

WPLYW OBRÓBKI POWIERZCHNIOWEJ ZGNIEMEM PO UTWARDZENIU SPOIN NA NOŚNOŚĆ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Effect of surface treatment cold-work hardening after adhesive curing on strength of adhesive lap joints

Jan GODZIMIRSKI, Anna JAGIEŁŁO

Streszczenie: Wprowadzenie naprężeń ściskających do warstwy wierzchniej materiału może powodować odkształcenia plastyczne, powodujące odkształcenia (deformacje) cienkich blach. Piaskowanie powierzchni zewnętrznych zakładkowych połączeń klejowych, po utwardzeniu ich spoin, powinno spowodować odkształcenia, które mogą zmniejszyć wartość naprężeń w obciążonych spoinach i w ten sposób zwiększyć wytrzymałość połączeń. Przeprowadzono badania eksperymentalne, które potwierdziły tę hipotezę. Zaproponowano również metodę uwzględnienia skutków obróbki powierzchniowej zgniotem w obliczeniach numerycznych wytrzymałości połączeń klejowych. Z badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych wynika, że wzrost wytrzymałości, wynikający z zastosowania obróbki powierzchniowej zgniotem klejonych elementów połączeń zakładkowych po utwardzeniu ich spoin, może wynieść od kilkunastu do kilkudziesięciu procent.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, obróbka powierzchniowa zgniotem, obliczenia numeryczne

Abstract: Loading compressive stress into surface layer of thin sheets cause possibility of their deformations. The sand blasting of surface layer of adhesive lap joints after adhesive curing should cause such deformation that can reduce stresses in adhesive layer, so enlarge joint strength. The experimental tests and numerical calculations verify this hypothesis. The method of considering in numerical calculations the effect of surface treatment cold-work hardening was proposed. Made experimental tests and numerical calculations showed that the increase of strength of cold-work hardening lap adhesive joints may cause strength increase from a dozen or so to dozen percent.

Key words: Adhesive joints, surface treatment cold-work hardening, numerical calculation

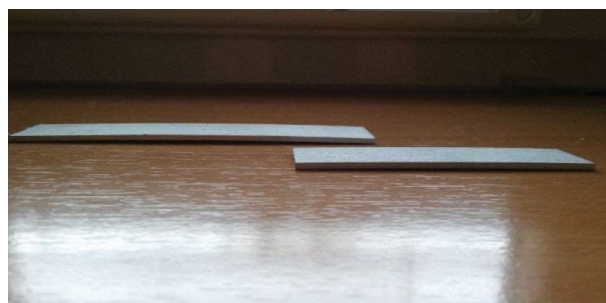
Wprowadzenie

Klejenie konstrukcyjne jest cennym uzupełnieniem innych metod łączenia materiałów. Trudno jest sobie wyobrazić działalność współczesnego budownictwa, przemysłu samochodowego, lotniczego oraz budowy maszyn bez stosowania w większym lub mniejszym zakresie technologii klejenia. Działalność ponad 700 firm specjalizujących się w wytwarzaniu klejów [4] świadczy o powszechności i perspektywach tej metody łączenia. W spoinach klejowych, nawet najbardziej popularnych połączeń zakładkowych, występuje złożony stan naprężenia i często naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny osiągają większe wartości od naprężeń stycznych. W celu ograniczenia ich wartości zalecane jest konstruowanie połączeń zakładkowych symetrycznych. W połączeniach zakładkowych występuje problem granicznej długości zakładki, tzn. takiej, której zwiększanie nie powoduje już wzrostu wytrzymałości połączenia [2]. W celu zwiększenia wytrzymałości połączeń zakładkowych, obciążonych na ścinanie, zalecane jest stosowanie bardziej efektywnych sposobów przygotowania powierzchni do klejenia [1], ukosowanie krawędzi klejonych elementów [5] oraz pozostawianie wypłytki na krawędziach spoin [3]. Ciekawe wyniki dotyczące zwiększania wytrzymałości połączeń zakładkowych uzyskał zespół prof. Zielińskiego, stosując peumokulowanie łączonych blach po utwardzeniu spoin klejowych [6, 7]. Było to inspiracją do

zastosowania piaskowania po utwardzeniu spoin w celu zwiększenia wytrzymałości połączeń klejowych i próby wyjaśnienia tego efektu dzięki przeprowadzeniu obliczeń numerycznych.

