

Nitowanie bezotworowe blach miedzianych – wybrane aspekty

Selected aspects of SPR copper sheets joining

Streszczenie

Metoda bezotworowego nitowania blach swój rozwój zawdzięcza głównie zmieniającym się wymaganiom w przemyśle motoryzacyjnym ze względu na zastosowanie nowych materiałów, zwłaszcza na elementy karoserii, i konieczności ich efektywnego łączenia. Obserwowane tendencje do stosowania w konstrukcjach elementów lekkich, a przy tym wytrzymałych, wykonanych ze stopów aluminium, kompozytów, tworzyw sztucznych itd., są tego przykładem. W referacie zaprezentowano wybrane aspekty prób zastosowania procesu nitowania bezotworowego do łączenia blach miedzianych. Zastosowano opracowaną wcześniej procedurę modelowania numerycznego procesu tworzenia połączenia i jego obciążania. Analizy numeryczne zostały zweryfikowane eksperymentalnie przy wykorzystaniu przemysłowego stanowiska badawczego wykorzystującego specjalny przyrząd wyposażony w zaprojektowany tor pomiarowy. Do symulacji wykorzystano komercyjne oprogramowanie ogólnego przeznaczenia MSC.Marc, służące m.in. do modelowania zjawisk o charakterze nieliniowym. Zaprezentowane wyniki mają charakter jakościowy i stanowią początek działań podejmowanych w ramach współpracy z firmą produkcyjną, mającej na celu optymalizację oraz opracowanie wewnętrznych wytycznych do projektowania połączeń blach miedzianych.

Słowa kluczowe: nitowanie bezotworowe; łączenie mechaniczne; modelowanie numeryczne

Abstract

The self-piercing riveting – SPR – for sheet metal joining owes its development mainly to the changing requirements of the automotive industry due to the use of new materials, especially for the body parts, and the need for their efficient joining. The observed trends to use for the structural components lightweight, yet durable, aluminum alloys, composites, plastics, etc., are examples of this tendency. The paper presents selected aspects of the attempts to use the SPR method for joining copper sheets. A numerical modeling of the process of joint formation and its loading was introduced. These analysis were verified experimentally using an industrial set-up consisting of a mobile unit for riveting equipped with a specially designed components for a measuring track setting. Simulation were carried out with commercial software based on the finite element method MSC.Marc, dedicated for the non-linear analysis. The presented results are of a qualitative nature and are the beginning of activities undertaken in cooperation with the production company, aimed at optimizing and developing internal guidelines for the design of copper sheet joints.

