

ANALIZA STATYSTYCZNA BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE POŁĄCZEŃ CZOPOWYCH WALCOWYCH

Statistical analysis of shear strength tests adhesively bonded cylindrical joints

Władysław ZIELECKI, Przemysław BIELENDĄ

Streszczenie: W artykule opisano wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych takich jak długość złącza, grubość warstwy kleju, wielkości fazy w otworze tulei oraz chropowatość powierzchni na wytrzymałość na ścinanie klejowych połączeń czopowych walcowych. Do przeprowadzenia niezbędnych obliczeń w pracy użyto programu Minitab.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, połączenia czopowo-walcowe, wytrzymałość, czynniki konstrukcyjne

Abstract: The article describes the influence of selected structural factors such as joint length, thickness of the adhesive layer, the size of the phase in the bushing opening and the surface roughness on the shear strength of adhesively bonded cylindrical joints. The Minitab program was used to carry out the necessary analyses.

Key words: adhesively bonded cylindrical joints, shear strength

Wprowadzenie

Od lat znaną i coraz powszechniej stosowaną metodą łączenia materiałów jest klejenie. Opracowanie w latach 40. ub.w. klejów do metali, a następnie w latach 70. tzw. klejów wzmocnionych, spowodowało rozwój klejenia konstrukcyjnego. Aktualnie technologia klejenia odgrywa bardzo dużą rolę w rozwoju nowoczesnych konstrukcji. W wielu przypadkach jest ona alternatywą dla stosowanych do tej pory metod łączenia, uszczelniania czy regeneracji części maszyn. Poza tym klejenie stwarza nowe możliwości w zakresie łączenia materiałów, które pozwalają na zmniejszenie wymiarów łączonych części na skutek uproszczenia ich konstrukcji. Istotne jest to zwłaszcza w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Takie różnorodne możliwości zastosowania klejenia skutkuje potrzebą poszukiwania optymalnych warunków sterowania tym procesem oraz identyfikowania czynników, które w istotny sposób warunkują wytrzymałość połączeń klejowych [1, 2].

Połączenia klejowe

Klejenie polega na wprowadzeniu pomiędzy powierzchnie łączonych części cienkiej warstwy kleju (ok. 0,1 mm), który wiąże złącze siłami adhezji (przyczepność kleju do powierzchni łączonych elementów) i kohezji (wewnętrzna wytrzymałość utwardzonego kleju) [9]. Jest to nowoczesna technologia łączenia części maszyn, której rozwój wiąże się w głównej mierze z produkcją klejów o lepszych właściwościach, a także z postępem badań dotyczących wyznaczania właściwości klejów i połączeń klejowych [8].

Definicja kleju, pochodząca z normy PN-EN 923:2008 Kleje – Terminy i definicje [5], określa go jako substancję niemetaliczną, umożliwiającą łączenie materiałów

przez połączenie ich powierzchni, przy czym uzyskane w ten sposób połączenie ma odpowiednią wytrzymałość wewnętrzną. Obecnie na rynku występuje wiele rodzajów klejów, które można stosować do klejenia określonego rodzaju materiału. Dlatego wybór odpowiedniego gatunku kleju jest istotnym etapem w technologii klejenia. Przy doborze kleju do konkretnego przypadku należy wziąć pod uwagę m. in. [7]:

- rodzaj klejonego materiału,
- przesłanki ekonomiczne,
- parametry przewidywanego połączenia m. in. konstrukcję i wytrzymałość połączenia klejowego, temperaturę, środowisko,
- postać kleju,
- mechanizm wiązania spoiny,
- ilość składników (jednoskładnikowe czy wieloskładnikowe),
- wymagany sposób przygotowania kleju,
- odporność chemiczna spoiny klejowej.

Połączenia klejowe są węzłami konstrukcyjnymi, w których za pomocą spoiny klejowej połączone są minimum dwa proste elementy konstrukcyjne (tarcze, płyty, powłoki, pręty, belki) [11]. Szczegółowe poznanie problematyki klejenia i połączeń klejowych, ze zwróceniem uwagi na ich zalety oraz wady, pozwala na projektowanie funkcjonalnych złączy przy względnie małych nakładach finansowych.

