

AUTOREFERAT

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć
naukowych, w szczególności określonych
w art. 16 ust. 2 ustawy

Dr inż. Jacek Mucha

Katedra Konstrukcji Maszyn
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska

Rzeszów, styczeń 2014

Autoreferat

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: **Jacek Mucha**

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Stopień doktora Rok uzyskania: **2004**
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Dyscyplina: Budowa i Eksploatacja Maszyn
Tytuł rozprawy doktorskiej: **Wykrawalność blach prądnicowych**
Promotor:
prof. dr hab. inż. Feliks Stachowicz – Politechnika Rzeszowska

Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Józef Zasadziński – Akademia Górniczo-Hutnicza
dr hab. inż. Jan Burek, prof. PRz – Politechnika Rzeszowska

Tytuł magistra Rok uzyskania: **2000**
Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn
Tytuł pracy magisterskiej: **Badanie trwałości narzędzi pokrytych azotkiem tytanu do wykrawania blach prądnicowych**
Promotor:
prof. dr hab. inż. Feliks Stachowicz – Politechnika Rzeszowska

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2002-2004	Asystent, Katedra Przeróbki Plastycznej, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska
2004-2005	Starszy technolog, Katedra Przeróbki Plastycznej, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska
2005-obecnie	Adiunkt, Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

4. Wskazane osiągnięcia wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm.)

4.1 Jednotematyczny cykl publikacji pt.: „Problematyka formowania i statycznej wytrzymałości przetłoczeniowych połączeń blach w konstrukcjach cienkościennych”, stanowiący osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora^{1,2}:

1. ([51]) Mucha J., Współczesne techniki łączenia cienkich blach - zaciskanie przez wytlaczanie (Clinching). *MECHANIK*, 80(2007)11, s.932-939, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich.
2. ([8]) 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*, 11(2011)1, s. 137-148, Elsevier. Liczba cytowań: 3 (Scopus), 7 (Google Scholar). Impact factor: 0.855 (0.963)³.
3. ([9]) Mucha J., The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint. *MATERIALS AND DESIGN*, 32(2011)10, s. 4943-4954, Elsevier. Liczba cytowań: 5 (Scopus), 16 (Google Scholar). Impact factor: 2.2 (2.913).
4. ([7]) Spišák E., Kaščák L., Mucha J., Joining materials used in car body production by clinching. *CHEMICKÉ LISTY*, 106(2012)s3, s. 541-544, Association of Czech Chemical Societies. Impact factor: 0.438 (0.453).
5. ([11]) Mucha J., The analysis of rectangular clinching joint in the shearing test. *EKSPLLOATACJA I NIEZAWODNOSC – MAINTENANCE AND RELIABILITY*, 51(2011)3, s. 45-50, Polish Maintenance Society. Impact factor: 0,333 (0,293).
6. ([20]) Mucha J., Witkowski W., Experimental strength analysis of the joining by clinching of DX51D sheet metal. In: (red. nauk. J. Mucha) *PROGRESSIVE TECHNOLOGIES AND MATERIALS* 4(2013), s. 63-74, ISBN 978-83-7199-889-9, Publishing House of Rzeszow University of Technology.
7. ([6]) Markowski T., Mucha J., Witkowski W., FEM analysis of clinching joint machine's C-frame rigidity. *EKSPLLOATACJA I NIEZAWODNOSC – MAINTENANCE AND RELIABILITY*, 15 (2013)1, s. 51-57, Polish Maintenance Society. Liczba cytowań: 1 (Scopus). Impact factor: 0,293.
8. ([5]) Mucha J., Witkowski W., The experimental analysis of the double joint type change effect on the joint destruction process in uniaxial shearing test. *THIN-WALLED STRUCTURES*, 66(2013), s. 39-49, Elsevier. Impact factor: 1.231.
9. ([31]) Kaščák L., Spišák E., Mucha J., Clinchrivet as an alternative method to resistance spot welding. *ACTA MECHANICA ET AUTOMATICA*, 7(2013)2, s. 79-82, Bialystok University of Technology Publishing Office.

¹ Kopie prac wchodzących w skład cyklu publikacji (stanowiącego osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm.)) zawarte są w odrębnym załączniku (Załącznik 4).

² Numery prac w kwadratowych nawiasach odpowiadają podanym w załączniku 3a.

³ Wskaźnik IF zgodny z rokiem publikacji, zaś w nawiasie podano obowiązujący w 2013 roku.

10. ([2]) Mucha J., Kaščák L., Spišák E., The experimental analysis of forming and strength of clinch riveting sheet metal joint made of different materials, *ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING*, DOI: 10.1155/2013/848973, Hindawi. Impact factor: 1.062.
11. ([18]) Kaščák L., Mucha J., Slota J., Spišák E., Application of modern joining methods in car production. Monografia Oficyny Wydawniczej Politechniki Rzeszowskiej, ISBN 978-83-7199-903-8, Rzeszów 2013, Polska, s. 1-146.

4.2 Omówienie celu naukowego poszczególnych prac oraz osiągniętych wyników

a) Wprowadzenie

Kierunki moich pierwszych prac badawczych zdeterminowane zostały wiedzą zdobytą podczas studiów doktoranckich oraz pracy w Katerze Przeróbki Plastycznej na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Po przejściu w 2005 roku do Katedry Konstrukcji Maszyn głównym zagadnieniem moich dociekań naukowych stało się formowanie i statyczna wytrzymałość połączeń przetłoczeniowych.

Przy bardzo dużym wsparciu kierownika Katedry Konstrukcji Maszyn prof. T. Markowskiego możliwe było utworzenie Laboratorium Badawczego Połączeń Prasowanych. Dzięki temu moje prace badawcze stanowią nowe spojrzenie na aspekt formowania połączeń prasowanych realizowanych różnymi technologicznymi metodami. Jednocześnie, prowadząc własne analizy, podjąłem współpracę badawczą z naukowcami z Uniwersytetu Technicznego w Koszycach oraz doktorantem z Politechniki Wrocławskiej. Efektem tego było szereg ważnych publikacji.

Przedstawiony do oceny cykl prac obejmuje jedenaście publikacji tematycznie związanych z zagadnieniem formowania i statycznej wytrzymałości połączeń przetłoczeniowych. Poszczególne opracowania dotyczą procesu technologicznej realizacji kształtowania połączeń oraz zapewnienia ich określonej wytrzymałości. Do istotnych oryginalnych osiągnięć naukowo-badawczych wynikających z tych prac zaliczam:

- określenie wpływu zmiany układu grubości blach podczas formowania na ukonstytuowanie się struktury zamka oraz statyczną wytrzymałość połączenia;
- zbadanie możliwości formowania połączenia dwóch blach o różnej plastyczności tym samym zestawem narzędzi;
- wykazanie wpływu warunków realizacji procesu kształtowania, w tym maksymalnej siły formowania F_{fmax} , geometrii narzędzi na tworzenie się zamka scalanych elementów;
- wykazanie wpływu zastosowania dodatkowego nita na zwiększenie wytrzymałości połączenia oraz zmiany wartości parametrów zamka i twardości materiału przetłoczenia;
- określenie maksymalnej nośności połączeń wykonanych różnymi technikami plastycznego formowania.

b) Krótka charakterystyka celu naukowego, wyników oraz oryginalnego wkładu ww. prac składających się na jednotematyczny cykl

W pracy [51] „*Współczesne techniki łączenia cienkich blach – zaciskanie przez wytłaczanie (Clinching)*” przedstawiłem krótko technologię połączeń prasowanych za pomocą przetłaczania materiału łączonych blach. Opisałem przebieg procesu formowania, narzędzia stosowane do kształtowania oraz przykłady aplikacji wspomnianych złączy w cienkościennych konstrukcjach. Dokonałem także przeglądu i krótkiej charakterystyki podstawowych odmian połączeń. Publikacja stanowi wprowadzenie w jednotematycznym cyklu.

