

## Dr inż. Jacek Mucha

Katedra Konstrukcji Maszyn  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska  
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Polska  
e-mail: j\_mucha@prz.edu.pl

## Analiza zniszczenia prostokątnego złącza przetłoczeniowego w próbie ścinania

**Słowa kluczowe:** połączenia przetłoczeniowe, ścinanie, rozdzielanie złącza

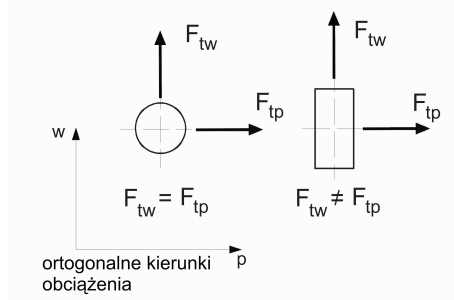
**Streszczenie:** W pracy zawarto wyniki badań eksperymentalnych dotyczących wpływu zmiany kierunku obciążenia przetłoczeniowego złącza na przebieg charakterystyki i maksymalną wartość siły ścinania. Przedmiotem badań były jednozakładkowe połączenia przetłoczeniowe blach z aluminium AW1050A. Odpowiednio wykonane próbki prostokątnych połączeń przetłoczeniowych z nacięciem materiału poddano testom ścinania na maszynie wytrzymałościowej UTS 100.

Przeanalizowano skrajne przypadki zniszczenia złącza dla kąta ułożenia  $\beta = 0^\circ, 90^\circ$ . Opisano mechanizm rozdzielania połączenia dla wszystkich wartości kąta  $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ . Zwrócono również uwagę na wielkość całkowitej pracy rozdzielania przez ścinanie złącza.

### 1. Wprowadzenie

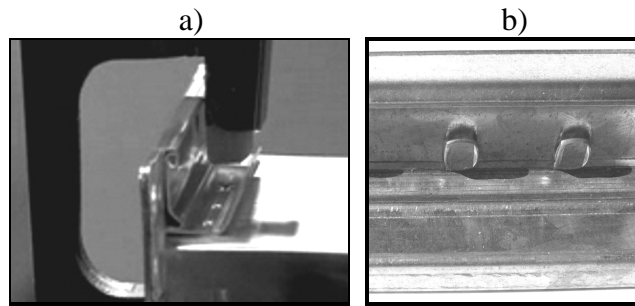
Podczas eksploatacji prostokątnych połączeń przetłoczeniowych niezwykle istotna jest znajomość ich statycznej wytrzymałości. Pozwala ona m.in. na określenie wartości oraz rodzajów obciążeń, przy których połączenie może być eksploatowane. Najczęściej rozpatruje się ich odporność na ścinanie [4, 5, 6, 7, 11, 12].

Wytrzymałość prostokątnego złącza na działanie zewnętrznego obciążenia ścinającego z racji kształtu miejsca scalenia nie jest jednakowa [2, 3, 8, 13, 14]. Zależy ona bowiem od jego usytuowania względem kierunku działania głównego obciążenia (rys. 1).



Rys. 1. Przypadki ścinania okrągłego i prostokątnego złącza przetłoczeniowego

Podczas montażu elementów blaszanych linia przeciętego miejscowo materiału może być równoległa (rys. 2a), bądź też usytuowana poprzecznie (rys. 2b) do linii szwu scalenia. Pożądane jest, aby kierunek głównego obciążenia złącza w konstrukcji pokrywał się z tym, na którym posiada ono największą nośność. W praktyce nie zawsze możliwe jest takie jego usytuowanie. Wykorzystanie technologii połączeń przetłoczeniowych podyktowane jest bowiem możliwością jej adaptacji tak, aby zapewniony był dostęp dla narzędzi gwarantujący odpowiednią sztywność ich podparcia oraz wyprowadzenia po dokonaniu zabiegu [15].



Rys. 2. Przetłoczeniowe łączenie blach stalowych elementów przewodu klimatyzacyjnego: a) o wzdłużnym ułożeniu w szwie, b) o prostokątnym ułożeniu w szwie łączącym

Znajomość wytrzymałości prostokątnych połączeń przetłoczeniowych oraz zagadnień z tym związanych pozwala na dobór właściwych parametrów procesu formowania oraz określenie warunków ich poprawnej eksploatacji. Wiedza na temat mechanizmu zniszczenia odgrywa kluczową rolę podczas projektowania i późniejszej eksploatacji tych złączy [10].

