu eliminacji i najlepszego dopasowania ostatecznie wybrano sieć neuronową typu MLP (Multilayer Perceptron), posiadającą trzy neurony w warstwie wejściowej, trzy neurony w warstwie

ukrytej oraz jeden neuron w warstwie wyjściowej (MLP 3-3-1). Schemat architektury tej sieci przedstawiono na rysunku 1. Za dane wejściowe dla niej przyjęto kąt piaskowania, wielkość ziarna ścierniwa oraz ciśnienie robocze nośnika. Za funkcje aktywacji dla neuronów ukrytych oraz neuronu wyjściowego przyjęto funkcje wykładnicze. Wielkością wyjściową sieci była wytrzymałość połączenia ceramika-metal (R_t). Na etapie trenowania sieci były wprowadzane dane, jako zmienne parametry wejściowe procesu obróbki strumieniowo-ścierniej oraz uzyskany doświadczalnie wytrzymałość na ścinanie po obróbce. Po wykonaniu cyklu treningów i zakończeniu procesu uczenia sieci średni błąd pomiędzy pomiarami faktycznymi a prognozowanymi przez sieć wynosił nie więcej niż 5%. Uczenie prowadzono metodą BFGS (Broydena-Fletcher-Goldfarb-Shanno) wg formuły:

$$V_t = V_{t-1} + \left(1 + \frac{(r^t)^T V_{t-1} r^t}{(s^t)^T r^t} \right) \frac{s^t (s^t)^T}{s^t r^t} - \frac{s^t (r^t)^T V_{t-1} + V_{t-1} r^t (s^t)^T}{(s^t)^T r^t}, \quad (1)$$

gdzie:

$$r^t = \nabla E(w^t) - \nabla E(w^{t-1}), \quad (2)$$

$$s^t = w^t - w^{t-1}, \quad (3)$$

$$w^t = w^{t-1} - \eta V^t \nabla E(w^{t-1}). \quad (4)$$

Za funkcję błędu przyjęto sumę kwadratów różnic opisaną wzorem:

$$E = \sum_{i=1}^k (d_i - y_i)^2, \quad (5)$$

gdzie:

- y_i – i-ta – odpowiedź sieci,
- d_i – i-ty – wzorzec uczący,
- k – liczba wzorców uczących.

Wyniki procesu uczenia przedstawiono w tabeli 2. Działanie sieci weryfikowano na osobnym zbiorze danych, otrzymując wartości, które przedstawiono w tabeli 3.

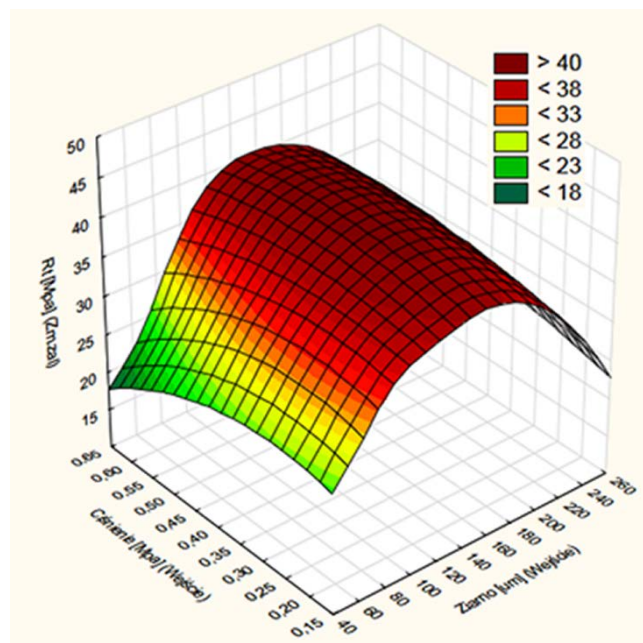
Tab. 3 Wyniki badań weryfikacyjnych.