Poprawnie zaprojektowane i wykonane połączenia klejowe wykazują dużo zalet. W wielu przypadkach technika ta oferuje złącza o właściwościach znacznie przewyższających możliwości konwencjonalnych technologii. Zastosowanie jej zmniejsza do minimum naprężenia i odkształcenia w połączeniach, a także je uszczelnia oraz chroni przed wnikaniem wilgoci i powstawaniem korozji. Istotną cechą klejenia i połączeń klejowych jest możliwość łączenia materiałów o bardzo

zróznicowanych właściwościach, łatwość automatyzacji oraz eliminacja dodatkowych obróbek powierzchniowych [3].

Podstawowe wady klejenia i połączeń klejowych to przede wszystkim ograniczona odporność na działanie wysokich temperatur i mała wytrzymałość mechaniczna połączeń, zazwyczaj nie przekraczająca 35 MPa. Niektóre kleje są niezbyt odporne na działanie wody, chociaż zarazem mogą być odporne na działanie olejów i benzyny. Czas składowania klejów jest ograniczony, a dodatkowo wykazują one skłonność do żelowania, rozwarstwiania i sedymentacji.

Jak wynika z analizy literatury, autorzy wielokrotnie próbowali dokonać syntezy porównawczej podstawowych technik łączenia. W wielu przypadkach klejenie i połączenia klejowe wykazują przewagę zalet, w porównaniu z lutowaniem, zgrzewaniem, spawaniem czy łączeniem mechanicznym. Nie oznacza to jednak, że klejenie jest je w stanie zastąpić. Dlatego przy wyborze klejenia, jako metody łączenia, należy dla wybranego połączenia wziąć pod uwagę jego wady i zalety, a później zaplanować technologię klejenia zależną od założeń pracy połączenia, rodzaju kleju, a także innych czynników.

Połączenia czopowe walcowe

Powszechnie w konstrukcji maszyn stosuje się połączenia czopowe walcowe. Do najczęściej stosowanych typów tego rodzaju połączeń należą połączenia: skurczowe, wyciskane, wpustowe oraz wielowypustowe, które cechują się wysokimi kosztami wykonania, natomiast rzadziej używane są połączenia klejowe, które charakteryzują się niskimi kosztami wytwarzania. Istotnym ograniczeniem w zastosowaniu połączeń klejowych czopowych walcowych jest brak wytycznych do obliczania ich wytrzymałości statycznej, a także zmęczeniowej. Opracowanie sprecyzowanych wytycznych do projektowania połączeń czopowych walcowych pochłania dużo pracy, przede wszystkim ze względu na ich właściwości wytrzymałościowe, które uzależnione są od dużej ilości czynników technologicznych oraz konstrukcyjnych [13].

Analiza literatury pozwalają stwierdzić, że na wytrzymałość połączeń klejowych ma wpływ wiele czynników konstrukcyjnych takich, jak [12]:

- chropowatość powierzchni łączonych części,
- wymiary geometryczne złącza (długości złącza, średnicy czopa, grubości spoiny klejowej),
- sztywność elementów łączonych w strefie przykrawędziowej złącza [4, 10],
- dokładność wykonania złącza.

W dużym stopniu wytrzymałość połączeń klejowych czopowych walcowych zależy od ich konstrukcji. Dlatego podczas projektowania tych łączeń należy przede wszystkim unikać rozwiązań konstrukcyjnych, które zmniejszają ich wytrzymałość oraz wykorzystywać rozwiązania umożliwiające wzrost nośności dynamicznej i statycznej połączeń [12].

W Polsce dla klejowych połączeń czopowych nie opracowano normatywnych metod badania ich własności zmęczeniowych oraz wytrzymałościowych statycznej. W przypadku badań wytrzymałości statycznej połączeń klejowych czopowych walcowych wykorzystuje się maszyny wytrzymałościowe [6].