Połączenia przetłoczeniowe (ang. „*clinching*” - CL) posiadają szereg zalet w porównaniu z klasycznymi metodami łączenia, takimi jak np. spawanie, zgrzewanie, nitowanie klasyczne. Najważniejszą jest to, że są otrzymywane bez stosowania dodatkowych łączników w postaci nita, spoiwa w postaci elektrody. W porównaniu z nitowaniem czy skręcaniem czas cyklu powstawania jest krótki (najczęściej od 0.6÷1.2 sekundy) a koszt uzyskania niski. Podczas łączenia nie występuje emisja ciepła i oparów gazów, a przede wszystkim nie jest wymagany otwór. Technologia połączeń „*clinching*” należy do grupy szybko rozwijających się technologii plastycznego formowania na zimno. Obecnie powstające nowe rozwiązania są modyfikowane pod kątem zmiany kształtu narzędzi oraz zastosowania dodatkowego łącznika tak by uzyskać zwiększoną statyczną wytrzymałość scalenia.

Najpopularniejszym sposobem łączenia elementów wytwarzanych z blach jest punktowe zgrzewanie. Dbałość firm o środowisko naturalne oraz chęć obniżenia kosztów produkcji powodują zastępowanie w coraz większym stopniu stosowanych rozwiązań nowymi technologiami montażu. Połączenia przetłoczeniowe w bardzo dużym stopniu są stosowane podczas procesów montażowych cienkościennych konstrukcji blaszanych. Największym beneficjentem nowych rozwiązań technologii łączenia jest przemysł motoryzacyjny. Prostota połączenia CL oraz procesu formowania pozwala na zastosowanie zarówno w produkcji seryjnej, jak też jednostkowej. Przy wytwarzaniu wielkoseryjnym oraz masowym dla przedmiotów o nieskomplikowanych kształtach wykorzystuje się odpowiednio przystosowane do tego celu roboty (manipulatory) w połączeniu z prostymi prasami. Natomiast dla bardziej złożonych elementów stosuje się specjalizowane stanowiska montażowe.

W przypadku omawianych złączy istotne znaczenie na ich ukształtowanie i ostateczną wytrzymałość ma układ grubości blach. Podczas formowania odwrócenie układu grubości i rodzaju materiału blach w stosunku do matrycy powoduje istotną zmianę wartości maksymalnej siły ścinającej złącze. W kolejnej pracy [8] „*Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements*” cyklu przedstawiono przy wykorzystaniu blach z materiału DD13, DD14 oraz DX53D+Z wyniki badań eksperymentalnych łączenia przez przetłaczanie i zgrzewanie. Eksperymentalna analiza dotyczyła wpływu zmiany układu materiału i grubości blach w stosunku do matrycy podczas łączenia na maksymalną nośność złączy przetłoczeniowych. Blachy użyte do badań są wykorzystywane w produkcji konstrukcji samochodowych m.in. w *Volkswagen Group w Bratislave, Skoda Mlada Boleslav*. W celu porównania efektów łączenia metodą przetłaczania wykonane zostały połączenia zgrzewane. Parametry zgrzewania dobrano zgodnie z obowiązującymi zaleceniami dla tych blach, tak by powstała średnica czynna zgrzeiny (d_z) posiadała wymiar zbliżony do średnicy połączenia przetłoczeniowego.

W przypadku połączenia przetłoczeniowego postać zniszczenia ma charakter lokalnej deformacji (zgniecenia lub częściowego pęknięcia i wyrwania przetłoczonego zamka). Natomiast w wyniku prawidłowo wykonanej zgrzeiny, pozostaje ona w całości - rozerwaniu ulega jedynie materiał blachy. Maksymalna wytrzymałość złączy przetłoczeniowych w badanych przypadkach układu i grubości blach była niższa niż zgrzewanych oporowo. Kompensacja (zwiększenie) wytrzymałości może odbyć się na drodze zwiększenia średnicy złącza lub ich liczby. Fakt ten jest uwzględniony w konstrukcjach nadwozi samochodowych. Praca [8] stanowi pewnego rodzaju studium naukowe z zakresu formowania i statycznej wytrzymałości połączeń formowanych technologią przetłaczania. Osiągnięciem o znaczeniu naukowym, ale także i użytecznym jest ocena wpływu wielkości udziału grubości blachy górnej w stosunku do dolnej na powstanie połączenia i jego statyczną wytrzymałość.

Na podstawie zdobytego doświadczenia z realizacji łączenia miękkich blach postanowiłem przeprowadzić analizę formowania połączenia przetłoczeniowego. W pracy [9] „*The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint*” podjąłem próbę wyjaśnienia mechanizmu tworzenia zamka w połączeniu przetłoczeniowym, uwzględniając regulację przepływu materiału blach. Badania doświadczalne nad tworzeniem zamka składały się

z dwóch części: badań numerycznych formowania złącza dla różnych modeli geometrii narzędzi oraz eksperymentalnej analizy wpływu siły prasowania na wytrzymałość połączenia.

W badaniach symulacji numerycznej formowania połączenia z zastosowaniem metody elementów skończonych wykazałem rolę kształtu i geometrii narzędzi na regulację płynięcia materiału, dla sztywnej matrycy. Dopasowanie modelu MES potwierdzono eksperymentalnie. Analiza odkształceń, prędkości przepływu materiału oraz maksymalnej siły formowania połączenia przetłoczeniowego pozwala na lepsze zaprojektowanie połączenia z uwzględnieniem obciążenia narzędzi i wydatku energetycznego niezbędnego do ukształtowania zamka.

Wyniki wykazały, że przyczyną ukonstruowania się odpowiedniej struktury zamka połączenia są relacje między określonymi cechami geometrii narzędzi formujących. Zwiększenie siły nacisku podczas formowania złącza daje efekt w postaci zmiany parametrów zamka: t_n i t_s . Wzrost siły nacisku wymusza zmniejszenie grubości dna (X), bez większej zmiany przewężenia (t_n), natomiast zwiększa się wartość penetracji promieniowej materiału blachy górnej w dolnej (t_s). Przekłada się to bezpośrednio na wytrzymałość złącza. Wartość maksymalnej siły łączenia (P_{max}) pośrednio wskazuje czy wymiary narzędzi zostały właściwie dobrane. Geometria rowka w dnie matrycy istotnie wpływa na utworzenie się zamka oraz maksymalną siłę formowania. Mniejsza szerokość rowka w matrycy powoduje zmianę kierunków płynięcia materiału blach podczas tworzenia się zamka. Zmiana wielkości promienia zaokrąglenia stempla i matrycy również istotnie wpływa na wartość maksymalnej siły kształtowania. Modyfikacja promieni narzędzi użytych do łączenia przekłada się bezpośrednio na kształt i parametry zamka: t_n i t_s . Zwiększenie względnego promienia stempla powoduje wzrost siły kształtowania, natomiast w przypadku matrycy - obniżenie jej wartości w stosunku do uzyskanej dla narzędzi w modelu bazowym.