Ziarno μm	Ciśnienie MPa	Kąt $^\circ$	R_t MPa (pomiar)	R_t MPa (sieć n.)	R_t MPa (różnica)
110	0,4	90	46,30	37,34	8,96
110	0,4	45	45,20	38,72	6,48
110	0,4	60	47,60	39,58	8,02
50	0,4	90	27,60	23,86	3,74
50	0,4	90	23,00	23,86	0,86
50	0,4	30	26,40	29,32	2,92
50	0,4	60	31,90	29,39	2,51
250	0,4	90	22,30	28,14	5,84
250	0,4	60	30,40	27,80	2,60
250	0,4	30	25,60	26,96	1,36
110	0,2	30	35,40	32,72	2,68
110	0,6	30	39,50	38,00	1,50
250	0,6	30	26,30	28,81	2,51
50	0,2	45	22,50	28,97	6,47
60	0,6	60	22,50	23,58	1,08
60	0,6	90	15,70	17,11	1,41
60	0,6	90	14,50	17,11	2,61
60	0,6	90	15,10	17,11	2,01

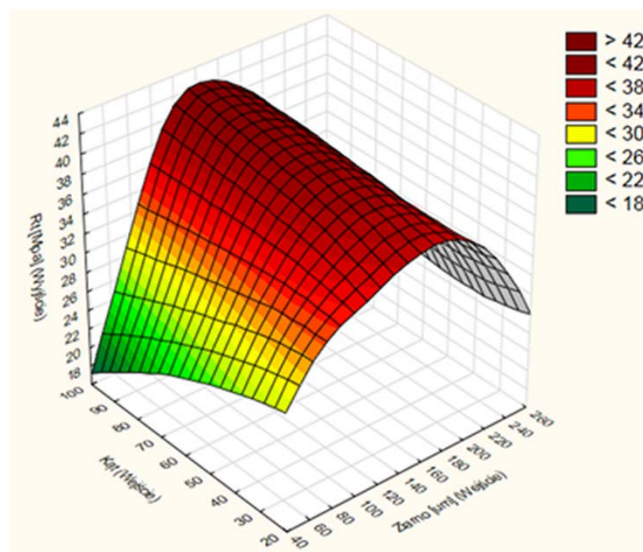
Wyniki badań

Na podstawie wyników badań otrzymanych doświadczalnie oraz wyników wygenerowanych przez sieć neuronową opracowano wykresy zależności wartości wytrzymałości

połączenia ceramika-metal od parametrów obróbki strumieniowo-ścierniej: ciśnienia, kąta padania oraz wielkości ziarna ścierniwa (Rys. 2, Rys. 3).



Rys. 2 Wykres zależności wytrzymałości połączenia ceramika-metal od parametrów obróbki strumieniowo-ścierniej (pomiar doświadczalny).



Rys. 3 Wykres zależności wytrzymałości połączenia ceramika-metal od parametrów obróbki strumieniowo-ścierniej (sieć neuronowa).

Dyskusja

Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych wskazują, że najlepsze połączenie między metalem a ceramiką uzyskuje się dla obróbki strumieniowo-ścierniej ziarnem o wielkości 110 μm w ciśnieniu 0,4 MPa. Analiza statystyczna wyników wytrzymałości próbek piaskowanych ziarnami 50, 110 i 250 μm wykazuje, że różnice między wartościami uzyskiwanymi dla ziarna 110 μm a resztą (50 i 250 μm) są istotne statystycznie. W ramach obróbki takim ziarnem (110 μm) nie stwierdzono natomiast istotnych statystycznie różnic pomiędzy próbkami obrabianymi pod różnymi kątami.

Próbki obrabiane ziarnami o rozmiarach 50 μm i 250 μm wykazywały znacznie mniejszą wytrzymałość na ścinanie w stosunku do próbek piaskowanych ziarnami o rozmiarze

110 μm . W tych grupach nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic wytrzymałościowych zarówno między próbkami obrabianymi pod różnym kątem, jak i między próbkami obrabianymi różną wielkością ziaren ścierniwa. Nie mniej można uznać, że wszystkie badane połączenia spełniły wymogi normy ISO 9693, ustalającej minimalną wartość wytrzymałości połączenia ceramiki z powierzchnią metalowego podłoża w przypadku badań na ścinanie na 25 MPa.

Charakter przełomów wszystkich próbek był podobny, co autorzy opisali w pracy [13]. Obecność na przełomach zarówno pierwiastków wchodzących w skład ceramiki (krzem), jak i w skład podłoża metalowego (kobalt) wskazuje, że pękały one zarówno na granicy metal-ceramika, jak i przez ceramikę. Jednak analizując mapy rozkładu powierzchniowego pierwiastków na przełomach można zauważyć, że większość przełomu przebiega jednak na granicy metal-ceramika. Wynika z tego, że najslabszym ogniwem badanego połączenia jest granica między podłożem metalowym a napalaną ceramiką. Podobny charakter przełomów zaobserwowano także w stosunku do połączeń ceramiki z innymi podłożami metalowymi [14-17].