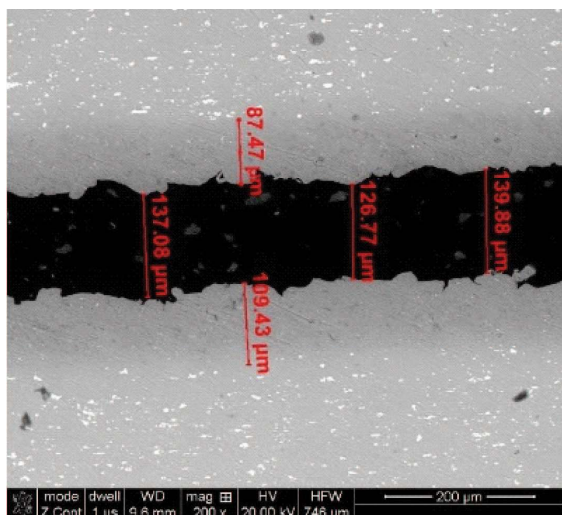
Ocena wpływu piaskowania na odkształcenia blach

Piaskowanie wprowadza naprężenia ściskające do warstwy wierzchniej materiału i może powodować jej odkształcenia plastyczne. Skutkuje to odkształceniami (deformacją) cienkich blach. Znaczącymi wartościami odkształceń (deformacji) można oszacować wartość naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej, które spowodowałyby



Rys. 1. Odkształcenia próbek metalowych spowodowane jednostronnym piaskowaniem powierzchni

Fig. 1. Deformation of metal sheets caused by one-sided sand blasting



Rys. 2. Obraz z badania tomografem komputerowym spoiny klejowej (powierzchnie piaskowana)
Fig. 2. Adhesive layer tested by means of computer-assisted tomograf (sandblasted surface)

takie same odkształcenia. Znajomość wartości takich naprężeń może być przydatna do numerycznego modelowania połączeń piaskowanych po utwardzeniu spoin klejowych. W badaniach wykorzystano próbki prostokątne wykonane ze stopu aluminium AW 2024T3 o grubości 2 mm i stalowe (C35) o takiej samej grubości, które poddano jednostronnemu piaskowaniu. Próbki uległy wygięciu (rys. 1). Za pomocą głębokościomierza mikrometrycznego zmierzono strzałki ich ugięcia.

Na podstawie badania tomografem komputerowym (rys. 2.) oszacowano głębokość warstwy wierzchniej, w której występują naprężenia spowodowane piaskowaniem na ok. 0,1 mm.

Odształcenie próbki potraktowano jako zginanie belki obciążonej momentem. Odształcenie belki zginanej opisuje zależność:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M_g, \quad (1)$$

gdzie:

- E – moduł Younga
- I – moment bezwładności
- y – strzałka ugięcia
- M_g – moment gnący

Dwukrotne całkowanie zależności (1) daje rezultat:

$$EIy = -M_g \frac{x^2}{2} + Cx + D \quad (2)$$

Stałe C i D można obliczyć z warunków brzegowych:

$$\begin{aligned} x = 0 & \quad y = 0 \\ x = l & \quad y = 0 \end{aligned}$$

$$D = 0 \quad C = M_g \frac{l}{2}$$

co sprowadza równanie (2) do postaci:

$$EIy = -M_g \frac{x^2}{2} + M_g \frac{l}{2} x \quad (3)$$

Dla $x = 0,5l$ równanie (3) uzyskuje postać:

$$EIy = M_g \frac{l^2}{8} \quad (4)$$

Moment gnący działający na piaskowaną próbkę można określić jako funkcję umownych naprężeń normalnych dodatnich w warstwie wierzchniej

$$M_g = \sigma_x A \times r = \sigma_x g_\sigma b \left(\frac{g_m}{2} - 0,5g_\sigma \right) \quad (5)$$

gdzie:

- g_m – grubość materiału
- g_σ – grubość warstwy, w której występują naprężenia
- b – szerokość próbki
- r – odległość warstwy wierzchniej od środkowej warstwy próbki

Podstawiając do równania (5) znane wartości grubości g_m i g_σ otrzymujemy:

$$M_g = 0,1b(1-0,05)\sigma_x = 0,095\sigma_x b \quad (6)$$

Podstawiając zależność (6) do równania (4) i przekształcając otrzymujemy:

$$\sigma_x = \frac{8EIy}{l^2 b 0,095} \quad (7)$$

Obliczono wartość momentu bezwładności przekroju badanych próbek i umowne naprężenia (tab. 1).