Keywords: self-piercing riveting; mechanical joining; numerical modeling

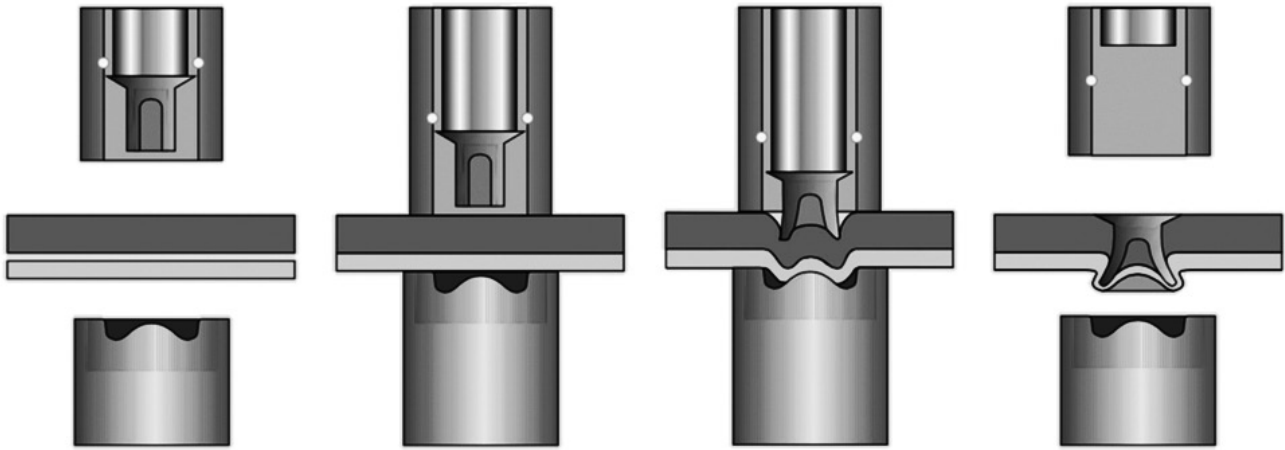
Wstęp

Nitowanie bezotworowe (ang. *self-piercing riveting* – SPR) jest techniką łączenia pod naciskiem wykorzystującą nit o specjalnym, rurowym kształcie, zwykle wykonany ze stali niskostopowej, do łączenia dwóch lub więcej arkuszy blach. Klasyfikowana jest w obszarze obróbki plastycznej ze względu na charakter odkształcenia materiałów łączonych jak i elementu łączącego, czyli nitu. W czasie procesu łączenia dochodzi do przebicia górnej blachy (blach) i zagłębienia nitu wraz z jego odkształceniem w blasze dolnej, schemat na rysunku 1. W tak prawidłowo wykonanym połączeniu, przy zapewnieniu ciągłości dolnej blachy, utrzymana zostaje szczelność i odpowiednia wytrzymałość. Siła wymagana

do utworzenia tego typu połączenia zależy przede wszystkim od rodzaju materiałów i ich grubości. W przypadku blach z metali nieżelaznych wartości osiągniętych sił dochodzą do 50 kN, natomiast dla łączonych blach stalowych mogą być wyższe i osiągać w pewnych przypadkach 100 kN. Nitowanie techniką SPR jest stosowane przede wszystkim w przemyśle motoryzacyjnym, np. przy łączeniu elementów karoserii i części nadwozia. Ostatnimi czasy rozszerzył się zakres zastosowań tej metody, głównie ze względu na rozwój oprzyrządowania oraz popularyzację metody. Można znaleźć przykłady zastosowań w montażu różnego rodzaju instalacji, np. kanałów wentylacyjnych czy w elementach

Dr inż. Robert Cacko, dr inż. Jacek Goliński, dr inż. Piotr Czyżewski – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: r.cacko@wip.pw.edu.pl



Rys. 1. Schemat procesu łączenia – główne etapy [2]
Fig. 1. Self-piercing riveting outline [2]

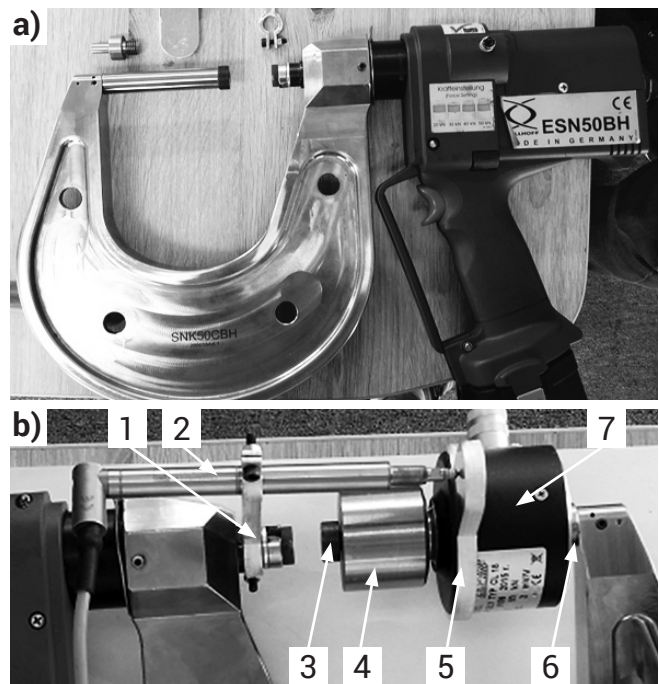
nośnych wykonanych z blach lub profili otwartych o niewielkiej grubości, takich jak wszelkiego rodzaju obudowy, stelaże, kratownice itp. W ostatnich latach opracowano wiele artykułów dotyczących zarówno opisu czynników wpływających na jakość tego rodzaju połączeń, np. [1÷3], jak i technik ich projektowania/optimalizacji, np. [4÷8].

