

# Analiza wpływu obciążenia termomechanicznego na wytrzymałość połączenia z nitem zrywalnym

## Analysis of the thermomechanical load impact on the riveted joint strength

JACEK MUCHA  
WALDEMAR WITKOWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.2.35>

Prezentowane wyniki analizy eksperymentalnej wytrzymałości pojedynczego złącza w próbie ścinania w temperaturze 23, 400, 600 i 800°C. Pozwola one wyjaśnić, jak temperatura obciążenia złącza wpływa na jego charakterystykę wytrzymałościową. W badaniach wykorzystano stalową blachę S350GD z powłoką cynkową.

**SŁOWA KLUCZOWE:** wytrzymałość połączeń nitowych, obciążenie termomechaniczne, S350GD+Z275

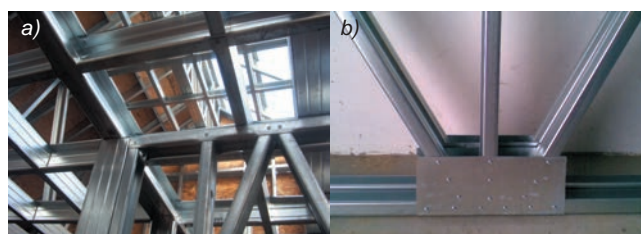
*Presented was the results of experimental analysis of single riveted joints strength. The joints shear strength was determined in temperature of 23, 400, 600, 800 Celsius degrees. The obtained results helped to explain how the temperature affects on the joint load characteristic. The experimental research was carried out for zinc coated S350GD sheet metal material.*  
**KEYWORDS:** riveted joint strength, thermomechanical load, S350GD+Z275

W ostatnim okresie w branży konstrukcji budowlanych znacząco wzrosło zastosowanie lekkich konstrukcji ze stalowych elementów zimno giętych. Podstawowymi zaletami konstrukcji wykonanych z lekkich kształtowników profilowanych na zimno są niewielka masa i czas montażu, który jest nawet o 30% krótszy w porównaniu z pozostałymi konstrukcjami stalowymi [1].

Gama technik spajania elementów cienkościennych jest szeroka. Wybór rodzaju połączenia zależy od szeregu czynników: materiałowych, wytrzymałościowych i technologicznych, a także od rodzaju i przeznaczenia konstrukcji. Proces projektowania konstrukcji, w tym węzłów spajanych, powinien uwzględniać zalecenia zawarte w normie EN 1993-1-8 [2].

Profile cienkościenne łączy się w różny sposób, najczęściej nitami zrywalnymi [3–6], śrubowymi (w przypadku konstrukcji kompozytowych) [1, 7, 8] lub specjalnymi nitami rurkowymi [9–12]. Analiza eksperymentalna ścinania złączy wykonanych w nowych systemach scalania elementów konstrukcji stalowych została przedstawiona w [13]. Znalazły się w niej wyniki badań ścinania podwójnych połączeń (np. SPR, *clinching*) z miękkiej blachy stalowej S235JR o grubości 2 mm.

Nowe rozwiązania nie zawsze zapewniają odpowiednią wytrzymałość. Dlatego nadal stosuje się klasyczne technologie nitowania nitami pełnymi zakuwanymi czy zrywalnymi, zwłaszcza w konstrukcjach obiektów użyteczności publicznej oraz domów mieszkalnych – gdzie połączenia muszą być pewne (rys. 1).



Rys. 1. Połączenia nitowe w cienkościennych konstrukcjach z profili zimno giętych: a) fragment ścianki działowej, b) węzeł z czterech profili

Rurkowe nity zrywalne należą do licznej grupy elementów łączących wykorzystywanych w montażu cienkościennych konstrukcji. Tego typu łączniki pozwalają na wysoko wydajny montaż. Za pomocą nitów wykonywane są trwałe, nierozłączne połączenia, wymagają one jednak przygotowania wcześniej otworu i odpowiedniego pozycjonowania elementów, by możliwe było umieszczenie łącznika. Gotowe złącze zajmuje stosunkowo mało miejsca, jego wykonanie nie jest skomplikowane i wymaga dostępu tylko z jednej strony do łączonych elementów. Obecne rozwiązania złącza nitowego wykazują dość zróżnicowaną maksymalną nośność – od kilku do kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu kN. Są tak proste i interesujące z punktu widzenia nośności, że prowadzone są badania nad możliwością łączenia bez konieczności wcześniejszego wykonywania otworu [14, 15].