Tabela 1. Moment bezwładności i naprężenia umowne w warstwach wierzchnich próbek

Table 1. Moment of inertia and conventional stresses in surface layer

Próbki	AW 2024T3	C35
moment bezwładności, mm ⁴	13,3	
Naprężenia, MPa	390	418

Piaskowanie powierzchni zewnętrznych zakładkowych połączeń klejowych po utwardzeniu ich spoin powinno wprowadzić do łączonych blach naprężenia, które powinny zmniejszyć wartość naprężeń w obciążonych spoinach i w ten sposób zwiększyć wytrzymałość połączeń.

Badania eksperymentalne

Celem prowadzonych badań było porównanie wytrzymałości próbek zakładkowych o szerokości 25 mm, sklejonych klejem Epidian 57/Z1, z próbkami piaskowanymi po sklejeniu i utwardzeniu spoin. Przygotowano po 5 zestawów próbek sklejonnych zakładkowo. Porównywane próbki przygotowano do klejenia w jednakowy sposób. Przygotowanie powierzchni do klejenia polegało na obróbce strumieniowej elektrokorundem F40

Tabela 2. Wyniki badań eksperymentalnych
Table 2. Results of experimental tests

	rodzaj próbki	AW 2024T3	AW 2024T3	AW 2024T3	C35	C35
przygotowanie powierzchni		piaskowanie	plótno ścierne	plótno ścierne	piaskowanie	piaskowanie
długość zakładki, mm		25	25	12	22	12,5
Nośność, N	zwykle	4958,6±873,9	2961±393	3520± 393,3	7020± 262,2	5967,2±291,8
	piaskowane	5969,6±641,8	4692,6±335	4420± 382,6	7270± 521,5	6318,6±242,1
Wytrzymałość na ścinanie, MPa	zwykle	8,02±1,41	4,74±0,63	11,95 ± 1,34	12,76 ± 0,48	19,1±0,93
	piaskowane	9,53±1,02	7,51±0,54	14,88 ± 1,29	13,22 ± 0,95	20,22±0,77
Przyrost wytrzymałości, %		19	58	26	4	5

przez 30 s przy ciśnieniu 0,5 MPa lub szorstkowaniu płótnem ściernym numer 80, a następnie przemywaniu benzyną ekstrakcyjną, która była odparowywana w suszarce laboratoryjnej. Bezpośrednio po przygotowaniu powierzchni sklejało 10 próbek. Utwardzanie spoin przeprowadzono dwustopniowo: 24 h w temperaturze pokojowej i 5 h w temperaturze 80°C. Połowa ze sklepanych próbek była poddawana ponownemu piaskowaniu po utwardzeniu spoin. W celu uzyskania podobnych grubości spoin umieszczono w nich nitki dystansowe. Po utwardzeniu próbek usuwano wycieki kleju w celu eliminacji efektu wypływek. Średnią wytrzymałość połączeń określono na podstawie pięciu próbek i obliczono przedziały ufności dla poziomu ufności $1-\alpha = 0,95$. Badania zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Hung-Ta HT-2402 przy prędkości rozciągania 2 mm/min (tab. 2).

We wszystkich badaniach stwierdzono wzrost wytrzymałości próbek piaskowanych po utwardzeniu spoiny. Większy wzrost wytrzymałości uzyskano przy mniej efektywnym sposobie przygotowania powierzchni do klejenia. Większy wzrost wytrzymałości uzyskano dla próbek o dłuższej zakładce oraz dla próbek duralowych w porównaniu ze stalowymi. Największy wzrost wytrzymałości uzyskano klejąc duralowe próbki na zakładkę 25 mm,

których powierzchnie przygotowano do klejenia metodą obróbki płótnem ściernym.

Analiza numeryczna

Przeprowadzono obliczenia numeryczne w systemie Ansys w celu analizy przyczyn wzrostu wytrzymałości połączeń zakładkowych poddanych procesowi piaskowania po utwardzeniu spoin klejowych. Model połączenia elementów ze stopu aluminium klejonych na zakładkę o długości 25 mm przedstawiono na rys. 3.