Często podczas montażu cienkościennych konstrukcji zachodzi konieczność łączenia ze sobą różnych materiałów. Stąd ważnym zagadnieniem jest analiza możliwości łączenia materiałów o różnych granicach plastyczności. W opracowaniu [7] „*Joining materials used in car body production by clinching*” przedstawione zostały niektóre aspekty problematyki łączenia blach o różnej wrażliwości na odkształcenie plastyczne. W pracy wykazano, że w przypadku łączenia materiałów o odmiennych zdolnościach do odkształcenia plastycznego możliwość uzyskania połączenia bez naruszenia spójności materiału za pomocą narzędzi o jednakowej geometrii jest mocno ograniczona. Podczas eksperymentalnego ścinania zakładkowego połączenia blach z H220PD i TRIP typu RA-K 40/70 wystąpiło pęknięcie materiału dolnej zewnętrznej części wybruszenia przetłoczenia. Świadczy to, że w przypadku dolnej warstwy formowanie odbyło się na granicy warunków zachowania ciągłości materiału. Obciążenie materiału przetłoczenia podczas ścinania spowodowało przekroczenie granicznych odkształceń, skutkiem tego były wspomniane pęknięcia. W kolejnych przypadkach łączenia tymi samymi narzędziami, lecz o innej kolejności ułożenia materiałów od strony stempla (tj. układ RA-K 40/70 i H220PD oraz RA-K 40/70 i DX51D) okazało się niemożliwe uzyskanie poprawnego połączenia. W górnej warstwie wystąpiło pocienienie materiału i całkowite pęknięcie szyjki zamka w przetłoczeniu. Najlepsze rezultaty utworzenia połączenia spośród badanych materiałów uzyskano dla układu DX51D z RA-K 40/70 oraz H220PD z H220PD. Dla porównania wytrzymałości połączeń przetłoczeniowych wykonano również zgrzewane oporowo.

W procesie montażowym blach o mocno zróżnicowanej zdolności do odkształceń plastycznych należy szczególnie zwrócić uwagę na dobór geometrii narzędzi. Dla każdego układu materiału blach można dobrać optymalną geometrię narzędzi formujących. Jednak biorąc pod uwagę, że te same narzędzia zamontowane w C-ramie przemysłowego robota mają zapewnić montaż połączeń dla całej konstrukcji, zatem wszystkie złącza nie są formowane z optymalnym kształtem stempla i matrycy. Głównym celem naukowym publikacji [7] było określenie możliwości kształtowania połączenia dla różnych układów rodzaju materiału blach tymi samymi stemplem i matrycą.

Inną odmianą technicznej realizacji połączenia przetłoczeniowego jest formowanie prostokątnego złącza z celowym naruszeniem spójności materiału (nacięciem). Wytrzymałość tego typu scalenia na działanie zewnętrznego obciążenia ścinającego z racji kształtu scalenia nie jest jednakowa. Zależy ona bowiem od jego usytuowania względem kierunku działania głównego obciążenia. 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.

Wiedza na temat mechanizmu zniszczenia odgrywa kluczową rolę podczas projektowania i późniejszej eksploatacji tych złączy. W pracy [11] „*The analysis of rectangular clinching joint in the shearing test*” przedstawiłem analizę wpływu zmiany kąta ułożenia złącza (w stosunku do obciążenia) na wartość krytyczną siły powodującej całkowite rozdzielenie pasm blach. Ponadto przeprowadziłem analizę przebiegu zniszczenia tak obciążonych złączy.

Analizę eksperymentalną wykonano dla materiału blach: stop Al99,5 (wg ISO). Materiał celowo dobrano tak by zminimalizować wpływ wygięcia blach podczas testu ścinania zakładkowego połączenia. Z racji braku symetryczności połączenia względem płaszczyzny działania obciążenia ścinającego przetłoczenie blachy poddane są dodatkowemu momentowi powodującemu odchylenie blach podczas testu ścinania. Największa dyssypacja energii całkowitego zniszczenia złącza wystąpiła dla kąta ścinania 90° (nacięcia poprzecznie usytuowane do kierunku działania obciążenia).

Do oryginalnych osiągnięć naukowych wynikających z realizacji badań opisanych w pracy [11] można zaliczyć określenie sposobu degradacji zamka oraz określenie fragmentów materiału przetłoczenia, w których lokalizują się odkształcenia w zależności od kąta działania siły obciążenia. Określenie zachowania się i sposobu zniszczenia elementów przetłoczenia z nacięciem jest istotne z punktu widzenia praktycznego, ponieważ pozwala na właściwe usytuowanie kierunku nacięcia połączenia prostokątnego względem przewidywanego obciążenia w cienkościennych konstrukcjach.

Parametryczna analiza kształtowania i wytrzymałości połączenia przetłoczeniowego daje odpowiedź na szereg pytań związanych z projektowaniem i montażem elementów konstrukcji cienkościennych. Często siła obciążenia nie leży w płaszczyźnie kontaktu blach, lecz zawarta jest w płaszczyźnie nachylonej pod pewnym kątem. Stąd istotne są również badania nad nośnością tych połączeń dla kierunków innych niż dla ścinania. Kolejna praca [20] „*Experimental strength analysis of the joining by clinching of DX51D sheet metal*” stanowi kontynuację analizy wytrzymałości dla złożonego stanu obciążenia połączenia przetłoczeniowego, tym razem formowanego sztywną okrągłą matrycą. Przedstawiono również wpływ sztywności zamocowania pasm blach na maksymalną nośność oraz mechanizm zniszczenia połączenia.

Zwiększenie wytrzymałości złącza może odbyć się przez zmniejszenie m.in. grubości dna przetłoczenia X . Jednak skutkuje to zwiększeniem zapotrzebowania na siłę formującą połączenie, co przekłada się na zwiększenie energetyczności procesu. Zmniejszenie grubości dna wymusza w dość istotny sposób płynięcie materiału w pustą przestrzeń wykroju matrycy. To z kolei doprowadza do zmiany parametrów zamka: t_n i t_s . Ścinane zakładkowe próbki połączeń z różną wartością X wykazują odmienny mechanizm zniszczenia w obszarze przetłoczenia.

Wyniki przedstawione w pracy [20] dotyczące określenia wytrzymałości połączenia na ścinanie w zależności od sztywności zamocowania scalonych pasm blach, przyczyniają się do ulepszenia metodyki projektowania i racjonalnej lokalizacji połączeń w cienkościennych konstrukcjach. Ponadto jednym z głównych rezultatów jest również wykres przebiegu funkcji zniszczenia

przetłoczenia w zależności od grubości dna przetłoczenia X dla dwuosowego stanu obciążenia złącza.

W procesach wytwórczych z udziałem przeróbki plastycznej ważne jest zapewnienie odpowiednio dużej sztywności narzędzi formujących oraz korpusu. W przypadku łączenia przez przetłaczanie zazwyczaj korpus stanowi C-rama. Mała sztywność korpusu nośnego urządzenia skutkuje zwiększonym odchyleniem osi narzędzi i tym samym błędem zachowania jednakowych właściwości we wszystkich promieniowych jego kierunkach (np. dla okrągłego złącza). W wyniku ugięcia C-ramy położenie powierzchni bazowej do ustalenia matrycy ulega odchyleniu, a to wpływa na zmianę wartości parametru X . Składowa przemieszczenia w osi x (zgodnej z przemieszczeniem stempla) ma wpływ na uzyskanie określonej grubości dna przetłoczenia X . Wartość X w złączu jest mierzalnym parametrem technologicznym, od którego zależy odpowiednie uformowanie zamka łączonych materiałów. Nowoczesne układy sterujące pozwalają na kompensację ugięcia ramy w kierunku osi x z dokładnością ± 0.01 mm, natomiast kompensacja wartości składowej ugięcia w kierunku y (prostopadłym do przemieszczenia stempla) jest praktycznie niemożliwa. W przypadku łączenia cienkich blach ma to szczególne znaczenie, stosunkowo łatwo może bowiem dojść do drastycznego jednostronnego pocienienia ścianek połączenia.