Stanowisko badawcze

W próbach eksperymentalnych wykorzystano specjalny przyrząd mobilny do nitowania o napędzie elektro-hydraulicznym ESN50BH, stanowiący część zestawu RIVSET® HTF 50 kN firmy Böllhoff, w którym elektryczny silnik zasila hydrauliczny tłok o maksymalnej sile nacisku stempla 50 kN, rysunek 2a. Poza standardowym wyposażeniem zestaw jest uzupełniony o niestandardową C-ramę SNK50CBH, umożliwiającą nitowanie w większej odległości od krawędzi blach – maksymalnie ok. 120 mm. Wybrane dane dotyczące urządzenia zestawiono poniżej:

- masa: ok. 7,7 kg (z akumulatorem),
- siła nacisku: do 50 kN,
- napięcie: 12 V DC,
- czas nitowania: 3÷5 s,
- wydajność: ok. 300 nitowań/jedno ładowanie akumulatora.

W celu dokonania pomiaru sił oraz przemieszczeń stempla w procesie łączenia konieczne było uzbrojenie urządzenia w dodatkowe elementy pomiarowe oraz zmodyfikowanie mocowania matrycy. W tym celu zaprojektowano mocowanie czujników siły, przemieszczenia uwzględniając zakres przestrzeni roboczej i zakresu przemieszczeń stempla. W celu montażu czujnika siły zostały wykonane dwa specjalnie zaprojektowane elementy pośrednie: sworzень umieszczony w gnieździe matrycy C-ramy z gwintem w celu osadzenia czujnika oraz wałek z wytoczonymi otworami obu stron – z jednej w celu osadzenia na czujniku i drugiej w celu osadzenia w nim matrycy z zestawu nitownicy. Do pomiaru przemieszczenia nitu zastosowano pojemnościowy czujnik przemieszczenia WA10 firmy HBM o zakresie pomiaru 0÷10 mm. W celu pomiaru przemieszczenia stempla konieczne było odpowiednie zamocowanie czujnika przemieszczenia oraz zderzaka, na którym czujnik byłby pozycjonowany. Do przeprowadzenia pomiarów obydwu wielkości zastosowano wzmacniacz pomiarowy Spider 8 firmy HBM, który był podłączony bezpośrednio do komputera wyposażonego w odpowiednią kartę z gniazdem umożliwiającym podłączenie wzmacniacza. Tor pomiarowy uzupełniał przetwornik analogowo-cyfrowy, sparowany przez producenta i zapewniający odpowiednią kalibrację czujnika. Czujnik przemieszczenia



Rys. 2. Przyrząd do nitowania firmy BÖLLHOFF model ESN50BH (a), wraz z zaprojektowanym układem pomiarowym (b): 1 – element mocujący czujnik przemieszczeń, 2 – czujnik przemieszczeń, 3 – matryca, 4 – łącznik, 5 – zderzak, 6 – element mocowania czujnika siły, 7 – czujnik siły

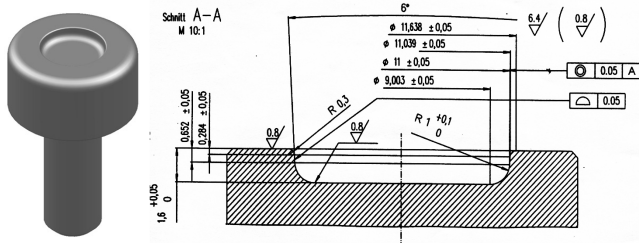
Fig. 2. BÖLLHOFF riveting set ESN50BH (a), including a measuring system (b): 1 – displacement sensor fastener, 2 – displacement sensor, 3 – die, 4 – connector, 5 – bumper, 6 – force transducer mounting, 7 – force transducer

natomiast był podłączony bezpośrednio do wzmacniacza Spider 8. Nitownicę wraz z osprzętem pokazano na rysunku 2b. Widać na nim mocowanie czujnika przemieszczenia do ruchomej części nitownicy ponad stemplem. Zderzak czujnika przemieszczenia jest zamocowany bezpośrednio do czujnika siły.