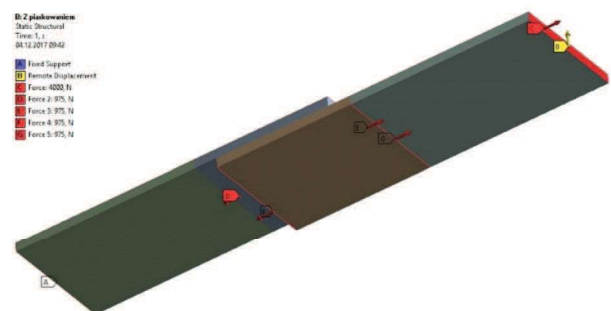
Efekt umocnienia zgniotem piaskowanej powierzchni zamodelowano przez obciążenie siłami rozciągającymi powierzchniowych warstw klejonych elementów poddanych piaskowaniu. Wartość sił obciążających wynikała z obliczonych naprężeń (tab. 2) oraz pola przekroju poprzecznego umocnionej warstwy (0,1 × 25 mm). Model połączenia zakładkowego obciążano:

- siłą rozciągającą 4000 N,
- siłą rozciągającą 4000 N i siłami modelującymi efekt piaskowania powierzchni (rys. 4),
- tylko siłami modelującymi efekt piaskowania powierzchni.

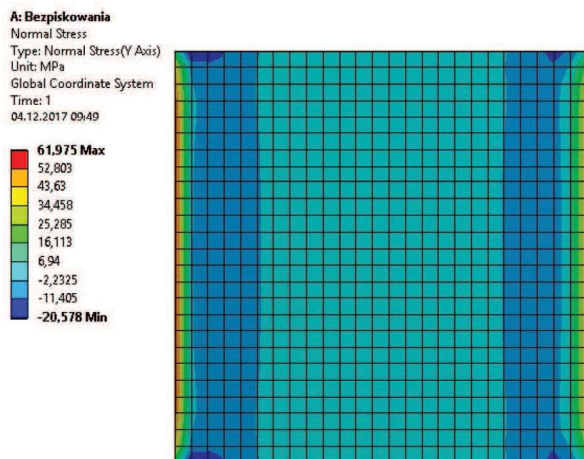
Porównano rozkłady naprężeń w spoinie: maksymalnych głównych, normalnych prostopadłych do powierzchni spoin klejowych (rys. 5–7) i naprężeń stycznych.



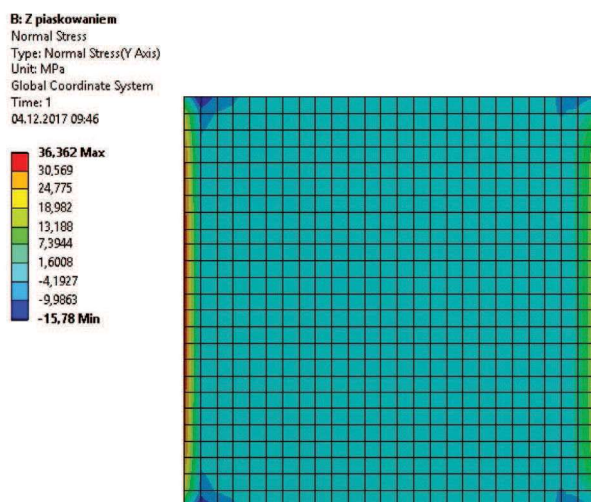
Rys. 3. Model połączenia zakładkowego
Fig. 3. Numerical model of lap joint



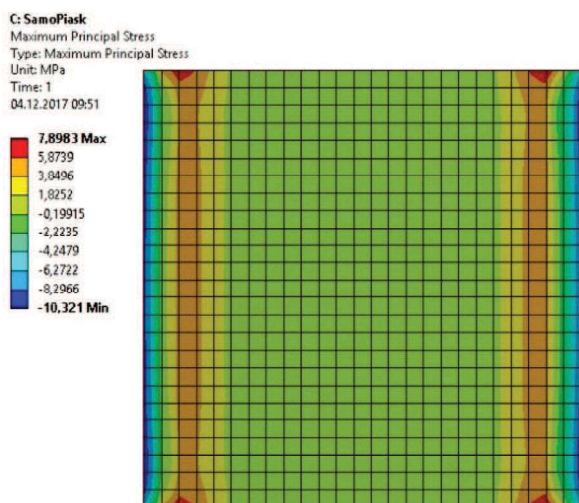
Rys. 4. Model obciążenia próbki
Fig. 4. Model of specimen loading