Zagadnienie analizy sztywności C-ramy zostało przedstawione w pracy [6] „*FEM analysis of clinching joint machine's C-frame rigidity*”. Celem tego opracowania była analiza sztywności wybranych rozwiązań geometrii C-kształtnej ramy urządzenia wchodzącego w skład manipulatora robota przemysłowego służącego do montażu połączeń przetłoczeniowych. Informacje uzyskane w wyniku realizacji tej pracy mają znaczenie praktyczne. Pozwalają na bardziej racjonalne zaprojektowanie ramy. Jednym z głównych rezultatów jest wyznaczenie funkcji promieniowego przemieszczenia punktu pomiarowego znajdującego się na powierzchni ustalenia matrycy. Otrzymane wyniki, dotyczące analizy zmiany sztywności C-ramy w wyniku nadania jej określonego kształtu i - co z tym związane - zmiany masy, pozwalają na bardziej racjonalne ich projektowanie, tak by nie obciążać niepotrzebnie elementów manipulatorów dodatkowymi siłami pochodzącymi od zbędnej masy. Rezultaty oceny jakościowej przedstawione w pracy mogą być przydatne dla konstruktorów podczas projektowania innego typu ram.

Najczęstszym sposobem łączenia jest nitowanie, które wymaga wykonania wcześniej otworu i odpowiedniego pozycjonowania elementów tak aby możliwe było umieszczenie łącznika. Obecnie rozwiązania konstrukcji złącza nitowego wykazują dość zróżnicowaną maksymalną nośność, począwszy od kilku do kilkunastu a nawet kilkudziesięciu kN. Zaś najprostszym i najtańszym sposobem formowania połączenia prasowanego bez użycia dodatkowego łącznika jest przetłaczanie („clinchng”-CL). Znanych jest szereg odmian połączeń, z których najbardziej popularne mają okrągły kształt, formowane są przy użyciu jednolitych narzędzi. Jednak nie zawsze w każdym przypadku rodzaju i grubości materiału blach połączenia przetłoczeniowe wykazują zbliżoną nośność do stosowanych klasycznych rozwiązań. Stąd opracowywane są różne modyfikacje by zwiększyć ich statyczną wytrzymałość.

Nowym, mało znanym rozwiązaniem jest technologia połączeń przetłoczeniowych z nitem pełnym (np. „ClinchRivet”-CR). Wybór rodzaju połączenia zależy od szeregu czynników: materiałowych, wytrzymałościowych i technologicznych.

W pracy [5] „*The experimental analysis of the double joint type change effect on the joint destruction process in uniaxial shearing test*” przedstawiono zastosowanie nowej technologii łączenia „ClinchRivet” za pomocą specjalnie wciskanego nita. Okrągłe połączenia „clinchng” wykazują izotropowe właściwości wytrzymałościowe. Złącze wykonane w technologii CR posiada różną charakterystykę ścinania w zależności od jego ułożenia względem kierunku obciążenia. Zmiana kierunku działania obciążenia o kąt 45° w takim złączu powoduje znaczny wzrost przemieszczeń do uzyskania wartości szczytowej siły niszczącej. Podczas ścinania

podobnie jak w przypadku połączeń „clinchng” zniszczenie przetłoczenia następuje w obszarze przewężenia. Zablokowany nit w blasze nie pozwala jednak na całkowite ścięcie przetłoczenia, a ostatecznie rozdzielenie następuje przez wyrwanie materiału blachy górnej z dolnej.

W opracowaniu [5] przedstawiono również wyniki badań nad wpływem zmiany sposobu ułożenia podwójnego połączenia względem kierunku obciążenia na maksymalną siłę ścinającą. Dokonano również eksperymentalnej analizy wpływu zmiany rodzaju złącza w podwójnym połączeniu blach na nośność i sposób zniszczenia. Uzyskane wyniki pozwoliły na wyjaśnienie na ile wybrane rodzaje połączeń mogą być efektywne we wzmocnieniu scalenia elementów cienkościennych konstrukcji z blachy stalowej S350 GD. Do badań wykorzystano ocynkowaną blachę, szeroko stosowaną na profile zimno gięte, z których buduje się konstrukcje nośne obiektów przemysłowych i mieszkalnych.

Niekiedy pojedyncze połączenie w takich konstrukcjach np. nitowe występuje razem z innym typem: okrągłym czy prostokątnym przetłoczeniowym, nitowanym bezotworowo, przetłoczeniowym z dodatkowym nitem lub z blachowkrętem. Wówczas to dodatkowe spełnia często rolę wzmocniającego lub wstępnie łączącego np. profile. Wzmocnienie pojedynczego złącza drugim w odległości 20 mm powoduje w niektórych przypadkach znaczny wzrost siły niszczącej połączenie. Największy efekt uzyskano dla połączeń wykonanych z nitem zrywalnym, zarówno dla ułożenia poprzecznego jak i równoległego. Zmiana kierunku działania siły obciążenia podwójnego połączenia wpływa na przebieg krzywej ścinania. Spośród badanych kombinacji największą wrażliwość na zmianę kierunku obciążenia wykazały nitowane bezotworowo. Najmniejszą zaś wykonane z użyciem nitów zrywalnych.

Najbardziej kosztowne i skomplikowane pod względem budowy urządzenia do wytwarzania połączeń stanowią systemy „ClinchRivet” i „Fastriv”. Pod względem kosztów samego wytworzenia, połączenia „clinchng” są najtańsze, co powoduje dużą ich konkurencyjność. Posiadają jednak, w stosunku do innych typów złączy, dość niską wytrzymałość. Oryginalnym osiągnięciem przedstawionych rezultatów w pracy [5] jest wykazanie zmiany przebiegu zniszczenia oraz struktury nośności podwójnego mieszanego połączenia w zależności od kombinacji zastosowanych metod scalenia. Publikacja powstała w wyniku współpracy pomiędzy pracownikami Katedry Konstrukcji Maszyn Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej a firmy StalArt Sp. z o.o. z siedzibą w Brzeźnicy.

W coraz większym stopniu do wytwarzania elementów pojazdów samochodowych wykorzystywane są nowe materiały, w tym mikrostopowe stale o podwyższonej granicy plastyczności. Łączenie nowych nowoczesnych materiałów za pomocą klasycznego zgrzewania czy spawania jest niekiedy utrudnione.

Nowe, często oparte o znane już, ale zmodyfikowane rozwiązania pozwalają na łączenie materiałów o specjalnym przeznaczeniu. W zależności od rodzaju materiału łączonych blach połączenia przetłoczeniowe formowane z dodatkowym nitem w niektórych przypadkach dorównują wytrzymałością połączeniom zgrzewanym. W kolejnej pracy [31] „*Clinchrivet as an alternative method to resistance spot welding*” przedstawione zostały wyniki badań nad statyczną wytrzymałością połączeń „CR” w konfrontacji ze zgrzewanymi oporowo. Krzywe ścinania dla początkowych wartości przemieszczeń podczas testów obciążeniowych są bardziej strome niż dla złączy zgrzewanych. Świadczy to o większej sztywności węzła dzięki zastosowanemu nitowi.