Specjalny uchwyt (1), posiadający dwa otwory mocujące został przytwierdzony z jednej strony do ruchomego stempla, natomiast z drugiej strony został zamocowany czujnik przemieszczenia (2). W czujnik siły (7) został wkręcony element mocowania (6), a następnie układ wsunięto w gniazdo matrycy w nitownicy. Na czujnik siły nałożono zderzak (5). Na grzybku czujnika siły nałożono spasowanym otworem łącznik (4), na którym została zamocowana matryca (3).

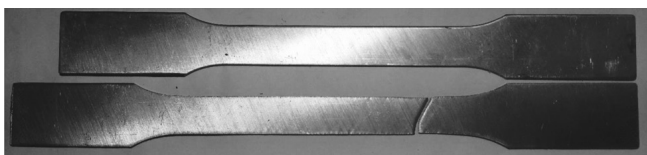
W pierwszej kolejności przeprowadzono kalibrację układu czujników pomiarowych. Rejestracja danych odbywała się

poprzez specjalną aplikację dedykowaną do wzmacniacza Spider 8. Próby były rejestrowane z próbkowaniem 300 Hz, co pozwalało na zgromadzenie wystarczającej liczby punktów pomiarowych w procesie trwającym kilka sekund. Dodatkowo prowadzony był pomiar czasu nitowania. Kalibracja czujnika siły odbyła się przez sparowanie czujnika z przetwornikiem analogowo-cyfrowym dostarczony w zestawie przez producenta. Odczytywane były wartości napięć odpowiadające – w zależności od czujnika – różnym wartościom fizycznym. Dla czujnika siły zachowane były proporcje 10 V – 50 kN, a dla czujnika przemieszczeń 8 V – 10 mm. W przeprowadzonych próbach nitowania zastosowano matrycę z płaskim dnem, rysunek 3.



Rys. 3. Matryca zastosowana w próbach nitowania
Fig. 3. Die applied for tests

W próbach nitowania wykorzystano blachę miedzianą o oznaczeniu M1Ez4. Jest to miedź elektrolityczna o zawartości pierwiastka miedzi minimum 99,9%. Materiał ten cechuje się wysoką plastycznością, bardzo dobrą przewodnością elektryczną i termiczną. Nadaje się do emaliowania, pokrywania warstwami cynku, aluminium oraz wyżarzania. Stosowana jest przede wszystkim w przemyśle elektrycznym, elektrotechnicznym oraz elektronicznym. Produkowana jest w postaci blach, prętów, rur, drutów oraz gotowych wyrobów dla elektrotechniki jak odbiorniki ciepła, klemy itp. Nitowanie bezotworowe staje się coraz popularniejsze również w przemyśle energetycznym głównie ze względu na wysoką wytrzymałość na obciążenia dynamiczne oraz brak ingerencji w strukturę materiału podczas tworzenia połączenia, co nie obniża jego możliwości do przewodzenia prądu. Stąd zainteresowanie zakładów produkujących elementy konstrukcyjne z miedzi. W celu weryfikacji podanych przez producenta własności wykonano siedem serii prób rozciągania standardowych próbek, rysunek 4. Na tej podstawie wyznaczone zostały parametry modelu materiału miedzi zastosowane w opisie materiału w modelowaniu numerycznym, tablica I.