### Zakres, metodyka i badania wytrzymałości

Złącza nitowe wykonano z wykorzystaniem stalowej blachy S350GD+Z275 (według EN 10326 nr mat. 1.0529) o grubości  $1 \pm 0,05$  mm, ocynkowanej ogniowo powłoką 275 g/m<sup>2</sup> o grubości ~20 μm. S350GD (1.0529) należy do grupy stali konstrukcyjnych o podwyższonej odporności na korozję dzięki zastosowaniu powłoki galwanicznej. Tego rodzaju stal nadaje się m.in. na zewnętrzne elementy konstrukcji narażone na działanie czynników atmosferycznych. Jej podstawowe właściwości mechaniczne zestawiono w tabl. I, natomiast skład chemiczny – w tabl. II.

TABLICA I. Właściwości mechaniczne materiału S350GD

$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_{80}$ , %	$n$	$E$ , GPa
350	420	16	0,3	2,09

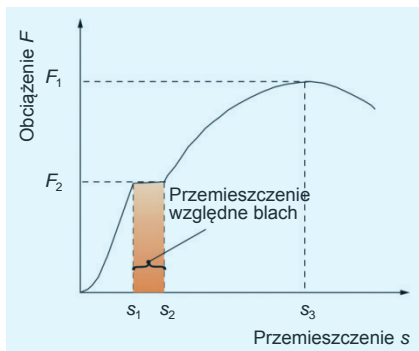
TABLICA II. Skład chemiczny materiału S350GD

Skład w % – wartości maksymalne					
C	Mn	P	S	Si	Fe
0,20	1,50	0,10	0,04	0,60	reszta

\* Dr hab. inż. Jacek Mucha (j\_mucha@prz.edu.pl), mgr inż. Waldemar Witkowski (wwitkowski@prz.edu.pl) – Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

Połączenia z nitami zrywalnymi zostały uformowane w jednakowych warunkach. Jednak trudno jest zachować dużą powtarzalność w uformowaniu przez spęczenie części rurkowej [16]. Średnica stalowego nitu oraz otworu pod nit wynosiła 5 mm. Wykonano po pięć prób wytrzymałościowych w każdej temperaturze.

W przypadku ścinania złącza nitowego z trzpieniem pełnym w temperaturze otoczenia (23°C) obserwuje się stabilizację siły w określonym zakresie przemieszczenia wymuszającego (rys. 2 – od  $s_1$  do  $s_2$ ).



Rys. 2. Przeniesienie obciążenia w złączu nitowym

W typowym złączu nitowym obciążenie przeniesione jest przez siłę tarcia ( $T$ ) pomiędzy stykiem łączonych pasm blach:

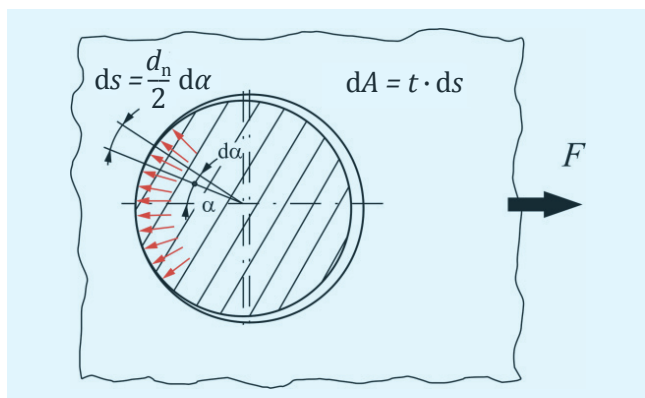
$$T = \frac{\mu \sigma_r \pi d_n^2}{4} \quad (1)$$

gdzie:  $\mu$  – współczynnik tarcia,  $\sigma_r$  – naprężenia rozciągające w nite wywołane w procesie spęczania walcowej części nitu,  $d_n$  – średnica nitu.

