

Analiza wytrzymałości złączy przetłoczeniowych blach stalowych, stosowanych na elementy nadwozi pojazdów samochodowych

JACEK MUCHA¹, ĽUBOŠ KAŠČÁK², EMIL SPIŠÁK²

¹Politechnika Rzeszowska, ²Technical University in Košice

Łączenie za pomocą przetłaczania wykorzystywane jest w przemyśle motoryzacyjnym przez producentów samochodów do montażu elementów nadwozi samochodowych. Wykonywanie połączenia realizowane jest przez proces miejscowego wytłaczania łączonych blach na zimno, bez efektu cieplnego oddziaływania na strukturę materiału. W pracy przedstawiono analizę wpływu zmiany układu grubości oraz rodzaju materiału blach - 1.0335 oraz 1.0389 - względem matrycy na efekt zmiany wytrzymałości połączenia. Wyniki testów ścinania połączeń przetłoczeniowych porównano z wynikami uzyskanymi dla połączeń zgrzewanych o podobnej średnicy punktu spoiny elementów.

1. Wstęp

Do niedawna w przemyśle samochodowym dominującą technologią łączenia elementów nadwozi było zgrzewanie punktowe lub spawanie. Technologie te sprawiają trudności w łączeniu ze sobą nowych, różnych materiałów. Ponadto miejsca łączenia blach przez spawanie czy zgrzewanie stanowią potencjalne punkty korozyjne. W wyniku poszukiwania nowych rozwiązań mogących pomóc w wyeliminowaniu tego problemu zauważono możliwości rozwoju, znanej już, technologii łączenia blach pod naciskiem [1]. Jedną z nich jest łączenie przez przetłaczanie (clinchng) [2, 3]. Łączenie tą technologią może być stosowane do elementów z pokryciami cynkowymi, malarskimi czy organicznymi, i jest odpowiednie do łączenia różnorodnych materiałów. Typowe materiały to: stal niskowęglowa, stal niskostopowa, stal nierdzewna, stopy metali kolorowych, np. aluminium.

Połączenia typu clinching (przetłoczeniowe) stanowią grupę szybko rozwijających się technologii łączenia na zimno kształtowych połączeń wytwarzanych pod naciskiem [4, 5, 6]. Z powodzeniem są już stosowane w przemyśle samochodowym.

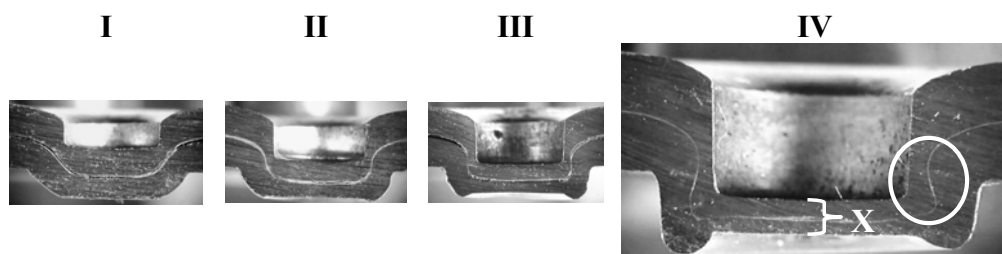
Złącza oparte na zaciskaniu przez wytłaczanie charakteryzują się szeregiem cech, z których podstawowe to:

- niewielki koszt jednostkowy złącza oraz mniejszy niż przy połączeniu dodatkowym elementem złącznym,
- nie ma potrzeby wykonywania otworów,

- wysoka powtarzalność kształtowania złącza,
- nie występują naprężenia cieplne (formowanie na zimno),
- niskie zapotrzebowanie na energię.

Oprócz takich znamion, jak innowacyjność, prostota wykonania, które posiadają połączenia oparte na zaciskaniu przez wytlaczanie („clinchng”) występuje przede wszystkim obniżenie kosztów produkcji gotowego wyrobu. Zastosowanie tej technologii łączenia obniża koszty finalnego wyrobu (poprzez wyeliminowanie kosztów pośrednich, np. kosztu nitów czy elektrod).

Wykonywanie połączenia zaciskowego realizowane jest przez proces miejscowego wytłaczania łączonych blach na zimno. W trakcie łączenia w miejscu powstawania złącza następuje wciskanie stempla w łączone elementy (faza I, II, III, IV – rys. 1) – materiał zostaje wtłaczany w wykrój matrycy. W dolnej matrycy stopniowo przebiega zaciskanie się warstw materiału blachy górnej w dolną bez utraty ich spójności. Poprzez wypełnienie wolnej przestrzeni matrycy (wykroju) powstaje ostateczny kształt połączenia (rys. 1-IV). Technika tą mogą być łączone elementy bez uszkodzenia warstwy ochronnej czy malarskiej.



Rys. 1. Poszczególne fazy wykonywania złącza zaciskowego (X – grubość dna przetłoczenia).
 Fig. 1. The individual phases of clinched joint processing (X – overpress bottom thickness).

Prostota połączenia przetłoczeniowego pozwala na jego zastosowanie zarówno w produkcji seryjnej, jak też jednostkowej. Przy wytwarzaniu wielkoseryjnym oraz masowym wykorzystuje się odpowiednio przystosowane do tego celu roboty (manipulatory) w połączeniu z prostymi prasami dla przedmiotów o nieskomplikowanych kształtach. Natomiast dla bardziej złożonych elementów stosuje się specjalizowane stanowiska montażowe do wykonywania połączeń przetłoczeniowych.

Dostępne na rynku rozwiązania oferowane są w postaci zmodularyzowanej, co ułatwia budowę stanowisk do montażu określonych wyrobów za pomocą przetłaczania. Występują już w szerokiej gamie układy montażowe z napędem elektrycznym, pneumatycznym oraz hydraulicznym.

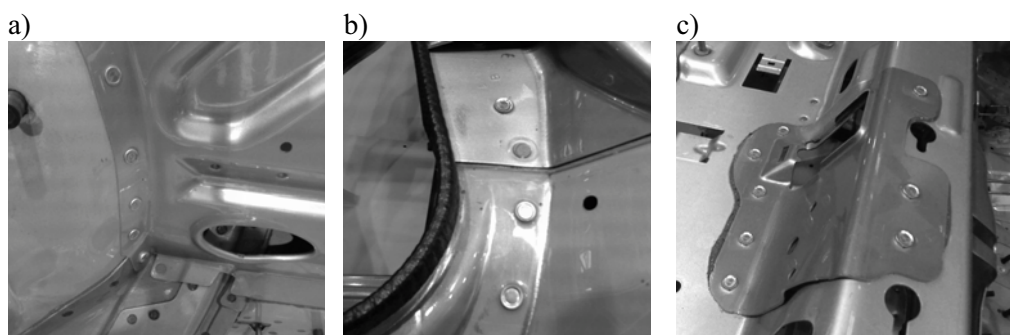
Siłowniki często wyposażone są w czujniki pomiaru siły kształtowania i przemieszczenia, co w zasadniczy sposób ułatwia sterowanie przebiegiem procesu łączenia. Urządzenia do wytwarzania połączeń przetłoczeniowych posiadają łatwy system wymiany narzędzi.

2. Wykorzystanie połączeń przetłoczeniowych

Otrzymane w krótkim czasie połączenie jest trwałe i zamknięte, bez naruszenia powłoki galwanicznej zabezpieczającej przed korozją. Obecnie tego typu łączenie wykorzystywane jest między innymi przez przemysł:

- metalowy,
- urządzeń grzewczych i klimatyzacyjnych,
- motoryzacyjny,
- elektroniczny,
- budowlany.

W trakcie wykonywania tego połączenia duże znaczenie mają duże odkształcenia plastyczne w miejscu łączenia blach. Stąd też sposób ten należy zaklasyfikować do technologii łączenia opartych na obróbce plastycznej. Metoda ta bardzo dobrze zdaje egzamin w przemyśle motoryzacyjnym przy łączeniu blach oraz profili blaszanych ze stopów aluminium i stalowych (rys. 2).



Rys. 2. Połączenie elementów nadwozia z aluminium i stali przez clinching: a, b) bezpośrednio, c) z klejem.

Fig. 2. The steel and aluminum joint made by clinching: a, b) directly, c) with glue.

Technika łączenia za pomocą przetłaczania wykorzystywana jest w przemyśle motoryzacyjnym przez producentów samochodów, jak też dostawców podzespołów. W szeregu procesach wytwórczych wykorzystuje się łączenie przetłaczaniem w produkcji takich elementów, jak: pokrywy bagażnika, pokrywy silnika, obudowy kolumny kierowniczej, drzwi, błotników, wsporników błotników, a nawet obręczy kół jezdnych (rys. 3). Łączenie przez przetłaczanie dobrze zdaje egzamin podczas spajania elementów aluminiowych, np. osłon przewodów wydechowych oraz osłon izolacyjnych silnika. Różnorodność elementów do produkcji, w których można zastosować tę technikę łączenia świadczy o jej walorach ekonomicznych i ekologicznych.



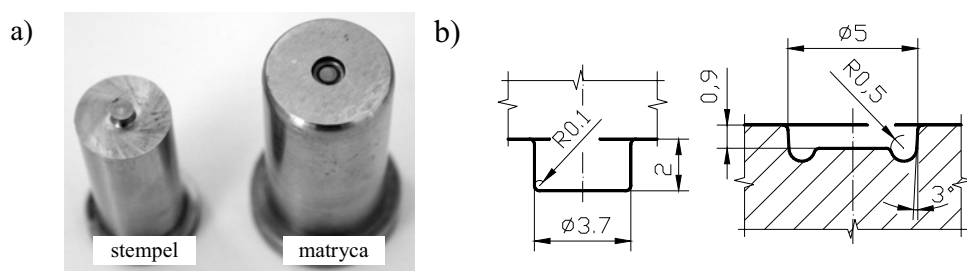
Rys. 3. Obręcz samochodowa z udziałem połączeń przetłoczeniowych.

Fig. 3. The wheel rim made with clinching joints.

Dostawcy dla przemysłu samochodowego coraz chętniej sięgają po ten sposób łączenia elementów wykonywanych z różnych materiałów. Obecnie prowadzone są badania nad możliwością wprowadzenia do procesu montażu elementów stref kontrolowanego zgniotu złączy wytwarzanych pod naciskiem [7÷10].

3. Badania eksperymentalne

Do analizy eksperymentalnej nowego sposobu łączenia pod naciskiem wykorzystano narzędzia składające się ze stempla kształtującego oraz matrycy z określonym wykojeniem (rys. 4). Dla każdej kombinacji grubości blach i rodzaju materiału wykonano po pięć próbek połączeń.



Rys. 4. Stempel i matryca: a) widok ogólny, b) główne ich wymiary.

Fig. 4. The punch and die: a) general view, b) major dimensions.

Blachy użyte do badań wykonane były z materiałów DD13 oraz DD14 (numer materiałowy 1.0335 oraz 1.0389 - wg EN 10111:2008), stosowanych na elementy nadwozi pojazdów samochodowych. Podstawowy skład chemiczny materiału łączonych próbek blach podano w tabeli 1, a ich własności mechaniczne i grubości w tabeli 2. Blachy takie wykorzystywane są w cyklu produkcyjnym konstrukcji samochodowych, m.in. w *Volkswagen Group w Bratislave, Skoda Mlada Boleslav*.

Tabela 1. Zestawienie składu chemicznego blach.
Table 1. Sheet chemical composition.

Oznaczenie materiału	Skład chemiczny, %					
	C	Mn	Si	P	S	Al
DD13*	0.03	0.2	0.006	0.008	0.008	0.042
DD14*	0.05	0.27	0.01	0.013	0.014	0.039

* EN 10111:2008

Tabela 2. Własności mechaniczne blach.
Table 2. Sheet mechanical properties.

Oznaczenie materiału	Parametry			
	g [mm]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]
DD13	0.7	179	315	44
	0.8	193	324	41
DD14	0.62	153	270	46
	0.7	162	279	42
	0.8	167	281	44
	0.9	175	285	42

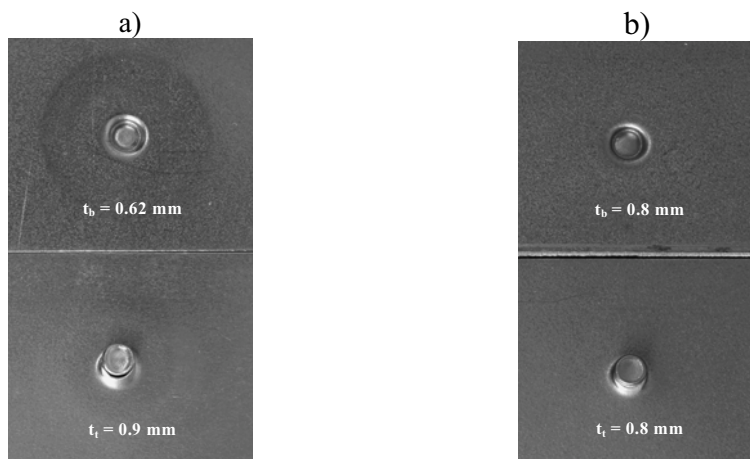
W celu porównania efektów łączenia metodą przetłaczania dodatkowo wykonano połączenia zgrzewane. Parametry zgrzewania przyjęto zgodnie z zaleceniami dla złączy wykonanych z blachy nie ocynkowanej - siła docisku $F_c = 2.0$ kN, czas zwarcia $t_c = 0.16$ s, natężenie prądu $I = 8$ kA, zawartymi w dokumencie: IIW Doc.III-WG12-92/1: „*Procedure for spot welding of uncoated and coated low karbon steels*”.

4. Wyniki i ich analiza

Testy wytrzymałości połączeń na ścinanie zrealizowano na maszynie wytrzymałościowej TIRAtest2300. Pomiary siły wykonano za pomocą głowicy tensometrycznej o zakresie pomiarowym od 0.08 kN do 100 kN, przy prędkości rozciągania 8 mm/min.

W zależności od kombinacji grubości łączonych blach może wystąpić różna forma rozdzielenia blach połączenia przetłoczeniowego (rys. 5). Rozdzielenie może nastąpić przez „rozkleszczenie” materiału z częściowym pęknięciem materiału w miejscu przewężenia (rys. 5a) lub też przez całkowite „rozkleszczenie” bez utraty spójności materiału złącza (rys. 5b).

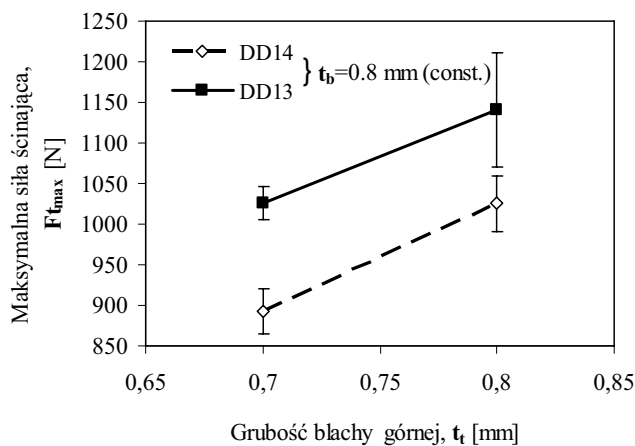
Zwiększenie grubości blachy górnej o 14.5% daje wzrost siły ścinającej połączenie o 15%, wykonane z blach stalowych (DD14) (rys. 6). Podobnie jest w przypadku złącza blach z materiału DD13. Na wykresie przedstawiono średnią wartość wyników z pięciu prób.



Rys. 5. Przykład postaci rozdzielania blach z materiału DD14, połączenia przetłoczeniowego:

a) $t_t=0.9/t_b=0.62$, b) $t_t=0.8/t_b=0.8$.

Fig. 5. The example of DD14 sheet material separation (the clinching joint): a) $t_t=0.9/t_b=0.62$, b) $t_t=0.8/t_b=0.8$.



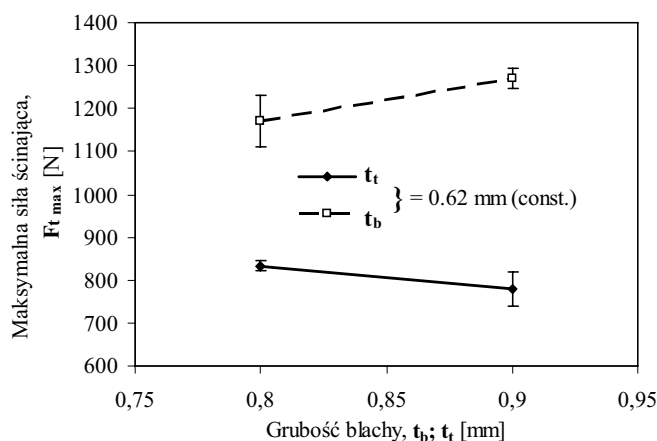
Rys. 6. Wpływ grubości blachy górnej na maksymalną siłę ścinającą połączenie.

Fig. 6. The effect of upper sheet thickness on maximum joint shearing force.

W przypadku zgrzewania blach nieistotny jest układ grubości blach w stosunku do elektrody górnej i dolnej. Parametry zgrzewania dobierane są w zależności od ich grubości i rodzaju materiału. W przypadku połączeń przetłoczeniowych ma to istotne znaczenie.

Na przykładzie łączonego materiału blach – DD14 – przedstawiono odpowiedzi złącza na jego obciążanie do momentu rozdzielania blach, otrzymane w teście wytrzymałościowym dla różnych układów grubości blach (rys. 7).

Sama zamiana układu grubości blach w stosunku do matrycy skutkuje istotną zmianą wartości siły ścinającej powodującej zniszczenie złącza. Przykładowo, dla układu blach $t_t = 0.62 \text{ mm}/t_b = 0.9 \text{ mm}$ jest to siła $F_{t \max} = 780 \text{ N}$, natomiast dla $t_t = 0.9 \text{ mm}/t_b = 0.62 \text{ mm}$ $F_{t \max} = 1272 \text{ N}$ – wzrost o 63% w stosunku do poprzedniego wariantu grubości blach. W wyniku formowania złącza podczas tworzenia się „zamka” część materiału zostaje wtłoczona w rowek matrycy. Jego odpowiednia wielkość pozwala na przemieszczenie się materiału i utworzenie pożądanego zamka (obszar zaznaczony na rysunku 1-IV).

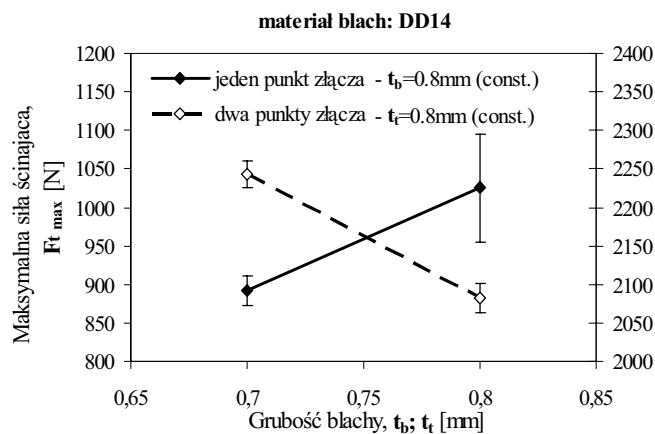


Rys. 7. Wpływ zmiany grubości blach na maksymalną siłę ścinającą połączenie dla materiału DD14.
Fig. 7. The effect of sheet thickness change on maximum joint shearing force for DD14 material.

Zwiększając grubość blachy górnej ($t_t \neq \text{const}$, $t_b = \text{const}$) otrzymujemy zwiększenie wytrzymałości złącza w wyniku utworzenia większego „zamka” w połączeniu. Większa objętość materiału blachy górnej musi zostać wtłoczona w dolną (przy założeniu tej samej wartości parametru X - grubości dna przetłoczenia).

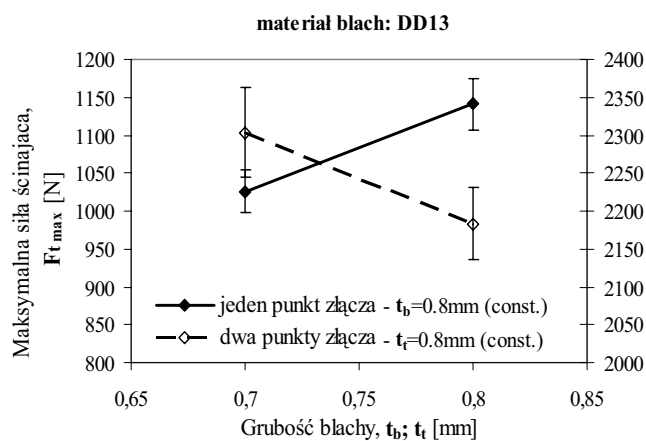
Efekt zmiany kombinacji grubości łączonych blach z materiałów DD13 i DD14 dla pojedynczego i podwójnego złącza na wielkość siły ścinającej przedstawiono na rysunkach 8 i 9. W celu wykazania wpływu zmiany liczby złączy poddanych obciążeniu wykonano testy dla jednakowych grubości blachy górnej ($t_t = 0.8 \text{ mm}$) i dolnej ($t_b = 0.8 \text{ mm}$).

Przy zmianie kombinacji grubości blach z $t_t/t_b = 0.8/0.8$ na $t_t/t_b = 0.8/0.7$ (w stosunku do matrycy) uzyskano spadek maksymalnej siły ścinającej złącze ($F_{t \max}$) – dla obu materiałów łączonych blach (linia przerywana na rys. 8 i 9).



Rys. 8. Wpływ zmiany grubości blach i liczby złączy na maksymalną siłę ścinającą połączenie dla materiału DD14.

Fig. 8. The effect of sheet thickness modification and joint number on maximum joint shearing force for DD14 material.

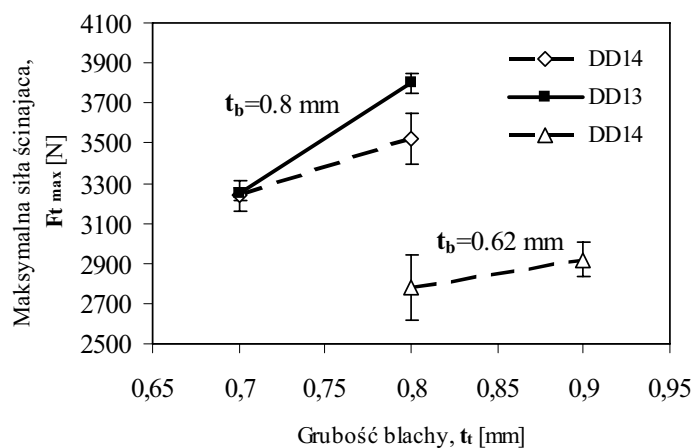


Rys. 9. Wpływ zmiany grubości blach i liczby złączy na maksymalną siłę ścinającą połączenie dla materiału DD13.

Fig. 9. The effect of sheet thickness modification and joint number on maximum joint shearing force for DD13 material.

W celu porównania efektów łączenia blach za pomocą przetłaczania wykonano również dla tych samych materiałów i grubości blach połączenia zgrzewane.

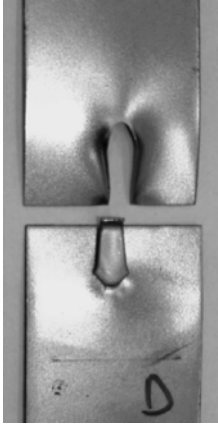
Parametry zgrzewania dobrano zgodnie z obowiązującymi zaleceniami dla analizowanych materiałów blach, tak by powstała średnica czynna zgrzeiny posiadała wymiar zbliżony do średnicy połączenia przetłoczeniowego. Uzyskane przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 10.



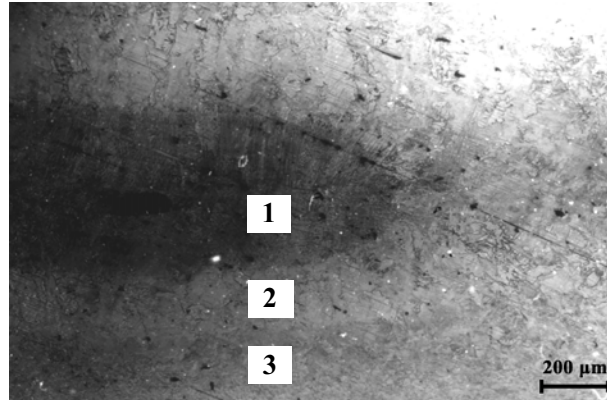
Rys. 10. Wpływ grubości blach na maksymalną siłę ścinającą połączenie zgrzewane – średnica zgrzeiny $d_z(\acute{s}r)=3,65\div 4,06$.

Fig. 10. The effect of sheet thickness on maximum spot welding joint shearing force – the weld diameter $d_z(\acute{s}r)=3,65\div 4,06$.

Proces zgrzewania punktowego jest bardzo szybką i efektywną metodą trwałego łączenia blach. Próbki blach połączone podczas badań poddane zostały próbie wytrzymałościowej. Rozdzielono je w teście wytrzymałościowym, jednak w punkcie, gdzie nastąpiło połączenie próbek, materiały nie odłączyły się od siebie (rys. 11). Świadczy to o tym, iż zgrzewane komponenty zostały poprawnie spojone. Należy zwrócić tu uwagę za sposób rozdzielenia – stąd duże wartości maksymalnej siły ścinającej złącze. Przykład makrostruktury złącza blach z DD13 przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 11. Przykład postaci rozdzielania blach z materiału DD13, połączenia zgrzewanego – $t_t=0.8/t_b=0.8$.
Fig. 11. The example of DD13 sheet material separation, the spot welding joint – $t_t=0.8/t_b=0.8$.



Rys. 12. Makrostruktura zgrzeiny w miejscu połączenia blach z materiału DD13 („1”- obszar wtopu, „2”- strefa wpływu cieplnego, „3”- obszar materiału rodzimego) – $t_t=0.8/t_b=0.8$.
Fig. 12. The weld macrostructure in the point of DD13 sheet joint (“1” – fusion point, “2” – heat effect zone, “3” – native material) – $t_t=0.8/t_b=0.8$.

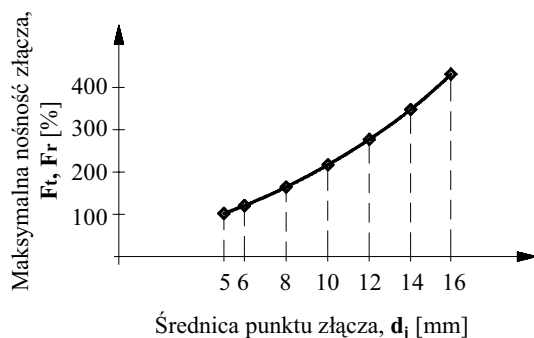
5. Wnioski

W niniejszej pracy zaprezentowano przykład praktycznej aplikacji metody wytwarzania połączeń elementów z blach wykorzystywanych podczas produkcji elementów nadwozi.

W przypadku połączenia przetłoczeniowego postać zniszczenia ma charakter lokalnej deformacji (zgniecenia lub częściowego pęknięcia i wyrwania przetłoczonego zamka). Natomiast w wyniku prawidłowo wykonanej zgrzeiny, zgrzeina pozostaje – rozerwaniu ulega blacha.

Połączenia przetłoczeniowe stanowią alternatywne rozwiązanie w stosunku np. do zgrzewanych. Zastosowanie ich eliminuje ograniczenia w łączeniu ze sobą różnych materiałów w porównaniu z łączeniem konwencjonalnym (zgrzewaniem). Wytrzymałość złącza jest w przedstawionym przypadku niższa, kompensacja (zwiększenie) wytrzymałości może odbyć się na drodze zwiększenia średnicy złącza lub ich liczby. Wiadomym faktem jest, że wraz ze zwiększaniem średnicy złącza wzrasta jego wytrzymałość (rys. 13). Jest to związane z tym, że im większa średnica złącza, tym większe powierzchnie blach biorą udział w tworzeniu połączenia, a im większe powierzchnie, tym większe siły są potrzebne do rozerwania łączonych elementów.

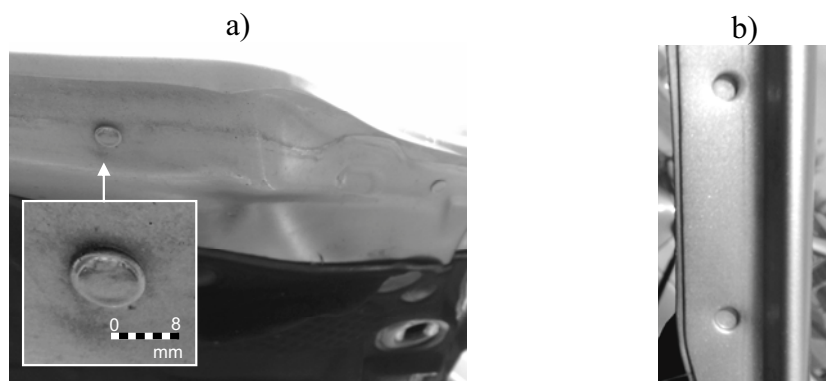
Fakt ten jest uwzględniony w szeregu współczesnych konstrukcji nadwozi samochodowych. Jako przykład można przedstawić złącze przetłoczeniowe o średnicy 8 mm, wykorzystane do połączenia blach np. elementów nadwozia samochodu Mercedes C 220 (rys. 14).



Rys. 13. Przebieg zależności między nośnością złącza a jego średnicą.
Fig. 13. The relation between the joint load-carrying ability and its diameter.

Podczas projektowania połączeń przetłoczeniowych istotnym parametrem jest układ grubości blach w stosunku do matrycy. Ma to bezpośrednie przełożenie na późniejszą nośność złącza.

W wyniku formowania tego typu złączy można uzyskać wyższą wytrzymałość poprzez zwiększenie siły docisku stempla. Wiąże się to jednak z obniżeniem trwałości narzędzi, a zwłaszcza matrycy. Podczas projektowania połączeń powinno zwrócić się uwagę na optymalne ich wykorzystanie z uwzględnieniem energochłonności procesu.



Rys. 14. Przykład połączenia przetłoczeniowego zastosowanego w Mercedesie klasy C:
a) wewnętrzna strona maski, b) bok maski.

Fig. 14. The example of the clinching joint used in C Class Mercedes Benz:
a) the interior of hood, b) the side part of hood.

Literatura

- [1] DI LORENZO G., LANDOLFO R.: *Shear experimental response of new connecting systems for cold-formed structures*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 60, 2004.
- [2] MUCHA J.: *Modern mechanical on press joinability techniques for sheet metal elements*. PRO-TECH-MA 07, Rzeszów-Bezmiechowa, 28-30 czerwca 2007. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.

- [3] MUCHA J.: *Wspólczesne techniki łączenia cienkich blach - zaciskanie przez wytłaczanie (Clinching)*. Mechanik, vol. 80, nr 11, 2007.
- [4] KAŠČÁK L., SPIŠÁK E.: *Evaluations of properties of clinching and resistance spot welding*. Mechanics 2008, Rzeszów, 26-27 czerwca 2008. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.
- [5] KAŠČÁK L., SPIŠÁK E.: *Analysis of properties of press joints through three sheets*. Acta Mechanica Slovaca, 2-B, 2008.
- [6] MUCHA J.: *Some aspects of designing process self piercing riveting*. Archives of Mechanical Technology and Automation, vol. 29, no. 2009.
- [7] PAN C., YU W.: *Bending strength of hybrid cold-formed steel beams*. Thin-Walled Structures, vol. 40, 2002.
- [8] RUSIŃSKI E., KOPCZYŃSKI A., CZMOCHOWSKI J.: *Test of thin-walled beams joined by spot welding*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 157–158, 2004.
- [9] LEE M.H., KIM H.Y., OH S.I.: *Crushing test of double hat-shaped members of dissimilar materials with adhesively bonded and self-piercing riveted joining methods*, Thin-Walled Structures, vol. 44, 2006.
- [10] 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, Vol. 8, No. 2, 2008.

The strength analysis of steel sheet clinching joints used in motor-car body elements

Summary

The clinching is the process used in the automotive applications when joining the car body elements. The clinching joint is created by local cold stamping of joined sheets without heat effect on the material structure. This paper presents the analysis of effect of the thickness layout change and sheet type – 1.0335 and 1.0389 – die on the joint strength change. The redrawing joint shearing test results have been compared with results achieved for spot welding joints of similar joint diameter.