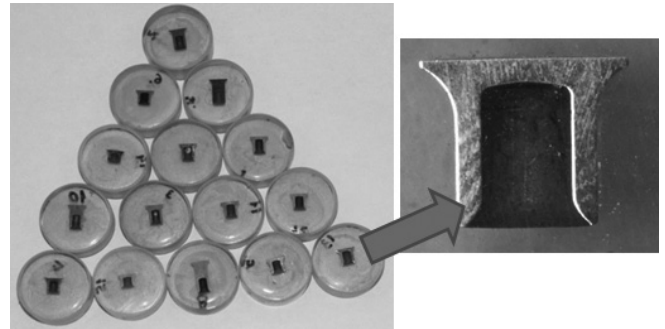


Rys. 4. Próbkę z blachy miedzianej przed i po próbie rozciągania
Fig. 4. Copper specimen before and after stretching test

Tablica I. Zestawienie wybranych wielkości wyznaczonych w próbach rozciągania
Table I. Collection of selected values determined during stretching tests

Nr próbki	R _{0,2} [MPa]	R _m [MPa]	E [GPa]	N	C [MPa]
1	235	301,3	117,1	0,5715	369,6
2	234	308,7	121,5	0,5558	373,0
3	248	303	109,4	0,5549	368,1
4	231	306	118,2	0,5647	390,1
5	234	294	110	0,5841	375,2
Średnia	236,4	302,6	115,24	0,5662	375,2

Próby nitowania przeprowadzono z wykorzystaniem standardowego nitu 5 x 7, rysunek 5. Dane materiałowe do modelowania dla nitu wykorzystano z prac [3,4].



Rys. 5. Rodzaj nitu wybrany do prób, typ 5 x 7
Fig. 5. Selected rivet shape for tests, type 5 x 7

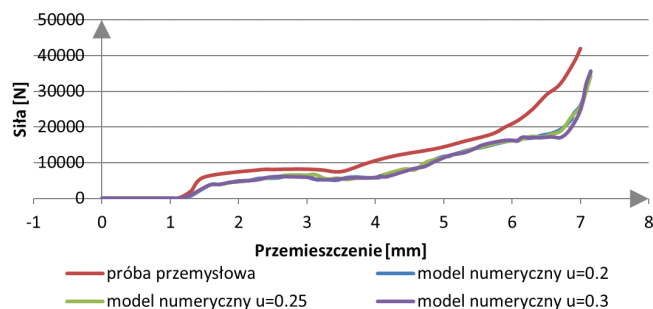
Modelowanie numeryczne

Tworzenie od podstaw kompletnego modelu numerycznego procesu nitowania jest zwykle żmudnym procesem. Spowodowane jest to szeregiem parametrów, które mają wpływ na proces, a których w jednoznaczny sposób nie można wyznaczyć. Stworzony model jest modelem koncepcyjnym, służącym do określenia warunków początkowych do testów na stanowisku badawczym oraz do tworzenia dokładniejszego schematu numerycznego. Proces nitowania był analizowany jako statyczny, izotermiczny i osiowo-symetryczny (2D). W modelowaniu przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału ze wzmocnieniem izotropowym, natomiast narzędzia – matryca, stempel, dociskacz – modelowano jako obszary sztywne. Dane materiałowe uwzględnione w modelu materiału podano w tablicy II. Zastosowano czterowęzłowe elementy skończone, a rozdzielanie górnej warstwy uwzględniono poprzez zastosowanie kryterium pęknięcia Cockcrofta-Lathama. Problemy związane z uwzględnieniem kryterium rozdzielania materiału oraz dopasowanie do algorytmu dynamicznej regeneracji siatki zostały opisane w różnych pracach, między innymi [4]. Tarcie modelowano wykorzystując zmodyfikowany model Coulomba, a przyjęte współczynniki tarcia pomiędzy narzędziami a materiałami odkształcanymi określono na poziomie $\mu=0,15$, natomiast na powierzchniach kontaktu elementów odkształczanych $\mu=0,2$.