Podsumowanie

Badania dotyczące stanu powierzchni elementów protezycznych są istotne dla wyznaczenia właściwości, bezpośrednio wpływających na funkcjonalność i przyszłe zachowanie się podczas ich eksploatacji. Przedstawione powyżej badania wytrzymałości połączenia ceramika – metal mają ścisły związek ze stanem powierzchni metalu, jaki uzyskuje się po obróbce strumieniowo-ścierniej przy różnych parametrach. Wytrzymałość połączenia metal-ceramika zależy od wielkości ziarna stosowanego do obróbki strumieniowo-ścierniej a najlepsze wyniki wytrzymałościowe uzyskiwane są dla próbek obrabianych ziarnem o wielkości 110 μm przy ciśnieniu 0,4 MPa.

Badania wykazują, że zaprojektowana sztuczna sieć neuronowa może być użyta do oszacowania wytrzymałości połączenia na podstawie parametrów obróbki. Wynika stąd, że zjawisko to może być zamodelowane a model zjawiska praktycznie wykorzystywany bez potrzeby tworzenia równań matematyczno-fizycznych.

LITERATURA

1. Coornaert J., Adriaens P., De Boever J., Long-term study of porcelain-fused-to-gold restorations, *J. Prosthet. Dent*, Volume: 51, 1984, pp. 338-342
2. Huang, Y., Zhang, H.W., The role of metal plasticity and interfacial strength in the cracking of metal/ceramic laminates, *Acta Metallurgica Et Materialia*, April, 1995, pp. 1523-1530
3. Combe E.C. Wstęp do materiałoznawstwa stomatologicznego, Sanmedia Warszawa 2002
4. Wataha, J.C., Alloys for prosthodontic restorations *Journal of Prosthetic Dentistry* Vol: 87, Issue: 4, April, 2002 pp. 351-363
5. Hofstede T.M., Ercoli C., Graser G.N., Tallents R.H., Moss M.E., Zero D.T.: Influence of metal surface finishing on porcelain porosity and beam failure loads at the metal-ceramic interface. *J. Prosthet. Dent.* 84 (2000) 309-317.
6. Piotrowski P., Krysiński Z., Rzątownski Sz.: Contemporary capabilities of abrasive blasting in laboratory and clinical procedures. *Magazyn Stomatologiczny* 3 (2003) 20-23.
7. Grajek A., Lubas M., Kotarski T., Wieczorek, P., Jasiński J.: Condition of surface and quality of metal-porcelain connection following preliminary sand blasting. *Materials Engineering* 6 (2008) 1082-1085.
8. Van Niekerk A.J., Ciaputa T.: Modern prosthetic supplements. *Art and Craft. Selected texts.* Elamed, Katowice (2007) 228-234.

9. Chladek W.: Experimental evaluation of occlusal forces. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 3 (1) (2001) 25–37.
10. Koczorowski R.: Tribological wear of some prosthetic materials in contact with dental ceramic (in vitro investigation). *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 1(2) (1999) 13–17.
11. http://www.heraeus-kulzer.pl/files/79_367_u_heraenium_p.pdf.
12. <http://www.ivoclarvivadent.pl/productcategories/ips-inline>.
13. Pietnicki K., Wołowicz E., Klimek L.: The effect of abrasive blasting on the strength of a joint between dental porcelain and metal base. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 16(1) (2014) 63-68.
14. Garbelini W.J., Henriques G.E.P., Troia Jr. M., Mesquita M.F., Dezan C.C.: Evaluation of low-fusing ceramic systems combined with titanium grades II and V by bending test and scanning electron microscopy. *J. Appl. Oral Sci.* 11(4) (2003) 354-60.
15. Homann F., Waddell J.N., Swain M.V.: Influence of water, loading rate and bonder on the adhesion of porcelain to titanium. *J. Dent.* 34 (2006) 485-490.
16. Papadopoulos T.D., Spyropoulos K.D.: The effect of a ceramic coating on the cpTi - porcelain bond strength. *Dent. Mater.* 25 (2009) 247-253.
17. Sadeq A., Cai Z., Woody R.D., Miller W.: Effects of interfacial variables on ceramic adherence to cast and machined commercially pure titanium. *The J. Prosthet. Dent.* 90(1) (2003) 10-17.