Konstruktorzy cienkościennych konstrukcji w celu uproszczenia technologii montażu stosują często to samo narzędzie do wykonywania otworów dla różnych nitów. Luz pomiędzy otworem a średnicą części rurkowej nitu podczas obciążania złącza powoduje, że ich kontakt zachodzi na mniejszej powierzchni (rys. 3). Po przekroczeniu obciążenia równoważnego dla pokonania sił tarcia siła wynikająca z nośności powierzchni jest równa:

$$F = \int_0^\alpha p \cdot \cos \alpha \cdot t \cdot \frac{d_n}{2} d\alpha \quad (2)$$

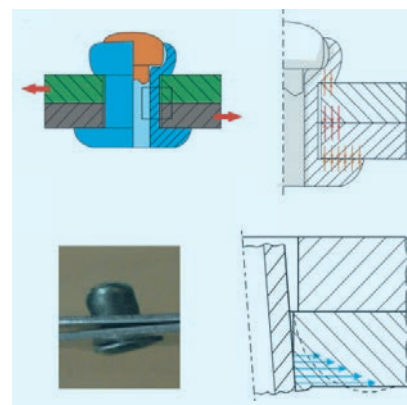
gdzie:  $p$  – naciski dopuszczalne,  $t$  – grubość łączonego elementu,  $\alpha$  – obwodowy kąt zakresu kontaktu dwóch powierzchni walcowych (otworu blachy i nitu).



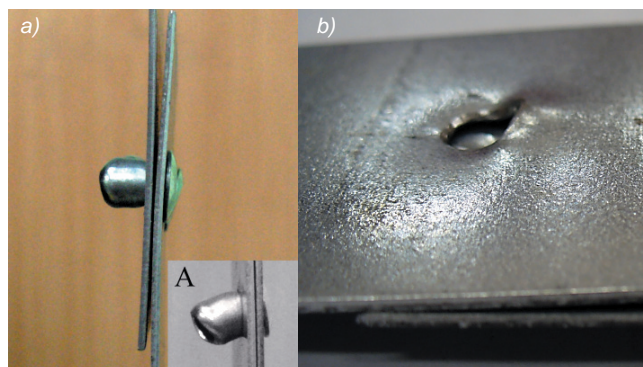
Rys. 3. Rozkład nacisków na ścianie otworu blachy

Opisany schemat obciążenia występuje w przypadku nitu rurkowego. Materiał części rurkowej przenosi obciążenia w złączu (rys. 4), głowa rdzenia zablokowana w spę-

Rys. 4. Oddziaływanie nitu na powierzchnię otworu blach podczas ścinania



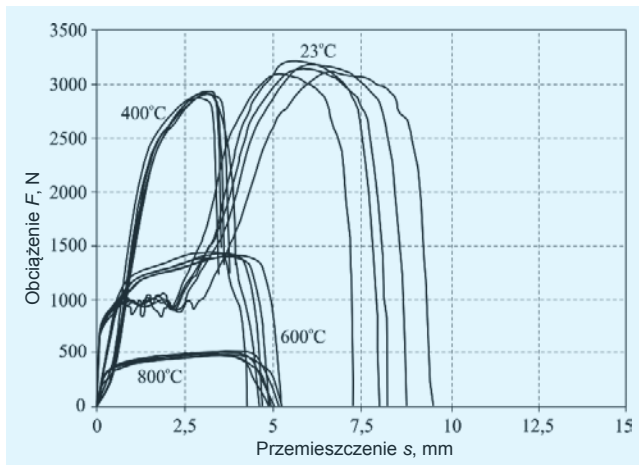
czonej części dociska łączone blachy i blokuje łączone elementy. Po przekroczeniu nośności sił tarcia w początkowej fazie obciążenia naprężenia koncentrują się wzdłuż powierzchni części rurkowej nitu. W miarę zwiększania się przemieszczenia szcęk uchwytu nit w połączeniu ulega obróceniu (szczegół na rys. 5a). Nit intensywniej oddziałuje na powierzchnię blachy i odkształca materiał wokół otworu (rys. 5b). W połączeniach zakładkowych blachy oprócz rozciągania doznają dodatkowo zginania, natomiast ścinanie nitów występuje w jednym przekroju.