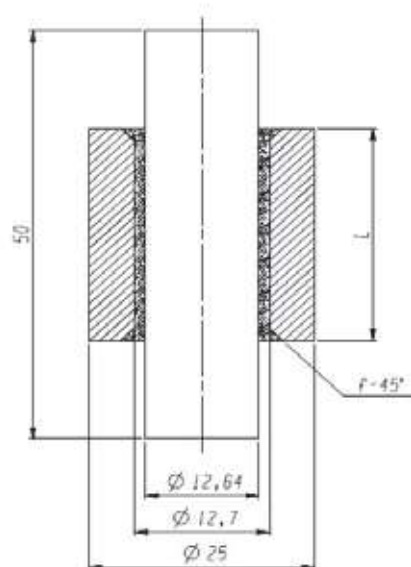
Metodyka badań

Celem artykułu jest ocena istotności wpływu wybranych czynników konstrukcyjnych takich jak: długość złącza L , grubość warstwy kleju g , wielkości fazy f w otworze tulei oraz chropowatość powierzchni R_a na wytrzymałość na ścinanie klejowych połączeń czopowych walcowych.

Badaniom zostały poddane połączenia czopowe walcowe wytworzone ze stali normalizowanej C45 sklejone za pomocą kompozycji klejowej Epidian 5 w połączeniu z utwardzaczem PAC (proporcja 80 cz. w. utwardzacza na 100 cz. w. żywicy) i utwardzane w temperaturze pokojowej. Całe badanie zostało zrealizowane w dwóch eksperymentach, podczas których zmieniały się wymiary wykorzystanych próbek.

Kształt oraz wymiary próbek użytych w doświadczeniu pierwszym przedstawia rys. 1. Dla tego etapu badania czynnikami zmiennymi były:

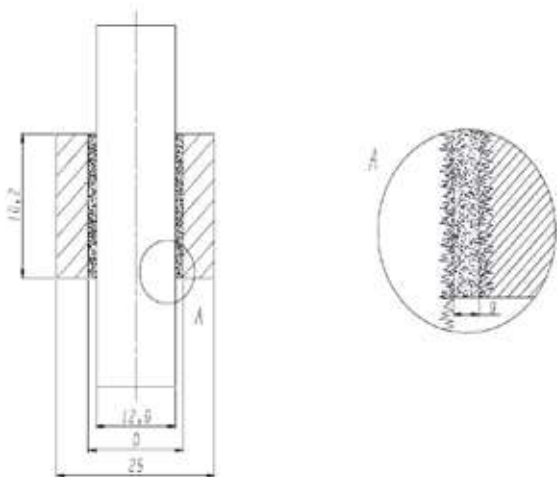
- długość tulejki L ($L = 10 - 16$ mm),
- wielkość fazy f w otworze tulei ($f = 0,0 - 3,0$ mm),
- natomiast czynnikami stałymi:
- grubość spoiny g ($g = 0,03$ mm),
- chropowatość powierzchni R_a ($R_a = 4,75$ μ m).



Rys. 1. Kształt oraz wymiary klejowych połączeń czopowych walcowych wykorzystanych w pierwszej części badań
Fig. 1. Shape and dimensions of adhesively bonded cylindrical joints used in the first part of the research

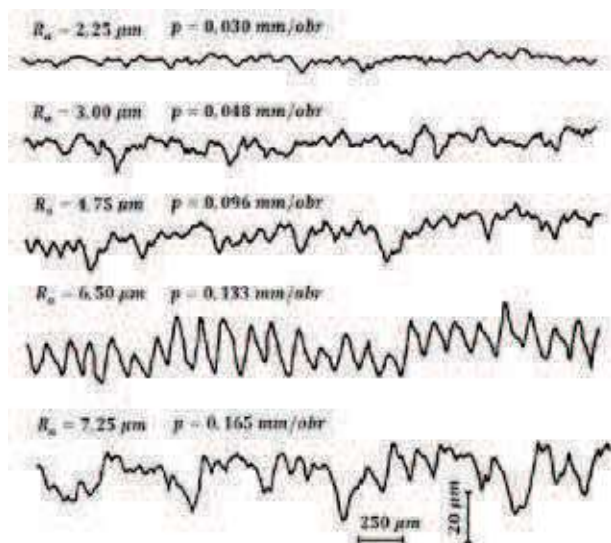
Natomiast wymiary oraz kształt pozostałych próbek wykorzystanych w drugim doświadczeniu przedstawia rys. 2. W tym przypadku czynnikami zmiennymi były:

- grubość warstwy kleju g ($g = 0,04 - 0,26$ mm),
- hropowatość powierzchni R_a ($R_a = 2,25 - 7,25$ μm),
- natomiast na stałym poziomie:
- długość tulejki L ($L = 10,2$ mm),
- brak fazy f w otworze tulejki.



Rys. 2. Kształt oraz wymiary klejowych połączeń czopowych walcowych wykorzystanych w drugiej części badań
Fig. 2. Shape and dimensions of adhesively bonded cylindrical joints used in the second part of the research

Profilogramy powierzchni czopów połączeń czopowych walcowych wykorzystanych w drugiej części doświadczenia przedstawia rys. 3. Powierzchnie tą ukształtowano w procesie toczenia wykonywanym z prędkością obrotową $n = 500$ obr/min przy głębokości skrawania $g_s = 0,2$ mm.



Rys. 3. Profilogramy powierzchni czopów klejowych połączeń czopowych walcowych wykorzystanych w drugiej części badania
Fig. 3. Profilograms of the surface of the spigots of adhesively bonded cylindrical joints used in the second part of the study

Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie badanych próbek przedstawiono w tab. 1.

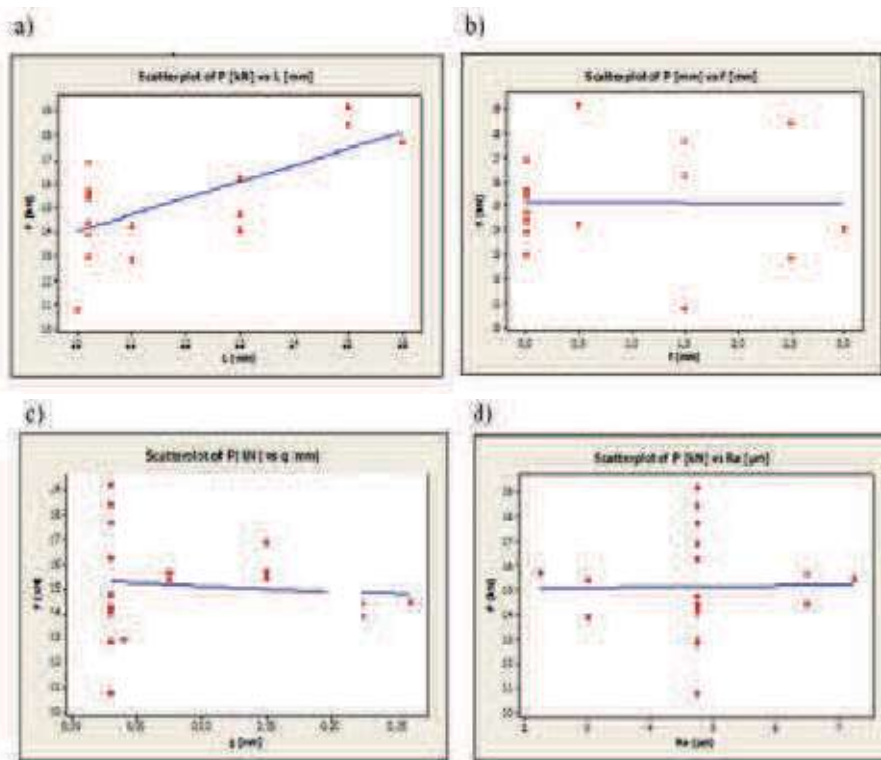
Tabela 1. Wytrzymałości na ścinanie badanych wariantów konstrukcyjnych połączeń klejowych czopowych walcowych
Table 1. Shear strengths of the tested construction variants of adhesively bonded cylindrical joints