Technologie plastycznego łączenia elementów konstrukcji blaszanych cieszą się coraz większym powodzeniem. Zaliczane są do grupy „białych” technologii wytwarzania. Jak już wcześniej wspomniano, w większości przypadków połączeń „clinchng” statyczna wytrzymałość jest niższa niż dla połączeń zgrzewanych. Zwiększenie wytrzymałości tych połączeń można dokonać stosując większą siłę formowania tak by otrzymać zmniejszoną wartość grubości dna X przetłoczenia. Innym sposobem jest zastosowanie zmodyfikowanej metody przetłaczania za pomocą nita.

Głównym celem naukowym kolejnej pracy cyklu [2] „*The experimental analysis of forming and strength of clinch riveting sheet metal joint made of different materials*” było określenie możliwości formowania połączeń blach dla różnych materiałów z zastosowaniem jednego typu nita w technologii „CR”. Przedstawiono możliwości zwiększenia nośności połączenia przetłoczeniowego przez zastosowanie specjalnego nita.

Formowanie złączy wykonano dla okrągłej matrycy jednolitej i prostokątnej z przesuwными segmentami (SKB) przeznaczonej do formowania połączeń z użyciem nita w technologii „CR”. Oceny właściwości nośnych połączeń dokonano za pomocą pomiaru maksymalnej siły obciążenia w oparciu o test ścinania na maszynie wytrzymałościowej. Dla porównania wpływu zmiany technologii łączenia na odkształcenia materiału łączonych blach dokonano pomiaru mikrotwardości.

Analogicznie jak w przypadku połączenia „CL” w połączeniu „CR” formuje się zamek materiału. Mierzalnymi parametrami zamka są wielkość t_n i t_u . Wytrzymałość i mechanizm zniszczenia połączenia „CR”, podobnie jak w przypadku „CL”, zależy głównie od wielkości utworzonego zamka oraz proporcji między parametrem t_n i t_u .

Oryginalnym wkładem w rozwój tej tematyki jest wykazanie wpływu nita na zwiększenie się geometrycznych parametrów zamka. Na podstawie obserwacji zglądów wyznaczone zostały wartości parametrów zamka: t_n i t_u , zarówno dla połączeń „CR”, jak i „CL”. Rezultaty badań przedstawione w pracy [2] należą do oryginalnych osiągnięć naukowych z zakresu formowania i statycznej wytrzymałości tych połączeń. Niewątpliwie cennym aspektem tego opracowania jest analiza zmiany mikrotwardości struktury materiału na przekroju tych złączy.

Monografia [18] „*Application of modern joining methods in car production*” stanowi pewnego rodzaju podsumowanie dotychczasowych prac prowadzonych samodzielnie oraz we współpracy z naukowcami Uniwersytetu Technicznego w Koszycach. W trakcie dwóch staży, które odbyłem w 2011 i 2013 roku, wraz z osobami z tego ośrodka naukowego prowadziłem badania nad możliwością formowania połączeń prasowanych różnymi technikami. Szereg prac związanych z realizacją projektów dla przemysłu miało charakter aplikacyjny. Na szczególną uwagę zasługuje rozdział czwarty, który oprócz obszernego podsumowania w postaci omówienia odmian technicznej realizacji formowania połączeń prasowanych zawiera cenne wyniki z analizy ich wytrzymałości. Przedstawiono w nim możliwości najbardziej popularnych dzisiaj technologii formowania połączeń pod naciskiem. Omówiono również możliwości formowania połączenia przetłoczeniowego z użyciem prostokątnej matrycy z ruchomymi segmentami (C-SKB). Za pomocą matrycy z ruchomymi segmentami możliwe jest zwiększenie parametrów zamka t_n i t_u . Jej zastosowanie znacznie zmniejsza wymaganą siłę prasowania oraz energię do uformowania. Podczas prasowania stemplem materiał blach zostaje wciskany w wykrój matrycy i następuje jego płynięcie w kierunku promieniowym. Ruchome segmenty wraz z płynącym promieniowo materiałem blach przesuwają się umożliwiając tworzenie się zamka. Dzięki takim ruchom elementów matrycy tworzy się zamek przy znacznie mniejszej sile niż podczas formowania z użyciem matrycy jednolitej.

Wprowadzenie nita (CR) do formowania połączenia przetłoczeniowego z zastosowaniem matrycy o ruchomych segmentach zwiększa maksymalną jego nośność nawet o 65÷80%. Wymaga to jednak większego wydatku siły formowania o ok. 30÷40% w porównaniu, gdy kształtowanie odbywa się okrągłą matrycą jednolitą. Największy znaczący wzrost siły formowania, bo rzędu 290%, zaobserwowano dla materiału blach ze stopu aluminium – zaś siła ścinająca F_{max} wzrosła o ok. 120%.

Krzywe ścinania w początkowym zakresie przemieszczeń dla połączenia CR są bardziej strome. Dla tych połączeń wymagana jest również większa energia do całkowitej separacji blach w porównaniu do złączy C-SKB. Spowodowane jest to usztywnieniem połączenia przez nit. Krzywe ścinania połączenia C-SKB w początkowym zakresie odkształceń charakteryzuje bardziej łagodny wzrost wartości siły ścinającej. Dla nich też uzyskuje się mniejsze wartości maksymalnej siły F_{max} ale i mniejszą energię zniszczenia.

Przedstawione wyniki własnych badań, dotyczące analizy efektywności różnych odmian technicznej realizacji plastycznego formowania połączeń blach, stanowią istotny wkład w rozwój tematyki związanej z połączeniami prasowanymi. Niewątpliwie jest to pierwsze w Polsce takie kompleksowe opracowanie. Do oryginalnych osiągnięć tego opracowania można zaliczyć określenie nośności połączeń przetłoczeniowych wykonanych różnymi technikami plastycznego formowania.

c) Podsumowanie

Realizowane przeze mnie prace badawcze stanowią dwa przenikające się nurty. Jeden związany jest z badaniami procesów kształtowania plastycznego połączeń blach z różnych materiałów i ma charakter badań podstawowych. Drugi o charakterze aplikacyjnym dotyczy wykorzystania technologii połączeń prasowanych do montażu cienkościennych konstrukcji blaszanych, zastępujących dotychczas stosowane np. zgrzewanie oporowe.

W przypadku formowania połączeń ważne jest zachowanie ciągłości materiału w obrębie scalenia. Dalsze badania dotyczyć również będą modelowania formowania połączenia z uwzględnieniem odpowiedniego kryterium odkształcalności granicznej. Opracowanie takiego modelu pozwoli w pełni symulować formowanie połączenia jak również późniejsze wirtualne testy ścinania.

W kolejnych pracach zamierzam kontynuować tematykę związaną z doskonaleniem technologii spajania. Nowe opracowania odmian złączy, bądź usprawnienia technologii łączenia, są przygotowywane do eksperymentalnej realizacji. Zamierzam szczególnie skupić się na badaniach dotyczących wpływu prędkości oraz dodatkowego źródła ciepła na konstytuowanie się struktury i wytrzymałość połączenia. Będą one mieć charakter podstawowy i uwzględnią również zużycie narzędzi.