Znaczna liczba dostępnych opracowań dotyczy zagadnienia połączeń przetłoczeniowych. Nieznaczna część z nich obejmuje problematykę prostokątnych złączy. Dotychczas przeprowadzono nieliczne badania uwzględniające zmianę kierunku ich obciążenia [2, 3, 8, 13, 14]. W jednej z niewielu prac [2], dotyczących zagadnienia analizy wytrzymałości tych połączeń można znaleźć opis wyników z prób ich statycznego ścinania. Inne, równie interesujące z tego punktu widzenia publikacje [13, 14], obrazują różnicę w pracy, jaką należy wykonać podczas próby zniszczenia złączy okrągłych oraz prostokątnych o różnym ułożeniu w stosunku do głównego kierunku odkształcania złącza. Natomiast w kolejnej pracy [8] autorzy przedstawili wpływ zmiany ułożenia złącza w węzłach przestrzennego ustroju z cienkich profili blaszanych na wielkość i przebieg siły wymuszającej deformację konstrukcji. Ciekawe jest również opracowanie zawierające opis zastosowania prostokątnego złącza przetłoczeniowego o różnym jego ułożeniu w blaszanej konstrukcji strefy kontrolowanego zgniotu [1]. W tego typu elementach określone ułożenie złączy wpływa na sposób ich rozdzielenia [2].

W niniejszej pracy autor przedstawił analizę wpływu zmiany kąta ułożenia złącza (w stosunku do obciążenia) na wartość krytyczną siły powodującej rozdzielenie połączenia. Ponadto przeprowadził analizę przebiegu zniszczenia odpowiednio obciążanych złączy.

## 2. Istota formowania połączenia

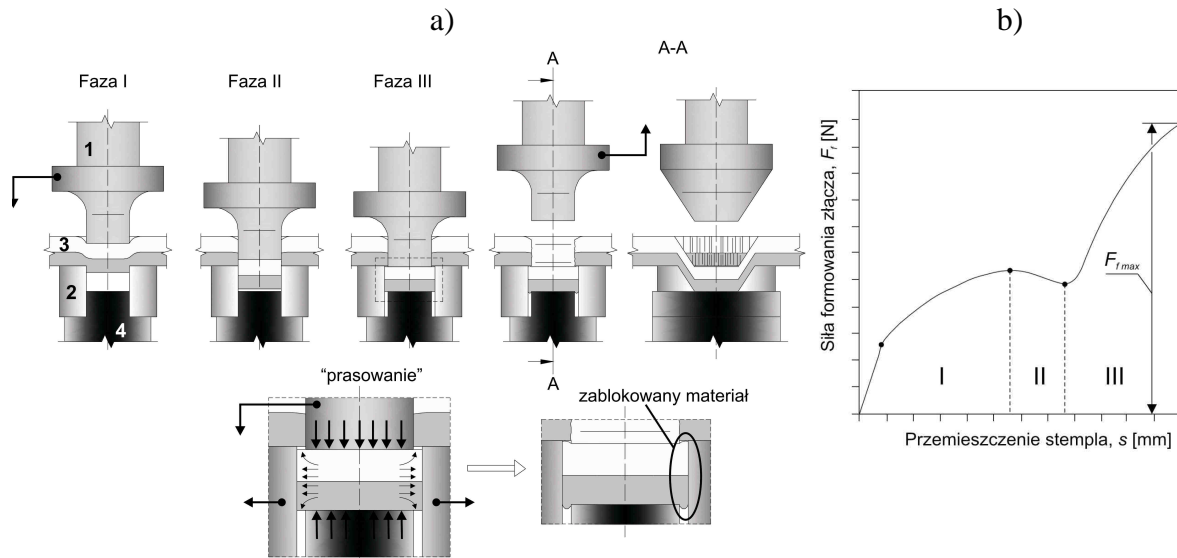
Proces łączenia (z nacięciem materiału) odbywa się za pomocą odpowiednio zaprojektowanych do tej metody narzędzi tj. stempla o określonym kształcie oraz matrycy z segmentami. Segmenty te mogą być dociskane za pomocą tulejki z wysokowytrzymałego elastomeru bądź sprężyn zwijanych lub płaskich [6].

Przebieg procesu formowania złącza można podzielić na trzy główne fazy: I - nacinanie (a ściślej nacinanie z jednoczesnym wstępnym wytłaczaniem); II – wytłaczanie właściwe; III – prasowanie (dotłaczanie dna przetłoczenia) – rys. 3.

Zagłębianiu się stempla w miejscach styku blach z krawędzią tnącą matrycy towarzyszy nacinanie materiału tak, że pod koniec wytłaczania następuje pęknięcie i rozdzielenie – faza I. Powstałe nacięcia materiału leżą wzdłuż krawędzi tnących matrycy i ułatwiają proces dalszego wytłaczania. Następnie rozpoczyna się wytłaczanie właściwe materiału blach - faza II. Trwa ona stosunkowo krótko i następuje zaraz po całkowitym przecięciu materiału, a przed prasowaniem dna przetłoczenia. Dalszy przesuw stempla powoduje nacisk na materiał dna i jego prasowanie - faza III. Prasowaniu dna towarzyszy - w

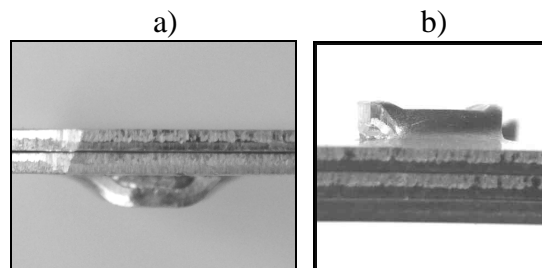
mniejszym już stopniu - nacinanie materiału. Pod wpływem nacisku stempla na dno przetłoczenia uzyskuje się promieniowe płynięcie materiału (rys. 3a) i rozsuwanie segmentów matrycy. W ten sposób powstaje „zamek”, tj. zakleszczenie materiału blachy górnej w dolnej. Po uzyskaniużądanego efektu scalenia warstw blach następuje wycofanie stempla formującego złącze.