Lp.	L [mm]	f [mm]	g [mm]	Ra [μm]	P [kN]	S2
1.	11,0	0,5	0,03	4,75	14,24	1,946
2.	10,2	0	0,075	3,0	15,34	1,356
3.	15,0	0,5	0,03	4,75	19,18	2,7
4.	10,2	0	0,225	3,0	13,9	1,389
5.	11,0	2,5	0,03	4,75	12,8	1,393
6.	10,2	0	0,075	6,5	15,64	2,211
7.	15,0	2,5	0,03	4,75	18,4	4,231
8.	10,2	0	0,225	6,5	14,36	1,997
9.	16,0	1,5	0,03	4,75	17,68	0,923
10.	10,2	0	0,26	4,75	14,42	1,101
11.	10,0	1,5	0,03	4,75	10,78	1,188
12.	10,2	0	0,04	4,75	12,96	0,713
13.	13,0	3,0	0,03	4,75	14,06	1,396
14.	10,2	0	0,15	7,25	15,40	1,002
15.	13,0	0	0,03	4,75	14,72	2,309
16.	10,2	0	0,15	2,25	15,66	2,993
17.	13,0	1,5	0,03	4,75	16,22	1,853
18.	10,2	0	0,15	4,75	16,86	1,664

Wyniki badań

Przed przeprowadzeniem analizy statystycznej przy użyciu programu Minitab zostały utworzone wykresy rozproszenia (scatterplot) z linią regresji (with regression), które przedstawiają relację pomiędzy siłą niszcząca P a czynnikami konstrukcyjnymi badanych klejowych połączeń czopowych walcowych (rys. 4).

Analiza wykresów rozproszenia wskazuje, że zarówno długość złącza L jak i grubość warstwy kleju g mają wpływ na wytrzymałość na ścinanie badanego połączenia klejowego czopowego walcowego. Natomiast faza f w strefie przykrawędziowej oraz chropowatość powierzchni R_a nie wpływają w istotny sposób na nośność badanych połączeń. Analiza wizualna nie powinna być jednak przyjmowana jako ocena ostateczna i niezaprzeczalna, wymaga ona weryfikacji statystycznej.



Rys. 4. Wykresy rozproszenia (scatterplot) z linią regresji (with regression) przedstawiają relacje pomiędzy siłą niszcząca P, a poszczególnymi parametrami konstrukcyjnymi
 Fig. 4. Scatterplots with the regression line show relations between the destructive force P and the individual construction parameters

Analizę statystyczną uzyskanych wyników badań przeprowadzono stosując analizę wariancji, prostą regresję liniową, regresję wieloraką oraz test istotności F (Snedecora). Wyznaczony model regresji prostej (tab. 2) obrazujący zależność siły niszczącej P od długości złącza L należy uznać za istotny statystycznie ponieważ poziom prawdopodobieństwa jest równy $P_v = 0,003$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Modele regresji prostej przedstawiające zależność siły niszczącej P od fazy f w strefie przykrawędziowej, grubości warstwy kleju g oraz chropowatość powierzchni Ra są nieistotny statystycznie

ponieważ poziom prawdopodobieństwa jest równy $P_v > 0,05$. Oceniono również jaki wpływ na zmienną objaśnianą mają wszystkie zmienne objaśniające równocześnie. W tym celu za pomocą modułu „Regression” programu Minitab wyznaczono model regresji wielorakiej (tab. 2) pozwalający ocenić związek zmiennej objaśnianej P z całym zbiorem zmiennych objaśniających L, f, g, Ra. Otrzymany model regresji wielorakiej należy uznać za istotny statystycznie ponieważ poziom prawdopodobieństwa jest równy $P_v = 0,006$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Tabela 2. Wyniki analizy regresji nośności P połączeń klejowych od zmiennych niezależnych (długości złącza L, fazy f w strefie przykrawędziowej, grubości warstwy kleju g, chropowatości powierzchni Ra)
 Table 2. Results of regression analysis of the load-bearing capacity P of glue joints from independent variables (length of the L joint, phase f in the near-edge zone, thickness of the glue layer g, surface roughness Ra)