Obecnie jest w recenzji (czasopismo *Thin-Walled Structures*) jedna ważna z punktu widzenia analizy sztywności tego typu połączeń publikacja „*The analysis of clinching joint strength in the aspect of formation technology and its load capacity*”. Dotyczy zagadnienia analizy określonych wskaźników wyznaczanych podczas testu ścinania, zgodnie z nową normą ISO/FDIS 12996: 2013.

5. Przegląd pozostałych ważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych udokumentowanych publikacjami⁴

Tematyka pozostałych moich prac opublikowanych w czasopismach krajowych i zagranicznych, uzupełniających dokonania naukowe przedstawione w punkcie 4 autoreferatu obejmuje zagadnienia związane również z połączeniami. Pozostałe ważniejsze prace niewchodzące w skład cyklu stanowią uzupełnienie całościowego ujęcia problemów formowania połączeń w konstrukcjach blaszanych z uwzględnieniem statycznej ich wytrzymałości. Kilka z nich opisuje ważniejsze rozwiązania technologii formowania i zastosowania połączeń w procesach montażowych [52, 53]. Wyniki:

- I) numerycznej analizy formowania połączenia nitowanego bezotworowo oraz analizy odkształceń nita w tym sposobie łączenia [10, 49];
- II) numeryczno – eksperymentalnych badań związanych z łączeniem blach z użyciem specjalnego pełnego nita w technologii nitowania bezotworowego [1, 3, 39];

⁴ Numeracja prac cytowanych w rozdziale 5 autoreferatu jest zgodna z wykazem opublikowanych prac naukowych (Załącznik 3a).

- III) badań obejmujących możliwości zwiększenia nośności połączenia zgrzewanego przez zastosowanie klejenia - połączenie hybrydowe [4];
- IV) analizy technologii łączenia przez wstrzeliwanie łącznika [47];
- V) numerycznych badań związanych z prognozowaniem rozkładu naprężeń i odkształceń w połączeniu skurczowym [13], stanowią oryginalne osiągnięcie naukowe habilitanta, i uzupełniają jednotematyczny cykl.

Pierwsze prace związane z połączeniami prasowanymi dotyczą ogólnej charakterystyki procesu ich otrzymywania. W jednej z prac np. „**Klasyfikacja oraz charakterystyka połączeń nitowanych bezotworowo**” [53] przedstawione zostały podstawowe odmiany połączeń prasowanych z zastosowaniem nitów o specjalnej budowie. Scharakteryzowano przebieg formowania, podano podstawowe cechy łączników oraz przykłady aplikacji połączeń w konstrukcjach samochodowych. Z czasem pojawiły się opracowania, w których szczegółowo przedstawiłem istotę połączeń nitowanych bezotworowo: „**Rozwój technik wytwarzania złączy nitowych – nitowanie bezotworowe**” [52]. Dalsze moje prace dotyczące połączeń „self-piercing riveting” (SPR) związane są z analizą numeryczną procesu formowania. Jedną z pierwszych jest praca pt. „**Numeryczna analiza zjawisk zachodzących w procesie nitowania złącza typu SPR**” [49], w której przedstawione zostały wyniki analizy numerycznej przebiegu formowania połączenia SPR. Opracowanie zawiera wyniki analizy przebiegu siły nitowania w poszczególnych fazach procesu jego powstawania. Za pomocą obliczeń określono rozkład naprężeń oraz odkształceń plastycznych w elementach złącza. Ponadto wykazano istotność wpływu warunków docisku na przebieg powstawania połączenia oraz wartość maksymalnej siły nitowania. Dla zabezpieczenia nitów przed korozją pokrywa się je różnymi powłokami antykorozyjnymi. W zależności od powłoki zabezpieczającej nit oraz rodzaju łączonego materiału pomiędzy łącznikiem a blachami powstają różne warunki tarcia. Za pomocą modelu MES przedstawiony został wpływ współczynnika tarcia pomiędzy nitem a materiałem blach na przebieg siły nitowania oraz odkształcenie nita. Ponadto wyznaczono:

- przebieg zmienności siły obciążenia podczas nitowania dla wybranych elementów nitowniczy,
- krzywe siły nitowania uzyskane podczas tworzenia złącza w różnych warunkach docisku,
- rozkład resztkowych naprężeń w gotowym złączu.

Dalsze wyniki rozważań nad procesem nitowania SPR zawarte zostały w pracy pt. „**A study of quality parameters and behaviour of self-piercing riveted aluminium sheets with different joining conditions**” [10] opublikowanej w czasopiśmie znajdującym się na liście JCR. Oryginalnym osiągnięciem naukowym tego opracowania jest określenie wielkości zagłębienia nita w łączonych materiałach dla różnych warunków brzegowych procesu formowania połączenia SPR. Spośród oryginalnych osiągnięć naukowych wynikających z tej pracy wyróżnić również można określenie wielkości odkształceń nita dla różnej charakterystyki umocnieniowej jego materiału. Nie mniej istotnym było określenie pól naprężeń i odkształceń w nicie dla różnych warunków kształtowania połączenia w tym zastosowania matrycy o różnym wykroju. Głównym celem naukowym analizy numerycznej było wykazanie istotności wybranych parametrów procesu nitowania na zagłębienie nita oraz wskaźnik jego rozszerzenia (S_{Dr}). Bardzo istotnym celem naukowym było również zwrócenie uwagi na odpowiedni stosunek granicy plastyczności materiału nita i łączonego materiału (S_{σ}). W zależności od wspomnianej relacji między granicami plastyczności konstryuuje się odpowiednia struktura połączenia, co obrazują wartości parametru promieniowego zagłębienia nita w materiale blachy dolnej.

Kolejne kroki moich badań eksperymentalno-numerycznych rozwijające tematykę na forum naukowym czasopism o zasięgu międzynarodowym skierowane były w kierunku rozważań nad łączeniem nitem pełnym. Najważniejsze prace, jakie zrealizowałem z tego zagadnienia pozwoliły na pogłębienie i rozwinięcie ubogiej jeszcze wiedzy związanej z

połączeniami nitowanymi bezotworowo nitem pełnym (tzw. „nitem samowykrawającym”). W pracy pt. *„Nośność wybranych rozwiązań połączeń nitowych podczas próby ścinania i rozciągania”* [39] przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych związanych z analizą obciążenia tradycyjnych połączeń nitowych z nitem zakuwanym i zrywalnym oraz nowych z nitem samowykrawającym. Do badań na zakładkowe połączenia wykorzystano pasma blach z materiału DC01 i stopu aluminium AW-5754 o grubości 2 mm. Zastosowane łączniki: nit do zakuwania, zrywalny nit stalowy oraz pełny nit do połączeń nitowanych bezotworowo posiadały zbliżone wymiary średnicy części walcowej znajdującej się w połączonych blachach.

Podczas łączenia cienkościennych konstrukcji z blach często zachodzi konieczność łączenia ze sobą różnych materiałów. W przypadku produkcji szaf i różnego rodzaju obudów blaszanych konieczne jest, ze względów estetycznych, zachowanie z jednej płaskiej strony powierzchni. Ze względu na wysoką niezawodność połączeń nitowych są one chętnie stosowane w procesach montażowych. Jednakże ich zastosowanie wymaga dodatkowych operacji szlifowania wystającej części łba nita. Niedogodność tą można wyeliminować przez wykorzystanie technologii połączeń nitowanych bezotworowo z pełnym nitem.

Głównym celem naukowym pracy [39] było wykazanie wpływu zmiany ułożenia rodzaju materiału względem pierwotnego łba nita zakuwanego na zachowanie się połączenia podczas testu ścinania i jednostronnego rozrywania. Jako oryginalne osiągnięcie tej pracy można wymienić wykazanie roli układu materiału łączonych warstw: kombinacji twardy/miękki, twardy/twardy, miękki/miękki na nośność i mechanizm zniszczenia złączy z nitem samowykrawającym. W przypadku konwencjonalnych połączeń nitowych w decydującym stopniu na zdolność do przenoszenia obciążeń wpływa wytrzymałość łącznika, zaś z nitem pełnym właściwości mechaniczne scalanych blach. Stąd dla tych ostatnich niezwykle ważna jest kolejność ułożenia łączonych warstw względem wciskanego łącznika.

Z zakresu formowania i wytrzymałości połączeń nitowanych bezotworowo nitem pełnym (SSPR) powstały moje dwie najnowsze i ważne prace naukowe pt. *„The effect of material properties and joining process parameters on behavior of self-pierce riveting joints made with the solid rivet”* [3] oraz *„The numerical analysis of the effect of the joining process parameters on self-piercing riveting using the solid rivet”* [1]. Są owocem współpracy badawczej z firmą KerbKonus-Vertriebs GmbH oddział w Polsce i zostały opublikowane w czasopismach znajdujących się na liście JCR. Praca [3] stanowi bardzo obszerną analizę eksperymentalną nad możliwością łączenia blach z różnych materiałów. Łączenie pełnym nitem (SSPR) może z powodzeniem odbywać się dla materiałów zarówno twardych, jak i miękkich oraz różnych układów właściwości mechanicznych łączonych warstw. W przypadku, gdy przewidywane warunki eksploatacji węzłów złącznych nie są zbyt ciężkie, z powodzeniem można zastosować rozwiązanie połączenia typu „solid self-piercing riveting” (SSPR). Technologia nitowania bezotworowego nitem pełnym jest coraz chętniej stosowana w przemyśle samochodowym i stanowi uzupełnienie już istniejących procesów montażu we współczesnej inżynierii wytwarzania. Do poprawnego uformowania połączenia potrzebna jest odpowiednio dobrana siła: wykrawania i docisku. Przez zmianę wartości siły docisku uzyskuje się różną wytrzymałość połączenia, spowodowaną mniejszym lub większym stopniem wypełnienia rowków przez materiał blach.

Podczas wykonywania połączenia nit jest elementem wykrawającym otwór. W wyniku nacisku stempla na jego głowę jest on stopniowo wciskany w materiał blachy górnej. Towarzyszy temu wzrost siły do momentu osiągnięcia krytycznej wartości naprężeń tnących dla materiału blach. Po ich osiągnięciu następuje rozdzielenie przez ścinanie z udziałem naprężeń rozciągających. Po wykrojeniu otworu siła nie maleje do zera, a jej wartość utrzymuje się na pewnym poziomie. Związane jest to z przepchaniem odpadu przez otwór w matrycy oraz części walcowej nita przez blachę dolną. Od momentu zetknięcia się głowy

łącznika z materiałem blachy górnej siła formowania znów rośnie. Po zrównaniu się powierzchni jego głowy z powierzchnią blachy górnej następuje wciskanie grani matrycy i wtłaczany jest materiał blach w rowki nita.

Po jego ostatecznym zablokowaniu pozostają w nim naprężenia resztkowe. Dla nita uniwersalnego koncentrują się w dnie każdego z rowków z tym, że przy skrajnych obserwuje się ich największy poziom. W przypadku specjalnego naprężenia koncentrują się w obrębie jedyne rowka i tuż przy łbie stożkowej części łba. Szczegółową analizę rozkładu naprężeń w nicie po jego zakotwiczeniu w materiale blach przedstawiłem w pracy [1] pt. „*The numerical analysis of the effect of the joining process parameters on self-piercing riveting using the solid rivet*”.

Moje dociekania oraz analizy nośności połączeń wytwarzanych różnymi technikami obejmują również zagadnienie wzmocnienia połączeń zgrzewanych klejem. Często w obrębie jednego komponentu blaszanego konstrukcji samochodowej stosuje się kilka metod łączenia np. przetłaczanie, nitowanie bezotworowe, zgrzewanie, klejenie i zgrzewanie. Zgrzewanie w strukturze połączenia hybrydowego np. z klejowym stanowi uzupełnienie pewnych cech pożądaných od złącza konstrukcyjnego blach. Takie złącze posiada zalety połączenia zgrzewanego i klejowego. Wykorzystanie hybrydy pozwala na:

- zmniejszenie koncentracji naprężeń, a przez to wyrównanie wyężenia całej konstrukcji,
- zwiększenie wytrzymałości oraz absorpcji energii całkowitego zniszczenia,
- uzyskanie zwiększonej sztywności konstrukcji,
- poprawę szczelności oraz odporności korozyjnej połączeń zgrzewanych,
- polepszenie zdolności do tłumienia drgań.

Celem pracy [4] pt. „*Stress distribution in adhesively-bonded joints and the loading capacity of hybrid joints of car body steels for the automotive industry*” było przyczynienie się do rozszerzenia aktualnej wiedzy na temat technologii hybrydowego łączenia przez klejenie i zgrzewanie o przydatne informacje dotyczące łączenia blach o podwyższonej granicy plastyczności typu DP800 oraz HSLA320. Przedstawione wyniki analizy wytrzymałości zakładkowych złączy mogą stanowić pomoc podczas projektowania cienkościennych struktur blaszanych w przemyśle samochodowym. Badania wytrzymałości złączy klejowych składały się z dwóch części, tj. analizy numerycznej i eksperymentalnej. Za pomocą analizy numerycznej (MES) zbadano wpływ zmiany wybranych parametrów konstrukcyjnych i materiałowych na rozkład naprężeń w złączach wykonanych dla materiału DP800 i HSLA320. Analiza MES dała możliwość oceny jakościowej i ilościowej zmiany rozkładu naprężeń normalnych i stycznych. Zaś za pomocą badań eksperymentalnych wykazano, jaki ma wpływ efekt wzmocnienia połączenia klejowego zgrzewem na jego wytrzymałość i energię całkowitego zniszczenia. W hybrydowej konstrukcji obserwuje się koncentracje naprężeń na znacznie niższym poziomie niż dla zgrzewanego i występują lokalnie dwa obszary koncentracji naprężeń. Połączenie klejowo-zgrzewane z klejem o stosunkowo dużej wytrzymałości posiada dwuetapową strukturę maksymalnej nośności. Wzmocnienie zgrzewu klejem powoduje zwiększenie maksymalnej siły niszczącej i zmianę w strukturze absorpcji energii rozdzielenia blach. Praca [4] powstała w wyniku współpracy naukowo-badawczej naukowców Politechniki Rzeszowskiej i Politechniki Wrocławskiej, została opublikowana w czasopiśmie znajdującym się na liście JCR.