Tablica II. Zestawienie wybranych wielkości wyznaczonych w próbach rozciągania
Table II. Collection of selected values determined during stretching tests

Materiał	Moduł Younga [MPa]	Krzywa umocnienia
Stal 10B35 (nit)	210 000	$\sigma_p=639 \cdot \epsilon^{0,246}$
M1 (blacha)	125 000	$\sigma_p=380 \cdot \epsilon^{0,29}$

W ramach optymalizacji modelu numerycznego przeanalizowano wpływ parametrów regeneracji siatki na przebieg symulacji i wyniki końcowe, a także na dopasowanie kryteriów pęknięcia. Z kolei weryfikacja polegała na analizie wpływu współczynnika tarcia na przebieg siły procesu i porównaniu z wynikami testów, rysunek 6. Uzyskano jakościowo dobrą zbieżność wyników. Ilościowe różnice wynikały m.in. z braku uwzględnienia w modelu numerycznym elementów sprężystych zastosowanych w oprzyrządowaniu. Ponadto zaobserwowano niewielki wpływ zmiany współczynnika tarcia na przebieg siły w modelu numerycznym. Modele numeryczne dla układu blach 1-2 mm i 2-1 mm zostały pokazane na rysunku 7 wraz z przykładowymi wynikami obliczeń używanych w trakcie procesu optymalizacji.

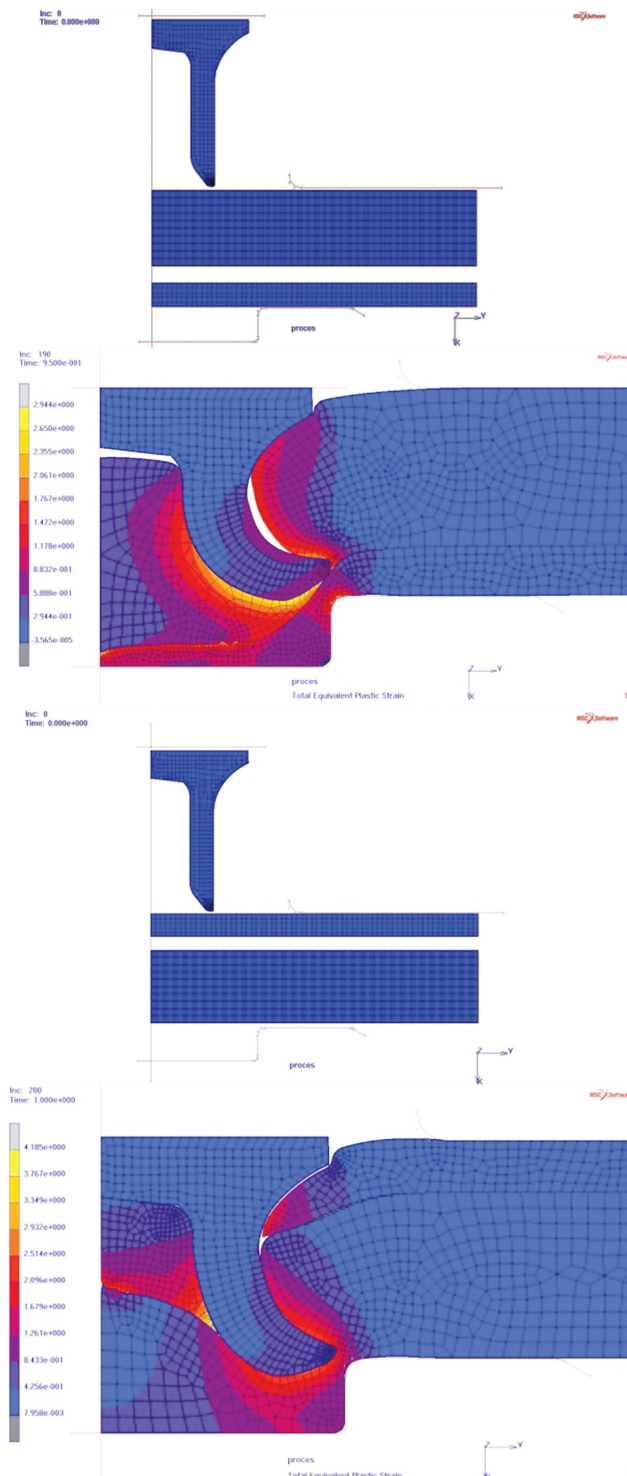


Rys. 6. Porównanie przebiegu siły procesu nitowania dla prób laboratoryjnych i modelowania numerycznego przy różnych współczynnikach tarcia