Technologia prostokątnych złączy przetłoczeniowych umożliwia łączenie ze sobą dwóch (rys. 4a), trzech (rys. 4b), a nawet większej liczby warstw materiału.



Rys. 3. Formowanie prostokątnego złącza przetłoczeniowego z nacięciem materiału:

a) schemat, b) przebieg siły kształtowania



Rys. 4. Scalenie: a) dwóch, b) trzech warstw materiału

### 3. Zakres i metodyka badań eksperymentalnych

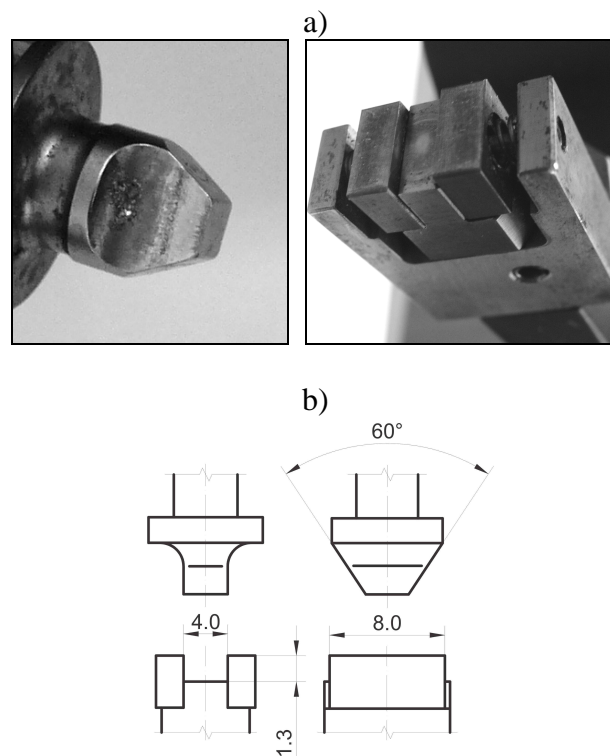
Do badań nad wpływem zmiany kąta ułożenia miejsca scalenia względem kierunku przemieszczenia wymuszającego odkształcenie złącza na jego krytyczne wartości obciążenia wykorzystano łatwo dostępną blachę z aluminium AW1050A. Do modelowania eksperymentu doświadczalnego użyto próbek w postaci pasków o szerokości 40 mm i długości 110 mm, wyciętych z blachy o grubości  $1.00 \pm 0.05$  mm. Materiał ich charakteryzował się określonymi właściwościami: umowną granicą plastyczności  $R_{p0.2} = 25$  MPa; granicą wytrzymałości  $R_m = 75$  MPa; modułem sprężystości  $E = 69\ 000$  MPa; wydłużeniem względnym  $A_{50} = 25$  mm.

Paski blach zostały połączone za pomocą narzędzi o określonej geometrii (rys. 5) zainstalowanych na szczękowym urządzeniu o napędzie hydraulicznym z zachowaniem określonych wymiarów gotowej próbki (rys. 6).

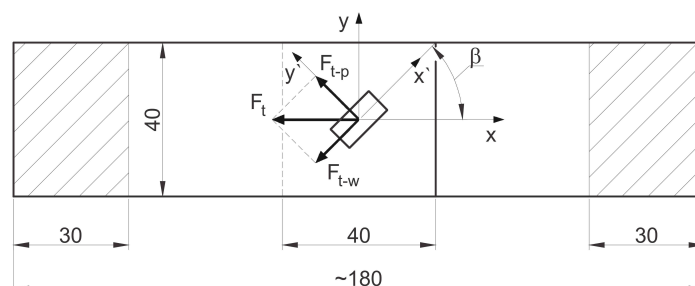
W zależności od geometrii stempla i matrycy można uzyskać zróżnicowanie np. udziału maksymalnej siły nacisku do doraźnej wytrzymałości na ścinanie. Jednak do wstępnej eksperymentalnej analizy postanowiono wykorzystać jeden zestaw narzędzi i jedną grubość końcową przetłoczenia ( $X$ ).

Podczas wykonywania próbek złączy jedynym zmiennym parametrem był kąt ułożenia geometrii miejsca scalenia  $\beta$  (rys. 6), pozostałe zaś były stałe. Grubość dna przetłoczenia ( $X$ ) we wszystkich przypadkach posiadała wartość  $0.85 \pm 0.02$  mm (rys. 7d).

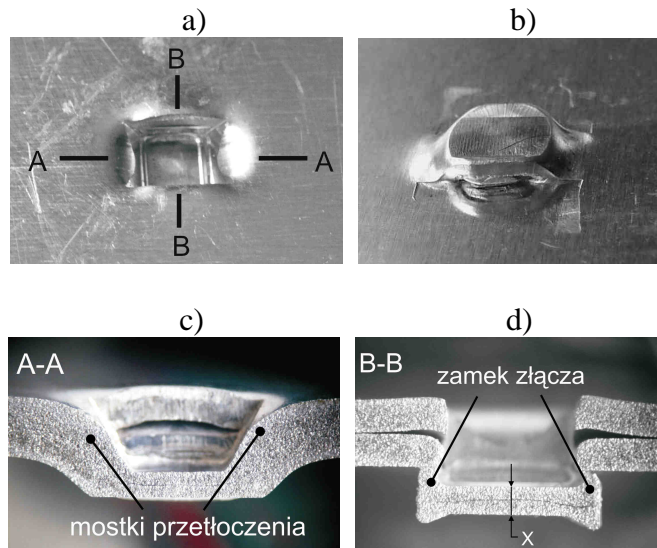
Cechą znaną złączy przetłoczeniowych jest wystąpienie określonej formy zaciśnięcia materiału blach w postaci zamka. Uzyskane próbki posiadały charakterystyczne przetłoczenie (rys. 7a) oraz wypływkę w miejscu scalenia (rys. 7b). Dzięki zastosowaniu dwusegmentowej podatnej matrycy uzyskano specyficzną postać połączenia warstw materiału (rys. 7c, d).



Rys. 5. Narzędzia do formowania złączy: a) widok kształtującego stempla i podatnej matrycy dwusegmentowej, b) podstawowa geometria



Rys. 6. Charakterystyka ułożenia miejsca scalenia i geometria próbek do ścinania



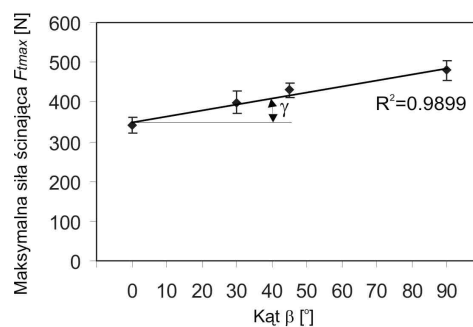
Rys. 7. Widok złącza: a) od strony przetłoczenia, b) po stronie wypływki oraz c) i d) jego określone przekroje poprzeczne

Złącza blach przeznaczone do testów wytrzymałościowych zostały odpowiednio oznaczone. Tak przygotowane, poddane zostały testom wytrzymałościowym na ścinanie, aż do ich całkowitego rozdzielenia. Przebadane zostały 3 serie próbek dla 4 kątów ułożenia  $\beta$ . Dla każdej dokonano rejestracji parametrów siły oraz przemieszczenia, na maszynie wytrzymałościowej UTS 100. Przekroje poprzeczne złącza wycięto za pomocą elektroerozyjnej przecinarki drutowej. Pozwoliło to na wyeliminowanie dodatkowych deformacji złącza, tak jak to bywa w przypadku innych metod cięcia.

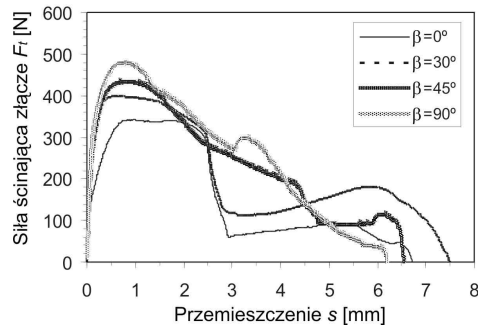
#### 4. Wyniki i ich analiza

W przypadku okrągłych złączy uzyskuje się izotropowy charakter nośności połączenia. Nieznaczne różnice w przebiegu charakterystyki siły ścinającej uzyskuje się dla blach silnie anizotropowych [9]. Natomiast w przypadku prostokątnego kształtu, połączenia wykazują anizotropię w przenoszeniu obciążenia w zależności od kierunku jego działania (rys. 8).

Dla badanych przypadków kąta ułożenia złącza  $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  uzyskano odmienne charakterystyki siłowe (rys. 9).



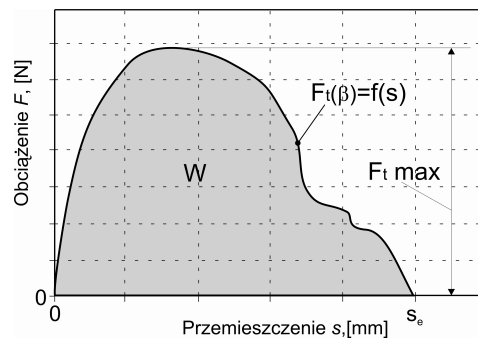
Rys. 8. Wpływ kąta ułożenia  $\beta$  złącza względem kierunku działającego obciążenia na wielkość maksymalnej siły ścinającej



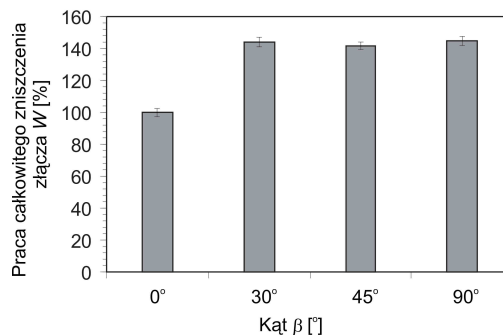
Rys. 9. Wpływ kąta ułożenia  $\beta$  złącza względem kierunku działającego obciążenia na przebieg krzywej siły ścinania

Przebieg krzywej siły ścinania jest odpowiedzią złącza na działanie przemieszczenia wymuszającego odkształcanie się elementów połączenia. Odzwierciedla kolejność degradacji elementów zamka w złączu i zapotrzebowanie na energię do pełnego rozdzielenia blach. Znając przebieg funkcji siły ścinającej (rys. 10) dla rozpatrywanego przypadku kąta ułożenia, wartość pracy można określić stosując formułę:

$$W = \int_0^{s_c} F_t(\beta) ds \quad (1)$$



Rys. 10. Interpretacja graficzna wielkości wykonanej pracy nad rozdzielaniem złącza

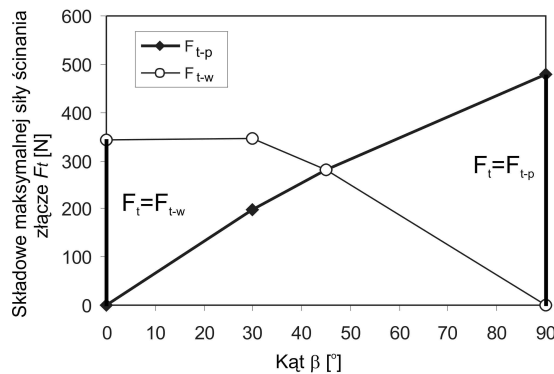


Rys. 11. Relacje w wielkości pracy zniszczenia złącza w zależności od kąta ułożenia  $\beta$

Dla prób o diametralnie różnych kątach ułożeniach złącza w stosunku do kierunku obciążenia odnotowano największe różnice w wartości wykonanej pracy podczas próby ścinania. Dyssypacja energii dostarczonej na całkowite rozdzielenie połączonych pasm blach dla kąta  $\beta = 90^\circ$  była prawie o 50% większa w stosunku do testu ścinania dla  $\beta=0^\circ$  (rys. 11). Natomiast dla kątów  $\beta = 30^\circ$  i  $45^\circ$  wykonana praca osiągnęła wartość zbliżoną do tej

uzyskanej z testu przy kącie  $90^\circ$ . Tym dwóm ostatnim przypadkom towarzyszy mieszany mechanizm zniszczenia, co zostało wyjaśnione w dalszej części pracy.

We wszystkich przypadkach całkowite rozdzielanie połączonych blach aluminiowych następowało w wyniku dekohezji materiału przetłoczenia. Sposób rozdzielania uzależniony był od składowych siły ścinającej (rys. 12), na które miał wpływ kąt ułożenia złącza. Połączone pasma blach aluminiowych wykazywały na tyle dużą sztywność, że podczas testu zasadniczo całość obciążenia została przejęta przez miejsce ich scalenia. Stąd rozdzielone blachy wszystkich próbek pozostały nieodkształcone.

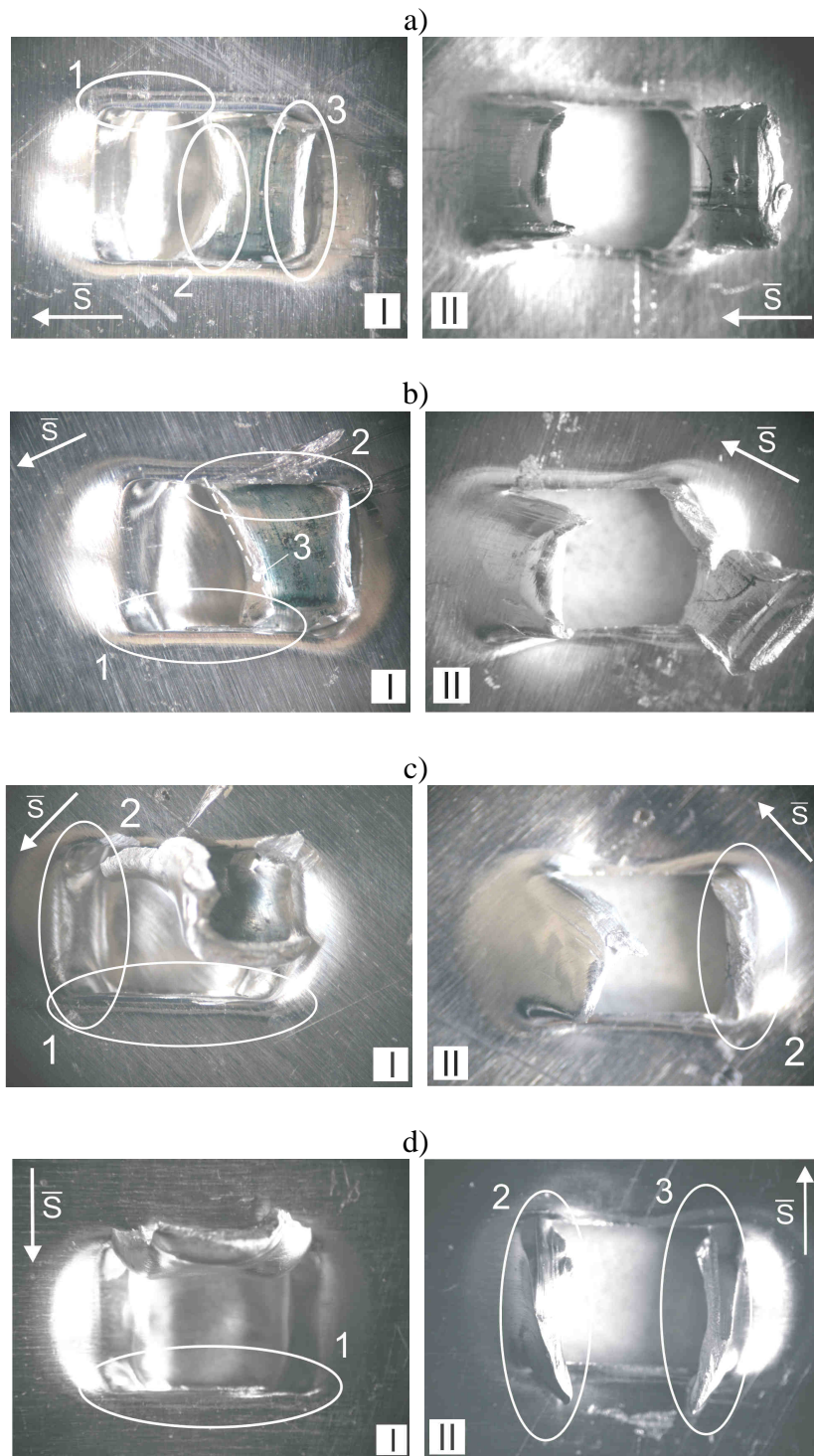


Rys. 12. Wpływ kąta ułożenia  $\beta$  złącza względem kierunku działającego obciążenia na odpowiadające mu składowe siły ścinania

Poszczególne przebiegi siły ścinającej w połączeniu z końcowym wyglądem próbek umożliwiają opis mechanizmu rozdzielania złączy.

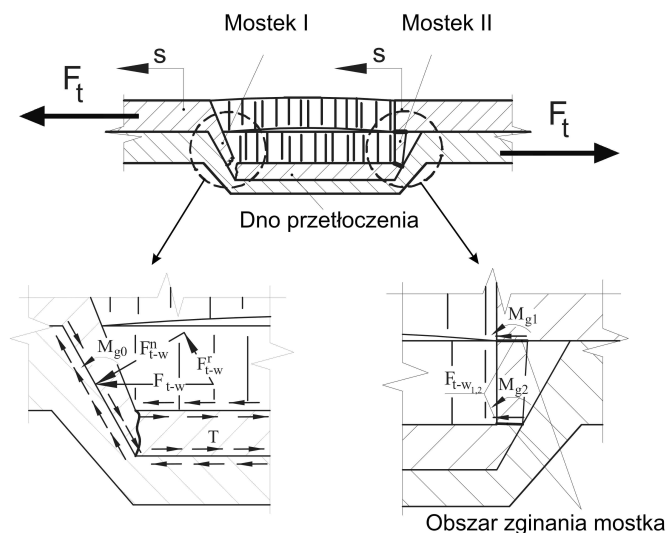
W przypadku obciążania złącza dla kąta  $\beta=0^\circ$  rozdzielenie nastąpiło w wyniku częściowego wyrwania zamka w obszarze „1” z jednoczesną utratą spójności materiału przetłoczenia w obszarach „2” i „3” (rys. 13a). Obciążanie wzdłużne połączenia ( $F_t=F_{t-w}$ ) zasadniczo doprowadziło w pierwszej kolejności do rozciągania mostka „I” siłą  $F_{t-w}^r$  i zginania mostka „II” momentami  $M_{g1}$  i  $M_{g2}$  (rys. 14). Cały czas przemieszczaniu się elementów zamka w złączu towarzyszyły siły tarcia (T). Dla tak usytuowanego złącza podczas testu wytrzymałościowego siła rosła, następnie wystąpiła pewna stabilizacja na poziomie 340 N (rys. 9). Dalsze odkształcanie złącza skutkowało zerwaniem mostka I (obszar „3”) i spadkiem siły ścinającej do wartości około 60 N. Wówczas następowało stopniowe wrywanie zamka w obszarze „1” (rys. 13a) z jednoczesnym rozciąganiem mostka II. Od tego momentu siła znowu rosła do uzyskania przemieszczenia  $s \approx 6.75$  mm (rys. 9), oraz osiągnięcia krytycznego przewężenia i pęknięcia materiału mostka II (obszar „2” na rys. 13a).





Rys. 13. Forma zniszczenia miejsca scalenia blach otrzymana z próby ścinania prostokątnego złącza przetłoczeniowego dla kąta ułożenia  $\beta$  (I – dolna blacha, II - górna blacha): a)  $0^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$ , d)  $90^\circ$



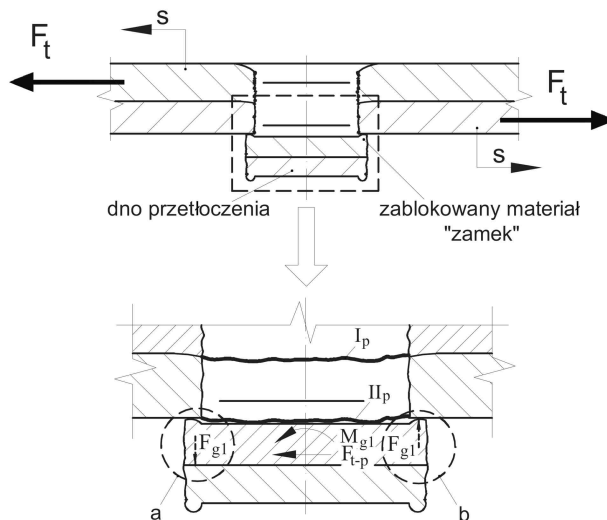


Rys. 14. Uproszczony opis obciążenia mostków złącza podczas ścinania dla kąta  $\beta=0^\circ$

Z kolei poprzeczne usytuowanie złącza (linia przeciętego materiału jest prostopadła do kierunku działającego obciążenia) podczas testu ścinania ( $F_t=F_{t-p}$ ) dało inną odpowiedź siłową połączenia niż miało to miejsce jak w przypadku ułożenia wzdłużnego (rys. 9). Szczytowa siła ścinająca osiągnęła wartość 480 N i była o 40 % większa niż dla kąta  $0^\circ$ .

Podczas testu wytrzymałościowego dla  $\beta = 90^\circ$  nastąpiło zniszczenie złącza przez wyrwanie zamka w obszarze „1” (rys. 13d), i utratę spójności materiału mostków w przekrojach poprzecznych (obszary „2” i „3” na rys. 13d). Działanie siły ścinającej  $F_t$  na złącze spowodowało określone obciążenie przetłoczenia wypadkowym momentem gnącym ( $M_{g1}$ ) i siłą ścinającą ( $F_{t-p}$ ). W wyniku tego dno przetłoczenia w obszarze „b”, a ściślej zamek został wyrwany, zaś materiał mostków ścięty w przekroju  $\Pi_p$  (rys. 15).

Przekrój „ $I_p$ ” złącza posiadał większą nośność niż „ $\Pi_p$ ” z racji większej powierzchni i mniejszych odkształceń podczas formowania złącza. W obszarze „a” następowało wciskanie się materiału dna i jego stopniowy obrót, stąd końcowa pozycja dna przetłoczenia (rys. 13d). Pod koniec rozdzielenia w przekroju  $\Pi_p$  utracie spójności materiału towarzyszyły już tylko siły ścinające i rozciągające.



Rys. 15. Uproszczony opis obciążenia złącza podczas ścinania dla kąta  $\beta=90^\circ$

Obserwując fotografie zniszczonych połączeń dla przypadków pośrednich wartości kąta  $\beta$  ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ) można stwierdzić, że występował mieszany mechanizm zniszczenia. Podczas obciążania połączenia dla kąta ułożenia  $\beta=30^\circ$  w pierwszej kolejności w obszarze „1” występowało wyrywanie zamka (rys. 13b). Oddziaływaniu obciążenia na miejsce scalenia blach, po stronie przecięcia blach w obszarze „1” towarzyszyło nieznaczne poluzowanie się zakleszczonego materiału. Natomiast od strony przeciwległej (w obszarze „2”), wraz ze zwiększaniem się przemieszczenia blach, przebiegało stopniowe wciskanie się materiału połączonych warstw. Stąd ułożenie linii rozdzielenia materiału przetłoczenia (szczegół „3”) pod kątem  $90^\circ$  w stosunku do kierunku przemieszczania się blach. Zwiększenie kąta ( $\beta$ ) usytuowania złącza względem kierunku przemieszczenia do  $45^\circ$  przyczyniło się do nasilenia zjawisk zachodzących tak jak dla kąta  $30^\circ$ . W wyniku realizacji testu wytrzymałościowego połączenia, całkowitemu wyrwaniu materiału w obszarze „1” towarzyszyło wywiniecie dna przetłoczenia (rys. 13c). Jeden z mostków uległ rozdzieleniu w miejscu jego przejścia w dno przetłoczenia (obszar „2”). W poprzednich przypadkach zaś mostki przetłoczenia pozostawały wraz z blachą górną.

## 5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej analizy eksperymentalnej można zauważyć, że:

- w przypadku wzdłużnego obciążenia złącza w pierwszej kolejności utrata spójności materiału występuje na jednym mostku, a następnie całość obciążenia przejmuje pozostała część wytworzonego przez prasowanie zamka;
- dyssypacja energii podczas zniszczenia połączenia pasm blach w przypadku kąta  $\beta=90^\circ$  była o ok. 50% większa w stosunku do próby dla kąta  $\beta=0^\circ$ , zaś maksymalna siła ścinająca wyższa o 40%;
- we wszystkich przypadkach ułożenia złącza uzyskano zróżnicowaną maksymalną siłę ścinającą, a uwzględniając wielkość pracy zniszczenia zbliżony poziom wartości uzyskano dla trzech kątów ułożenia ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ );
- przy poprzecznym obciążeniu połączenia ważnym elementem jest wytworzenie możliwie dużego zamka materiału, który w znaczący sposób odpowiada za sztywność połączenia;
- projektując ułożenie złącza w szwie łączącym, powinno się uwzględnić łatwość montażu oraz późniejszą jego eksploatację względem obciążenia.

Przeprowadzone badania wykazują, że taka analiza eksperymentalna może stanowić uzupełnienie i rozszerzenie wiedzy na temat zachowania się prostokątnych połączeń przetłoczeniowych podczas różnych kierunków ich obciążania.

Ułożenie w określony sposób miejsc scalenia może poprawić nośność lokalnie pojedynczych złączy oraz spowodować wyrównanie sprężystego wyężenia konstrukcji blaszanej.

## Literatura

1. Bartczak B, Gierczycka-Zbrożek D, Gronostajski Z, Polak S. The use of thin-walled sections for energy absorbing components: a review. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2010; 4(10): 5-19.
2. Gronostajski Z, Polak S. Quasi-static and dynamic deformation of double-hat thinwalled elements of vehicle controlled body crushing zones joined by clinching,

Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008; 2(8): 57-65.

3. Lennon R, Pedreschi R, Sinha B P. Comparative study of some mechanical connections in cold formed steel. *Construction and Building Materials* 1999; Vol. 3(13): 109-116.
4. Mucha J. The characteristics of H320LA steel sheet clinching joints. *Advances in Manufacturing Science and Technology* 2010; 4(34): 47-61.
5. Mucha J, Bartczak B. Thoughts on the effective modeling of the process of joining thin sheets using the clinching method. *Obróbka Plastyczna Metali* 2010; 2(21): 105-117.
6. Mucha J, Kaščák Ľ. Wybrane aspekty kształtowania okrągłych połączeń przetłoczeniowych. *Problemy eksploatacji - Maintenance Problems* 2010; 4(79): 29-38.
7. Mucha J, Kaščák L, Spišák E. Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011; 1(11): 135-148.
8. Pedreschi R F, Sinha B P. An experimental study of cold formed steel trusses using mechanical clinching. *Construction and Building Materials* 2008; 5(22): 921-931.
9. Saberi S, Enzinger N, Vallant R, Cerjak H, Hinterdorfer J, Rauch R. Influence of plastic anisotropy on the mechanical behavior of clinched joint of different coated thin steel sheets. *International Journal of Material Forming* 2008; 1(1): 273-276.
10. Shiming G, Lothar B. Mechanism of mechanical press joining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1994; 5(34): 641-657.
11. Tubielewicz K, Turczyński K. Kształtowanie połączeń blach metodą prasowania na zimno. *Technologia i Automatykacja Montażu* 2001; 2(52): 66-70.
12. Tubielewicz K, Turczyński K, Tubielewicz M. Wskaźniki wytrzymałościowe połączeń kształtowych prasowanych na zimno. *Technologia i Automatykacja Montażu* 2004; 3(55): 67-72.
13. Varis J P. The suitability of round clinching tools for high strength structural steel. *Thin-Walled Structures* 2002; 3(40): 225-238.
14. Varis J P. The suitability of clinching as a joining method for high-strength structural steel. *Journal of Materials Processing Technology* 2003; 1-3(132): 242-249.
15. Varis J P. Ensuring the integrity in clinching process. *Journal of Materials Processing Technology* 2006; 1-3(174): 277-285.