Rys. 5. Próba ścinania złącza nitowego (23°C): a) odkształcenie nitu, b) odkształcenie blachy wokół otworu

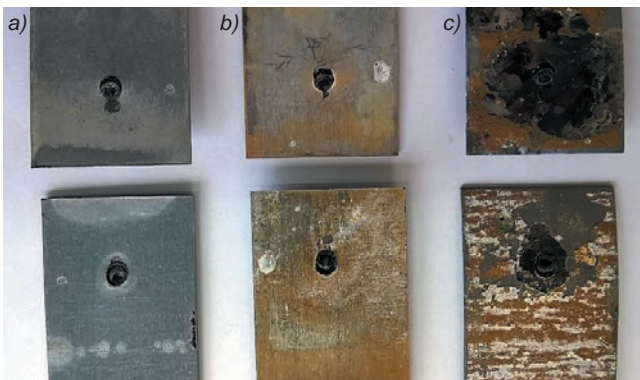
W przypadku charakterystyki ścinania złącza w temperaturze pokojowej obserwuje się przystanek (zakres stałości siły obciążającej) na poziomie 800÷900 N (rys. 6). Siła oscyluje w pobliżu 850 N, a jednocześnie zwiększa się przemieszczenie trawersy maszyny wytrzymałościowej. W trakcie realizacji testu ścinania w przedziale przemieszczenia wymuszającego od 0,65 mm do ok. 2,05 mm następowało wykasowanie luzu pomiędzy łącznikiem a otworem blach oraz przesunięcie głowy rdzenia. Dalsze przenoszenie obciążenia bez odkształceń części rurkowej nitu nie jest możliwe. Wzrastająca siła jest wynikiem zachodzenia mechanizmów odpowiadających za plastyczne odkształcenia w nite.

Maksymalna siła ścinająca złącze nitowe osiągnęła 3160 N (rys. 6). Zwiększenie obciążenia temperaturowego do 400°C podczas próby wytrzymałościowej zmieniło przebieg charakterystyki siłowej złącza. Utlenienie powłoki cynkowej spowodowało zablokowanie przemieszczania się blach względem siebie w wyniku zwiększenia tarcia oraz wpływu rozszerzalności materiału blach. Od razu nastąpiło przeniesienie obciążenia przez połączenie. Pod wpływem działania temperatury 400°C osiągnięto niższą o 9% maksymalną wytrzymałość połączenia w porównaniu ze złączem ścinanym w temperaturze 23°C. Kolejne próby ścinania dotyczyły tego samego połączenia, ale temperatura wynosiła 600 i 800°C.

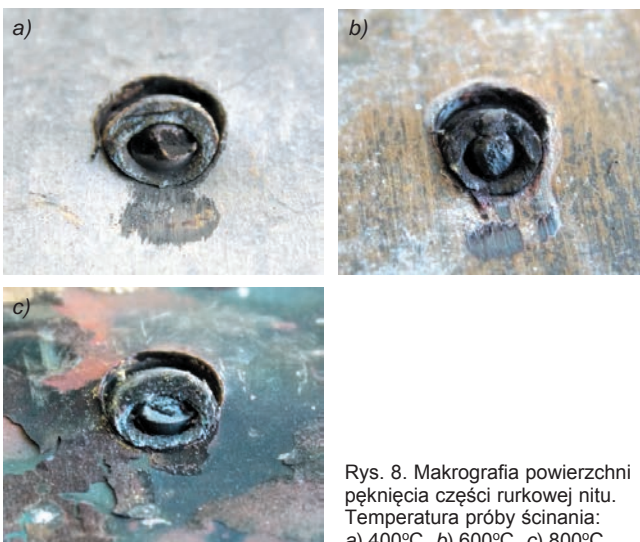


Rys. 6. Krzywe ścinania

Jak już wspomniano, w trakcie wygrzewania próbek do uzyskania żądanej temperatury próby ścinania powłoka cynkowa na powierzchni blach utleniła się (rys. 7). W miarę zwiększania obciążenia pola naprężeń przemieszczały się ku zewnętrznej krawędzi otworów blach. Im wyższa temperatura próby ścinania, tym bardziej nasilał się ten efekt. Zablockowana głowa rdzenia uniemożliwiła ścinanie części rurkowej w płaszczyźnie kontaktu blach. Utrata spójności materiału części rurkowej nitu wystąpiła tuż przy zakończeniu rdzenia (rys. 8).