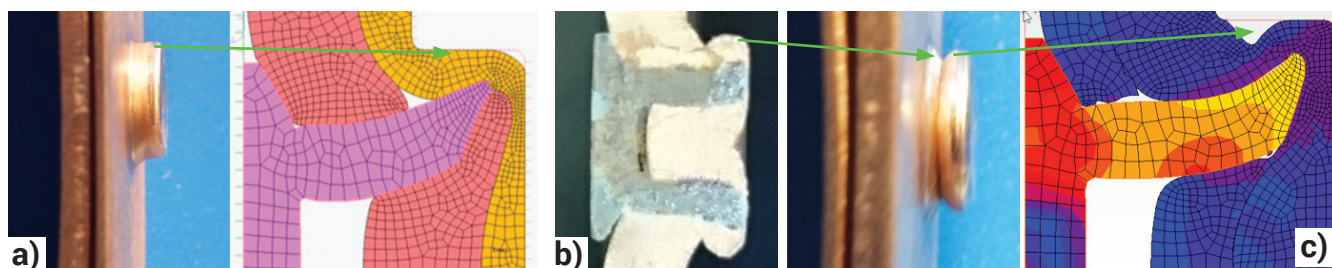
Fig. 6. Comparison of riveting force for laboratory tests and results of numerical modeling with different coefficients of friction

Analiza wyników

Przeprowadzone serie prób nitowania w różnych konfiguracjach ułożenia grubości materiałów blach względem wbijanego nitu: 1-2 mm, 2-2 mm, 2-1 mm, dostarczyły ciekawych informacji na temat łączenia, zwłaszcza układów różnoimiennych. Jednym z głównych kryteriów projektowych obecnie obowiązujących przy projektowaniu połączeń nitowanych bezotworowo jest założenie, że optymalną wytrzymałość uzyskuje się w sytuacji, gdy łączymy blachy w takim układzie, aby blacha cieńsza znajdowała się od strony wbijanego nitu. Sugeruje się, aby górna warstwa materiału była cieńsza, lub równa co do grubości warstwie dolnej. Jeśli nie można spełnić tego warunku, zalecane jest, aby grubość dolnej warstwy była nie mniejsza niż 1/3 grubości całego stosu łączonych elementów. Udokumentowano wiele przypadków łączenia blach stalowych i aluminiowych, w których dochodziło do uszkodzenia dolnej warstwy w innej sytuacji, czyli przy próbie uzyskania połączenia w odwrotnej konfiguracji – blacha grubsza od strony wbijanego nitu. Takie uszkodzenie dolnej warstwy wiąże się ze spadkiem, często znacznym, wytrzymałości połączenia. Przeprowadzone symulacje numeryczne wskazały na możliwość uzyskania połączenia bez przerwania dolnej warstwy w zaproponowanych układach dla blach miedzianych. Zostało to potwierdzone



Rys. 7. Modele numeryczne dla dwóch różnych zestawów procesów nitowania o różnym ułożeniu grubszej blachy względem nitu oraz odpowiadające im przykładowe wyniki symulacji przed optymalizacją



Rys. 8. Braku defektów zewnętrznego kształtu połączenia w próbach testowych i modelowaniu (a) i ich wystąpienie w próbach testowych (b) i modelowaniu numerycznym (c)

Fig. 8. The absence of external joint shape defects in tests and numerical modeling (A) and their occurrence in test (b) and numerical modeling (c)

w testach porównawczych. Ten efekt wymaga zbadania, np. dla innych rodzajów matryc, tzw. profilowanych.

Ponadto w symulacjach komputerowych zaobserwowano dwa zjawiska, które zostały potwierdzone w próbach testowych: tworzenie się wnęki od strony matrycy i brak

wypełnienia materiału pod nitem. Ciekawe jest to, że brak wypełnienia matrycy, a więc z punktu widzenia kryteriów projektowych gorszy kształt dolnej warstwy, uzyskano w potencjalnie lepszym układzie, czyli przy położeniu cieńszej blachy od strony wbijanego nitu, rysunek 8.

