POLITECHNIKA RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Dyscyplina Naukowa
Inżynieria Mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

ANALIZA WPŁYWU ZASTOSOWANIA DODATKOWEGO ELEMENTU ODKSZTAŁCALNEGO NA FORMOWANIE I NOŚNOŚĆ POŁĄCZENIA PRZETŁACZANEGO

mgr inż. Łukasz Boda

PROMOTOR:
dr hab. inż. Jacek Mucha, prof. PRz

PROMOTOR POMOCNICZY:
dr inż. Waldemar Witkowski

Rzeszów, 2026

Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń **6**

Wstęp **9**

1 Analiza stanu zagadnienia **11**
1.1 Technologia łączenia cienkościennych elementów poprzez przetłaczanie . . 11
1.2 Wybrane odmiany procesu łączenia w technologii przetłoczenia (*CL*) 16
1.3 Aplikacje przemysłowych rozwiązań urządzeń do technologii łączenia przez przetłaczanie 24
1.4 Łączenie cienkościennych elementów poprzez przetłaczanie z zastosowaniem dodatkowego elementu 27
1.4.1 ClinchRivet - *CR* 28
1.4.2 Self-piercing riveting - *SPR* 32
1.4.3 Solid self-piercing riveting - *SSPR* 35
1.5 Wnioski z krytycznej analizy stanu zagadnienia 36

2 Hipoteza, cele pracy oraz plan badań **39**

3 Metodyka badawcza **41**
3.1 Materiały łączonych blach 41
3.2 Opis metodyki dla zaplanowanych prac badawczych 42
3.2.1 Wpływ zastosowania dodatkowego elementu odkształcalnego na formowanie złącza przetłaczanego 42
3.2.2 Wpływ zastosowania komercyjnego nita na charakterystykę złącza *CR* 48
3.2.3 Wpływ zmiany twardości dodatkowego elementu odkształcalnego na charakterystykę złącza *CR* 49
3.2.4 Wpływ zmiany geometrii dodatkowego elementu odkształcalnego na charakterystykę złącza *CR* 52
3.2.5 Wpływ głębokości wtłoczenia nita na charakterystykę złącza *CR* . . 53
3.2.6 Wpływ zmiany geometrii oraz głębokości wykroju matrycy na charakterystykę złącza *CR* 54
3.2.7 Wpływ zmiany głębokości wnęki matrycy na charakterystykę złącza *CR* 56
3.2.8 Wpływ położenia złącza *CR* względem krawędzi łączonych warstw na charakterystykę zakładkowego połączenia 57
3.3 Aparatura badawcza 59
3.3.1 Stanowisko zastosowane do formowania złączy przetłaczanych . . . 59
3.3.2 Skaner 3D wykorzystany do analizy odkształceń powierzchni wybranych połączeń 60

3.3.3 Mikroskop wykorzystany do pomiaru geometrii na przekroju złącza i analizy deformacji powierzchni blach . . . 62
3.3.4 Stanowisko do badania nośności skrętnej . . . 66
3.4 Badania nośności i energochłonności zniszczenia złączy CR wg przedmiotowej normy ISO 12996 . . . 70

4 Badania doświadczalne i analizy uzyskanych wyników 73
4.1 Wpływ zastosowania dodatkowego elementu odkształcalnego na formowanie złącza przetłaczanego . . . 73
4.1.1 Połączenia dwóch warstw wybranych gatunków materiału o grubości 1,5 mm . . . 73
4.1.2 Połączenia dwóch warstw wybranych gatunków materiału o grubości 0,7 i 1,5 mm . . . 77
4.1.3 Łączenie trzech warstw materiału o zmiennym ułożeniu ich grubości 1,5, 0,7, 0,7 mm . . . 82
4.1.4 Połączenia trzech warstw wybranych gatunków z dwiema blachami DX51D+Z o grubości 0,7 mm . . . 85
4.2 Ocena efektów zastosowania nita na charakterystykę złącza przetłaczanego 90
4.2.1 Przebieg i efekty formowania złącza . . . 90
4.2.2 Nośność w próbie ścinania . . . 93
4.2.3 Nośność skrętna złączy . . . 94
4.3 Wpływ zmiany twardości dodatkowego elementu odkształcalnego na charakterystykę złącza *CR* . . . 95
4.3.1 Przebieg i efekty formowania złącza . . . 95
4.3.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza . . . 97
4.3.3 Nośność w próbie ścinania . . . 99
4.3.4 Nośność skrętna złączy . . . 100
4.4 Wpływ zmiany geometrii dodatkowego elementu odkształcalnego na charakterystykę złącza *CR* . . . 100
4.4.1 Przebieg i efekty formowania złącza . . . 100
4.4.2 Nośność w próbie ścinania . . . 104
4.5 Wpływ zmiany głębokości wtłoczenia nita na charakterystykę złącza *CR* . 107
4.5.1 Przebieg i efekty formowania złącza . . . 107
4.5.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza . . . 110
4.5.3 Nośność w próbie ścinania . . . 111
4.5.4 Nośność skrętna złączy . . . 112
4.6 Wpływ zmiany geometrii wnęki matrycy na charakterystykę złącza *CR* . . 112
4.6.1 Przebieg i efekty formowania złącza . . . 112
4.6.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza . . . 115
4.6.3 Nośność w próbie ścinania . . . 116
4.6.4 Nośność skrętna złączy . . . 118
4.7 Wpływ zmiany głębokości wnęki matrycy na charakterystykę złącza *CR* . . 119

4.7.1 Przebieg i efekty formowania złącza . . . 119
4.7.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza . . . 122
4.7.3 Nośność w próbie ścinania . . . 124
4.7.4 Nośność skrętna złączy . . . 126
4.8 Analiza wpływu odległości miejsca scalenia od krawędzi blach na charakterystykę złącza *CR* . . . 128
4.8.1 Przebieg i efekty formowania złącza . . . 128
4.8.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza . . . 130
4.8.3 Nośność w próbie ścinania . . . 132

5 Analiza numeryczna procesu formowania złącza w technologii *CR* 135
5.1 Założenie modelu numerycznego . . . 135
5.2 Opis uzyskanych wyników . . . 136

6 Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych badań 141

Bibliografia 144

Streszczenie rozprawy doktorskiej 153

Abstract of doctoral dissertation 155

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

$3D$	-	element trójwymiarowy (ang.: *3Dimensional*)
CL	-	określa okragłe połączenie przetłaczane formowane z wykorzystaniem matrycy i stempla bez użycia dodatkowych elementów (ang.: *Clinching*)
CR	-	określa połączenie przetłaczane formowane z wykorzystaniem matrycy, stempla i dodatkowego odkształcalnego nita (ang.: *Clinching*)
CAD	-	komputerowe wspomagane projektowanie (ang.: *Computer Aided Engineering*)
FDM	-	technologia druku 3D - modelowanie przez osadzanie topionego materiału (ang.: *Fused Deposition Modeling*)
MES	-	metoda elementów skończonych
SKB	-	zespół matrycy z segmentami ruchomymi firmy Tox Pressotechnik
SPR	-	technologia łączenia z zastosowaniem nita (ang.: *Self-Piercing Rivet*)
$SSPR$	-	technologia łączenia z zastosowaniem nita samowykrawającego (ang.: *Solid Self-Piercing Rivet*)
CR/CR	-	złącze wykonane w technologii *CR* z zastosowaniem nita i matrycy SKB
CL/CR	-	złącze wykonane w technologii *CL* z zastosowaniem matrycy SKB
$WEDM$	-	zaawansowana metoda obróbki ubytkowej materiałów przewodzących prąd (ang.: *Wire Electrical Discharge Machining*).

d - średnica stempla formującego, [mm]

d_{nit} - odległość pomiędzy skrajnymi punktami mierzona na ukształtowanym nicie wewnątrz złącza u jego podnóża, [mm]

d_{wyp} - odległość pomiędzy najbardziej oddalonymi punktami na zamku wzajemnego zablokowania warstw mierzona wewnątrz złącza, [mm]

d_{zew} - odległość pomiędzy najbardziej oddalonymi punktami na przetłoczeniu uformowanym we wnęce matrycy, [mm]

F_f - siła formowania, [kN]

F_s - siła obciążenia w próbie ścinania połączenia zakładkowego, [kN]

G_w - odległość stempla względem dna wnęki matrycy, [mm]

O_f - wartość odsunięcia wpływająca na głębokość wtłaczania, [mm]

h_d - głębokość wykroju matrycy, [mm]

h_{nit} - wysokość nita w ukształtowanym złączu, [mm]

M - Moment obrotowy w próbie nośności skrętnej złączy, [Nm]

s - przemieszczenie w próbie nośności na ścinanie, [mm]

s_f - przemieszczenie w procesie formowania, [mm]

s_{Fmax} - wartość przemieszczenia w momencie wystąpienia maksymalnej wartości siły w próbie ścinania złącza zakładkowego, [mm]

$s_{0,3Fmax}$ - przemieszczenie do osiągnięcia punktu $0,3F_{max}$, [mm]

$s_{fracture}$ - przemieszczenie całkowite do rozdzielenia połączenia, [mm]

t_1 - grubość górnej z łączonych warstw materiału, [mm]

t_2 - grubość dolnej z łączonych warstw materiału, [mm]

t_c - całkowita grubość wszystkich łączonych warstw materiałów, [mm]

t_n - pocienienie materiału w odrębie szyjki złącza, [mm]

t_s - grubość środkowej z łączonych warstw materiałów, [mm]

t_u - wartość zablokowania pomiędzy łączonymi warstwami, [mm]

W_{Fmax} - energia zniszczenia mierzona do wystąpienia maksymalnej wartości siły obciążenia złącza, [J]

$W_{0,3Fmax}$ - energia zniszczenia mierzona do punktu $0,3F_{max}$, [J]

$W_{fracture}$ - całkowita energia niezbędna do rozdzielenia złącza, [J]

W_f - energia procesu formowania złącza, [J]

X - minimalna grubość dna przetłoczenia, [mm]

σ - naprężenia, [MPa]

φ - wartość przemieszczenia kątowego, [^{o}]

Wstęp

Znaczący stopień rozwoju technologicznego umożliwia wykonywanie coraz bardziej zaawansowanych produktów, będących odpowiedzią na wymagania rynku. Produkcja elementów z jednego półfabrykatu jest już możliwa, lecz takie rozwiązanie może być niekorzystne ekonomicznie. W przypadku wybranych zespołów konstrukcyjnych, proces montażu prostych części w zespół, zastępowany jest realizacją obróbki docelowego elementu z jednego fragmentu materiału. Kluczową rolę w kontekście tworzenia funkcjonalnych urządzeń codziennego użytku, maszyn czy konstrukcji, odgrywają technologie montażowe z zastosowaniem połączeń. Elementy scalane są zarówno z zastosowaniem połączeń rozłącznych jak i nierozłącznych. Stosowanie odpowiednich technik łączenia jest niezbędne dla zapewnienia funkcjonalności, niezawodności i trwałości produktów.

Na przestrzeni lat w branży motoryzacyjnej kładziony jest coraz większy nacisk na aspekt ekonomiczny i ekologiczny. Redukcja masy samochodu ma bezpośredni wpływ na ilość zużywanego paliwa. Istotnym elementem, który zmienił swoją formę na przestrzeni minionych lat to konstrukcja nadwozia samochodowego, którego przykład przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. *Nadwozie pojazdu samochodowego jako przykład zastosowania różnych materiałów konstrukcyjnych: 1- stopy magnezu, 2- stopy aluminium, 3- stal niskowęglowe do głębokiego tłoczenia, 4- stale o podwyższonej wytrzymałości HSS, 5- stale o wysokiej wytrzymałości, 6- stale o bardzo wysokiej wytrzymałości, 7- stale o ultra wysokiej wytrzymałości (opracowanie własne na podstawie [1])*

Kluczowym kryterium napędzającym rozwój w zakresie inżynierii materiałowej jest wytrzymałość konstrukcji, które ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo, a w skrajnych przypadkach nawet życie użytkownika. Powstają nowe materiały, które z kolei generują potrzebę analizy odpowiedniego doboru ich łączenia [2–4]. Zastosowanie konwencjonalnych technik spajania takich jak zgrzewanie, spawanie, lutowanie bądź nitowanie, nie zawsze jest możliwe do wdrożenia z uwagi na konsolidację materiałów o różnych właściwościach wytrzymałościowych i fizykochemicznych [5–7].

Chęć zachowania konkurencyjności wymusza na producentach rozwój oferowanych elementów, a także uwzględnienie ekonomicznego procesu montażu [8, 9]. Trendem ostatnich lat jest coraz szersze stosowanie tak zwanych białych technologii wytwarzania, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym ze względu na masowa produkcję [10–14]. Łączenie blach za

pomocą technologii przetłaczania *CL* (ang.: *clinching*), zostało uznane jako jedna z metod *„białych technologii"*. Miejscowe przetłaczanie *CL* jest procesem łączenia z udziałem odkształceń plastycznych, umożliwiającym połączenie dwóch lub większej liczby warstw materiałów. Formowanie złącza polega na mechanicznym odkształceniu łączonych warstw z zastosowaniem narzędzi formujących w postaci stempla i matrycy. Niezbędna siła jaka jest potrzebna do ukształtowania złącza różni się w zależności od zastosowanych parametrów technologicznych, materiałów i geometrii narzędzi.

W pierwszej części niniejszej dysertacji przeprowadzono krytyczną analizę stanu zagadnienia, a na jej podstawie określono zakres wykonanych badań. Badania eksperymentalne wykonano dla złączy o różnych grubościach oraz konfiguracji układu blach. Analiza procesu formowania zawiera wzbogacenie wiedzy na temat możliwości ukształtowania złącza przetłaczanego. Z uwagi na mnogość możliwych modyfikacji, bardziej szczegółowe analizy wybranych właściwości złącza ograniczono do łączenia dwóch warstw w gatunku DX51D+Z o grubości 1,5 mm. Złącza wykonano z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego w technologii *CR* (ang.: *ClinchRivet*). Na podstawie uzyskanych wyników, dokonano modyfikacji w procesie formowania poprzez zmianę pozycji stempla względem matrycy. Przeprowadzono analizy efektów formowania złącza *CR* z zastosowaniem komercyjnego nita, a także modyfikację jego kształtu. Z uwagi na to, iż producent nie udostępnia informacji na temat materiału dodatkowego elementu odkształcalnego, wyprodukowano nowe nity o identycznej geometrii, celem sprawdzenia wpływu twardości na złącze przetłaczane. Wykonano nowy zespół matrycy formowania z wymiennymi trzpieniami, co umożliwiło przeanalizowanie wpływu wybranych cech geometrycznych narzędzia na charakterystyczne wymiary i nośność złącza.

Każdy sposób łączenia elementów cienkościennych w większym lub mniejszym stopniu powoduje odkształcenie się materiału w pobliżu miejsca oddziaływania narzędzi formujących. W związku z powyższym przeprowadzono analizy deformacji górnej powierzchni blachy. Wyznaczono krzywą ścinania wybranych złączy oraz charakterystyczne parametry zgodnie z normą ISO12996 [15].

W niniejszej pracy zawarto również opis wykonanego i zastosowanego stanowiska do badań nośności skrętnej złączy *CR*. Jest to element innowacyjności, ponieważ zagadnienie nośności skrętnej dla złączy przetłaczanych z zastosowaniem odkształcalnego nita i bez naruszenia spójności materiału, nie zostało jak dotąd przedstawione w literaturze naukowej.

W ostatniej części dysertacji zawarto opis możliwości zastosowania MES do analizy procesu formowania. Symulacja numeryczna stanowi potężne narzędzie, które umożliwia przewidywanie zachowania produktów podczas ich eksploatacji. Prawidłowo zbudowany model i jego zastosowanie do symulacji formowania, może w znaczącym stopniu skrócić okres wdrażania produktu. To z kolei bezpośrednio wpływa na koszty całego przedsięwzięcia. Skuteczność analiz zależy od zgodności modelu z rzeczywistymi efektami procesu formowania. W ostatnim etapie realizacji prac badawczych, dokonano walidacji modelu numerycznego na podstawie danych eksperymentalnych.

1 Analiza stanu zagadnienia

1.1 Technologia łączenia cienkościennych elementów poprzez przetłaczanie

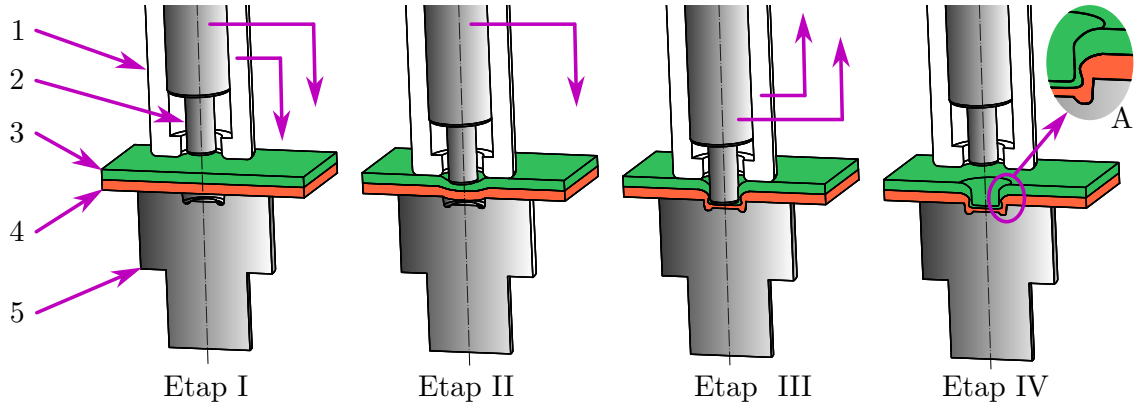
Podstawową i najbardziej rozpowszechnioną metodą plastycznego łączenia warstw materiałów jest przetłaczanie: *clinching - CL*. Technologia łączenia cienkościennych elementów konstrukcji poprzez przetłaczanie jest znana od ponad 100 lat. Niemiecki patent *DE98517C* [16], pojawił się w roku 1897 i jest on uznawany za początek rozwoju łączenia blach poprzez przetłoczenie. Zgodnie z jego założeniami połączenie utworzone zostaje przez przetłoczenie warstw materiałów z zastosowaniem matrycy i stempla. Z jednej strony widoczne jest wgłębienie, a po przeciwnej stronie łączonych warstw powstaje wypukłość, jako pozostałość po przetłaczaniu tych materiałów. Zgodnie z opisem patentu zachowana jest szczelność pomiędzy łączonymi warstwami. Przez długi czas technologia *CL* była mało rozpoznawana. Wzrost zastosowania tej techniki łączenia zaobserwowano od lat 80, głównie w branży motoryzacyjnej [17]. *Clinching* posiada wiele zalet, do których należą między innymi:

- brak wydzielania toksycznych gazów,
- brak stosowania dodatkowych elementów złącznych,
- brak konieczności wcześniejszego przygotowania łączonych elementów,
- brak konieczności nagrzewania powierzchni przed wykonaniem połączenia,
- możliwość łączenia elementów o różnych grubościach i gatunkach materiałów,
- możliwość łączenia części z różnymi powłokami.

Pomimo szeregu zalet technologia łączenia *CL* posiada również wady, do których należą między innymi:

- zależność możliwości stosowania łączenia od plastyczności łączonych materiałów,
- w zależności od miejsca scalania, może być wymagane specjalistyczne oprzyrządowanie umożliwiające dostęp do łączonych warstw,
- zużywanie się stempli i matryc.

Poszczególne etapy klasycznego procesu formowania złącza przetłaczanego w technologii clinching zostały przedstawione na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. *Etapy formowania złącza przetłaczanego w technologii łączenia CL (1- dociskacz, 2- stempel, 3- górna z łączonych warstw, 4- dolna z łączonych warstw, 5- matryca)*

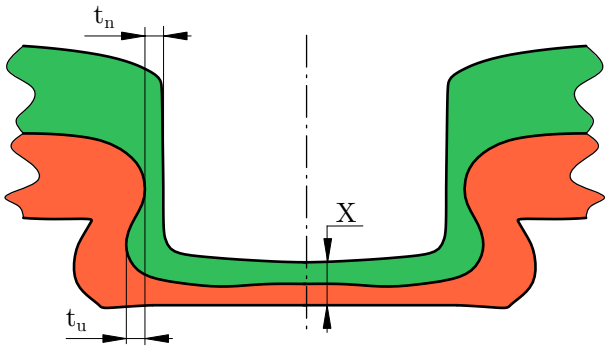
Narzędziami za pomocą których kształtuje się złącze są stempel oznaczony numerem 2 i matryca (numer 5). W pierwszym etapie należy za pozycjonować pomiędzy elementami formującymi łączone warstwy materiałów - górną z dolną oznaczone odpowiednio numerami 3 i 4. Później następuje przesunięcie elementów ruchomych tj. stempla wraz z mechanizmem docisku (numer 1) do osiągnięcia kontaktu z górną powierzchnią warstwy łączonych elementów. Mechanizm docisku w tym etapie pełni funkcję stabilizującą. W kolejnym kroku stempel spotyka się z górną warstwą łączonego materiału i powoduje jego przesunięcie w kierunku do dna matrycy. Etap trzeci rozpoczyna się od momentu, w którym materiał spotyka się z dnem matrycy, a następnie płynie w kierunku wolnej przestrzeni. Ostatni etap obejmuje osiągnięcie pożądanego wzajemnego usytuowania elementów formujących, po których następuje wycofanie stempla formującego. Wewnątrz złącza został ukształtowany charakterystyczny zamek przedstawiony w obszarze *A* na rysunku 1.1. Stempel wycofuje się do pozycji zdefiniowanej przez sterownik maszyny formowania. Ukształtowane złącze nie wymaga dodatkowej obróbki.

Technologia *CL* stosowana jest głównie dla blach cienkich, a jej zaletą jest możliwość łączenia różnych gatunków materiałów. Podstawowe rozwiązania konstrukcyjne narzędzi umożliwiają wykonanie scalenia bez uprzedniego specjalnego przygotowania. Ograniczenie ilości operacji ma bezpośredni wpływ na koszt łączenia elementów, co jest przewagą w stosunku np. do technologii klasycznego nitowania (z zastosowaniem nita zrywalnego). Stosunkowo proste oprzyrządowanie w połączeniu z możliwością łączenia różnych gatunków materiałów, a także elementów pokrytych powłokami zwiększa popularność stosowania technologii *CL*.

W procesie formowania złącza, istotnym jest uzyskanie balansu pomiędzy wytrzymałością połączenia, a energochłonnością procesu formowania. Dobór parametrów procesu ma również bezpośredni wpływ na trwałość zastosowanego zespołu narzędzi. W praktyce inżynierskiej dąży się do uzyskania kompromisu pomiędzy nośnością złącza, a wartością siły formowania.

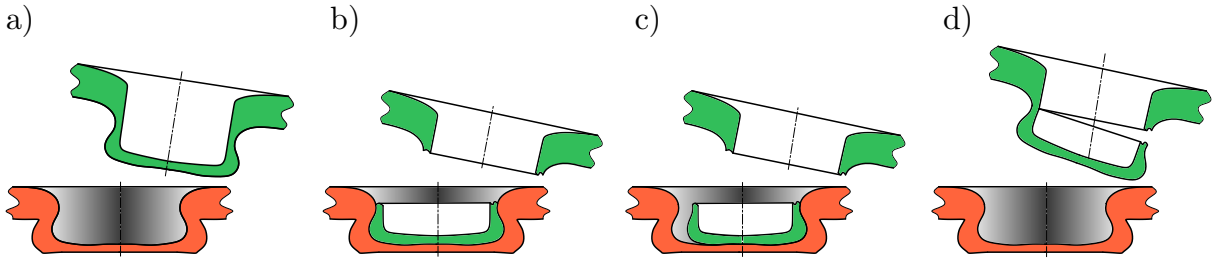
Kontrola gotowego złącza opiera się na pomiarze minimalnej grubości dna przetłoczenia,

oznaczonej jako parametr X na rysunku 1.2. Kluczowe jest uzyskanie wzajemnego zablokowania materiałów (t_u). Podczas obserwacji ukształtowanej geometrii na przekroju złącza, dokonuje się również pomiaru pocienienia w obszarze szyjki (t_n).



Rys. 1.2. *Kontrolne wymiary służące do oceny poprawności wykonania połączenia CL (X - dla badania nieniszczącego, t_n, t_u - dla badania niszczącego złącze)*

Przez długi czas brakowało wytycznych, które jednoznacznie określałyby geometrię próbek przeznaczonych do badania nośności złączy przetłaczanych. W dostępnych źródłach występuje wiele informacji związanych z badaniem wytrzymałości przedmiotowych połączeń. Jednakże nie jest stosowany jeden wymiarowy ich standard, bądź brakuje informacji o jego specyfikacji. Zależnie od grupy naukowców, stosowano próbki o szerokości, mieszczącej się w zakresie od 20 do około 46 mm. Brak jednego standardu, może wpływać na rezultaty badań, przez co techniczna wartość uzyskanych wyników nie jest spójna. Norma ISO 12996 [15], która została wprowadzona w 2013 roku, określa podstawowe wymagania geometryczne do przeprowadzenia badania wytrzymałości na ścinanie pojedynczego złącza. Podane wytyczne powinny mieć zastosowanie w przypadku łączenia materiałów o grubości do 4,5 mm dla jednej warstwy. Mechanizmy zniszczenia wyznaczone w próbie ścinania złącza, przedstawiono na rysunku 1.3 [15].



Rys. 1.3. *Podstawowe przypadki zniszczenia przetłoczenia połączenia CL w wyniku realizacji testu ścinania zakładkowego połączenia [15]: a) separacja bez zniszczenia przetłoczenia poszczególnych warstw, b) utrata nośności w najmniejszym przekroju, c) deformacja przetłoczenia i jego całkowite rozdzielenie, d) separacja przetłoczenia blach z częściowym pęknięciem przetłoczenia blachy górnej*

Pierwszym przypadkiem zniszczenia scalenia jest sytuacja (rys 1.3a), w której doszło do separacji łączonych warstw bez zniszczenia przetłoczenia. Taki efekt występuje w przy-

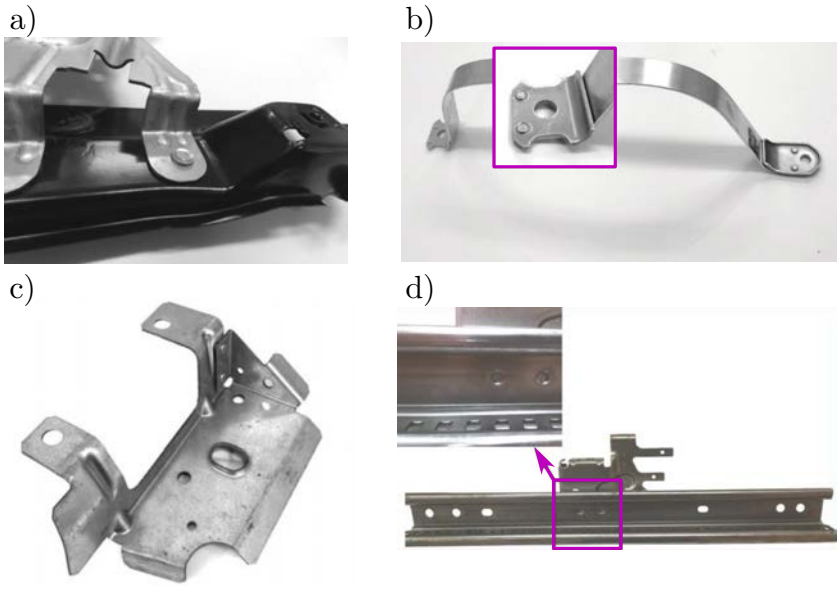
padkach, jeżeli wartość wzajemnego zablokowania materiałów t_u jest mała. W przypadku, gdy grubość szyjki t_n w złączu jest bardzo niska, może dojść do sytuacji, w której zakotwiczona część pozostaje w przetłoczeniu (rys. 1.3b). W trakcie zniszczenia złączy przetłaczanych, mogą wystąpić również bardziej złożone mechanizmy uszkodzenia, które mogą polegać na wystąpieniu plastycznej deformacji i zerwaniu w obrębie szyjki złącza (rys. 1.3c). Ostatnim z mechanizmów zniszczenia zawartych w normie, jest przypadek w którym górna z łączonych warstw została uszkodzona jednakże nie doszło do pełnej separacji obszaru przetłoczenia (rys. 1.3d).

Badania wytrzymałościowe złączy przetłaczanych opierają się głównie na wyznaczeniu nośności złącza w próbie ścinania. Steinfelder [18] jako pierwszy podjął próbę wyznaczenia wartości momentu, w którym podczas skręcania złącze utraci sztywność. W artykule opisano badania na temat nośności skrętnej dla klasycznej odmiany połączenia *CL*. Analizie poddano 4 aranżacje grubości warstw wykonane na blachach stalowych w gatunku HCT590X+Z.

Witkowski, w artykule [19], przedstawił badania wpływu prędkości ruchu stempla na formowanie złącza przetłaczanego wykonanego w technologii *CL*. W pracy wykonano złącza z ustawieniem prędkości stempla 3, 50 i 100 mm/s. W wariancie z najmniejszą wartością przemieszczenia - maksymalna siła formowania była największa.
W przypadku zwiększenia wartości drogi formowania, parametr X zmniejsza się w wyniku redukcji grubości dna przetłoczenia. Badania w tym zakresie zostały przedstawione w artykułach [20–22]. W pracy [23], przedstawiono badania przeprowadzone na dwóch warstwach o grubości 1 mm z gatunku DX51D+Z. Autor dokonał analizy wpływu geometrii narzędzi na siłę formowania. Zastosowano stemple o różnej średnicy, której przyrost wpływał również na zwiększenie wartości siły formowania. Z kolei w tej samej pracy, redukcję zaobserwowano w przypadku zastosowania matrycy z segmentami ruchomymi (dwoma, trzema i czterema). Znaczący wpływ na wartość siły formowania mają również parametry mechaniczne łączonych materiałów. Podczas łączenia stopów aluminium wymagana maksymalna siła formowania jest znacznie mniejsza, niż w przypadku blach stalowych. W przypadku łączenia blach tego samego gatunku, lecz o różnej ich grubości, występuje różnica w wartości siły formowania [1].

Połączenia powstałe z wykorzystaniem technologii *CL*, z uwagi na swoje zalety, znajdują zastosowanie w coraz szerszej gamie produktów. Wielu producentów z branży motoryzacyjnej stosuje złącza przetłaczane do montażu cienkościennych elementów. Między innymi Mucha w artykule [17] zwrócił uwagę na to, iż z roku na rok liczba koncernów samochodowych, które stosują tą technologię wzrasta. Aplikacje łączenia elementów poprzez przetłaczanie stosowane są między innymi przez: Audi, BMW, Chevrolet, Ford, Jeep, Mercedez Benz, Nissan, Porche, Skoda, Toyota, Volkswagen.

Przykładowe elementy z branży motoryzacyjnej, gdzie występują złącza przetłaczane przedstawiono na rysunku 1.4.

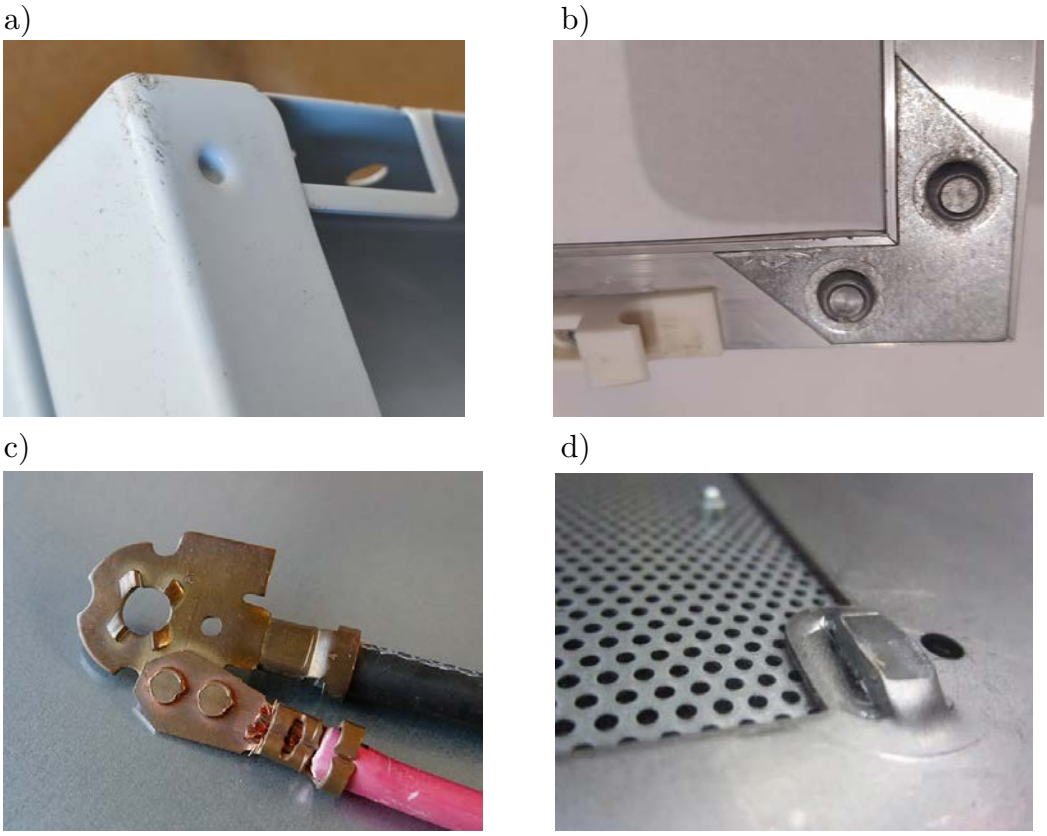


Rys. 1.4. *Przykłady zastosowania połączeń CL w cienkościennych konstrukcjach elementów stosowanych w pojazdach samochodowych: a) fragment blaszanej konstrukcji zespołu do podnoszenia szyby, b) opaska do mocowania zbiornika paliwa, c) wspornik akumulatora, d) szyna mechanizmu przesuwania fotela.*

W konstrukcji blaszanej układu do podnoszenia szyb zastosowane połączenie *CL* posłużyło do scalenia blachy ocynkowanej i malowanej (rys. 1.4a). Zespolenie obejmy zbiornika paliwowego do podwozia, wykonane zostało z użyciem między innymi przetłaczania do nakładek usztywniających (rys. 1.4b). Innym przykładem zastosowania połączeń przetłaczanych może być blaszany wspornik z otworami mocującymi i przetłoczeniami wzmacniającymi (rys. 1.4c). Kolejnym modelowym zastosowaniem połączeń *CL* jest konstrukcja szyny fotela pojazdu samochodowego (rys. 1.4d). Wyżej wymienione elementy są potwierdzeniem bardzo licznego zastosowania połączeń *CL* w cienkościennych konstrukcjach przemysłu motoryzacyjnego. Stosowane one są również do łączenia elementów nadwozi w niewidocznych miejscach, nie naruszając przy tym walorów estetycznych blaszanej konstrukcji.

Coraz szersze zastosowanie technologii łączenia przez przetłaczanie można zaobserwować w innych gałęziach przemysłu. *Böllhoff*, podjął skuteczną współpracę z polską firmą *P.P.H.U. LUFT-WENT*, która specjalizuje się w produkcji systemów wentylacyjnych. Polski dystrybutor grupy *Böllhoff - CNC-PROJEKT Sp. z o.o.* - na swojej stronie internetowej [24] przedstawił informację, iż otrzymał certyfikat TÜV szczelności punktów przetłoczeń zgodnych z klasą D przy zastosowaniu niciarki *RIVCLINCH 0404 IP Aero*. Producenci na stronach internetowych deklarują współpracę w zakresie wielu gałęzi przemysłowych między innymi: motoryzacyjnej, AGD, medycznej, lotniczej, bądź elektrotechnicznej [25]. Przykłady zastosowania połączeń przetłaczanych stosowane w różnych branżach przemysłowych przedstawiono również na rysunku 1.5. Złącze zastosowano między innymi jako wzmocnienie konstrukcji w narożu półki regału jezdnego (rys. 1.5). Na rysunku 1.5b przedstawiono ramę drzwi rewizyjnych, gdzie dwa kształtowniki aluminiowe

zostały zespolone ze sobą za pomocą stalowej blaszki. *BTM* na swojej stronie internetowej [26] przedstawia między innymi przykład zastosowania *CL* do łączenia przewodów elektrycznych (rys. 1.5c), a także połączenie blachy perforowanej z pełnym materiałem (rys. 1.5d). Z uwagi na coraz szersze zastosowanie, metoda clinching jest analizowana pod kątem zastosowania przez różne zespoły naukowców [27–30].



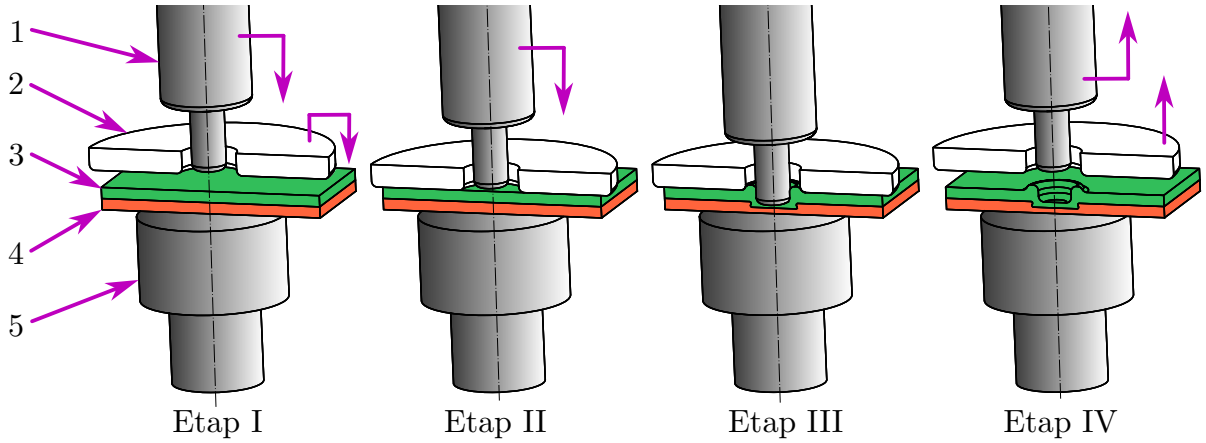
Rys. 1.5. *Przykłady zastosowania technologii CL w konstrukcjach wytwarzanych przez różne gałęzie przemysłu: a) fragment półki blaszanej szafy metalowej, b) połączenie stalowej blachy z aluminiowym kształtownikiem tworzące ramkę drzwi rewizyjnych, c) połączenie przewodów, d) połączenie perforowanej blachy z ramką osłony ochronnej (opracowanie własne na podstawie [26])*

1.2 Wybrane odmiany procesu łączenia w technologii przetłoczenia (*CL*)

Łączenia materiałów z uproszczeniem kształtu matrycy i wyeliminowanie charakterystycznej wypukłości, będącej plastycznym odkształceniem materiału, jest jedną z modyfikacji łączenia poprzez przetłaczanie.
Oprzyrządowanie opracowane na uniwersytecie Chemnitz (Niemcy) [31] umożliwia uzyskanie połączenia przetłaczanego bez wypływki w jednym ruchu roboczym narzędzi. Technologia ta może być z powodzeniem stosowana nawet na elementach z widoczną zewnętrzną powierzchnią. Autorzy w pracy [31] przedstawili badania eksperymentalne nad łączeniem blach metalowych różnych gatunków. Scaleniu poddano głównie blachy aluminiowe EN

AW-1050 (Al 99,5) o różnej grubości łączonych warstw. Połączono również warstwę ze stali DC04 o grubości 1 mm z Al99,5 o grubości 1,5 mm. Połączenie to charakteryzowało się największą nośnością równą 1,4 kN, wyznaczoną w próbie ścinania

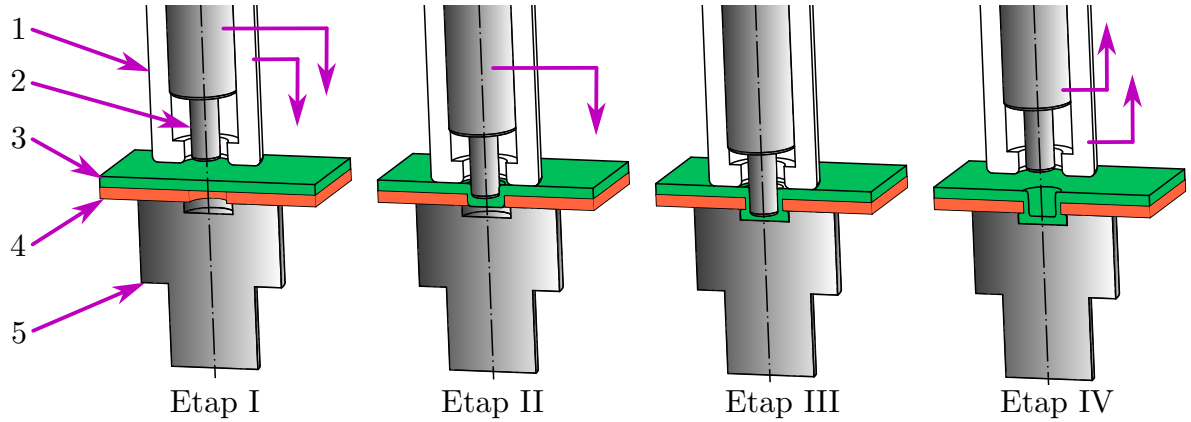
W publikacji [31] przedstawiono również połączenie blachy Al99.5 o grubości 1 mm z 2 mm warstwą tworzyw sztucznych takich jak Polistyren (PS 495F i PS145D) i politereftalan butylenu (PBT B4300k6 i B4300G6). Wytrzymałość połączeń hybrydowych na ścinanie dla wszystkich tworzyw mieściła się w zakresie od około 0,37 do 0,5 kN. W ramach tego rozwiązania, zastosowano matrycę o płaskiej geometrii dna formującego. Etapy formowania złącza, przedstawiono na rysunku 1.6.



Rys. 1.6. *Charakterystyczne etapy formowania połączenia CL z płaską matrycą (1-stempel, 2-dociskacz, 3- górna z łączonych warstw, 4- dolna z łączonych warstw, 5- matryca)*

Dociskacz oznaczony numerem 2 blokuje materiał, zaś ruch stempla (numer 1) w kierunku matrycy (numer 5), wymusza płynięcie łączonych warstw oznaczonych kolejno numerami 3 i 4 w wolną przestrzeń pomiędzy stemplem, a dociskaczem. Badania nad podobnym rozwiązaniem zostały przeprowadzone i opisane przez Chen'a w artykułach [32, 33]. Analizę wpływu wartości siły formowania na złącze z płaską geometrią matrycy formowania przeprowadzono również w artykule [34]. W przypadku przeprowadzonych badań na materiale EN AW-7075, siłę formowania zmieniano co 5 kN w zakresie od 30 do 50. Wykazano, iż wytrzymałość złącza była największa w przypadku ukształtowania połączenia z siłą 40 kN. Dalsze jej zwiększenie skutkowało zmniejszeniem nośności złącza.

Kolejną odmianą modyfikacji technologii *CL* jest łączenie miękkiego i twardego materiału. W takim przypadku dolną warstwę stanowi twardy materiał, w którym wykonany został otwór przed łączeniem. Poszczególne etapy formowania zmodyfikowanej technologii *CL*, ze względu na brak możliwości przetłoczenia w wykrój matrycy jednej z łączonych warstw, przedstawiono na rysunku 1.7.



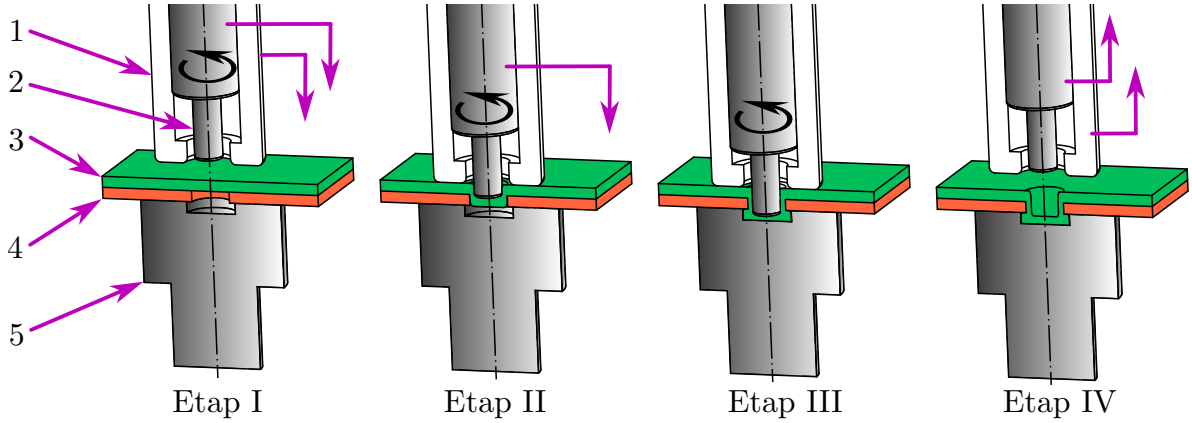
Rys. 1.7. *Etapy procesu formowania połączenia dla przypadku gdy dolna warstwa jest z materiału trudno odkształcalnego. (1-dociskacz, 2-stempel, 3- górna z łączonych warstw, 4 - warstwa z wykonanym otworem, 5- matryca)*

W odróżnieniu od klasycznego połączenia *CL*, do scalenia wymagany jest otwór, który został wykonany w dolnej spośród łączonych warstw (numer 4 na rysunku 1.7). Etap pierwszy wymaga za pozycjonowania pomiędzy narzędziami kształtującymi. Dociskacz (numer 1) wraz z matrycą (numer 5) blokują łączone elementy. W kolejnych etapach stempel oznaczony numerem 2 przetłacza górną warstwę materiału (numer 3) przez uprzednio wykonany otwór, aż do momentu spotkania się dolnej warstwy z dnem w wykroju matrycy. W etapie trzecim materiał płynie promieniowo względem osi narzędzi. Ponieważ wartość średnicy otworu jest mniejsza niż wnęki w matrycy powstaje trwałe połączenie. Połączenia wykonane wg tej zmodyfikowanej technologii mogą być stosowane między innymi do łączenia warstwy aluminium EN AW-6061 z kompozytem zbrojonym włóknem węglowym (CFRP). W pracy [35], przedstawiona została analiza eksperymentalna nad łączeniem wymienionych gatunków, o grubości 2,4 mm dla EN AW-6061 i czterech grubości od 1,00 do 1,60 mm ze zmianą co 0,2 mm w przypadku kompozytu CFRP. W próbach wytrzymałościowych, dla próbek o mniejszej grubości doszło do separacji łączonych warstw. Inny mechanizm zniszczenia zaobserwowano w przypadku scalenia z grubszymi warstwami CFRP. W próbkach o grubości 1,4 i 1,6 mm doszło do ścięcia wypływki w warstwie z materiału ze stopu aluminium przy sile 2,75 i 3,34 kN.

Modyfikacja technologii łączenia przez przetłaczanie i wykonanym wstępnie otworem ma jeszcze inne odmiany. Poza możliwością zablokowania materiału poniżej dolnej warstwy w przestrzeni wykroju matrycy, istnieją również odmiany, gdzie materiał zaciska się w otworze dolnej blachy. Dzięki czemu możliwe jest uzyskanie połączenia bez wystającej wypływki. Otwór ten może być wykonany pod kątem, bądź walcowy o dwóch wielkościach średnic. Badania nad łączeniem opisaną metodą, przedstawiono w pracy [36]. Potwierdzono możliwość stosowania metody z otworem i wykonanie połączenia bez wypływki, na stopach aluminium w gatunku EN AW-6063 o grubości 0,8 mm.

Lambiase w artykule [37] opisał inną odmianę technologii *CL* z otworem w dolnej warstwie materiału, z dodatkowym ruchem obrotowym stempla. Scaleniu poddano dwa materiały, każdy o grubości 2 mm (stop aluminium EN AW-6061 i CFRP). Wyjątko-

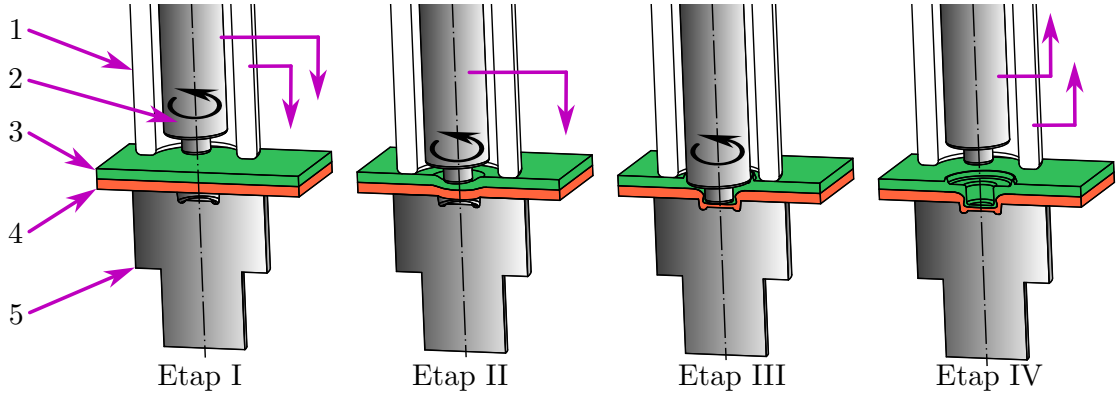
wość tej metody polega na dodatkowym obracaniu się stempla wokół osi, który nagrzewa górną z łączonych warstw. Poprzez lokalny wzrost temperatury, zostaje obniżona granica plastyczności materiału. Osiągnięcie wartości X przez stempel nastąpiło przy mniejszej wartości siły formowania w odniesieniu do konwencjonalnej odmiany technologii *CL*. W rezultacie uzyskano możliwość połączenia badanych materiałów bez defektów w postaci pęknięć. Główne etapy realizacji formowania dla opisanej modyfikacji technologii *CL* przedstawiono na rysunku 1.8.



Rys. 1.8. *Etapy procesu formowania połączenia dla przypadku gdy dolna warstwa jest z materiału trudno odkształcalnego (1-dociskacz, 2-stempel, 3- górna z łączonych warstw, 4 - warstwa z wykonanym otworem, 5- matryca)*

Dodatkowy ruch obrotowy pozwala na podgrzanie materiału w wyniku występującego tarcia. Obniżony zostaje opór plastycznego płynięcia, tym samym dochodzi do występowania mniejszych nacisków na twardą dolną spajaną warstwę. Wadą tego rozwiązania może być większe zużycie na powierzchniach roboczych stempla formującego.

Obrotowy ruch stempla, może być stosowany również w przypadku łączenia materiałów bez wstępnie przygotowanego otworu w dolnej warstwie. Etapy kształtowania złącza przedstawiono na rysunku 1.9.

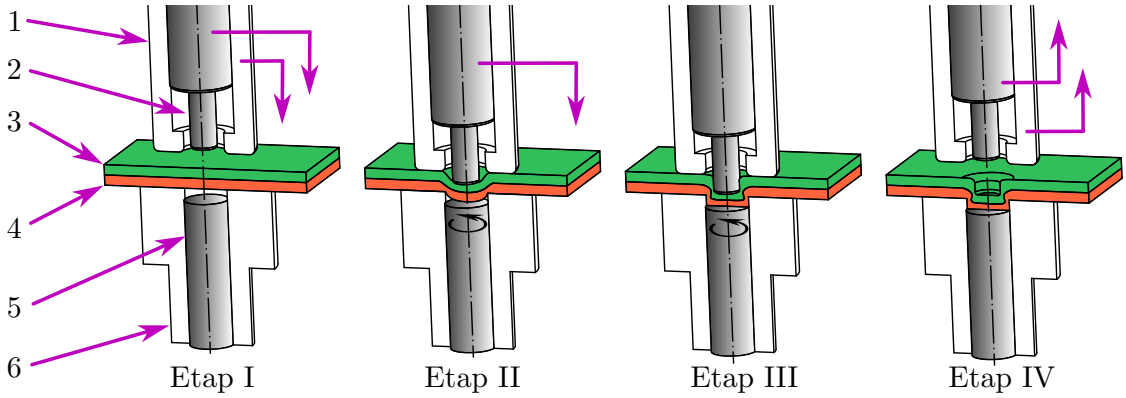


Rys. 1.9. *Etapy procesu formowania połączenia dla jednej z modyfikacji procesu przetłaczania (1-dociskacz, 2-stempel, 3- górna z łączonych warstw, 4- dolna z łączonych warstw, 5- matryca)*

Ułożone razem łączone warstwy oznaczone numerami 3 i 4 na rysunku 1.9 zostały do-

ciśnięte poprzez dociskacz (numer 1) do matrycy (numer 5). W kolejnym etapie stempel wykonujący ruch obrotowy i postępowy, wtłacza materiał łączonych warstw w kierunku dna wykroju matrycy. W trakcie procesu cały czas generowane jest ciepło wynikające z tarcia powierzchni roboczych stempla o materiał górnej warstwy. W tej metodzie powierzchnia stopniowana na stemplu opiera się o górną powierzchnię łączonych warstw pozostawiając kształt widoczny na rysunku 1.9 w etapie IV. Po wycofaniu stempla i dociskacza do zadanej pozycji, proces jest zakończony. Metoda ta została zbadana podczas łączenia dwóch blach aluminiowych w gatunku 2024-T3 [38, 39].

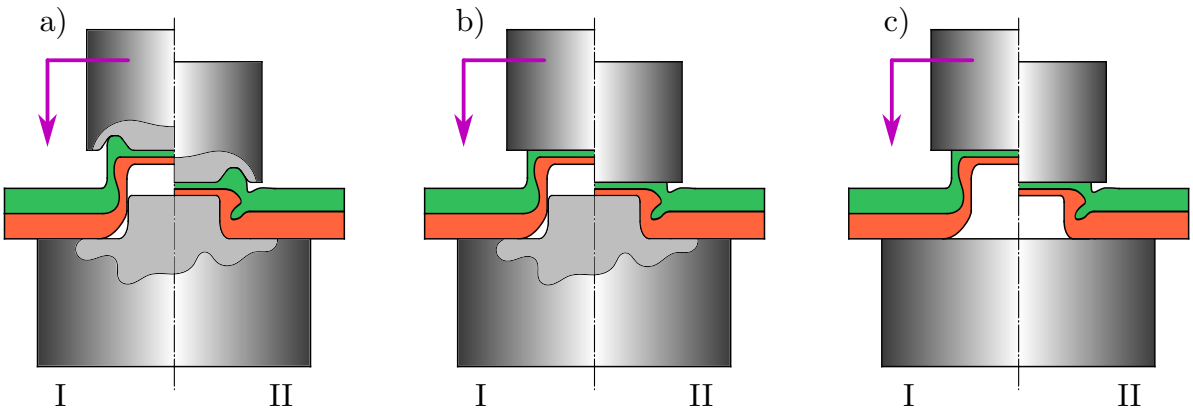
W literaturze występuje również koncepcja, w której ruch obrotowy realizowany jest poprzez zmodyfikowaną matrycę, a w zasadzie trzpienia w niej umieszczonego. Schemat tworzenia złącza, przedstawiono na rysunku 1.10.



Rys. 1.10. *Etapy procesu formowania połączenia dla jednej z modyfikacji procesu przetłaczania (1-dociskacz, 2-stempel, 3- górna z łączonych warstw, 4- dolna z łączonych warstw, 5-ruchomy trzpień, 6- korpus matrycy)*

Standardowe rozwiązanie wykroju w matrycy, zostało zastąpione przez trzpień obrotowy (numer 5 na rysunku 1.10) i element podpierający (numer 6), który wraz z dociskaczem oznaczonym numerem 1 podtrzymuje łączone warstwy w trakcie ich scalenia. Tak jak w pozostałych przypadkach przetłoczenia, stempel (numer 2) wtłacza łączone materiały w górną wolną przestrzeń nad trzpieniem obrotowym. W trzecim etapie materiał intensywnie płynie w kierunku promieniowym do osi narzędzi. Proces kończy się po wycofaniu narzędzi formujących do początkowej ich pozycji. W artykule [40] przedstawiono badania oraz wyniki dotyczące symulacji numerycznej takiego procesu łączenia. Autor dokonał analizy wpływu głębokości matrycy (tj. różnicy wysokości pomiędzy powierzchnią podpierającą w części nieruchomej i górnej powierzchni elementu obrotowego), prędkości i czasu formowania pod wpływem dodatkowego ruchu obrotowego trzpienia. Dla badanych zakresów zmienności zmodyfikowanego procesu formowania złącza uzyskane zostały znaczące różnice w geometrii i nośności połączeń, w porównaniu do klasycznego procesu łączenia.

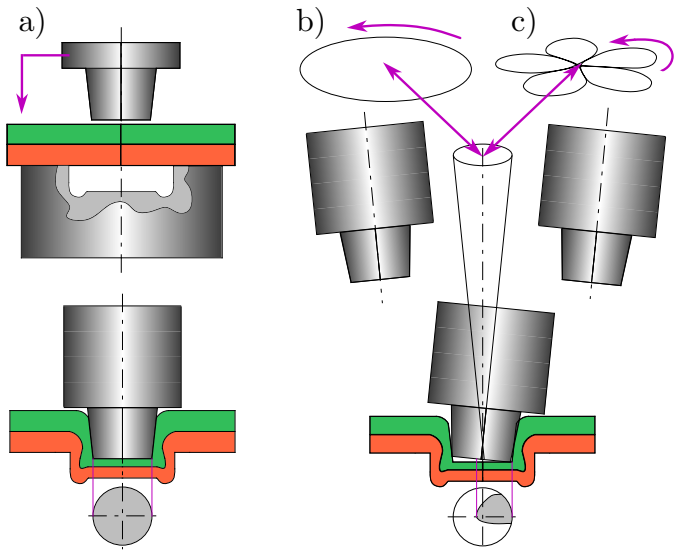
W literaturze została przedstawiona również propozycja kształtowania złącza w dwóch etapach, schemat układu narzędzi i etapy przedstawiono na rysunku 1.11. Pierwszy z nich zakłada standardowe utworzenie złącza, zaś w kolejnym kroku złącze poddane jest ponownemu procesowi prasowania.



Rys. 1.11. *Schemat narzędzi stosowanych w dwuetapowym procesie formowania złącza: a) z kształtem po stronie matrycy i stempla, b) z płaską geometrią stempla i kształtem na matrycy, c) z płaską geometrią stempla i matrycy*

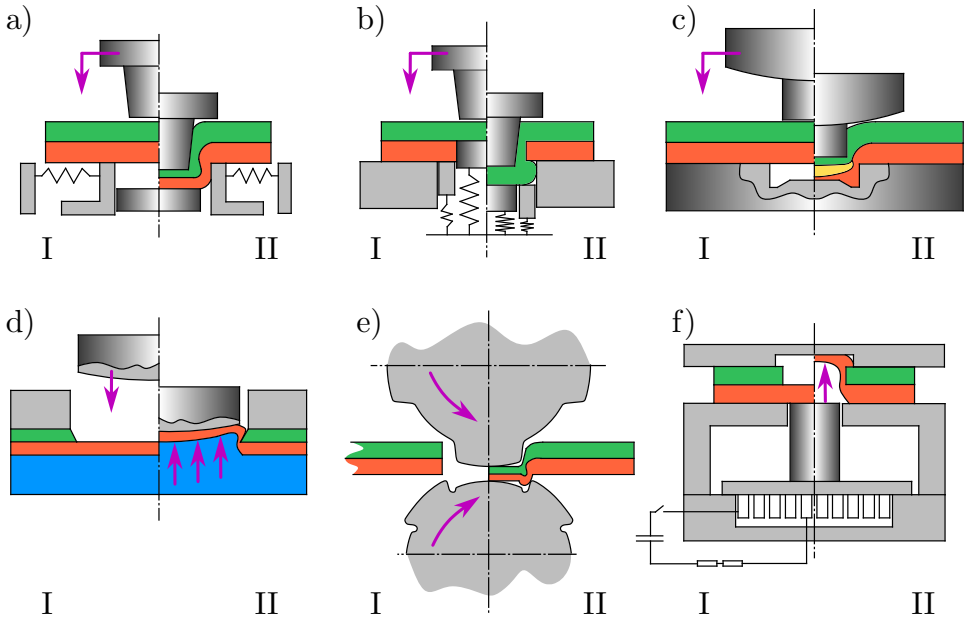
W artykule [41] opisano badania rozwiązania z dopasowanym kształtem zarówno stempla jak i matrycą (rys. 1.11a). Konstrukcja narzędzi ułatwia pozycjonowanie złącza w celu wykonania drugiego etapu. W artykule [42], opisano przypadek matrycy z wypustem do bazowania i zastosowaniem stempla o płaskiej geometrii (rys. 1.11b). Analizowano wpływ zróżnicowanej siły drugiego etapu kształtowania złącza. Scaleniu poddano dwie warstwy materiału EN AW-6061 o grubości 2 mm. Badania zestawiono i porównano z złączem wykonanym w jednym kroku. Wartość siły zmieniano co 4 kN rozpoczynając od 12 kN, a kończąc na 28 kN (łącznie 5 kroków). Dzięki sprasowaniu klasycznie utworzonego złącza, uzyskana została redukcja wielkości przetłoczenia od strony matrycy. Zmianę zaobserwowano również w zakresie geometrii na przekroju złącza, gdzie wartość zablokowania materiału rosła, wraz z przyrostem siły dotłaczającej połączenie. Nośność zmodyfikowanego złącza była wyższa niż klasycznego *CL*. Wartość maksymalnej siły obciążenia zwiększała się wraz ze wzrostem siły prasowania w drugim etapie. Kolejnym z przypadków modyfikacji, cechującym się płaską geometrią formującą zarówno po stronie stempla jak i matrycy (rys. 1.11c), został opisany w pracy [43]. W przypadku dotłaczania połączenia, bez elementu stabilizującego na matrycy, uzyskano takie samo przemieszczenie stempla przy mniejszej sile. Złącza te w próbach wytrzymałościowych, wykazały większą nośność w stosunku do podstawowego rozwiązania *CL*.

Na rysunku 1.12a przedstawiono standardowe złącze wykonane w technologii *CL*, wraz z zaznaczeniem pola styku narzędzia. Obniżenie wartości siły formowania złącze przetłaczane jest możliwe, przez zmniejszenie pola styku stempla kształtującego. Modyfikacja charakteryzuje się skomplikowanym układem napędowym ruchów stempla. Możliwą trajektorię narzędzia przedstawiono na rysunkach 1.12b i 1.12c. Pole styku jest znacznie zredukowane w odniesieniu do standardowego rozwiązania [1].



Rys. 1.12. *Rozkład nacisków i podstawowa kinematyka narzędzia dla procesu formowania połączenia przetłaczanego: a) konwencjonalnie, b) z ruchem orbitalnym stempla, c) z ruchem radialnym stempla*

Badania modyfikacji technologii *CL* są szeroko analizowane, a przykładowe ich odmiany zaprezentowano w formie uproszczonych schematów na rysunku 1.13. W praktyce przemysłowej istnieją rozwiązania, w których zamiast sztywnej i jednolitej matrycy zastosowano fragmenty w postaci segmentów ruchomych. Zastosowanie tych suwaków w matrycy w formie schematu przedstawiono na rysunku 1.13a.



Rys. 1.13. *Nowatorskie rozwiązania procesu formowania połączeń przetłaczanych: a) matryca z ruchomymi segmentami, b) matryca z dolnym ruchomym trzpieniem, c) formowanie i jednoczesne zgrzewanie, d) Hydro-Clinching, e) układ rotacyjny stempla i matrycy, f) materiał odkształcany jest przez siłę pola elektromagnetycznego*

Witkowski w publikacji [44], przeprowadził analizę wpływu ilości segmentów na proces formowania i nośność połączeń. Zastosowane matryce składały się z dwóch, trzech i czterech ruchomych cylindrycznych segmentów. Badania przeprowadzono na dwóch warstwach z gatunku DX51D+Z o grubości 1 mm każda. Ilość segmentów nie wpłynęła znacząco na wartość siły formowania. Zaobserwowano, że nośność połączenia formowanego z trzema i czterema segmentami jest większa w porównaniu do formowanych matrycą z dwoma segmentami. Lee zaś w opracowaniu [45], przedstawił rozwiązanie będące modyfikacją metody formowania z otworem w dolnej warstwie. Na rysunku 1.13b, przedstawiono uproszczony schemat kształtowania złącza za pomocą matrycy z segmentami ruchomymi przesuwającymi się wzdłuż osi pionowej stempla. Łączeniu poddano stop aluminium EN AW-5083 (górna warstwa) z płytą kompozytową CFRP (dolna warstwa). W odrębie złącza uzyskano wyeliminowanie, bądź minimalizację uszkodzeń dolnej warstwy. Połączenie technologi *RSW* (ang.: *Resistance Spot Welding*) z *CL* opisywane jest jako złącze hybrydowe. W artykule [46] przedstawiono wyniki badań dotyczące połączenia wstępnie zgrzewanego oporowo, następnie przetłoczonego z zastosowaniem narzędzi używanych w technologii *CL*. Badania przeprowadzone zostały na dwóch gatunkach stali HX420LAD+Z i HCT600X+Z. Wykonane zostały badania nośności złączy wykonane w sposób konwencjonalny technologią *CL* oraz hybrydową *RSW+CL* (zgrzewanie + przetłaczanie). W wyniku przeprowadzonej analizy wykazano, iż łączenie technik zwiększyło nośność złączy.

Neugebauer w pracach [47, 48] opisał technologię łączenia *Hydro-Clinching* (rys. 1.13d). Jest to specjalna odmiana formowania połączenia *CL* z wcześniej wykonanym otworem w jednej z warstw. Stempel jest ustawiany przy wykonanym otworze górnej blachy, aby ograniczyć przemieszczenie materiału w trakcie kształtowania złącza. Materiał dolnej blachy podczas działania nacisków wypełnia przestrzeń tworząc zakotwiczenie materiału. W literaturze naukowej opisana jest również metoda, która do łączenia wykorzystuje rolkowy stempel i matrycę (rys. 1.13e). Dzięki rozłożonym naciskom siła formująca jest mniejsza w stosunku do standardowego rozwiązania [49]. Salamati i Zajkani [50] opisali metodę przedstawioną na rysunku 1.13f. Połączenie tworzone było z wykorzystaniem siły pola elektromagnetycznego. Jest to również odmiana technologii *CL* z otworem. Połączono warstwę aluminium EN-AW 1050A z CFRP.

Mucha w pracy [51] przedstawił porównanie metody *CL* ze zgrzewaniem oporowym. Łączono dwie warstwy materiału blach stalowych w gatunku DX53D+Z i DD14. Złącza zgrzewane przy identycznej aranżacji łączonych grubości i gatunków materiału wykazały ponad dwukrotnie większą wytrzymałość w porównaniu do formowanych metodą *CL*. Różnica ta może być zniwelowana w przypadku wykonania większej ilości złączy *CL*. W zestawieniu wyników, dwa złącza przetłaczane, zredukowały znacząco różnice w nośności złączy. Jednakże, nadal zgrzewanie wykazało większą wytrzymałość. Istotnym aspektem przedstawionym w tym artykule, było ułożenie łączonych warstw materiału w technologii *CL*. W połączeniach pomiędzy warstwami DX53D+Z(grubość 0,98 mm) i DD14 (o grubości 0,62 mm), większą nośnością charakteryzowało się połączenie w przypadku ułożenia warstwy o większej grubości usytuowanej od strony stempla.

Wzmocnienie połączenia, poprzez dodanie dodatkowego spoiwa jakim są kleje zaliczane

jest do rozwiązań hybrydowych. Warstwa kleju pomiędzy łączonymi blachami zwiększa globalnie wytrzymałość takiego połączenia w porównaniu do nośności zwykłego scalenia *CL* [52].

Chen w artykule [53] zaproponował rozwiązanie naprawy złącza przetłaczanego wykonanego w technologii *CL* w przypadku utracenia ciągłości blach. Metodą przywrócenia złącza było wtłaczanie nita rurkowego w miejscu scalenia. Przedstawiona została zależność pomiędzy wytrzymałością złącza *CL*, w odniesieniu do wytrzymałości zrekonstruowanego połączenia. Z opisanej korelacji wynika iż, zależnie od zastosowanej siły wtłaczania nita mającego na celu naprawę złącza wytrzymałość może być mniejsza bądź większa w stosunku do nieuszkodzonego połączenia.

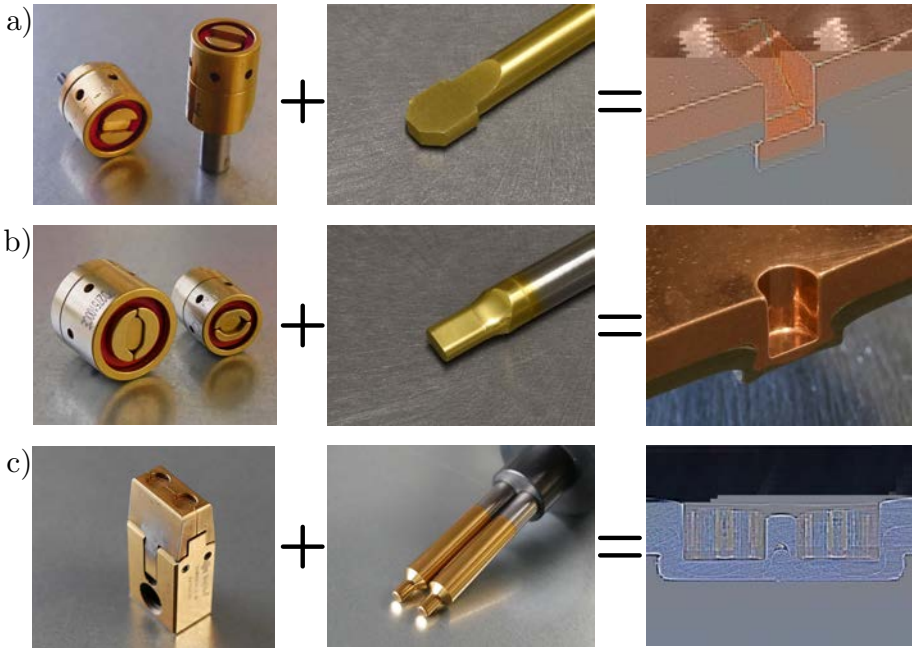
1.3 Aplikacje przemysłowych rozwiązań urządzeń do technologii łączenia przez przetłaczanie

Rozwój konstrukcji narzędzi umożliwił stosowanie technologii łączenia warstw materiału o grubości od 0,1 mm do 12 mm. Technologie przetłaczania można wykorzystywać do scalenia warstw o łącznej grubości do około 20 mm [25, 51, 54]. Zakres ten, nie jest możliwy do połączenia, z zastosowaniem jednego kompletu narzędzi. Oznacza to, iż na przykład do łączenia cienkich blach, występuje konieczność zastosowania odpowiednio mniejszych elementów formujących.

Zmiany geometryczne i rozwiązanie konstrukcyjne narzędzi formujących mogą znacząco wpłynąć na proces kształtowania złącza. Abe w opracowaniu [55] wykazał, że poprzez zmianę odległości pomiędzy powierzchnią, na której opiera się dolna blacha o matrycę, a dnem w wykroju matrycy, można zredukować bądź nawet wyeliminować możliwe pęknięcia materiału. Głębokość i średnica wykroju matrycy wpływa na wartość zablokowania górnej warstwy w dolnym łączonym materiale, co jest szczególnie istotne w przypadku scalania blach stalowych o wysokiej wytrzymałości. Mucha w artykule [56], przedstawił symulację numeryczną procesu przetłaczania, gdzie analizował wpływ kształtu rowka w matrycy. Autor określił wpływ parametrów geometrycznych narzędzi na charakterystyczne wymiary złącza oraz maksymalną siłę formowania.

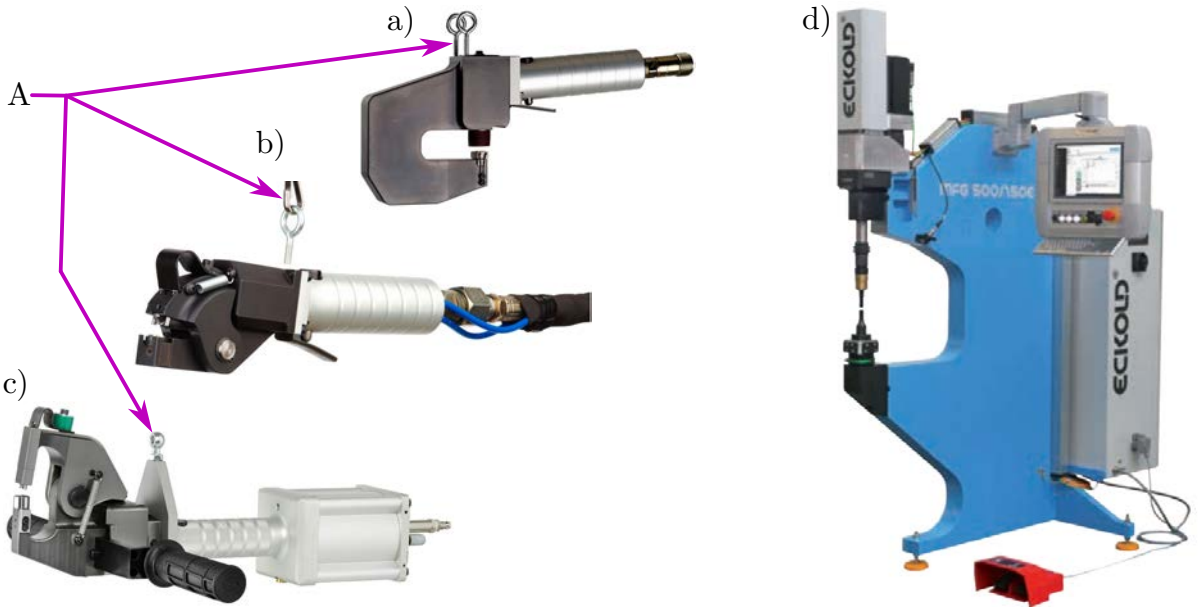
W warunkach przemysłowych, producenci oprzyrządowania, chcąc zachować konkurencyjność, rozwijają i oferują coraz szerszą ofertę narzędzi do plastycznego łączenia blach. Na rysunku 1.14a, przedstawiony został zespół producenta *BTM Lance-N-Loc*. Z uwagi na brak cylindrycznego kształtu, istotnym jest wzajemne położenie elementów kształtujących. Rozwiązanie to może być stosowane w aplikacjach, w których znaczenie ma oprócz połączenia warstw, zablokowanie obrotu względnego materiałów. Złącze powstaje w wyniku nacięcia materiałów, a następnie po przemieszczeniu się górnej warstwy poniżej poziomu dolnej, docisk powoduje, że górna warstwa materiału płynie prostopadle do ruchu stempla, wypełniając przestrzeń pod dolną blachą. Dla tego typu połączenia kierunek jego ułożenia względem obciążenia ma znaczenie [57]. Istnieją również rozwiązania narzędzi, które pozwalają na uzyskanie innego niż osiowosymetryczny kształt złącza.

Na rysunku 1.14b, przedstawiono rozwiązanie, która polega na zmianie cylindrycznego stempla na owalny. Matryca cechuje się dwoma segmentami ruchomymi, które powracają do pierwotnej pozycji dzięki elastomerowi. Producenci narzędzi stosują również rozwiązanie, które polega na zastosowaniu w bliskiej odległości dwóch stempli. Zespół narzędzi przedstawiono na rysunku 1.14c.



Rys. 1.14. *Rozwiązania matryc z ruchomymi segmentami firmy BTM, do formowania połączeń: a) prostokątnych z nacięciem warstw, b) owalnych, c) podwójnych [26]*

W przypadku urządzeń obsługiwanych przez operatora, popularne są dwa rozwiązania: najprostsze podręczne urządzenia z możliwością łatwego przenoszenia (rys. 1.15a-c), oraz stacjonarne urządzenia do łączenia z zastosowaniem prasy (rys. 1.15d). Producenci oferują zastosowanie stacjonarnych urządzeń o dużej sile nacisku. Producent *TOX Pressotechnik* w swojej ofercie posiada napęd *TOX ElectricPowerDrive EXe-L*, które jest dostępny w wersjach siły nacisku nawet do 1000 kN. Ogromną zaletą tego typu rozwiązania jest połączenie z automatyką. Do dyspozycji pozostają systemy pomiarowe do kontroli złączy przetłaczanych, umożliwiające monitorowanie i dokumentowanie wykonanych połączeń. Pozwala to na wykrycie odchyleń na wczesnym etapie, minimalizując czas przestoju [25]. W przypadkach, gdzie nie ma konieczności stosowania dużych sił, popularnym rozwiązaniem są narzędzia do obsługi ręcznej. Na przestrzeni ostatnich lat, powstało bardzo wiele odmian dopasowanych do wymaganej aplikacji. Przykłady odmiennych rozwiązań przedstawiono na rysunku 1.15a-c). Producent *Jurado* [58], opiera narzędzia o napęd pneumatyczny. Poprzez zastosowanie wbudowanego wzmacniacza ciśnienia, możliwe jest uzyskanie siły około 30 kN przy ciśnieniu roboczym 6-7 bar. Urządzenia dedykowane do obsługi ręcznej w celu poprawy ergonomii pracy posiadają specjalne uchwyty (A na rysunku 1.15). Urządzenie w trakcie eksploatacji jest podwieszone, co skutkuje redukcją wymaganej siły operatora.



Rys. 1.15. *Przykład urządzeń do wytwarzania połączeń przetłaczanych: a-c) przenośne, d) stacjonarne [58, 59]*

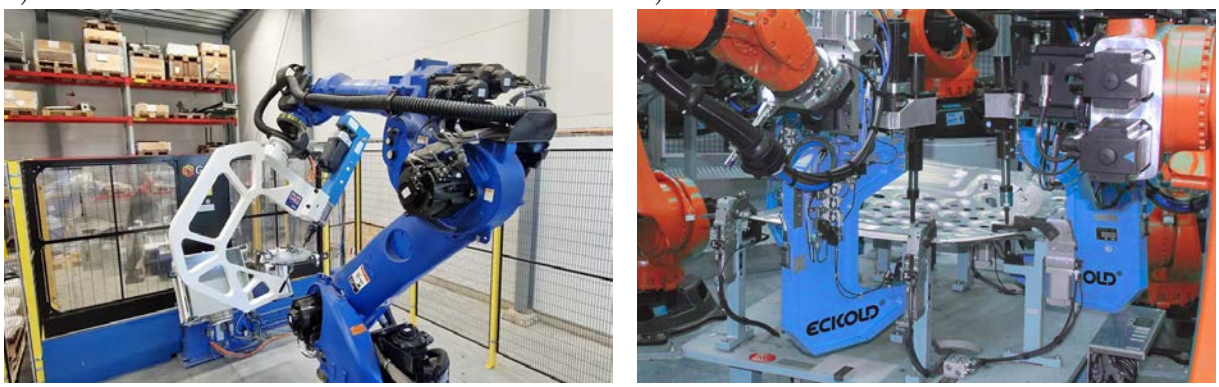
Dobór narzędzi jest indywidualnym elementem procesu projektowania montażu cienkościennych elementów. Wychodząc na przeciw wymaganiom rynku i zwiększenia konkurencyjności, producenci oferują wykonanie dedykowanych rozwiązań do seryjnego procesu montażu (rys. 1.16a-c). W ramach jednego zespołu narzędzi, możliwe jest wykonanie złączy w wielu miejscach równocześnie, co znacząco ogranicza ilość operacji i skraca czas montażu. Kosztowna inwestycja w oprzyrządowanie może być opłacalna w zależności od wielkości produkcji. Ograniczeniem tego sposobu łączenia jest dostęp do łączonych warstw materiałów z obu stron.



Rys. 1.16. *Dedykowane oprzyrządowanie do wielopunktowego łączenia w procesie montażu cienkościenny elementów: a) osłony przewodu rurowego, b) multiplikacja stempli i matryc, c) kątowego połączenia profili [60]*

W przypadku bardziej skomplikowanych aplikacji, technologia *CL* może być zintegrowana z robotami przemysłowymi. Przykłady narzędzi do *CL* zamocowane na manipulatorze przedstawiono na rysunku 1.17a i 1.17b.

a) b)



Rys. 1.17. *Przykład zastosowania robota przemysłowego w procesie łączenia elementów: a) uniwersalny pojedynczy układ do wykonywania połączeń, b) kompleks układu dedykowanych robotów [61]*

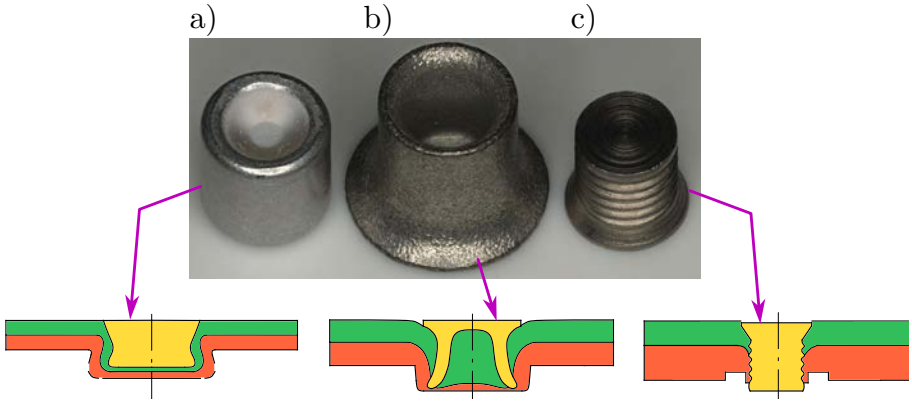
Żywotność narzędzi w dużej mierze zależy od materiału łączonych warstw. *Tox Pressotechnik* zamieścił informację w jednym z katalogów dotyczącą szacowanej liczby cykli, po osiągnięciu której należy wymienić narzędzie. W zależności od grubości i gatunków łączonych materiałów zakresy są dość zróżnicowane. Najkrótszy czas eksploatacji, występuje w przypadku łączenia blach ze stali nierdzewnych o łącznej grubości powyżej 3 mm, dla której przedstawiono zakres od około 30 do 80 tysięcy cykli. Dla tej grupy stali wg informacji producenta w przypadku łącznej grubości do 3 mm, żywotność narzędzi kształtujących rośnie do około 150 tysięcy cykli. W przypadku gatunku X6Cr17 o łącznej grubości nie przekraczającej 2 mm zakres trwałości mieści się w przedziale od około 100 do 300 tysięcy cykli. Producent nie sprecyzował informacji dotyczącej łącznej grubości łączonych warstw dla stali węglowych, jednakże podaje informacje o spodziewanej ilości wykonanych złączy. Trwałość dla stali o wytrzymałości na rozciąganie od 500 do 1000 MPa, oszacowano na 100-250 tysięcy złączy. W przypadku stali o granicy plastyczności z przedziału od 200 do 500 MPa, narzędzia mogą być dłużej eksploatowane, a spodziewana liczba wykonanych złączy mieści się w zakresie od 200 do 500 tysięcy. Najszerszy zakres trwałości może wystąpić w przypadku łączenia cynowanych stopów miedzi, który mieści się w przedziale od 200 tysięcy nawet do 1 miliona cykli.

1.4 Łączenie cienkościennych elementów poprzez przetłaczanie z zastosowaniem dodatkowego elementu

Trendem ostatnich lat jest rozwijanie technologii połączeń prasowanych, w kierunku zwiększenia nośności złączy, zapewnienia możliwości łączenia szerokiej gamy materiałów o różnym układzie grubości i właściwości mechanicznych [62]. Jedną z interesujących modyfikacji technologii połaczeń przetłaczanych jest zastosowanie dodatkowego nita do formowania złącza. Pomimo zachowania wspólnej cechy - braku konieczności wykonania otworu wstępnego, rola nita różni się, w zależności od konstrukcji i sposobu jego osadzania

w łączonych warstwach:

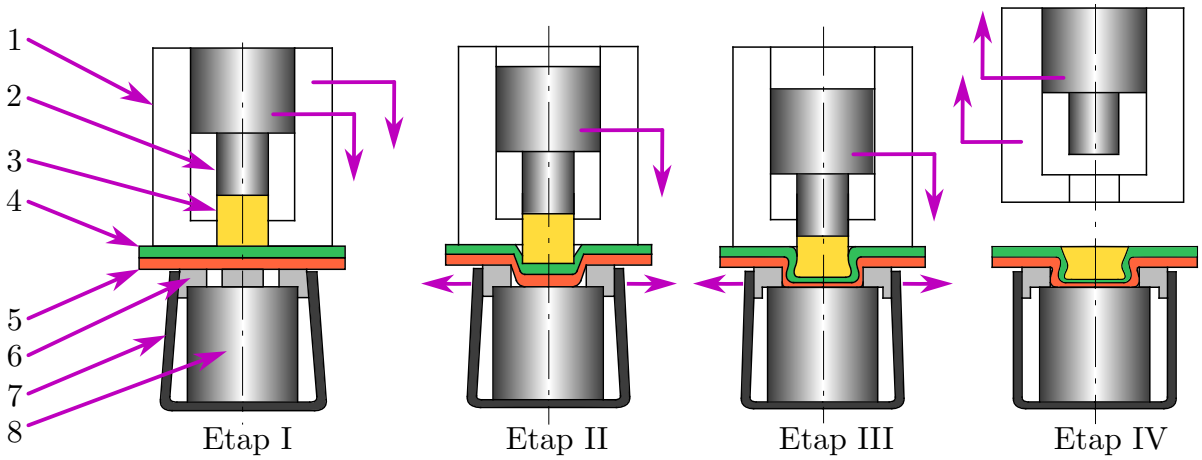
- w przypadku technologii *CR* (ang.: *ClinchRivet*) - rozwiązanie najbardziej zbliżonego do klasycznego *CL*, podstawowe założenie zakłada, że nie doprowadza się do przebicia w miejscu scalenia. Przykład nita, oraz przekrój złącza przedstawiono na rysunku 1.18a,
- technologia w której nit (rys. 1.18b) osadza się w dolnej warstwie materiału, przecinając wszystkie górne, opisywane jest jako *SPR* (ang.: *Self Piercing Riveting*),
- technologia, w której wszystkie łączone warstwy są przebijane za pomocą nita samowykrawającego (rys. 1.18c), opisywana jest jako *SSPR* (ang.: *Solid Self Piercing Riveting*).



Rys. 1.18. *Główne rozwiązania nitów stosowanych w technologii połączeń przetłaczanych. Nit stosowany w procesie: a) CR, b) SPR, c) SSPR*

1.4.1 ClinchRivet - *CR*

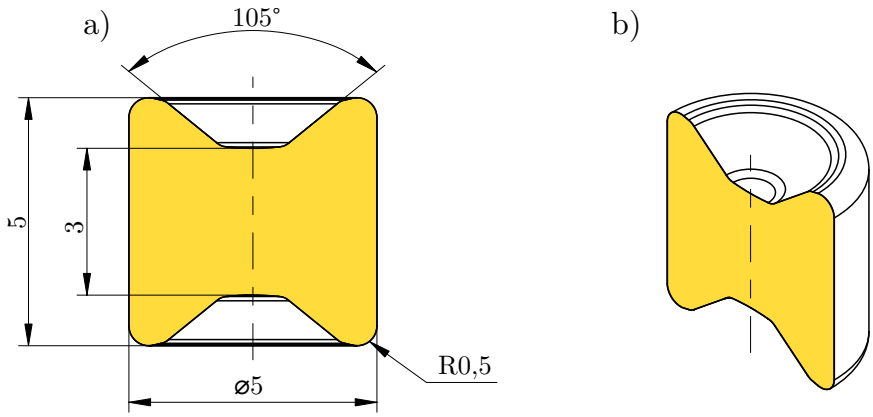
Jedną z odmian przetłaczania z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego jest metoda opatentowana przez firmę *TOX Pressotechnik - CR* (ang.: *ClinchRivet*). Podobnie do technologii *CL*, złącze powstaje w wyniku lokalnego plastycznego odkształcenia łączonych materiałów. Technologia stosowana jest do łączenia dwóch lub większej liczby warstw materiałów. Mucha, w pracy [63], dokonał porównania złączy wykonanych w technologii *CL* i *CR*. Badania przeprowadzone zostały na różnych gatunkach materiałów o grubości każdej z warstw 0,8 mm. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że niezależnie od analizowanego materiału, w każdym przypadku nośność złącza z zastosowaniem nita była większa w porównaniu do połączenia wykonanego w technologii *CL*. Złącze formowane jest wewnątrz wykroju matrycy, a łączone materiały nie ulegają przebiciu, czy uszkodzeniu przez pęknięcie. Etapy formowania złącza przedstawiono na rysunku 1.19.



Rys. 1.19. *Etapy procesu formowania złącza w technologii CR. (1- dociskacz, 2- stempel, 3- nit, 4- górna z łączonych warstw, 5- dolna z łączonych warstw, 6- ruchomy segment, 7- sprężyna, 8- trzpień matrycy)*

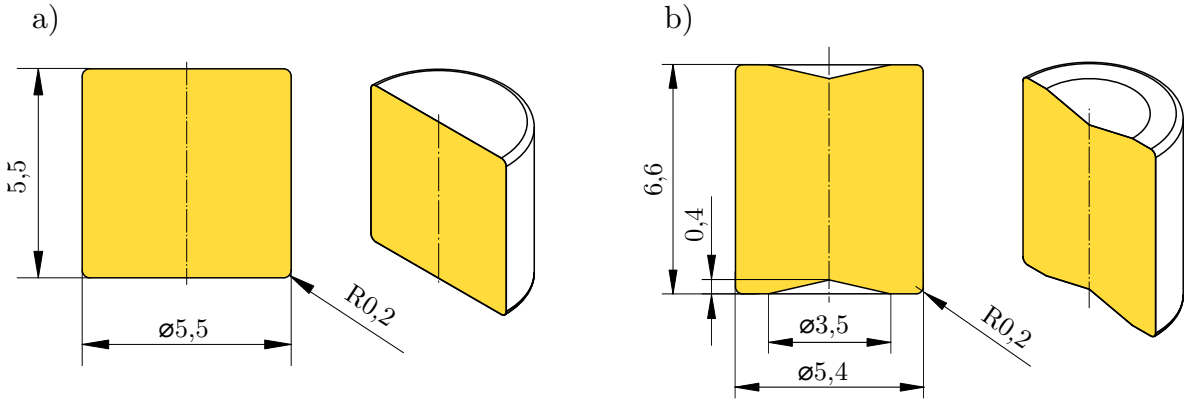
Pierwszy etap zawiera pozycjonowanie łączonych warstw oznaczonych numerami 4 i 5, przesuw tulei dociskacza (numer 1), oraz pobranie nita (numer 3) z magazynu. Dociskacz (numer 1) wraz z zespołem matrycy składającym się z ruchomych segmentów (numer 6) i trzpieniem (numer 8) dociskają do siebie łączone warstwy w trakcie formowania złącza. W etapie drugim, ruch stempla (numer 2), wtłacza nit. Wraz z ruchem nita materiał łączonych warstw wtłaczany jest we wnękę matrycy, aż do momentu kontaktu dolnej warstwy z płaską powierzchnią w jej wykroju. Dalsze przesuwanie stempla w kierunku matrycy wymusza płynięcie łączonych materiałów. Ruchome segmenty odsuwają się od osi matrycy. W trzecim etapie dochodzi do promieniowego zablokowania nita w górnej warstwie łączonych elementów. Proces kształtowania złącza kończy się w momencie, gdy czoło stempla zrówna się z górną powierzchnią pierwszej warstwy łączonych materiałów. Po wyjęciu połączenia z matrycy, sprężyna (numer 7) wymusza powrót ruchomych segmentów do pierwotnej pozycji.

Uproszczoną geometrię na przekroju nita, przedstawiono na rysunku 1.20, wraz z rzutem izometryczny łącznika. Producent *TOX Pressotechnik*, posiada w swojej ofercie nity o zbliżonej do siebie geometrii, jednakże prawdopodobnie o różnym stopniu twardości. Wykonawca nie podaje szczegółowych informacji dotyczących materiału z jakiego nity zostały wytworzone. Nity komercyjne mogą różnić się się materiałem oraz geometrią.



Rys. 1.20. *Przybliżona geometria nita stosowanego w technologii CR (opracowanie własne na podstawie [63])*

Połączenia wykonane z zastosowaniem technologii *CR* wykazują większą nośność w stosunku do złączy *CL*. W pracy [64], potwierdzono zwiększoną nośność złącza przetłaczanego z nitem. Opracowanie zawiera badania nad łączeniem blach ze stopów aluminium EN AW-1060 i EN AW-5052. Dokonano porównania klasycznego *CL* wraz z dwoma rodzajami nitów - odkształcalnym (rys. 1.21a) i nieodkształcalnym (bardzo twardym - rys. 1.21b).

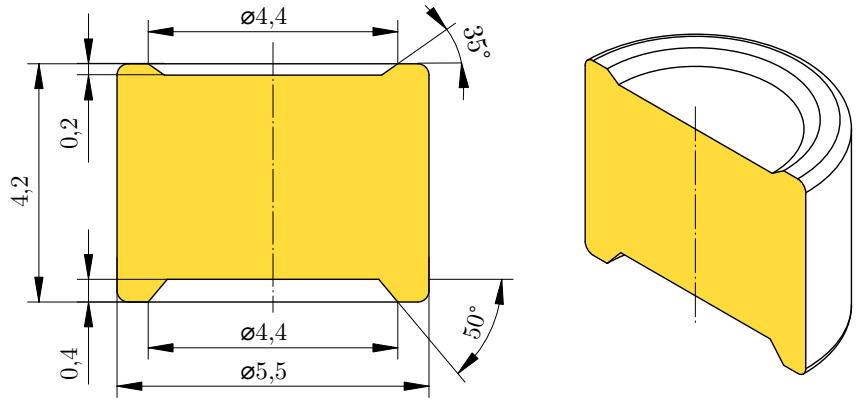


Rys. 1.21. *Przybliżona geometria innych możliwych nitów w technologii CR: a) nit pełny nieodkształcalny, b) nit z wgłębieniem stożkowym, odkształcalny (opracowanie własne na podstawie [64])*

W przypadku zastosowania nita odkształcalnego, zaobserwowano zmianę mikro twardości, a jej wartość była wyższa w stosunku do wartości początkowych materiału. W wyniku odkształcenia plastycznego doszło do umocnienia materiału. W artykule [64], nity poza twardością różniły się geometrią, dlatego nie jest możliwe jednoznaczne określenie wpływu twardości na podstawie wyników tych badań.

Wu w opracowaniu [65] przedstawił analizę wpływu nita nieodkształcalnego na nośność i formowanie złącza przetłaczanego blach ze stopu aluminium, w zależności od aranżacji łączonych warstw. Zaobserwowano analogiczną zależność, która miała miejsce w przypadku technologii *CL*. Dla zróżnicowanej grubości, złącza charakteryzują się więk-

szą nośnością w przypadku układu, gdy grubsza spośród łączonych warstw, usytuowana była od strony stempla. Zaś Chen, w artykule [66], przeprowadził badania, w których do ukształtowanego złącza w technologii *CL* zaprasował nit wypełniając przetłoczenie uformowane przez stempel. Geometrię wykorzystanego elementu, przedstawiono na rysunku 1.22.



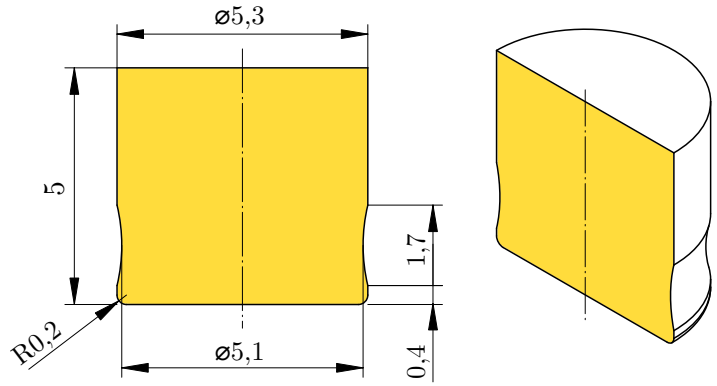
Rys. 1.22. *Jedna z możliwej geometrii nita w technologii CR (opracowanie własne na podstawie [66])*

Łączenie zostało wykonane w dwóch etapach - najpierw zostało utworzone połączenie *CL*, a następie w przetłoczenie pozostałe po stemplu dokonał wtłoczenia odkształcalnego nita. Wykonano badania z różną maksymalną siłą naciskania nita. Połączenia wzmocnione nitem wykazały większą wytrzymałość w odniesieniu do złączy *CL*.

W innej pracy Chen [67] przedstawił analizę, w której zarówno badaniami eksperymentalnymi jak i numerycznymi potwierdził możliwość zastosowania technologii *CR* wraz z płaską matrycą. W rezultacie uzyskano złącze *CR* bez wypływki od strony matrycy. Przeprowadzona została optymalizacja kształtu nita i jego cech geometryczny na podstawie symulacji numerycznej.

W pracy [68], Shi przedstawił wyniki badań ze zmienną wartością maksymalnej siły wtłaczania nita. Obserwacje zostały dokonane na próbie scalenia dwóch blach EN AW-5052 o grubości 2 mm. Nit o twardości 62 HRC wykonany został z materiału Cr12MoV. Wykazano, że wraz ze wzrostem maksymalnej siły formowania wzajemne promieniowe zablokowanie materiałów zwiększało się. Wartość nośności złącza w próbie ścinania zakładowego połączenia uległa zwiększeniu wraz ze wzrostem maksymalnej siły formowania.

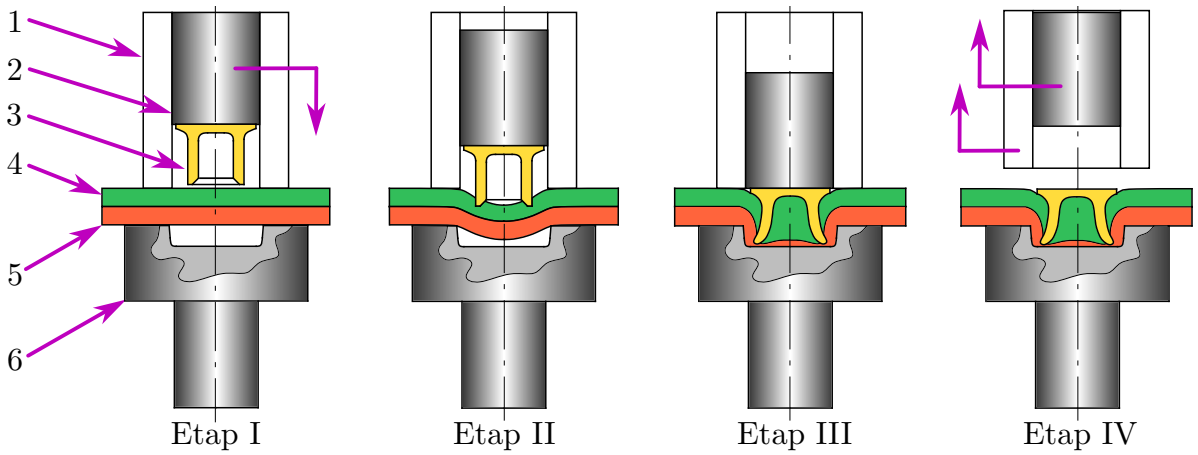
Chen, w opracowaniu [69], wykonał badania *CR* z matrycą cechującą się brakiem wnęki co pozwoliło na uzyskanie złącza bez charakterystycznego wypuklenia. W ramach opisanych badań, dokonano analizy wpływu siły, z jaką dociskacz podtrzymywał łączone warstwy w trakcie scalania. Geometrię zastosowanego nita przedstawiono na rysunku 1.23. Wykazano, że w przypadku braku zablokowania górnej powierzchni blachy, warstwy ulegają dużej deformacji. Wzrost siły podtrzymującej łączone warstwy ze stopu aluminium wpływał znacząco na wzajemne kształtowanie się blach, a także wytrzymałość złącza. Najlepsze rezultaty nośności uzyskano w przypadku zastosowania największego docisku (50 kN) .



Rys. 1.23. *Przykład geometrii nita z zaproponowanego w pracy [69]*

1.4.2 Self-piercing riveting - *SPR*

Odmianą łączenia blach z wykorzystaniem dodatkowego elementu, w której dochodzi do przecięcia warstw i osadzeniu nita w dolnej powierzchni nosi nazwę nitowania bezotworowego z zastosowaniem nita rurkowego *SPR* (ang.: *Self-Piercing Riveting*). Badania z zastosowaniem tej technologii i jej modyfikacje są szeroko opisane w literaturze. W artykułach [70, 71] autorzy dokonali podsumowania stanu wiedzy na temat tej technologii. Zwrócono uwagę na mnogość badań naukowych, co jest potwierdzeniem wielkiego zainteresowania tym sposobem łączenia w środowisku naukowym. Formowanie procesu przedstawiono na rysunku 1.24.