Rys. 5. Mapa naprężeń normalnych – obciążenie 4000 N
Fig. 5. Stress normal pattern – loading 4000 N



Rys. 6. Mapa naprężeń normalnych – obciążenie 4000 N + 4 × 975 N
Fig. 6. Stress normal pattern – loading 4000 N + 4 × 975 N



Rys. 7. Mapa naprężeń normalnych – obciążenie 4 × 975 N
Fig. 7. Stress normal pattern – loading 4 × 975 N

Maksymalne wartości analizowanych naprężeń zamieszczono w tab. 4.

Tabela 4. Porównanie wartości maksymalnych naprężeń dla różnych wariantów obciążenia

Table 4. Comparison of maximum stresses value for different loading variant

Obciążenie	4000 N	4000 + 4 × 975 N	4 × 975 N
Naprężenia, MPa			
σ_x	89,9	65,2	-10,3
σ_y	62	36,4	-24,5
τ_{xy}	39,5	35,2	3

Przeprowadzone obliczenia numeryczne wykazały, że w połączeniu zakładkowym o długości zakładki 25 mm naprężenia normalne dodatnie prostopadłe do powierzchni spoiny osiągają większe wartości od naprężeń stycznych i one głównie decydują o wyężeniu spoiny. Efektem wprowadzenia zgniotu do powierzchni łączonych elementów po utwardzeniu spoiny jest ich odkształcenie skutkujące powstaniem w spoinie naprężeń normalnych ujemnych, co powoduje zmniejszenie naprężeń normalnych wynikających z obciążenia połączenia. Spowodowany tym wzrost wytrzymałości połączenia ocenianego na podstawie wartości naprężeń maksymalnych głównych może wynieść 27%.

Wnioski

Obróbka powierzchniowa zgniotem powierzchni klejonych elementów połączeń zakładkowych po utwardzeniu spoin klejowych może powodować odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej co skutkuje odkształceniami łączonych elementów, spadkiem naprężeń normalnych w spoinach i wzrostem wytrzymałości połączeń.

W celu numerycznego modelowania połączeń klejowych poddawanych obróbce powierzchniowej zgniotem, odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej można zastąpić obciążeniem siłami powierzchniowymi obliczonymi według zaproponowanej metodyki.

Z badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych wynika, że wzrost wytrzymałości wynikający z zastosowania obróbki powierzchniowej zgniotem klejonych elementów połączeń zakładkowych po utwardzeniu ich spoin może wynieść od kilkunastu do kilkudziesięciu procent.

Większy wzrost wytrzymałości połączeń klejowych, wynikający z obróbki powierzchniowej zgniotem po utwardzeniu spoin, dotyczył połączeń, w których zastosowano mniej efektywny sposób przygotowania powierzchni do klejenia, a więc o mniejszej wytrzymałości adhezyjnej.

LITERATURA

- [1] Cagle Ch.V. 1977. „Kleje i klejenie”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [2] Czaplicki J. i in. 1987. „Klejenie tworzyw konstrukcyjnych. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [3] Klein B. 1994. „Leichtbau – Konstruktion Berechnungsgrundlagen und Gestaltung Vieweg“. Verlag GmbH. Braunschweig-Wiesbaden.
- [4] Mirski Z., T. Piwowarczyk. 2008. „Historia klejenia – od prehistorii do dzisiaj”. *Przegląd Spawalnictwa* (8).
- [5] Ptakowska-Wyżanowicz H. 1961. „Klejenie metali”. Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Techniczne.
- [6] Zielecki W., K. Korzyńska. 2017. „Analiza wpływu wybranych parametrów pneumokulowania na nośność jednozakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (1): 55–59.
- [7] Zielecki W., K. Korzyńska. 2016. „Umacnianie zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V metodą pneumokulowania”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (1): 44–47.

prof. dr. hab. inż. Jan Godzimirski – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, ul. gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

inż. Anna Jagiełło – studentka Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, ul. gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa