WYBRANE METODY BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ ROZŁĄCZNYCH W ZŁOŻONYM STANIE OBCIĄŻENIA

SELECTED STRENGHT TEST METHODS OF PERMAMENT JOINTS IN COMPLEX STRESS STATE

Eugeniusz Rusiński – Katedra Konstrukcji i Badań Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
Paweł Kaczyński – Katedra Obróbki Plastycznej i Metrologii, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Omówiono główne, nierozłączne technologie łączenia punktowego stosowane w przemyśle motoryzacyjnym. Zaproponowano nowatorską metodę badania złącz punktowych w złożonym stanie obciążenia. Przedstawiono także numeryczny model połączenia umożliwiający uwzględnienie zniszczenia złącza i dokonano jego walidacji.

The most common permanent, point-to-point joining techniques used widely in automotive industry were discussed. Innovative testing method of point-to-point joints in a complex load conditions has been proposed. Additionally numerical model taking into account the destruction possibility of the connection was presented and verified.

Wstęp

Technologie łączenia punktowego umożliwiają scalanie elementów w oddzielonych od siebie miejscach. Powszechnie stosuje się w przemyśle samochodowym dwie metody, tj. zgrzewanie oraz przetłaczanie za pomocą stempla i matrycy zwane potocznie klinczowaniem (ang. *clinching*). Oba rodzaje złącz należą do grupy nierozłącznych połączeń bezpośrednich, tj. takich, w których blachy są ze sobą połączone bez udziału jakichkolwiek elementów dodatkowych, a ich rozdzielenie wiąże się z nieodwracalnym zniszczeniem.

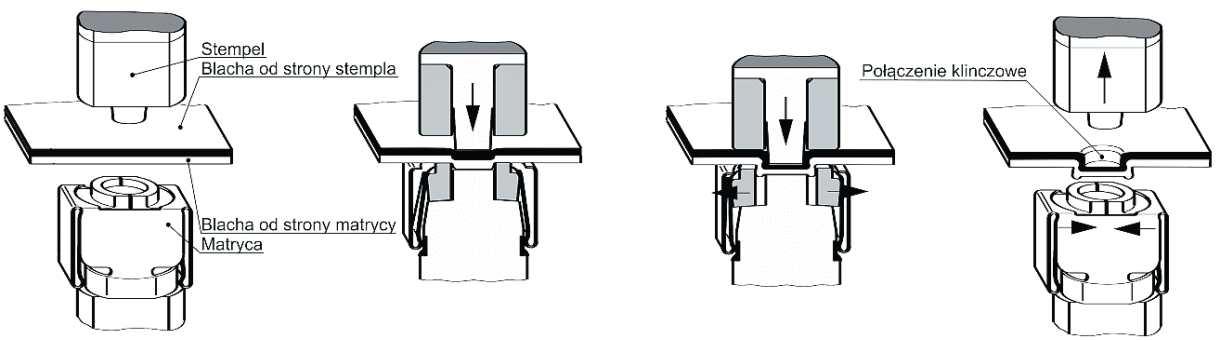
Zgrzewanie punktowe

Zgrzewanie punktowe jest w niektórych dziedzinach produkcji – z powodu jego wieloletniego zastosowania i ciągłego rozwoju – nadal najszerzej rozpowszechnioną metodą łączenia kształtowników i blach ułożonych na zakładkę. Technologia ta jest stosowana głównie w: budownictwie, lotnictwie, przemyśle maszynowym, okrętowym i samochodowym oraz gospodarstwach domowych. Ilość zgrzein wykonanych podczas produkcji przeciętnego auta waha się od 3000 do 5000, co czyni przemysł samochodowy głównym odbiorcą opisywanej technologii [1].

Przetłaczanie

Metodą alternatywną do zgrzewania punktowego jest przetłaczanie na zimno łączonych elementów. Metoda pozwala na łączenie materiałów o sumarycznej grubości do 12 mm. Wykonane złącza cechują się wytrzymałością na poziomie 70% wytrzymałości odpowiedniej zgrzeiny punktowej. Łączenie elementów za pomocą odkształcenia plastycznego posiada wiele niewątpliwych zalet. Najważniejsze spośród nich to [2]:

- brak negatywnych oddziaływań termicznych w obszarze połączenia,
- brak szkodliwych oparów, dźwięku o wysokim natężeniu, intensywnego światła i iskier, co czyni proces bardziej przyjaznym dla operatora, który nie musi zakładać ubrania ochronnego,
- możliwość łączenia różnych materiałów, także o zróżnicowanej grubości,
- możliwość łączenia elementów posiadających pokrycia ochronne bez ich uszkadzania,
- niskie koszty narzędzi oraz ich duża żywotność stosunkowo niskie siły łączenia,
- korzystny wygląd połączenia i możliwość automatyzacji procesu,
- wysoka sprawność energetyczna procesu,

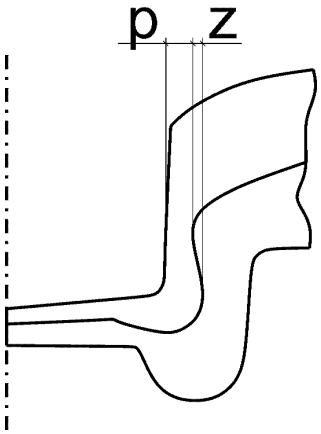


Rys. 1. Proces tworzenia połączeń przetłaczanych [2]

- możliwość podniesienia wytrzymałości połączeń poprzez zastosowanie technik hybrydowych, jak np. klej-klincz.

Metoda ta polega na mechanicznym odkształceniu dwóch blach przy użyciu stempla i matrycy (rys. 1).

Po podparciu łączonych elementów o górną powierzchnię matrycy i ustaleniu ich wzajemnej pozycji następuje przemieszczenie stempla w stronę materiału. Nacisk powoduje odkształcanie materiału i powstanie przetłoczenia. Proces postępuje do momentu zetknięcia dolnej blachy z powierzchnią matrycy. W wyniku dalszego wywierania siły przez stempel następuje pocienienie dna powstającego złącza i promieniowe płynięcie materiału. Proces ten nazywany jest prasowaniem. W wyniku opisanych procesów powstaje złożona, połączona mechanicznie geometria przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Parametry geometryczne połączenia przetłaczanego [3]

Najważniejsze parametry decydujące o wytrzymałości złącza to:

- wartość przewężenia p: decyduje o wytrzymałości złącza na ścinanie. W przypadku zbyt małej wartości p materiał od strony stempla ulega zerwaniu w najcieńszym miejscu,
- wartość zakładki z: decyduje o wytrzymałości złącza na rozciąganie poprzeczne zwane wyrywaniem. Dzieje się tak, ponieważ w przypadku siły normalnej złącze ulega zazwyczaj rozłączeniu, bez naruszenia materiału od strony stempla i matrycy.

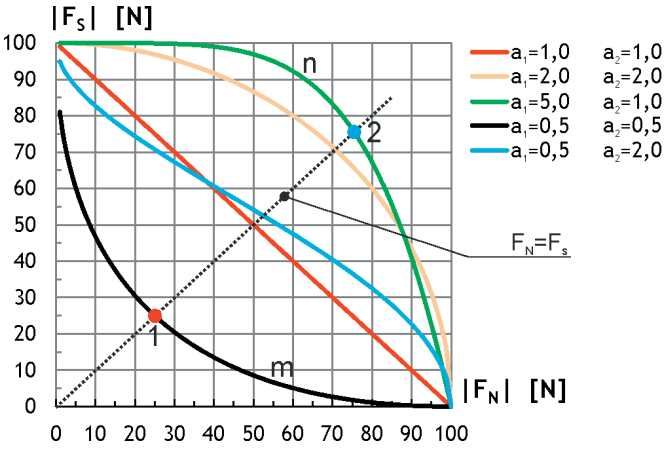
Model połączenia przetłaczanego

Autorzy prac naukowych ograniczają się zazwyczaj do przeprowadzenia badań polegających na wyznaczeniu wartości siły wyrywającej F_{Nmax} oraz ścinającej złącze F_{Smax}. Określenie omawianych współczynników uzyskiwane jest na drodze zrywania serii próbek pod dwoma wzajemnie prostopadłymi kątami. Praktyka ta pozwala na ocenę zachowania połączenia w przypadkach czystego ścinania oraz wyrywania. W rzeczywistości sytuacje takie nie występują, a w złączu panuje złożony stan obciążenia. Poprawne zachowanie modelu połączenia wymaga określenia krzywej nośności, a więc wyznaczenia dodatkowych współczynników a_1 oraz a_2 zawartych we wzorze (1).

$$\left(\frac{F_N}{F_{N_{max}}}\right)^{a_1} + \left(\frac{F_S}{F_{S_{max}}}\right)^{a_2} \leq 1 \qquad (1)$$

gdzie: F_N – wartość siły normalnej,
F_{Nmax} – wartość maksymalnej siły normalnej,
F_S – wartość siły ścinającej,
F_{Smax} – wartość maksymalnej siły ścinającej.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe krzywe nośności złącza zdolnego przenieść maksymalną siłę wyrywającą i ścinającą o wartościach 100 N. Złącze o współczynnikach $a_1 = 0{,}5$ i $a_2 = 0{,}5$ (krzywa m) zerwane zostanie przy siłach $F_N = 25$ N i $F_S = 25$ N (pkt. 1: $F_{WYP} \approx 35$ N), natomiast złącze o współczynnikach $a_1 = 5{,}0$ i $a_2 = 1{,}0$ (krzywa n), obciążane w ten sam sposób (jednakowy procentowy udział siły wyrywającej i ścianającej), zniszczone zostanie przy siłach $F_N = 75$ N i $F_S = 75$ N (pkt. 2: $F_{WYP} \approx 106$ N). Jak widać na powyższym przykładzie, w zależności od omawianych parametrów, wartość siły wypadkowej może różnić się nawet trzykrotnie.



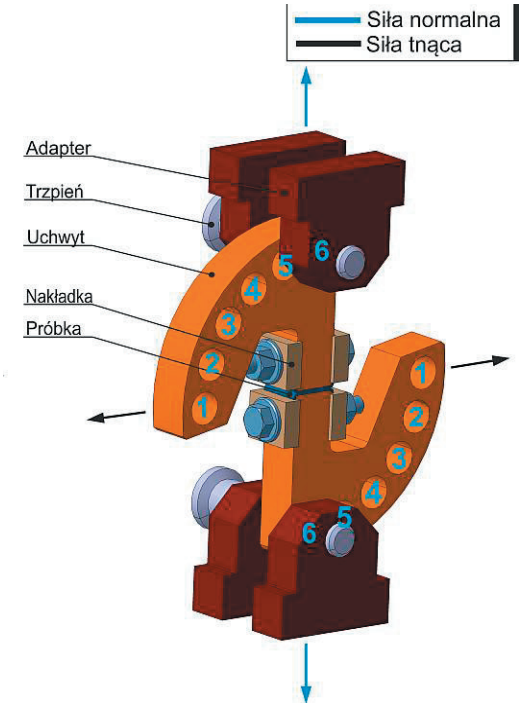
Rys. 3. Zależność nośności złącza od współczynników a_1 i a_2 [4]

Omówiony przykład pokazuje jednoznacznie, iż samo wyznaczenie wartości F_{Nmax} oraz F_{Smax} może być wystarczające jedynie w przypadku porównywania właściwości wytrzymałościowych złącz wykonanych za pomocą tej samej technologii. Wykonanie analiz numerycznych z użyciem elementów rozłącznych, których kryterium zniszczenia opisane jest za pomocą równania (1) wymaga przeprowadzenia dodatkowych eksperymentów celem wyznaczenia współczynników a_1 i a_2.

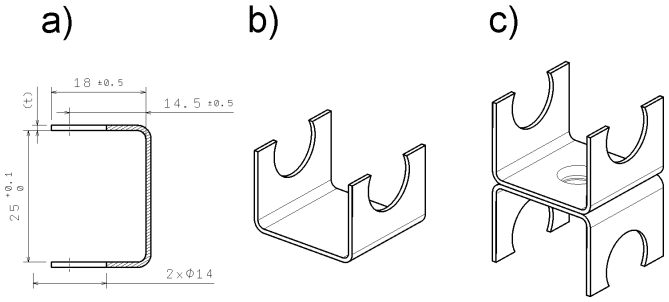
W celu wyznaczenia parametrów a_1 i a_2 złącz przeprowadzono eksperyment polegający na quasi-statycznym zrywaniu połączeń przetłaczanych pod różnymi kątami (przy różnym udziale procentowym sił składowych wyrywającej oraz ścinającej). Wymagał on zaprojektowania i wykonania specjalnego oprzyrządowania maszyny wytrzymałościowej przedstawionego bliżej na rysunku 4.

Badania materiałowe

Próbki do badań wytworzone zostały z pasków o szerokości 25 mm wyciętych na gilotynie do stali. Wykonane elementy były następnie zaginane na numerycznej giętarce krawędziowej. Środniki tak przygotowanych detali zostały ze sobą połączone za pomocą największego z narzędzi firmy ECKOLD do łączenia metodą R-PJ o zewnętrznej średnicy występu (zewnętrzna średnica złącza od strony matrycy) 8,0 mm, tworząc postać końcową próbki do niszczących badań złącz (rys. 5). Poprawność wykonania połączenia sprawdzana była poprzez pomiar grubości dna złącza.



Rys. 4. Zaprojektowany przyrząd pomiarowy



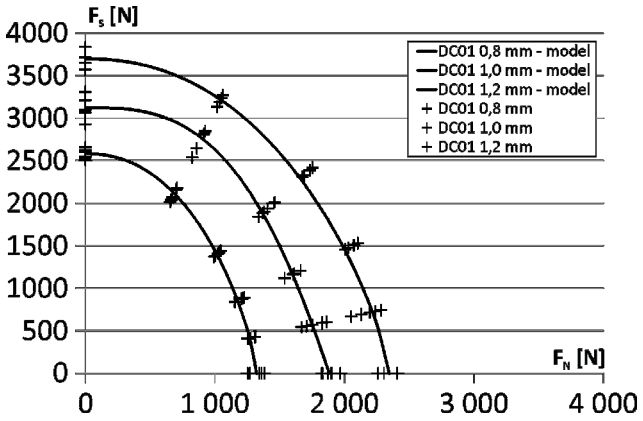
Rys. 5. Próbka do badań złącza: a) przekrój; b) widok izometryczny komponentu; c) widok izometryczny gotowej próbki

Serię pomiarową stanowiły połączenia blach o określonej grubości, wykonane z tego samego materiału. Każda z serii pomiarowych składała się z 29–32 próbek, min. 4 szt. na każdy z badanych kątów. Przebadano grubości blach wyszczególnione w tabeli 1.

Proces quasi-statycznego zrywania połączeń klinczowych przeprowadzony został na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej firmy ZWICK EZ030 o zakresie dopuszczalnych obciążeń 0–30 kN. Badania wykonano z prędkością 5 mm/min.

Tab. 1. Badane rodzaje połączeń klinczowych

Gatunek	Badane grubości [mm]		
DC01	0,8	1,0	1,2



Rys. 6. Dopasowanie modelu do danych pomiarowych – DC01

Rejestracja z częstotliwością 50 Hz odbywała się na komputerze podłączonym do maszyny wytrzymałościowej. Dodatkowo proces zrywania próbek rejestrowany był kamerą wideo.

Po naniesieniu wszystkich punków na wykres $F_S = f(F_N)$ wyznaczono współczynniki a_1 oraz a_2 modelu (1) za pomocą regresji wielorakiej. Pozwoliło to na dostrojenie przyjętego modelu do wyników eksperymentu. Ich wzajemne dopasowanie przedstawiono na rysunku 6.

Wyniki eksperymentu

Wyznaczono współczynniki a_1 i a_2 badanych serii oraz siły F_{Nmax} i F_{Smax}. Wyznaczono także współczynnik korelacji R^2 pomiędzy modelami a zgromadzonymi danymi pomiarowymi. Podczas wizualnej oceny próbek odnotowana została także postać ich uszkodzenia. Pozwoliło to na precyzyjne określenie wartości kątów granicznych oraz zakresu występowania danej postaci zniszczenia. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Analiza pod względem wpływu grubości łączonych materiałów na wytrzymałość złącza nasuwa wniosek, iż zwiększenie grubości łączonych blach prowadzi do wzrostu wytrzymałości połączenia niezależnie od stosunku siły ścinającej i zrywającej.

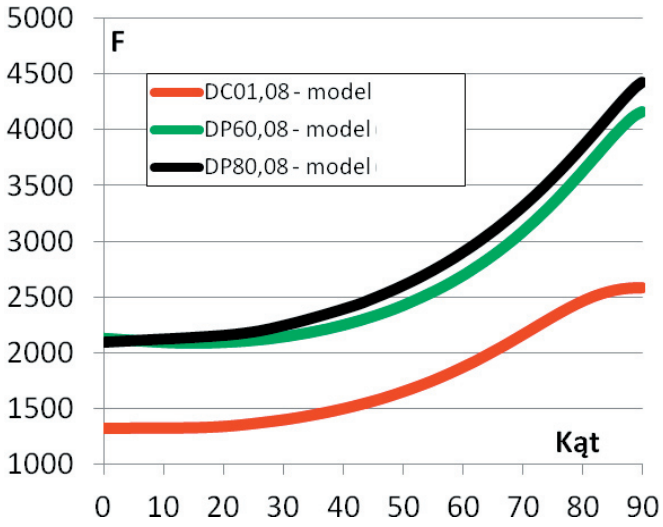
Z rysunku 7 wynika, iż połączenia klinczowe, ze względu na ich wyższą wytrzymałość, powinny być obciążane głównie na ścinanie. Dostrzeżono także, iż wraz ze wzrostem wartości kąta w przedziale (0–30)° następuje nieznaczny wzrost siły wypadkowej. Dla porównania zmiana o tę samą wartość kąta z 90 do 60° powoduje znaczące zmniejszenie wytrzymałości.

Walidacja przyjętego modelu połączenia przetłaczanego

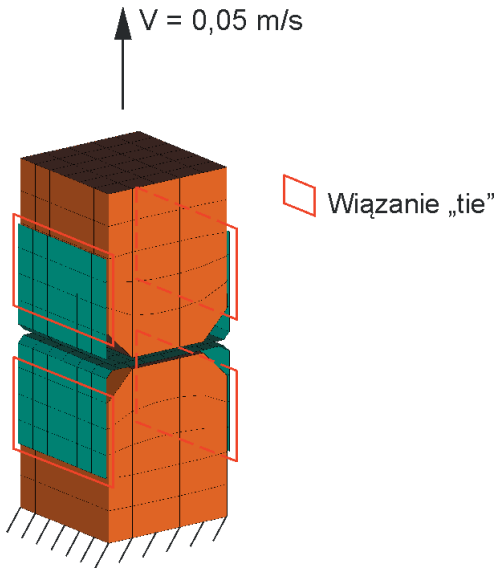
W celu sprawdzenia poprawności działania przyjętego modelu, wykonana została symulacja numeryczna. Utworzono postać geometryczną próbki przedstawionej na rysunku 8. Kolejnym krokiem była dyskretyzacja utworzonych modeli geometrycznych za pomocą powłok. Wykorzystano element

Tab. 2. Wyniki badań złącz klinczowych

Materiał	Grubość [mm]	l. próbek [szt.]	F_{Nmax} [N]	F_{Smax} [N]	a_1 [-]	a_2 [-]	R^2 [-]	Wyrwanie [°]	P. mieszana [°]	Ścięcie [°]
DC01	0,8	31	1322	2581	2,23	1,32	0,97	0–49	49–63	63–90
	1,0	30	1883	3123	2,96	0,97	0,97	0–52		52–90
	1,2	29	2346	3697	2,22	1,30	0,96	0–45		45–90



Rys. 7. Wpływ poszczególnych składowych na wartość siły niszczącej



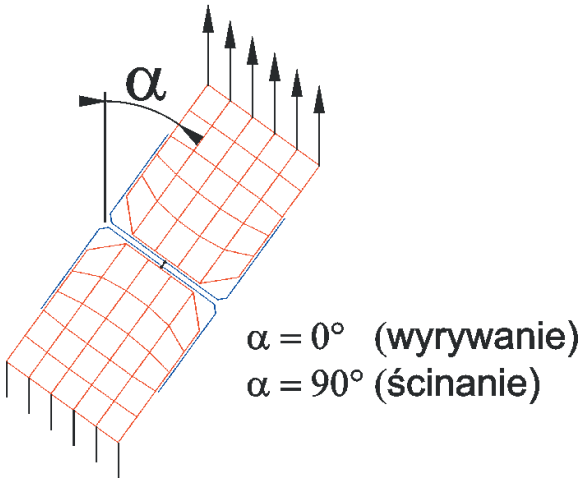
Rys. 8. Model obliczeniowy służący do walidacji złącza

skończony, który zostanie docelowo użyty w symulacjach dynamicznego zgniatania struktur energochłonnych. Ze względu na dużą sztywność przyrządu użytego w badaniach wytrzymałości złącz, jego model dyskretny uproszczono i utworzono jedynie jego końce. Służyły one do zamocowania próbki. Model obliczeniowy przedstawiono na rysunku 8.

Odpowiednie węzły próbki i przyrządu zostały ze sobą połączone za pomocą kontaktu (wiązanie nierozłączne typu „tie”). Jeden z końców przyrządu został utwierdzony poprzez odebranie 3 stopni swobody. Drugiemu nadano wymuszenie w postaci stałej prędkości przyłożonej do wybranych węzłów. Pomiędzy odpowiednimi powłokami oraz powierzchniami elementów objętościowych nadano więz kontaktu wyliczający sztywność na podstawie równoważności mas węzłowych. Korzysta on z globalnego algorytmu wyszukiwania i jest wysoce zalecany z powodu swej dokładności oraz szybkości działania. Przyjęto współczynnik tarcia $\mu = 0{,}15$. Model składał się z około 515 elementów skończonych, których średnia wielkość wynosiła 4 mm.

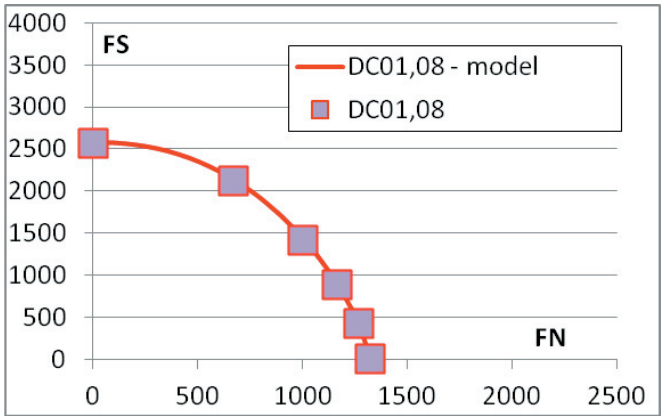
Komponenty badanych próbek połączone zostały ceownikami za pomocą rozłącznych, punktowych więzów. Przyjęto połączenie wielowarstwowe (typu „plink”) [5] [6]. Jest to pozbawiony masy element kontaktowy. Nadaje się do modelowania zgrzein, nitów oraz innych połączeń punktowych. Jest niezależny od utworzonej siatki elementów skończonych i pozwala na wzajemne skojarzenie powłok oraz powierzchni elementów objętościowych znajdujących się w obrębie wskazanego obszaru [7]. Wykorzystany element pozwala na zastosowanie kryterium zniszczenia opisanego równaniem (1), które bazuje na przedstawionych wcześniej parametrach, tj. maksymalnej sile ścinającej F_N i wyrywającej F_S oraz współczynnikach a_1 i a_2.

Dokonano walidacji wybranego modelu na przykładzie próbki wykonanej ze stali DC01 o grubości 1,0 mm. Przeprowadzono serie symulacji polegających na zrywaniu połączenia pod kątami α (rys. 9) wynoszącymi: 0, 18, 36, 54, 72 oraz 90°.



Rys. 9. Definicja kąta α

Wynikiem eksperymentu były wartości sił normalnych oraz ścianających połączenie. Zostały one naniesione na wykres w układzie współrzędnych (F_N, F_S), a następnie skorelowane z utworzonym modelem połączenia (rys. 10).



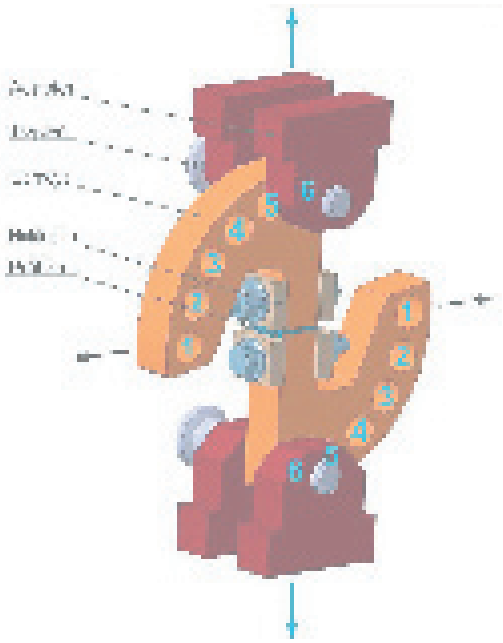
Rys. 10. Korelacja wyników symulacji i przyjętego modelu połączenia – stal DC01 1,0 mm

Wnioski

Omówiono najważniejsze technologie wykonywania punktowych złącz nierozłącznych stosowanych w przemyśle samochodowym. Zwrócono uwage na problem nazbytniego upraszczania modeli złącz punktowych wykorzystywanych w symulacjach numerycznych oraz badania odporności złącz jedynie na ścinanie i rozciąganie poprzeczne. Praktyka ta pozwala

na ocenę zachowania połączenia w prostych stanach obciążenia. W rzeczywistości sytuacje takie nie występują, a w złączu panuje złożony stan obciążenia. Zaprezentowano innowacyjne urządzenie pozwalające na badanie złącz obciążonych dowolną kombinacją sił składowych. Przeprowadzono także czasochłonne eksperymenty zrywania połączeń pod różnymi kątami. Pozwoliło to na wyznaczenie krzywej nośności złącza i opracowanie parametrów modelu zgodnie z przedstawionym równaniem. Wyznaczono współczynniki a_1, a_2, siły F_{Nmax}, F_{Smax} dla blach DC01 o zróżnicowanej grubości oraz wyznaczono wartości graniczne, przy których złącza ulegają ścinaniu, zrywaniu i zniszczeniu w sposób mieszany. Zaproponowane równanie może być także zaimplementowane w systemach obliczeniowych bazujących na MES. Zaproponowany model został poddany walidacji na podstawie stali DC01. Wykazano zgodność modelu numerycznego oraz modelu połączenia.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/03/N/ST8/06383

Literatura

[1] Klimpel A., *Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali*, Technologie, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2010
[2] www.eckold.com, Eckold Clinching. The joining technique of the future, dostęp do strony: 25.01.2013, [Online]
[3] Varis J., *Ensuring the integrity in clinching process*, Journal of Materials Processing Technology, tom 174, nr 1–3, p. 277–285, 2006
[4] Kaczyński P., Modelowanie połączeń klinczowych użytych do łączenia elementów cienkościennych obciążonych udarowo, Interdyscyplinarność badań naukowych, p. 159–164, 2011
[5] ESI Group, Explicit Solver Reference Manual, Paris: ESI Group, 2010
[6] ESI Group, Solver Notes Manual, Paris: ESI Group, 2010
[7] Gunnion A. J., Korber H., Elder D.J. Thomson R. S., *Development of fastener models for impact simulation of composite structures*, w International Congress of Aeronautical Sciencer, Hamburg, 2006
[8] www.worldautosteel.org, AHSS application guidelines, dostęp do strony: 03.01.2013, [Online]
[9] Kaczyński P., Kryterium doboru własności wytrzymałościowych połączeń profili cienkościennych obciążonych udarowo, Interdyscyplinarność badań naukowych, p. 117–120, 2009