Zależność nośności P od zmiennej niezależnej	Otrzymane równanie regresji	P_v
L	$P = 7,32 - 0,675 L$	0,003
f	$P = 15,2 - 0,03 f$	0,952
g	$P = 15,4 + 2,29 g$	0,722
Ra	$P = 15,0 + 0,027 Ra$	0,949
L, f, g, Ra	$P = 3,29 + 1,02 L - 0,824 f + 5,56 g + 0,027 Ra$	0,006

Tabela 3. Obliczenia wariancji do oceny adekwatności modelu regresji wielorakiej
 Table 3. Calculations of variance to assess the adequacy of the multiple regression model

Lp.	L [mm]	f [mm]	g [mm]	Ra [μm]	Wielkość średnia \bar{y}_u	Wielkość z modelu \hat{y}_u	$(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2$	σ_u^2
1	11,0	0,5	0,030	4,75	14,24	14,393	0,023	1,946
2	10,2	0,0	0,075	3,00	15,34	14,192	1,318	1,356
3	15,0	0,5	0,030	4,75	19,18	18,473	0,500	2,700
4	10,2	0,0	0,225	3,00	13,90	15,026	1,268	1,389
5	11,0	2,5	0,030	4,75	12,80	12,745	0,003	1,393
6	10,2	0,0	0,075	6,50	15,64	14,287	1,832	2,211
7	15,0	2,5	0,030	4,75	18,40	16,825	2,480	4,231
8	10,2	0,0	0,225	6,50	14,36	15,121	0,578	1,997
9	16,0	1,5	0,030	4,75	17,68	18,669	0,978	0,923
10	10,2	0,0	0,260	4,75	14,42	15,268	0,719	1,101
11	10,0	1,5	0,030	4,75	10,78	12,549	3,130	1,188
12	10,2	0,0	0,040	4,75	12,96	14,045	1,176	0,713
13	13,0	3,0	0,030	4,75	14,06	14,373	0,098	1,396
14	10,2	0,0	0,150	7,25	15,40	14,724	0,457	1,002
15	13,0	0,0	0,030	4,75	14,72	16,845	4,516	2,309
16	10,2	0,0	0,150	2,25	15,66	14,589	1,148	2,993
17	13,0	1,5	0,030	4,75	16,22	15,609	0,373	1,853
18	10,2	0,0	0,150	4,75	16,86	14,656	4,857	1,664
						SUMA	25,454	32,365

Otrzymany model regresji wielorakiej:
 $P = 3,29 + 1,02 L - 0,824 f + 5,56 g + 0,027 Ra$
 poddano ocenie adekwatności za pomocą testu F (Snedecora).

Przyjęto hipotezy:

- $H_0 = \sigma_a^2 = \sigma^2$ (model jest adekwatny).
- $H_1 = \sigma_a^2 > \sigma^2$ (model nie jest adekwatny).

Dane do obliczeń:

$$n = 18,$$

$$r = 3,$$

$$N_b = 4,$$

$$f_1 = 18 * (3 - 1) = 36,$$

$$f_2 = 18 - 4 = 14.$$

Na podstawie zgromadzonych danych obliczono:

1. wariancję błędów aproksymacji:

$$\sigma_a^2 = \frac{3}{14} * 25,454 = \frac{76,362}{14} = 5,454$$

2. wariancję wyników pomiarów:

$$\sigma^2 = \frac{2}{36} * 32,365 = \frac{32,365}{18} = 1,798$$

3. wariancję funkcji testowej:

$$F = \frac{5,454}{1,798} = 3,0333$$

Wobec niespełnienia warunku $F \leq F_{\alpha, f_2, f_1}$ na każdym z poziomów ufności odrzucamy hipotezę zerową i przyjmujemy, że model obiektu jest nieadekwatny.

Podsumowanie

Głównym celem opisanych badań w artykule było pokazanie wpływu czynników konstrukcyjnych takich jak: długość złącza L, grubość warstwy kleju g, wielkości fazy f w otworze tulei oraz chropowatość powierzchni Ra na wytrzymałość na ścinanie klejowych połączeń czopowych walcowych.

Wyniki wstępne badań, czyli analiza wizualna danych i analiza wariancji oraz zbudowany model regresji liniowej i regresji wielorakiej wskazały, że statystycznie istotny wpływ na wartość siły niszczącej P badanego połączenia czopowego walcowego wykonanego z normalizowanej stali 45 sklejonego Epidianem 5 + PAC wykazuje tylko długość tulei L. Jednoznacznie wskazała na to wartość poziomu prawdopodobieństwa P_v , która wyniosła $P_v = 0,003$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Ocena adekwatności modelu regresji wielorakiej przedstawiające zależność siły niszczącej P od długość złącza L, faza f w strefie przykrawędziowej, grubość

warstwy kleju g oraz chropowatość powierzchni Ra, przeprowadzona z wykorzystaniem statystycznego testu istotności F (Snedecora), wykazała że badany model jest nieadekwatny.

LITERATURA

- [1] Domińczuk J. 2011. „Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych.” Postępy Nauki i Techniki (10): 14 – 26.
- [2] Godzimirski J., A. Komorek. 2008. „Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych”. Przegląd Spawalnictwa (8): 38.
- [3] Mirski Z., T. Piwowarczyk. 2008. „Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości”. Przegląd Spawalnictwa (8): 12.
- [4] O'Reilly C. 1990. “Designing Bonded Cylindrical Joints for Automotive Applications”. Journal of Materials and Manufacturing Vol. 99, Section 5: 839-848.
- [5] PN-EN 923:2006E - Kleje - Terminy i definicje.
- [6] „Podstawy konstrukcji maszyn” T.2, pod red. Dietrich M. 1999. Warszawa: WNT.
- [7] Rudawska A. 2005. „Dobór rodzaju kleju w aspekcie wytrzymałości klejowych blach ocynkowanych”. Technologia i Automatykacja Montażu (1): 28.
- [8] Rutkowski A. 1986. „Części maszyn”. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
- [9] Sempruch J., T. Piątkowski. 2006. „Podstawy konstrukcji maszyn z CAD: połączenia i elementy podatne”. Piła: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa.
- [10] Walame M. V., B.B. Ahuja. 2013. “Profile modification of adhesively bonded cylindrical joint for maximum torque transmission capability”. International Journal of Modern Engineering Research Vol. 3, Issue. 4: 1900-1905.
- [11] „Węzły i połączenia konstrukcyjne. Projektowanie metodą nośności granicznej” pod red. Frąckiewicz H. 1985. Warszawa: WNT.
- [12] Zielecki W. 2005. „Konstruowanie klejowych połączeń czopowych walcowych”. Technologia i Automatykacja Montażu (1): 32-35.
- [13] Zielecki W. 2003. „Stanowiska do badań zmęczeniowych klejowych połączeń czopowych walcowych”. Technologia i Automatykacja Montażu (4): 19 – 20.

dr hab. inż. Władysław Zielecki prof. PRz - Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: wzkmiop@prz.edu.pl

mgr inż. Przemysław Bielenda – student studiów doktoranckich na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: pbielenda@prz.edu.pl

korozja kosztuje! *

***) straty korozyjne szacuje się na 3-6% PKB**



na życzenie wysyłamy bezpłatny
egzemplarz okazowy:
redakcja@ochronaprzekkorozja.pl

**Forum wymiany wiedzy
i doświadczeń na temat
ochrony materiałów
przed skutkami korozji**

www.ochronaprzekkorozja.pl
www.sigma-not.pl