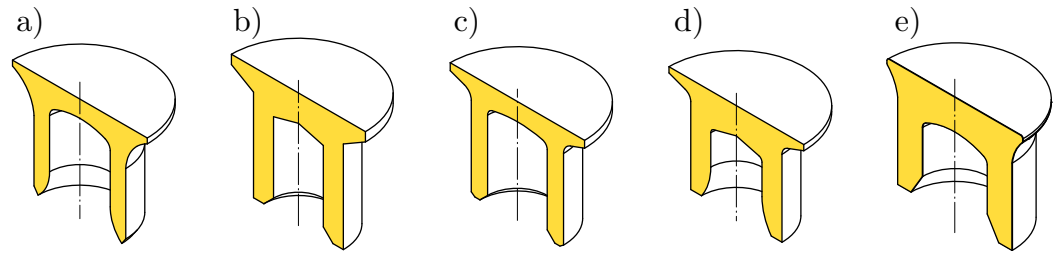


Rys. 1.24. *Charakterystyczne etapy kształtowania połączenia przetłaczanego z zastosowaniem nita rurkowego w technologii SPR (1- dociskacz, 2- stempel, 3- nit, 4- górna z łączonych warstw, 5- dolna z łączonych warstw, 6- trzpień matrycy) (opracowanie własne na podstawie [72])*

Pierwszy etap to za pozycjonowanie nita w głowicy nitowej. W kolejnym etapie postępowy ruch stempla rozpoczyna proces wtłaczania. Materiał górnych warstw jest przecinany zaś sam nit osadza się w materiale opartym na matrycy.

W warunkach przemysłowych technologia stosowana jest gównie w produkcji seryj-

nej. W celu osiągnięcia najlepszych efektów, przed jej wdrożeniem zalecany jest dobór nita pod konkretne zastosowanie aranżacji materiałów łączonych elementów. Producenci, chcąc sprostać wymaganiom klientów, opracowując i testując nowe połączenia rozszerzają tym samym swoją ofertę. Szeroki zakres stosowalności tej metody możliwy jest dzięki różnorodności narzędzi, a także samych nitów. Abe, w artykule [73], dokonał analizy zmiany geometrii matrycy, zmieniając zarówno jej głębokość jak i średnicę. Mnogość odmian geometrycznych możliwych do zastosowania nitów zawarta jest w katalogach producentów. Przykładem mogą być nity zaproponowane przez firmę *Böllhoff* [74]. Elementy te mogą różnić się materiałem, kształtem, powierzchnią, kształtem łba, średnicą i długością (rys.1.25). Kombinacja wymienionych cech pozwala na uzyskiwanie szerokiego zakresu zastosowania technologii *SPR* do łączenia różnych materiałów.



Rys. 1.25. *Przykładowe typy nitów stosowanych w metodzie łączenia SPR wg Böllhoff: a) C-SKR, b) P-SK, c) HD2-SK, d) HD3-SK, e) HDX-SKR (opracowanie własne na podstawie [74])*

Na rysunku 1.26a przedstawiono wykonane złącze, dla dwóch warstw blach metalowych, o grubości 3 mm. Zaś na rysunku 1.26b pokazano przypadek połączenia trzech warstw, gdzie środkową warstwą jest blacha stalowa o grubości 1 mm, a materiałem górnej i dolnej był stop aluminium o grubości 1,2 mm. *Böllhoff* w swoim katalogu przedstawił również możliwość wykonania połączenia tworzywa sztucznego z materiałem metalowym (rys. 1.26c).



Rys. 1.26. *Przykłady aplikacji technologii SPR dla różnych kombinacji łączonych warstw: a) dwie warstwy blach metalowych, b) trzy warstwy - górna i dolna blacha zastosowano stop aluminium, zaś warstwą środkową jest stal, c) połączenie tworzywa sztucznego z blachą ze stopu aluminium. (Opracowanie własne na podstawie) [74]*

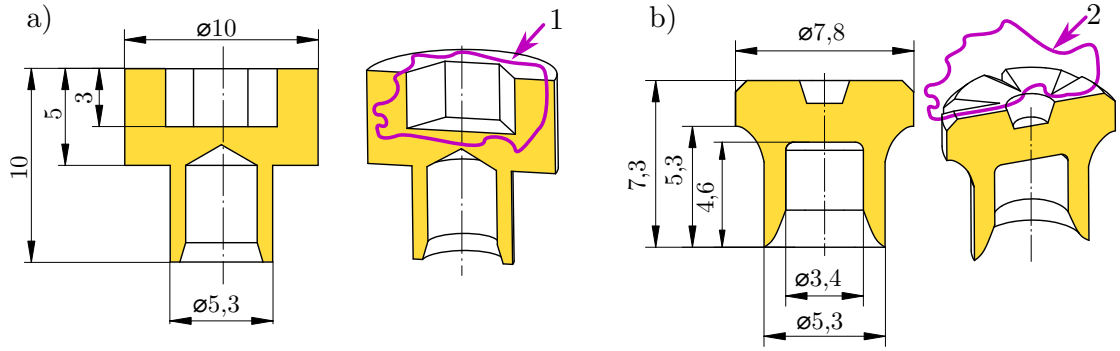
W kilku pracach potwierdzona została możliwość stosowania technologii *SPR* do łączenia blach z różnych materiałów, takich jak np. kompozytu włókna węglowego, usytuowanym jako górna warstwa ze stopem aluminium EN AW-2024-T6 [75]. Zhang z kolei,

w pracy [76], przedstawił analizę możliwości łączenia warstw tytanu z stopami aluminium, a także tytanu EN 3.7025 z warstwą mosiądzu CuZn38. Analiza możliwości łączenia blach CuZn38 i stopu aluminium EN AW-5052 została przeprowadzona również przez He i przedstawiona w pracy [77]. Obszerne badania nad możliwością łączenia blach stalowych z zastosowaniem technologii *SPR*, zaprezentował między innymi Haque w swojej rozprawie doktorskiej [78]. Mucha, w artykule [63], przedstawił porównanie wielu technik łączenia do scalenia dwóch warstw stalowych z materiału S355. Zhao zaś przedstawił możliwość łączenia blach stopu aluminium w gatunku EN AW-5052 o różnych aranżacjach grubości [79].

Stosowanie technologii *SPR* niesie ze sobą szereg zalet, do których należą między innymi [80, 81]:

- brak konieczności wcześniejszego wykonania otworu w łączonych elementach,
- proces jest szybki i o wysokiej powtarzalności,
- brak emisji szkodliwych gazów w porównaniu np. do spawania,
- niskie zapotrzebowanie w energię w stosunku do spawania.

Li, w pracy [82], przedstawił propozycję modyfikacji technologii *SPR* poprzez ingerencje w przebieg wtłaczania nita. Wtłaczany nit dodatkowo wykonywał ruch obrotowy wokół własnej osi nagrzewając tym samym, w wyniku tarcia, łączoną warstwę materiału. Wykazano, iż rezultatem modyfikacji było wyeliminowanie pęknięć wewnątrz złącza. Rożne zespoły badawcze przeprowadziły również analizy eksperymentalne nad zmodyfikowaną technologią *SPR* z zastosowaniem wkręcanego nita [83, 84]. Należą do nich między innymi Liu , który przedstawił analizę nita o geometrii przedstawionej na rysunku 1.27a. Yang, w artykule [84], analizował wpływ nita o geometrii zaprezentowanej na rysunku 1.27b.

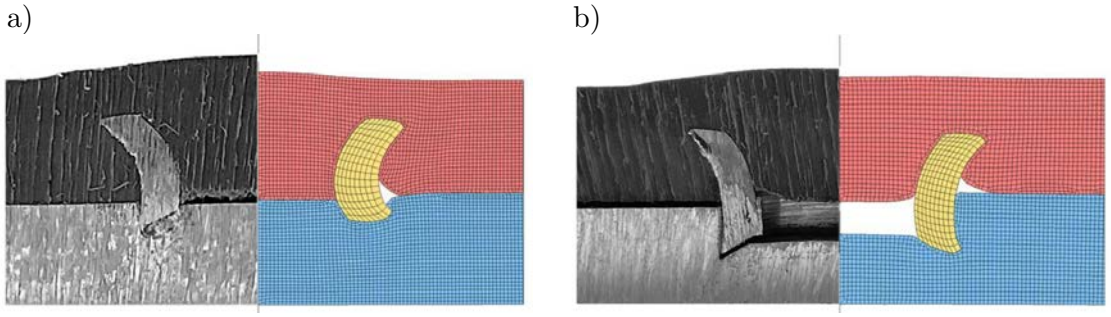


Rys. 1.27. *Przykłady specjalnego ukształtowania głowy nita stosowanego w technologii F-SPR: a) z gniazdem sześciokątnym [83], b) z wycięciami na zewnętrznej powierzchni łba [84]*

Każda modyfikacja dodatkowego elementu stosowanego w złączach prasowanych może być łączona z analizą zmiany geometrii narzędzi. Yang, w artykule [85], przedstawił kontynuację badań nad nitem wkręcanym z zastosowaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych matrycy. W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego jaki zaproponowany został przez zespoły badawcze [83, 84], może być wykonane gniazdo lub wycięcia na powierzchni zewnętrznej łba (oznaczone numerami 1 i 2 na rysunku 1.27). Taka modyfikacja jest niezbędna do realizacji dodatkowego ruchu obrotowego nita podczas jego wtłaczania w łą-

czone warstwy materiałów.

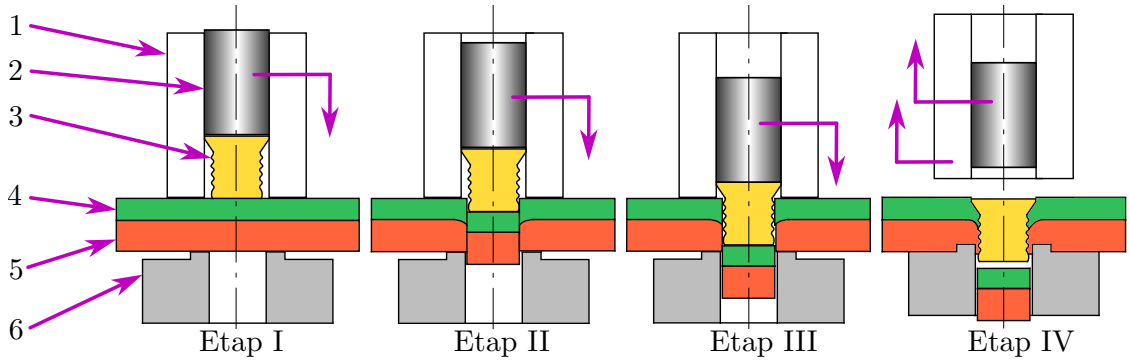
Inne, całkiem odmienne od opisanych wyżej rozwiązań, jest zastosowanie rurkowego nita bez łba umieszczonego przed prasowaniem pomiędzy przeznaczone do połączenia warstwy [86]. Rozwinięcie tej technologii zostało opisane przez Alves w pracy [87]. Dwie odmiany metody z zastosowaniem nita rurkowego dwustronnego *DSSPR* (ang.: *Double-Sided Self-Pierce Riveting*) przedstawiono na rysunku 1.28. W przypadku obu modyfikacji podobnie jak w technologii *SPR* nit zagłębia się w łączonych materiałach, jednakże jest on umieszczony pomiędzy łączonymi warstwami.



Rys. 1.28. *Niekonwencjonalne zastosowanie nita rurkowego bez łba w przypadku łączenia dwóch warstw materiałów [87]*

1.4.3 Solid self-piercing riveting - *SSPR*

Technologia *SSPR* jest szczególną odmianą łączenia, która charakteryzuje się elementami procesu wykrawania i prasowania. Schemat realizacji kolejnych etapów formowania złącza przedstawiono na rysunku 1.29.

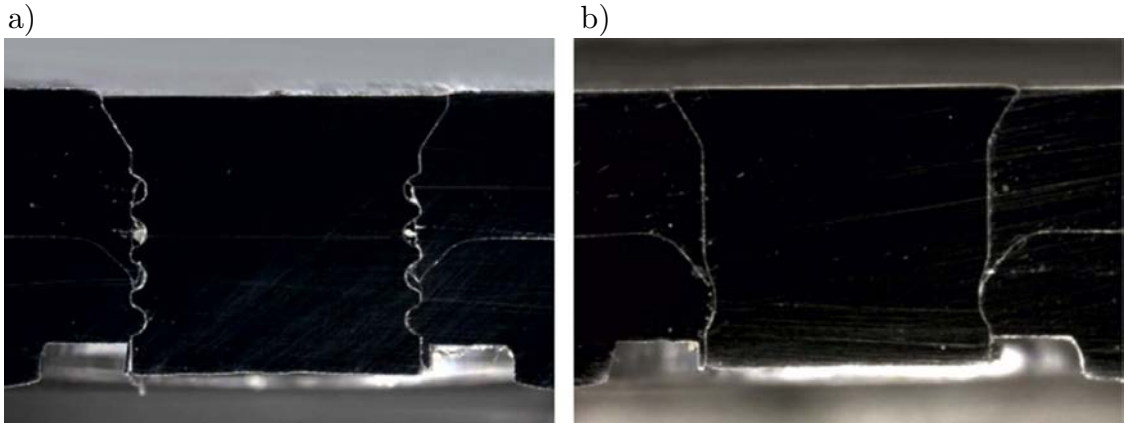


Rys. 1.29. *Etapy formowania złącza z zastosowaniem technologii SSPR (1- dociskacz, 2- stempel, 3- nit, 4- górna z łączonych warstw, 5- dolna z łączonych warstw, 6- trzpień matrycy) (opracowanie własne na podstawie [88])*

Pierwszym etapem jest ulokowanie łączonych warstw oznaczonych na rysunku 1.29 numerami 4 i 5 pomiędzy narzędziami: stemplem (numer 2) i matrycą (numer 6). Dociskacz (numer 1) wraz z matrycą unieruchamiają łączone warstwy. W kolejnych etapach II i III, ruch nita (oznaczonego numerem 3) wymuszony poprzez stempel, powoduje wykrawanie otworu zarówno w górnej, jak i dolnej warstwie materiału. W czwartym etapie

następuje zablokowanie nita W łączonych warstwach poprzez docisk. Materiał wypełnia pustą przestrzeń w rowkach nita. Od materiału nita wymagana jest wysoka wytrzymałość i twardość umożliwiając wykrawanie otworu. Po osiągnięciu zadanej siły, bądź pozycji stempla proces formowania się kończy [88, 89].

Przykład poprawnie wykonanego złącza z zastosowaniem technologii *SSPR* przedstawiono na rysunku 1.30. Mucha w artykule [90] przedstawił badania z zastosowaniem różnej geometrii nita wykazując, iż jego kształt ma znaczący wpływ na wytrzymałość złącza przetłaczanego.



Rys. 1.30. *Przykład złącza wykonanego w technologii SSPR z zastosowaniem nita: a) uniwersalnego, b) specjalnego (opracowanie własne na podstawie [90])*

Analizę możliwości łączenia blach stalowych potwierdzona została w pracach [90, 91]. Han w artykule [92] dokonał analizy łączenia kompozytów wzmacnianych włóknem. Tak jak w przypadku pozostałych odmian łączenia, kształt nita jest obiektem analiz. W artykule [93], zaproponowano zmianę geometrii nita na podstawie uzyskanych wyników z symulacji numerycznej. Główna zmiana poległa na zastosowaniu nita odkształcalnego. W pierwszej kolejności wykrawany był otwór przez nit, zaś w kolejnym kroku docisk łączonych materiałów przez matrycę i stempel wymusza płynięcie materiału nita. Dzięki temu pojawia się możliwość łączenia blach, które w standardowej metodzie mogłby nie wypełnić wolnej przestrzeni rowków na klasycznym kształcie nita.

1.5 Wnioski z krytycznej analizy stanu zagadnienia

W wyniku przeprowadzenia krytycznej analizy literatury zaobserwowano, iż naukowcy z całego świata przeprowadzili bardzo obszerne badania nad podstawową technologią łączenia przetłaczania jaką jest *Clinching CL*. Przedstawiono bardzo wiele badań dotyczących zmiany zarówno narzędzi, parametrów technologicznych, jak i metod procesu formowania. Zastosowanie dodatkowego elementu w procesie przetłaczania wykazało znaczący wzrost wytrzymałości złącza przetłaczanego. Najbardziej popularną metodą wzbogaconą o dodatkowy element jest *SPR* (*ang.: Self-Pierceing Riveting*) o czym świadczą liczne publikacje.

Opracowane klasyczne przetłaczanie umożliwia łączenie dość dużej liczby gatunków materiałów, jednak z pewnymi ograniczeniami. Badania z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego ograniczają się do wybranych aranżacji grubości i gatunków materiału. Dlatego w zakresie możliwości formowania postanowiono rozszerzyć stan wiedzy w ramach zastosowania technologii *ClinchRivet*.

Badania wytrzymałości złączy *CR*, ograniczono do wyznaczenia nośności złącza na ścinanie w próbie rozciągania zakładkowego połączenia. Zagadnienie nośności skrętnej złączy przetłaczanych *CR*, jak dotąd nie zostało wyjaśnione w żadnym technicznym, ani naukowym opracowaniu. Nośność skrętna wpływa w znaczny sposób na sztywność węzłów w cienkościennych konstrukcjach. Z tego powodu postanowiono dokonać analizy nośności skrętnej dla złączy w technologii *CR*.

Złącza przetłaczane często zlokalizowane są przy krawędziach łączonych elementów. Standardowym podejściem wg normy ISO12996-2013 [15] są badania nośności próbek zakładkowych i wyznaczenie określonych parametrów krzywej ścinania. Pomimo zaleceń zawartych w normie określających szerokość próbek przeznaczonych do badań, wybrani naukowcy stosują próbki o szerokości mniejszej niż zalecana. Postanowiono przeprowadzić analizę wpływu lokalizacji złącza przetłaczanego wykonanego w technologii *CR* na wytrzymałość połączenia. Chen, w artykule [69] przedstawił wpływ elementu dociskającego na deformację łączonych warstw. Proces konsolidacji złącza w technologii przetłaczanej generuje występowanie dużych naprężeń w pobliżu połączenia. W dostępnej literaturze brakuje badań przedstawiających analizę dewiacji powierzchni łączonych elementów.

Zwiększenie zablokowania materiału blachy górnej w dolnej w technologii *CL* może być zrealizowane przez pomniejszenie parametru X od położenia wyjściowego (odległości, na której stempel kończy proces kształtowania w odniesieniu do dna matrycy). W metodzie *CR* z nieodkształcalnym nitem, przeprowadzono badania z analizą siły formowania dla płaskiej matrycy. Brakuje jednak badań z zastosowaniem matrycy zawierającej zarówno segmenty stałe, jak i ruchome, w których proces formowania będzie inny niż do momentu osiągnięcia poziomu górnej blachy przez stempel. Rozwiązanie takie może powiększyć zakres możliwości scalenia materiałów.

Analiza literatury wykazała uzasadnienie do stosowania technologii *CR* z uwagi na zwiększenie nośności złącza. Dla metody *CR* brakuje dokładnych badań, analizujących wpływ twardości odkształcalnego nita. Dlatego postanowiono wykonać nity o identycznej geometrii, lecz o różnej twardości. W celach porównawczych postanowiono przeprowadzić również zmianę geometrii nitów komercyjnych. Zdecydowano rozszerzyć stan wiedzy również w kierunku modyfikacji kształtu narzędzi formujących, a konkretnie zespołu matrycy.

2 Hipoteza, cele pracy oraz plan badań

W pracy sformułowano hipotezę:

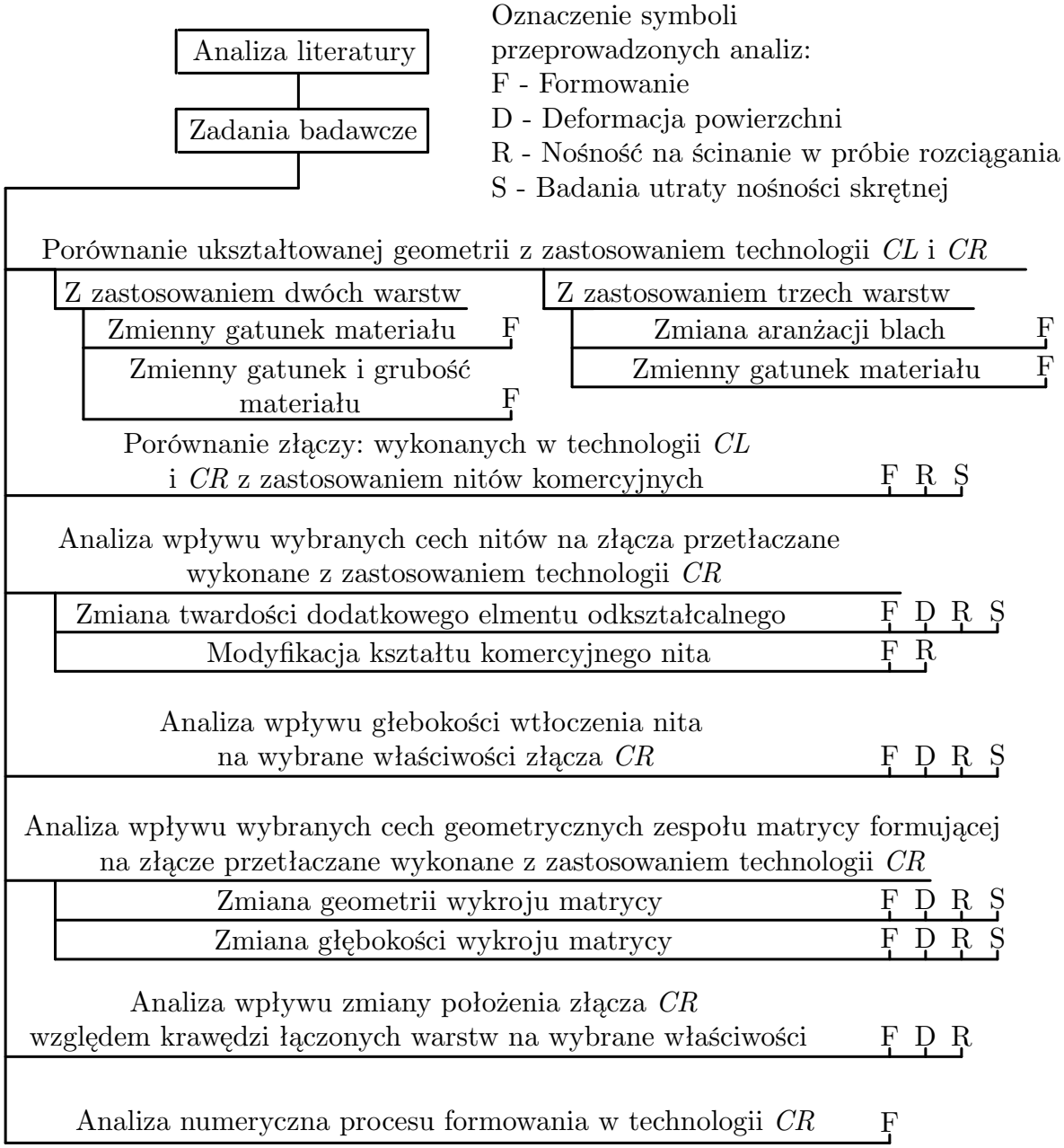
Maksymalna wartość siły formowania złącze przetłaczane w technologii CR, może zostać obniżona poprzez zastosowanie odpowiedniej konstrukcji matrycy, a także kształtu oraz twardości dodatkowego elementu odkształcalnego.

Cele pracy obejmowały najważniesze askepty badawcze związane z:

- obserwacja ukształtowanej geometrii na przekroju złącza przetłaczanego,
- analizą możliwości obniżenia energochłonności procesu formowania złacza *CR*,
- analizą deformacji powierzchni łączonych w obszarze miejsca scalenia blach,
- analizą wytrzymałości na ścinanie połączeń z wyznaczeniem charakterystycznych parametrów, zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie ISO 12996:2013,
- wyznaczeniem wartości momentu obrotowego, dla którego zaobserwowano utratę nośności skrętnej.

Zaplanowany zakres badań dotyczył:

- opracowania i wykonania stanowiska do badania nośności skrętnej złączy *CR*,
- analiza możliwości ukształtowania złącza przetłaczanego dla różnych materiałów, grubości blach i ich aranżacji dla dwóch metod formowania: *CL* i *CR*,
- analizę wpływu głębokości wtłoczenia nita na wybrane charakterystyki złącza *CR*,
- analizę wpływu zmiany geometrii dna matrycy na wybrane charakterystyki złącza *CR*,
- analizę wpływu zmiany wysokości segmentów matrycy formowania na wybrane charakterystyki złącza *CR*,
- analizę wpływu zmiany geometrii dodatkowego elementu odkształcalnego na wybrane charakterystyki złącza *CR*,
- analizę wpływu zmiany twardości dodatkowego elementu odkształcalnego na wybrane charakterystyki złącza *CR*,
- analizę wpływu zmiany położenia złącza *CR* względem krawędzi łączonych warstw na wybrane charakterystyki złącza *CR*.



Rys. 2.1. *Zaplanowany plan badań*

3 Metodyka badawcza

3.1 Materiały łączonych blach

Przegląd literatury i ogólnodostępnych informacji na stronach internetowych różnych producentów narzędzi do wykonywania złączy przetłaczanych, potwierdził, że coraz częściej występuje konieczność łączenia ze sobą różnych materiałów. Między innymi z tego powodu do przeprowadzenia analizy formowania połączeń *CL* i *CR* wybrano szeroko dostępne materiały, których podstawowe właściwości mechaniczne zestawiono w tabeli 3.1. Celem zestawienia dostępnych danych, dla materiałów z wyraźną granicą plastyczności przyjęto R_e i bez wyraźnej granicy plastyczności przyjęto $R_{p0.2}$.

Tabela 3.1. *Właściwości mechaniczne materiałów blach zastosowanych w eksperymencie [94–98]*

Oznaczenie materiału	**Numer materiału**	**Norma**	$\mathbf{R_{p0.2}}$ / $\mathbf{R_e}$	$\mathbf{R_m}$	$\mathbf{A_{80}}$
			[MPa]	**[MPa]**	**[%]**
DX51D+Z	1.0226	PN-EN 10346:2015-09	-	270÷500	≥ 22
H220PD	1.0358	PN-EN 10292:2003	220÷280	340÷400	≥ 32
HX340LAD	1.0933	PN-EN 10346:2015-09	340÷420	410÷510	≥ 21
HX420LAD	1.0935	PN-EN 10346:2015-09	420÷500	470÷590	≥ 17
HCT690T	1.0947	PN-EN 10346:2015-09	410÷510	690÷790	≥ 23
EN AW-5754 0/H111	3.3535	PN-EN 573-3:2019-12	80	180÷250	≥ 17

DX51D+Z to powszechnie uznawane oznaczenie stali ocynkowanej ogniowo, wytwarzanej zgodnie z europejską normą EN 10346 [94]. Gatunek ten cechuje się dobrą jakością powierzchni, która wraz z ocynkiem będącym zabezpieczeniem przed korozją ma szerokie spektrum zastosowania. Stal ta charakteryzuje się bardzo dobrą zdatnością do plastycznego kształtowania. Cecha ta czyni ten materiał odpowiednim do zastosowań, gdzie realizowane jest gięcie, tłoczenie lub inny proces obróbki stali. Stal ta jest szeroko stosowana w wielu gałęziach przemysłu.

H220PD jest to niskowęglowy gatunek stali, walcowany na zimno, o podwyższonej plastyczności. Znajduje on zastosowanie głównie w sektorze motoryzacyjnym i AGD, gdzie wymagana jest dobra plastyczność przy jednoczesnym zachowaniu wyższej granicy plastyczności. Dobrze sprawdza się w produkcji cienkościennych, lekkich, ale wytrzymałych komponentów.

HX340LAD i HX420LAD należą do grupy mikrostopowych stali o podwyższonej wytrzymałości HSLA (ang.: *High-Strength Low-Alloy*). Ich podwyższona wytrzymałość jest wynikiem niewielkiego dodatku różnych pierwiastków. Stale, z uwagi na swoje zwiększone wytrzymałości uzyskane przy stosunkowo nie wielkich kosztach, są atrakcyjne cenowo. Aspekt ekonomiczny, wraz z bardzo dobrymi właściwościami, powoduje coraz szersze stosowanie tego typu materiałów.

HCT690T jest stalą TRIP (ang.: *Transformation Induced Plasticity*), która należy do odmian stali AHSS (ang.: *Advanced High-Strength Steels*). Główną cechą tego materiału jest połączenie wysokiej wytrzymałości ze zdolnością do odkształceń plastycznych. Efekt TRIP polega na tym, że podczas odkształcania (np. rozciągania lub ściskania) w mikrostrukturze stali zachodzi przemiana austenitu w martenzyt. Dzięki tej przemianie, w miejscu odkształcenia zwiększa się wytrzymałość. Dodatkowo dochodzi do absorpcji energii, co przekłada się na poprawę odporności na pękanie. Typowa stal TRIP zawiera ferryt, bainit, i kluczowy dla efektu TRIP austenit szczątkowy. Martenzyt powstaje w trakcie plastycznego odkształcenia.

Stop aluminium EN AW-5754 (PA11) w stanie technologicznym H111 to materiał, który łączy doskonałą odporność na korozję, dobrą spawalność i przyzwoite właściwości mechaniczne, co czyni go jednym z najbardziej uniwersalnych stopów w grupie AlMg. Stan H111: oznacza lekko umocniony materiał, który zachowuje dobrą formowalność przy zwiększonej wytrzymałości w porównaniu do stanu O (wyżarzonego). Materiał jest szeroko stosowany jako element konstrukcyjny w przemyśle morskim, budownictwie, w transporcie, a także w motoryzacji.

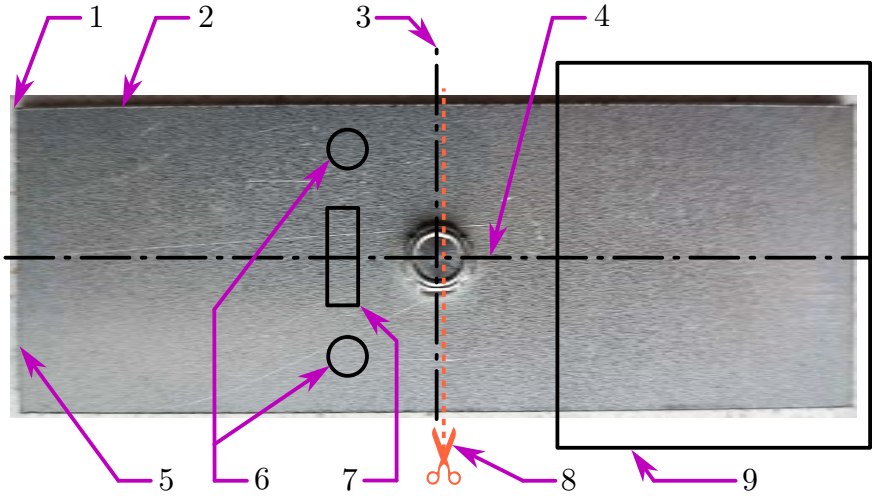
Do przeprowadzenia kolejnych analiz w niniejszej dysertacji, gdzie obserwowano inne kryterium zmienności niż gatunek materiału, badania zostały przeprowadzone już na dwóch warstwach materiału DX51D+Z o grubości 1,5 mm.

3.2 Opis metodyki dla zaplanowanych prac badawczych

3.2.1 Wpływ zastosowania dodatkowego elementu odkształcalnego na formowanie złącza przetłaczanego

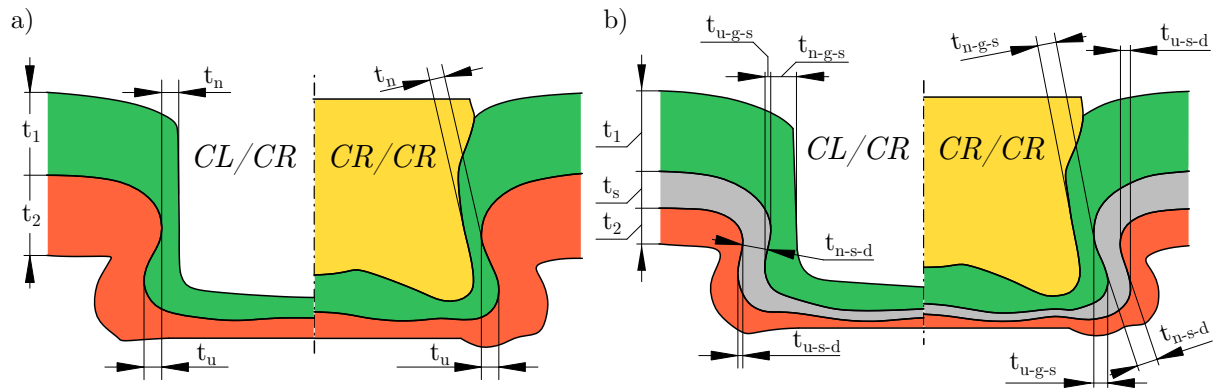
Obserwacja ukształtowanej geometrii na przekroju złącza była kluczowa w niniejszej dysertacji. Próbki połączeń wykonano z zastosowaniem stanowiska w *Laboratorium Połączeń Prasowanych Politechniki Rzeszowskiej*. W celu jednoznacznej identyfikacji złączy, przeznaczonych do analiz, konieczne było opracowanie własnego systemu oznakowania. Na powierzchni blach w pobliżu połączenia wygrawerowano oznaczania, w punkcie 7, przedstawionym na rysunku 3.1. W celu zapewnienia jak najmniejszej ingerencji w strukturę materiału, do wykonania przekrojów złączy zastosowano metodę cięcia drutem na maszynie *Cut P30* producenta *+GF+ AgieCharmilles*. Maszyny wykorzystują technologię *WEDM* (ang.: *Wire Electrical Discharge Machining*). Dobrane parametry procesu przecinania zapewniły wysoką precyzję cięcia, dla której maksymalny błąd wymiarów, obliczany jako różnica pomiędzy największą i najmniejszą odchyłką od wartości nominalnej, wynosił ± 5 µm. Maszyna do cięcia posiadała numeryczne sterowanie, co zwiększyło precyzję przecinania próbek złączy. Aby uzyskać cięcie w osi wykonanego złącza, początek układu współrzędnych przyjęto w punkcie 1 przedstawionym na rysunku 3.1. Układ został wyznaczony z położenia krawędzi próbki. Kierunek osi X został przyjęty zgodnie z krawędzią oznaczoną numerem 5, zaś dla osi Y odniesieniem na rysunku 3.1, był

punkt 2. Położenie osi złącza, oznaczonych punktami 3 i 4 zostało odpowiednio uwzględnione w programie, definiującym ścieżkę druta (punkt 8). Różnica w odległości względem osi złącza i linią przebiegu cięcia wynikała z wymaganego odsunięcia, niezbędnego do uzyskania powierzchni przecięcia przechodzącej przez oś połączenia. Na wartość tego odsunięcia miały wpływ: średnica wykorzystanego druta, a także wartość rozpalenia. Cięcie wykonano drutem o średnicy 0,25 mm z rozpaleniem 0,18 mm. Na rysunku 3.1, obszar oznaczony numerem 9, został wykorzystany jako część chwytowa. Aby uniknąć separacji po procesie cięcia, na etapie przygotowania próbki wykonano zabezpieczenie za pomocą nitów zrywalnych w dwóch miejscach, oznaczonych numerem 6. Powierzchnia przecięcia charakteryzowała się stosunkowo mała wartością parametru chropowatości *Ra* i wynosiła 3 µm.



Rys. 3.1. *Charakterystyka przygotowania złączy umożliwiający obserwację geometrii na przekroju złącza*

Po przecięciu próbek i wypłukaniu drobinek materiału na przekroju złącza dokonano pomiaru określonych wielkości geometrycznych złącza na podstawie cyfrowej fotografii o wysokiej rozdzielczości. Działania te wykonano za pomocą oprogramowania *VHX-7000_970F*, będącego na wyposażeniu mikroskopu *KEYENCE VHX-7000*. Oprogramowanie to umożliwia dokonanie pomiarów bezpośrednio na uzyskanym zdjęciu. W części badań doświadczalnych, gdzie dokonano obserwacji możliwości ukształtowania połączenia, dokonano pomiaru charakterystycznych cech geometrycznych, przedstawionych na rysunku 3.2.



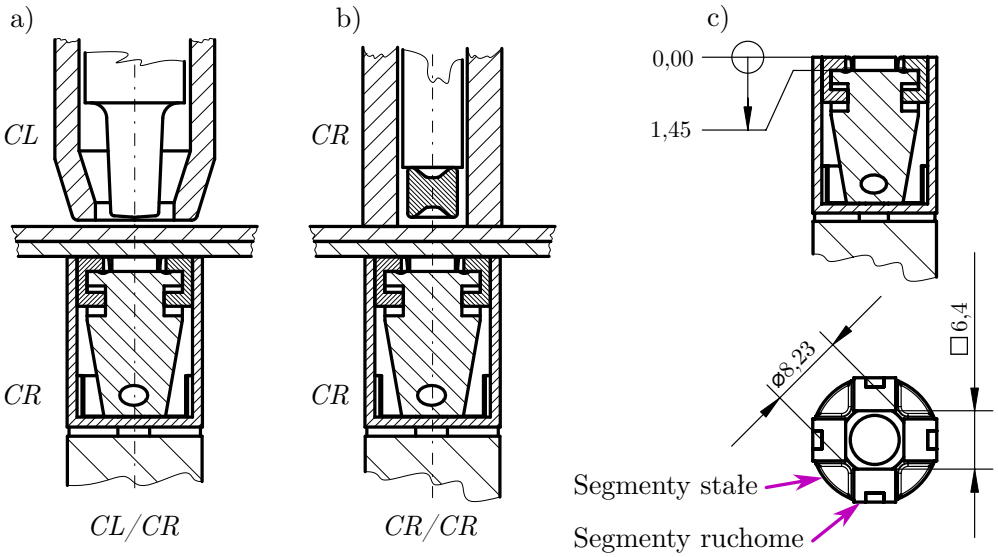
Rys. 3.2. *Przekrój połączenia CL/CR (lewa strona) i CR/CR (prawa strona) oraz cechy geometryczne dla: a) dwóch, b) trzech warstw materiału*

Uzyskanie jak najlepszej nośności złącza formowanego z dodatkowym nitem, wymaga indywidualnego doboru układu grubości i gatunku materiałów. Zakres stosowalności dla nita o oznaczeniu producenta *A5x5* obejmuje obszar zaplanowanych aranżacji.

Analizę ukształtowanej geometrii oceniono na podstawie pomiaru wzajemnego zablokowania materiałów t_u i pocienienia materiału w obszarze szyjki złącza t_n. Miejsca wykonanych pomiarów, w przypadku łączenia dwóch warstw materiału, przedstawiono na rysunku 3.2a. Oznaczenia w przypadku analizy ukształtowanego połączenia trzech warstw materiału przedstawiono na rysunku 3.2b. Wartość wzajemnego zablokowania analizowano zarówno pomiędzy górną, a środkową warstwą t_{u-g-s}, jak i środkową z dolną t_{u-s-d}. Analogiczne oznaczenie przyjęto w przypadku najmniejszej grubości pomiędzy poszczególnymi warstwami materiału. Indeks w przypadku geometrii pomiędzy górną, a środkową blachą opisano jako t_{n-g-s}, zaś dla pocienienia materiału środkowej warstwy przyjęto oznaczenie: t_{n-s-d}.

Analizę wpływu nita na formowanie złącza przetłaczanego oceniono na podstawie połączeń wykonanych z zastosowaniem technologii *CL* i *CR*. W obu przypadkach wykorzystano zespół matrycy z ruchomymi i stałymi segmentami. Złącza w technologii *CL*, zostały wykonane stemplem o średnicy 5 mm i w niniejszej dysertacji opisano je jako *CL/CR*. Nit producenta *TOX Pressotechnik* wykorzystany do analizy, był o średnicy i wysokości 5 mm (*A5x5*). Dla złączy wykonanych w technologii *CR* przyjęto nazwę *CR/CR*.

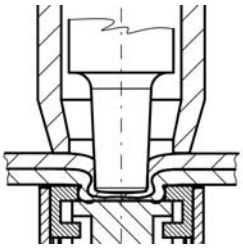
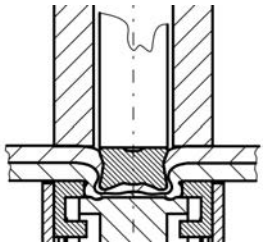
Porównanie metod, przedstawiono w postaci schematu na rysunku 3.3a,b. Z kolei geometria zastosowanego zespołu matrycy *TOX SKB*, została przedstawiona na rysunku 3.3c.