Wymienione dotąd w pracach metody łączenia stosowane są z dość małymi prędkościami formowania. Jedną z nowych, ciekawych i dobrze wpisujących się w obecną tendencję zastępowania tradycyjnych metod łączenia (np. zgrzewania, skręcania) innymi, jest spajanie przez wstrzeliwanie z wysokimi prędkościami twardych łączników – specjalnych gwoździ. W pracy [47] pt. „*Charakterystyka połączeń wykonanych*

technologią wstrzeliwania łącznika” opisałem wady i zalety technologii wstrzeliwania gwoździ o specjalnej konstrukcji. Do głównych zalet tej technologii można zaliczyć:

- łączenie bez konieczności wykonywania wcześniej otworów,
- konieczność zachowania tylko jednostronnego dostępu przy dużej sztywności łączonych materiałów,
- możliwość łączenia wysokowytrzymałych materiałów o stosunkowo dużej grubości,
- możliwość elastycznego stosowania do połączeń mieszanych, wielowarstwowych oraz hybrydowych,
- minimalny czas łączenia oraz cyklu roboczego urządzenia,
- możliwość do stosowania wraz z techniką klejenia. Ma ona jednak jedną z podstawowych wad – konieczne jest zachowanie dużej sztywności elementów w miejscu ich łączenia. Uciążliwy może być także wysoki poziom hałasu – sięgający 100÷107 decybeli.

W pracy [47] opisano również przypadek obciążenia łącznika podczas ścinania zakładkowego połączenia. Wyjaśniono kolejne etapy zniszczenia złącza w wyniku przekroczenia granicznej nośności. W przypadku obciążenia zakładkowego połączenia przekrój łącznika oraz jego duża twardość nie pozwalają na rozdzielenie w wyniku jego ścięcia w płaszczyźnie poprzecznej. Łącznik z racji, że musi przebić łączone warstwy charakteryzuje się znacznie wyższą twardością niż materiał blach. Wstrzelony gwoździe – mający z jednej strony ostre zakończenie, a z drugiej łeb – determinuje odkształcanie się łączonych elementów do takiej postaci, dla której możliwe jest powolne wysuwanie gwoźdźcia z jednoczesnym ścinaniem materiału blach wypełniającego rowki.

W wyniku eksperymentalnej analizy obciążenia połączenia ustalono mechanizm zniszczenia połączenia, stwierdzono, że na maksymalną nośność połączenia ma wpływ materiał blach. Praca [47] powstała w wyniku współpracy naukowo-badawczej pomiędzy firmą Böllhoff Verbindungstechnik GmbH oddział w Polsce a Katedrą Konstrukcji Maszyn PRz.

W inżynierskich konstrukcjach istnieje wiele innych rozwiązań połączeń rozłącznych i nierozłącznych. Połączenia skurczowe są odmianą złączy wciskowych, posiadają szereg zalet, z których najważniejsze to: prostota i łatwość wykonania, oszczędność materiału, dobre środkowanie łączonych elementów. Zagadnienie połączenia wciskowego dwóch elementów oparte jest na pewnych założeniach: kołowa symetria geometryczna rury oraz przyjęcie równomiernego rozkładu ciśnień wzdłuż obwodu i długości rury. Konstruowanie połączeń wciskowych dla elementów o złożonych kształtach przy wykorzystaniu równań Lamego jest obarczone dużym błędem. Pomocnym narzędziem przy projektowaniu założonej wytrzymałości i nośności połączenia w takich przypadkach są programy oparte o metodę elementów skończonych. W pracy [13] pt. „*Finite element modeling and simulating of thermomechanic stress in thermocompression bondings*” przedstawiłem prognozowania rozkładu naprężeń i odkształceń w połączeniu wciskowym elementów o złożonym kształcie. Rozkłady pól naprężeń wg hipotezy Misesa nie są jednakowe. Z analizy MES wynika, że są one zależne od kształtu przekroju łączonych elementów. Nie jest możliwe analityczne wyznaczenie wartości naprężeń zastępczych na przekroju takiego połączenia. Złożony kształt łączonych elementów powoduje niejednakowy rozkład przemieszczeń promieniowych materiału w pobliżu powierzchni kontaktu. Zmienny kształt przekroju łączonych elementów skutkuje zróżnicowanym rozkładem pól naprężeń. Może to prowadzić przy tradycyjnym podejściu do niedoszacowania wartości naprężeń w poszczególnych obszarach elementu. Przebieg nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni kontaktu dla zmiennego przekroju nie jest liniowy. Spowodowane jest to zmienną sztywnością przekroju elementów.

5.2 Podsumowanie dorobku naukowego - statystyka

5.2.1 Ogólna charakterystyka

L.p.	Nazwa	Liczba/wskaźnik
1	Rozdziały w monografiach o zasięgu:	
	- międzynarodowym	4
	- krajowym	1
2	Monografie	1
3	Publikacje w czasopismach z bazy JCR	13
4	Publikacje w czasopismach z bazy Scopus	15
5	Inne publikacje recenzowane	32
6	Publikacje w czasopismach branżowych	11
7	Publikacje w materiałach konferencyjnych	20
8	Zgłoszenia patentowe	3
9	Patenty	4
10	Wdrożenia	1
11	Udział w projektach badawczych	5
12	Cytowania (bez autocytowań) wg:	
	- Web of Science	11
	- Scopus	18
	- Google Scholar	39
13	Sumaryczny IF publikacji wg JCR ⁵	14.567 (17.380)
14	Indeks Hirscha (wg Web of Science)/Scopus ⁶	3/3
15	Udział procentowy wszystkich samodzielnych publikacji	48 %
16	Sumaryczna liczba punktów całkowitego dorobku uzyskanego po doktoracie wg MNiSzW ⁷	598

5.2.2 Dane bibliometryczne prac naukowych opublikowanych po doktoracie

- Czasopisma z listy JCR

L.p.	Nazwa	Liczba prac	Σ IF
1	Advances in Mechanical Engineering	1	1.062
2	Archives of Civil and Mechanical Engineering	2	1.818
3	Chemické Listy	1	0.438
4	Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability	2	0.626
5	International Journal of Adhesion and Adhesives	1	1.295
6	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	1	1.068
7	Materials and Design	3	6.631
8	Strojnicki Vestnik – Journal of Mechanical Engineering	1	0.398
9	Thin-Walled Structures	1	1.231

⁵ W nawiasie podano sumaryczny IF dla wszystkich publikacji z raportu ogłoszonego w 2013.

⁶ Indeks podany z wykluczeniem autocytowań.

⁷ Dla punktacji obowiązującej w danym roku i uzyskania dorobku, w tym dla publikacji zaakceptowanych do druku.

- Czasopisma spoza listy JCR

L.p.	Czasopismo spoza listy JCR	Liczba prac
1	Archives of Mechanical Technology and Automation	3
2	Advances in Manufacturing Science and Technology	1
3	Acta Metallurgica Slovaca	1
4	Acta Mechanica Slovaca	1
5	Acta Mechanica et Automatica	2
6	Advances in Science and Technology Research Journal	2
7	Technologia i Automatyizacja Montażu	5
8	The Archives of Automotive Engineering	2
9	Czasopismo naukowo-techniczne: Mechanik	4
10	Computer Methods in Materials Science	1
11	Problemy Eksploatacji	1
12	Obróbka Plastyczna Metali	1
12	Rudy i Metale Nieżelazne	1
13	Przegląd Mechaniczny	1
14	Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej: Mechanika	2

Szczegółowe informacje dotyczące autorstwa ekspertyz i raportów naukowo-technicznych wykonanych dla przedsiębiorstw, międzynarodowej i krajowej współpracy naukowej, uczestnictwa w programach naukowych, autorstwa recenzji artykułów dla redakcji czasopism naukowych, osiągnięć dydaktycznych oraz działalności organizacyjnej zamieszczone są w odrębnym załączniku (*Załącznik 6a*).

Rzeszów, 20.01.2014



.....
(podpis)