Wnioski

Na podstawie wielu eksperymentów badawczych i przemysłowych opracowano podstawowe kryteria projektowania procesu nitowania bezotworowego, ale odnoszą się one przede wszystkim do elementów łączonych ze stali i stopów aluminium:

- całkowita grubość łączonych elementów nie powinna przekroczyć 7 mm dla stali i 12 mm dla aluminium,
- minimalna grubość łączonych materiału dla stali i aluminium powinna wynosić 1,6 mm,
- sugeruje się, aby górna warstwa materiału była cieńsza, lub równa co do grubości warstwie dolnej; jeśli nie można spełnić tego warunku, zalecane jest, aby grubość dolnej warstwy była nie mniejsza niż 1/3 grubości całego stosu łączonych elementów.

Przeprowadzone z wykorzystaniem komercyjnych narzędzi do nitowania wstępne próby produkcyjne z wykorzystaniem jednego profilu matrycy wskazały, że żaden z tych warunków nie musi być spełniony, jeśli chodzi o blachy wykonane z miedzi.

Ponieważ wykorzystano w badaniach matrycę płaską, istnieje konieczność zweryfikowania efektów w przypadku zastosowania matryc o zmiennym przekroju dna (matryce z wyspą). Badania połączeń blach miedzianych będą kontynuowane w celu szerszej weryfikacji obowiązujących kryteriów i ewentualnego zaproponowania korekty tych założeń.

Literatura

- [1] Cacko R., Czyżewski P.: Numeryczne modelowanie kształtowania i obciążania połączeń nitowanych bezotworowo, in Polish, Przegląd Mechaniczny, 2005, nr 7-8, s. 50-53.
- [2] Wang C.C., Kam H.K., Cheong W.C.: Effect of tool eccentricity on the joint strength in mechanical clinching process, Proceedings of the 11th International Conference on Technology of Plasticity.
- [3] Cacko R., Czyżewski P.: Verification of numerical modeling of the SPR joint by experimental stack-up, Proc. Of Computer Methods in Materials Science Vol. 7, 2007, no. 1, pp.124-130.
- [4] Cacko R.: Review of different material separation criteria in numerical modeling of the self-piercing riveting process – SPR, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, Vol. VIII, No. 2, pp. 21-31.
- [5] Cacko R., Czyżewski P., Kocańda A.: Initial Optimization of Self-Piercing Riveting Process by Means of FEM, The 10th Int.Conf. METAL FORMING 2004, 19-22 Wrzesień 2004, Akademia Górniczo-Hutnicza KRAKÓW, Steel Grips 2 (2004) Suppl. Metal Forming, pp. 307-310.
- [6] Cacko R., Czyżewski P.: Analiza wpływu modyfikacji kształtu matrycy i nitu na proces nitowania bezotworowego SPR, Przegląd Mechaniczny, nr 7-8, 2007, s. 41-44.
- [7] Hahn O., Schulte A.: Performance and Reliability of Self-Piercing Riveted Joints in Steel and Aluminum Alloys. Mechanical Fastening Seminar, Troy, Michigan, January 1998, pp. 1-13.
- [8] Bokhari N., LaPensee M.: Self-Piercing Riveting in Automotive Applications. Mechanical Fastening Seminar, Troy, Michigan, January 1998, pp. 17-22.
- [9] TWI World Centre for Materials Joining Technology – Self-Piercing Riveting database, available at www.twi.co.uk.
- [10] Porcaro R., Hanssen, A.G., Langseth, M., Aalberg A.: Self-piercing riveting process: An experimental and numerical investigation, Journal of Materials Processing Technology, 171, 2006, pp. 10-20.
- [11] Abea, Y., Kato, T., Mori, K.: Joinability of aluminium alloy and mild steel sheets by self piercing rivet, Journal of Materials Processing Technology, 177, 2006, pp. 417-421.
- [12] Porcaro R., Hanssen A.G., Langseth M., Aalberg A.: The behaviour of a self-piercing riveted connection under quasi-static loading conditions, International Journal of Solids and Structures 43, 2006, pp. 5110-5131.