Rys. 7. Pasma blach złącza po teście ścinania w ogrzewanej komorze w temperaturze: a) 400°C, b) 600°C, c) 800°C



Rys. 8. Makrografia powierzchni pęknięcia części rurkowej nitu. Temperatura próby ścinania: a) 400°C, b) 600°C, c) 800°C

## Podsumowanie

Nośność połączenia nitowego drastycznie spada wraz z podwyższaniem temperatury podczas próby ścinania. Powierzchnie kontaktu zmieniają się w wyniku szybszego uplastycznienia materiału w miarę wzrostu temperatury. Im wyższa temperatura próby, tym mniejsze uzyskano rozbieżności w przebiegu charakterystyki siłowej.

Wraz ze wzrostem temperatury podczas testu obciążania złącza malała nośność złącza oraz różnica pomiędzy maksymalną nośnością a nośnością w zakresie liniowym. Wpływ temperatury podczas próby znacząco obniżał wytrzymałość złącza. Najmniejsza różnica maksymalnej wytrzymałości wystąpiła w przypadku próby ścinania dla temperatury 23 i 400°C, a największa – przy wzroście temperatury z 400 do 600°C.

**Praca powstała dzięki współpracy Katedry Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej z firmą Stalart Sp. z o.o. Autorzy składają podziękowania kierownikowi Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego prof. dr. hab. inż. Janowi Sieniawskiemu za umożliwienie wykonania badań wytrzymałościowych.**

## LITERATURA

- Dano M.L., Gendron G., Picard A. "Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates". *Compos. Struct.* 50 (2000): s. 287–296.
- EN 1993-1-8, Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints; 2005.
- Mucha J., Witkowski W. "The experimental analysis of the double joint type change effect on the joint destruction process in uniaxial shearing test". *Thin Wall. Struct.* 66 (2013): s. 39–49.
- Bayan A., Sariffuddin S., Hanim O. "Cold formed steel joints and structures – a review". *Int. J. Civil Struct. Eng.* 2, 2 (2011): s. 621–634.
- Lu W., Mäkeläinen P., Outinen J., Ma Z. "Design of screwed steel sheeting connection a tantient and elevated temperatures". *Thin Wall. Struct.* 49 (2011): s. 1526–1533.
- Childs P. "Fastening and Power Screws". *Mechanical Design Engineering Handbook*. Elsevier Ltd., 2014, s. 677–719.
- Matsuzaki R., Shibata M., Todoroki A. "Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method". *Compos. Part A-Appl S.* 39 (2008): s. 154–163.
- Kolesnikov B., Herbeck L., Fink A. "CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints". *Compos. Struct.* 83 (2008): s. 368–380.
- Moroni F., Pirondi A., Kleiner F. "Experimental analysis and comparison of the strength of simple and hybrid structural joints". *Int. J. Adhes. Adhes.* 30 (2010): s. 367–379.
- Di Franco G., Fratini L., Pasta A. "Influence of the distance between rivets in self-piercing riveting bonded joints made of carbon fiber panels and AA2024 blanks". *Mater. Des.* 35 (2012): s. 342–349.
- Di Franco G., Fratini L., Pasta A. "Analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single-lap joints between CFRP panels and aluminum blanks". *Int. J. Adhes. Adhes.* 41 (2013): s. 24–32.
- Masahito Ueda M., Miyake S., Hasegawa H., Hirano Y. "Instantaneous mechanical fastening of quasi-isotropic CFRP laminates by a self-piercing rivet". *Compos. Struct.* 94 (2012): s. 3388–3393.
- Di Lorenzo G., Landolfo R. "Shear experimental response of new connecting systems for cold-formed structures". *Journal of Constructional Steel Research.* 60, 3–5 (2004): s. 561–579.
- Mucha J., Witkowski W. Nit rurkowy do nitowania, zwłaszcza tarciowego. Zgłoszenie Patentowe UP RP: P.404729 (16.07.2013).
- Min J., Li Y., Carlson B.E., Hu S.J., Li J., Lin J. "A new single-sided blind riveting method for joining dissimilar materials". *CIRP Annals – Manufacturing Technology.* 64, 1 (2015): s. 13–16.
- Kelly B., Costello C. "FEA modelling of setting and mechanical testing of aluminum blind rivets". *J. Mater. Process. Technol.* 153–154 (2004): s. 74–79.