Rys. 3.3. *Komplety narzędzi i ich oznaczenie wariantu, oraz podstawowa geometria matrycy: a) kombinacja narzędzi dla połączeń CL/CR, b) CR/CR, oraz c) podstawowe wymiary matrycy SKB [99].*

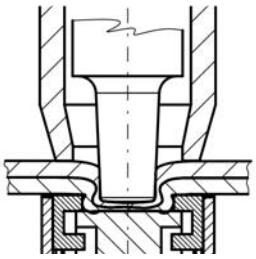
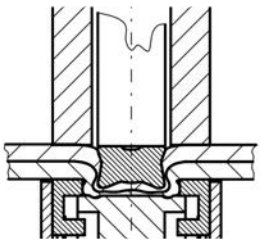
Analiza literatury potwierdziła potrzebę łączenia ze sobą różnych warstw materiału. W celu wzbogacenia stanu wiedzy, dokonano podziału badań na kilka grup w zależności od przyjętego kryterium zmienności. Próby scalenia dwóch warstw materiału, gdzie przynajmniej jedną z nich jest DX51D+Z przedstawiono w tabeli 3.2. W przypadku tego zestawienia, obie warstwy miały jednakową grubość, która wynosiła 1,5 mm.

Tabela 3.2. *Zestawienie kombinacji układu dwóch różnych materiałów o jednakowej grubości* $t_1 = t_2$ *=1,5 mm*

Lp.	**Zestaw narzędzi**	**Górna blacha**	**Dolna blacha**
		Oznaczenie gatunku materiału	
1		DX51D+Z	DX51D+Z
2		DX51D+Z	HX340LAD
3		HX340LAD	DX51D+Z
4		DX51D+Z	HCT690T
5		HCT690T	DX51D+Z
6	*CL/CR*	EN AW-5754	EN AW-5754
7		DX51D+Z	DX51D+Z
8		DX51D+Z	HX340LAD
9		HX340LAD	DX51D+Z
10		DX51D+Z	HCT690T
11		HCT690T	DX51D+Z
12	*CR/CR*	EN AW-5754	EN AW-5754

Kolejną grupą analizowanych połączeń, było zastąpienie jednej spośród łączonych warstw, cieńszą blachą. W przypadku łączenia blach stalowych, zachowano założenie, by przynajmniej jedna spośród łączonych warstw była w gatunku DX51D+Z. Lista wykonanych aranżacji została przedstawiona w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. *Zestawienie kombinacji wzajemnego ułożenia dwóch warstw materiałów o różnej grubości i gatunku*

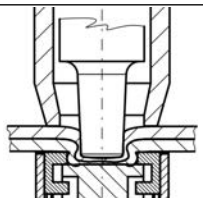
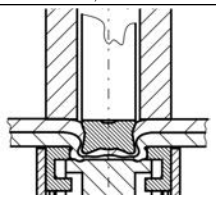
Lp.	Zestaw narzędzi	Górna blacha		Dolna blacha	
		Oznaczenie gatunku materiału	Grubość t_1 [mm]	Oznaczenie gatunku materiału	Grubość t_2 [mm]
1	 *CL/CR*	DX51D+Z	1,5	DX51D+Z	0,7
2		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	1,5
3		DX51D+Z	1,5	HX340LAD	0,7
4		HX340LAD	0,7	DX51D+Z	1,5
5		HX340LAD	1,5	DX51D+Z	0,7
6		DX51D+Z	0,7	HX340LAD	1,5
7		DX51D+Z	1,5	H220PD	0,7
8		H220PD	0,7	DX51D+Z	1,5
9		EN AW-5754	1,5	EN AW-5754	0,7
10		EN AW-5754	0,7	EN AW-5754	1,5
11	 *CR/CR*	DX51D+Z	1,5	DX51D+Z	0,7
12		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	1,5
13		DX51D+Z	1,5	HX340LAD	0,7
14		HX340LAD	0,7	DX51D+Z	1,5
15		HX340LAD	1,5	DX51D+Z	0,7
16		DX51D+Z	0,7	HX340LAD	1,5
17		DX51D+Z	1,5	H220PD	0,7
18		H220PD	0,7	DX51D+Z	1,5
19		EN AW-5754	1,5	EN AW-5754	0,7
20		EN AW-5754	0,7	EN AW-5754	1,5

W przypadku zastosowania stali o zwiększonych parametrach wytrzymałościowych w procesie scalania, uzyskano mniejsze wartości wzajemnego zablokowania blach. Zaobserwowano również pewne ograniczenia w stosowalności technologii przetłaczania dla wybranych aranżacji warstw materiałów.

Często podczas montażu cienkościennych konstrukcji występuje sytuacja, że jeden ma-

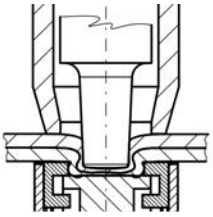
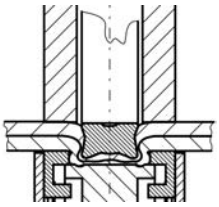
teriał stanowi konstrukcje nośną, zaś pozostałe tworzą zewnętrzne poszycie. Dlatego postanowiono, jako kryterium zmienności w przypadku kolejnego kierunku z analizowanych grup, przestudiować jaki wpływ ma względne usytuowanie więcej niż dwóch warstw materiału na kształtowanie złącza. Łączenie z zastosowaniem zarówno technologii *CL* jak i *CR*, umożliwia scalanie większej niż dwie warstwy materiału. W przypadku łączenia trzech blach, zastosowano jedną warstwę o grubości 1,5 mm, zaś dla dwóch pozostałych zastosowano blachę o grubości 0,7 mm. Zestawienie aranżacji zawarto w tabeli 3.4.

Tabela 3.4. *Zestawienie kolejności względnego ułożenia grubości trzech warstw materiału blachy ze stali DX51D+Z*

Lp.	**Zestaw narzędzi**	**Górna blacha**	**Środkowa blacha**	**Dolna blacha**
		t_1 [mm]	**t_s [mm]**	**t_2 [mm]**
1	 *CL/CR*	1,5	0,7	0,7
2		0,7	1,5	0,7
3		0,7	0,7	1,5
4	 *CR/CR*	1,5	0,7	0,7
5		0,7	1,5	0,7
6		0,7	0,7	1,5

Ostatnią grupą, dla której przeprowadzono analizę wpływu dodatkowego elementu odkształcalnego, były połączenia wykonane z trzech warstw materiału o zmiennym gatunku warstwy o grubości 1,5 mm. Tak jak w poprzedniej analizie, jako materiał dwóch pozostałych warstw, wykorzystano blachę DX51D+Z o grubości 0,7 mm. Listę aranżacji przedstawiono w tabeli 3.5.

Tabela 3.5. *Zestawienie układu grubości i gatunków materiałów w przypadku łączenia trzech warstw*

Lp.	Zestaw narzędzi	Górna blacha		Środkowa blacha		Dolna blacha	
		Oznaczenie gatunku materiału	t_1 [mm]	Oznaczenie gatunku materiału	t_s [mm]	Oznaczenie gatunku materiału	t_2 [mm]
1	 *CL/CR*	**HX340LAD**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7
2		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7	**HX340LAD**	**1,5**
3		**HX420LAD**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7
4		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7	**HX420LAD**	**1,5**
5		**HCT690T**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7
6		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7	**HCT690T**	**1,5**
7		**EN AW-5754**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7
8		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7	**EN AW-5754**	**1,5**
9		**HX340LAD**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7
10	 *CR/CR*	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7	**HX340LAD**	**1,5**
11		**HX420LAD**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7
12		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7	**HX420LAD**	**1,5**
13		**HCT690T**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7
14		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7	**HCT690T**	**1,5**
15		**EN AW-5754**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7
16		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	0,7	**EN AW-5754**	**1,5**

3.2.2 Wpływ zastosowania komercyjnego nita na charakterystykę złącza *CR*

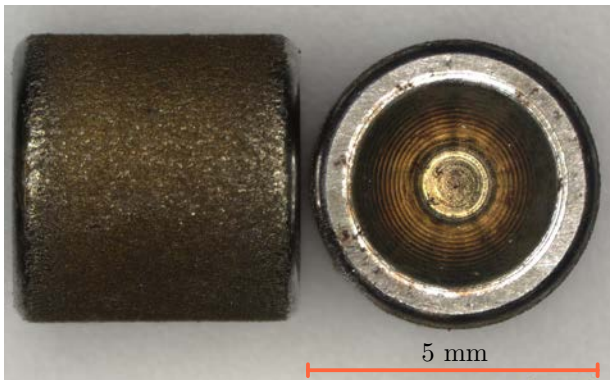
TOX PRESSOTECHNIK w ogólnodostępnych materiałach nie podaje szczegółowych informacji na temat nitów dedykowanych do technologii *CR*. Dobór jest indywidualnie realizowany i zależny od łączonych materiałów (zdefiniowanych przez klienta). Postanowiono przebadać twardość nitów, stosowanych w różnych aplikacjach. Celem ich jednoznacznej identyfikacji, wykonano pomiar twardości i przyjęto własny system oznaczenia. Dla nita opisanego w niniejszej dysertacji jako *X00* - średnia wartość z pomiarów wyniosła 41 HRC, zaś dla nita *Y00* - 35 HRC.

Dokonano analizy wpływu zastosowania komercyjnych nitów na wytrzymałość złącza przetłaczanego. W przypadku łączenia dwóch warstw materiału DX51D+Z o grubości 1,5 mm, zastosowanie dodatkowego elementu odkształcalnego, niezależnie od twardości wykazało większą nośność w stosunku do złączy wykonanych w technologii *CL*. W połączeniach

z nitem o wyższej twardości uzyskano większą nośność złączy. Z uwagi na powyższe nit z oznaczeniem *X00* został wykorzystany do pozostałych analiz.

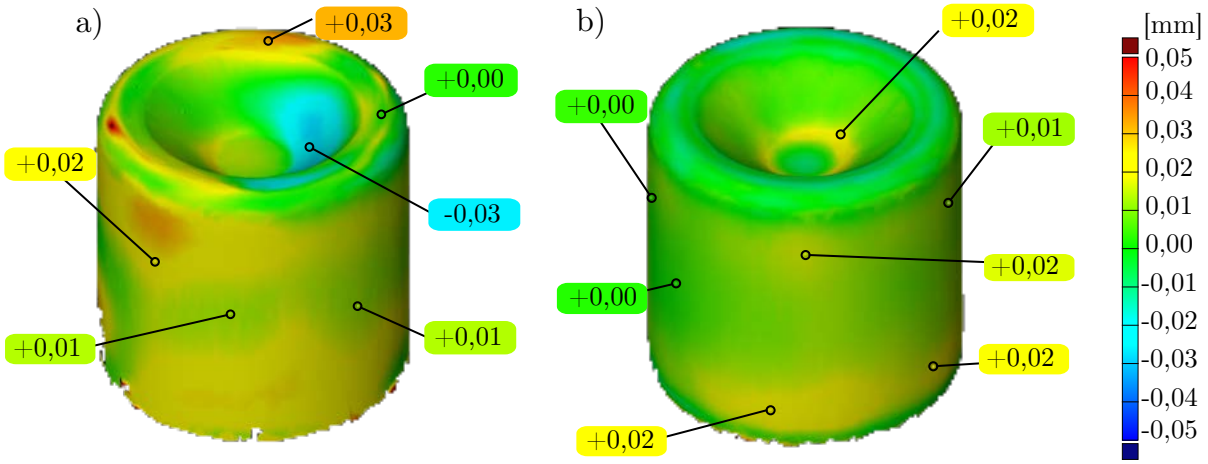
3.2.3 Wpływ zmiany twardości dodatkowego elementu odkształcalnego na charakterystykę złącza *CR*

Realizacja wstępnych badań i analiz wykazała, że materiał łączonych warstw istotnie wpływa na możliwości formowania. Z uwagi na to, iż producent nie podaje szczegółowych informacji dotyczących materiału i technologii ich wykonania, postanowiono wykonać nowe nity. Model 3D CAD nita uzyskano z wykorzystaniem inżynierii odwrotnej na podstawie skanów uśrednionej geometrii 5 losowo wybranych nitów. Nity uzyskano przez obróbkę z pręta materiału 42CrMo4 (1.7225). Materiał ten został wybrany z uwagi na zachowanie ciągliwości rdzenia po obróbce termicznej. Niezależnie od stopnia twardości, nity po obróbce wyglądały niemal identycznie, a ich wygląd rzeczywisty przedstawiono na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. *Rzeczywisty wygląd nita wykonanego z materiału: 42CrMo4 (1.7225)*

Na rysunku 3.5a, przedstawiono porównanie powierzchni dodatkowego elementu odkształcalnego nita o oznaczeniu *X00* w stosunku do utworzonego modelu nominalnego. Na rysunku 3.5b przedstawiono porównanie powierzchni nominalnej względem nowo wykonanego nita. Różnice pomiędzy geometrią są niewielkie i mieszczą się w zakresie kilku setnych milimetra. Główną przyczyną występowania odchyłek jest zastosowany proces technologiczny wytworzenia nitów.



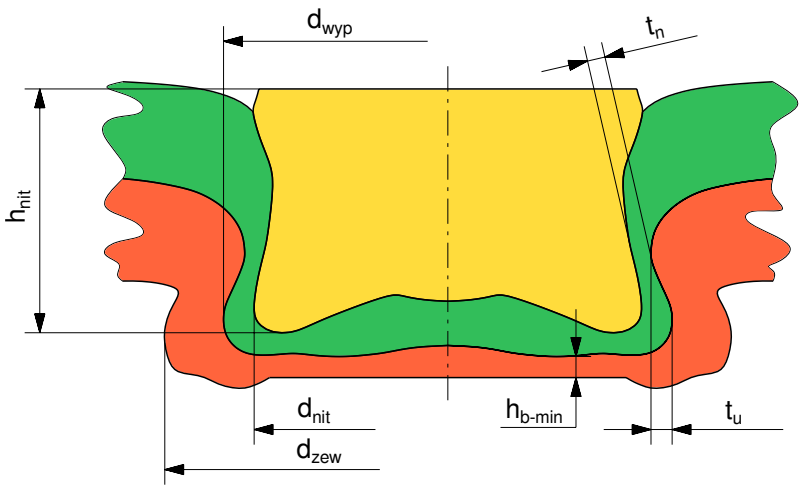
Rys. 3.5. *Porównanie powierzchni względem utworzonego modelu 3D CAD nita w zestawieniu z: a) nitem komercyjnym o przyjętym oznaczeniu X00, b) wykonanym nitem o przyjętym oznaczeniu NC*

Zróżnicowanie twardości półfabrykatów, uzyskano poprzez ingerencję w obróbkę termiczną, a konkretniej proces odpuszczania po hartowaniu. Kształt nitów został wyfrezowany na wcześniej zahartowanych półfabrykatach, a następnie nity zostały wycięte z wykorzystaniem technologii WEDM (ang.: *Wire Electrical Discharge Machining*). W celu weryfikacji założeń początkowych, wykonano po 5 pomiarów twardości na materiale, po procesie odpuszczania. Ich uśrednioną wartość przedstawiono w tabeli 3.6.

Tabela 3.6. *Zestawienie oznaczenia wykonanych nitów, wraz z pomiarem stopnia twardości*

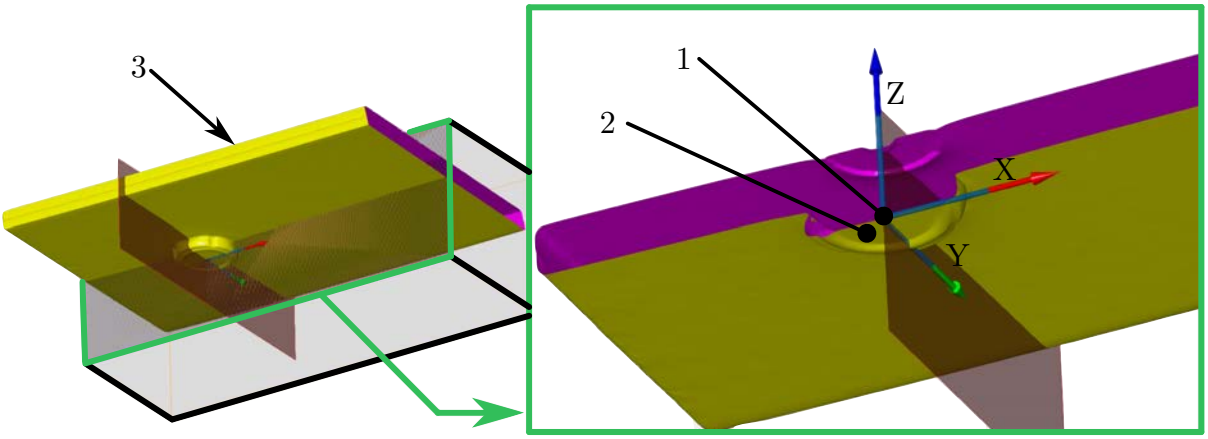
Oznaczenie nita	**Temperatura odpuszczania**	**Twardość**
	[°C]	**[HRC]**
NA	620	32
NB	530	37
NC	415	42

W ramach analizy wpływu twardości dodatkowego elementu odkształcalnego obserwowano ukształtowaną strukturę budowy na przekroju złącza. Rozszerzono zakres mierzonych wartości, zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rysunku 3.6



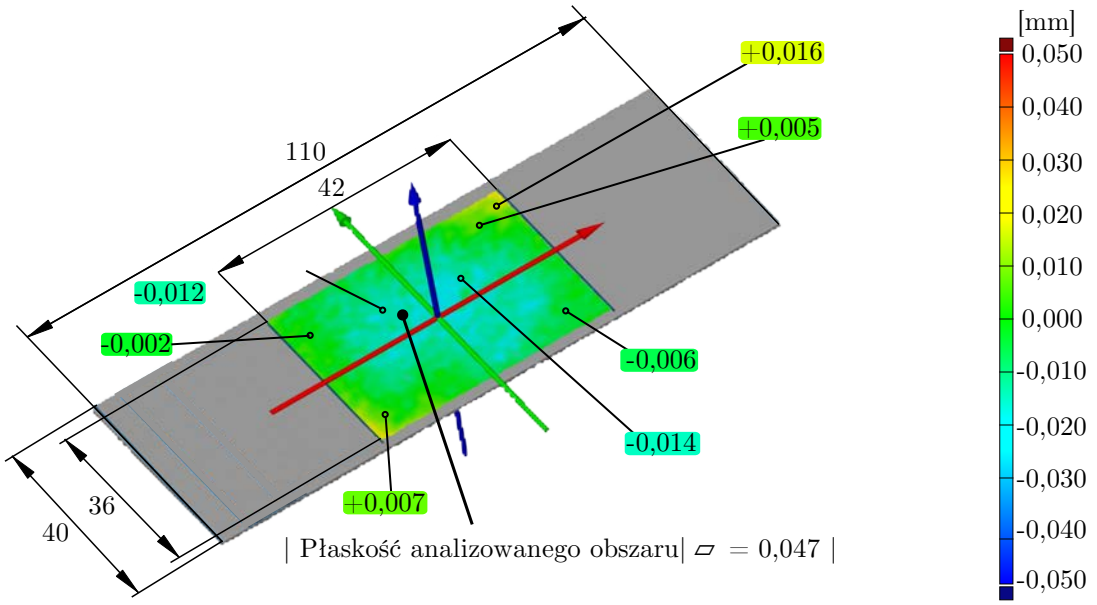
Rys. 3.6. *Oznaczenia kontrolnych cech geometrycznych złącza CR*

Analizę deformacji powierzchni, wykonano z zastosowaniem skanera 3D. Na rysunku 3.7 numerem 1 oznaczono początek układu współrzędnych. Bazowanie zostało wykonane indywidualnie dla każdej z próbek w taki sposób, aby uzyskać symetryczny rozkład deformacji, względem osi złącza. Osie X i Y, ustalono na środku wykonanego połączenia, przy zachowaniu równoległości względem krawędzi próbek (numer 3 na rysunku 3.7 dla osi X). Płaszczyznę definiującą oś Z przyjęto na podstawie punktów z płaskiej powierzchni na wypływce, ukształtowanej przez zespół matrycy (numer 2).



Rys. 3.7. *Orientacja zeskanowanych obiektów w wirtualnej przestrzeni pomiarowej z oznaczonym układem współrzędnych*

Do analizy deformacji wybrano blachy, dla których odchyłka płaskości na obserwowanym obszarze wynosiła mniej niż 0,07 mm. Rysunek 3.8 przedstawia przykładową blachę z potwierdzeniem niskiej wartości tolerancji płaskości. Pomiary deformacji wykonane zostały na próbkach o wymiarach 110×40 mm, w których wykonano jedno złącze usytuowane na środku łączonych blach, gdzie przedstawiono układ współrzędnych. Pomiaru płaskości dokonano na obszarze 42×36 mm.



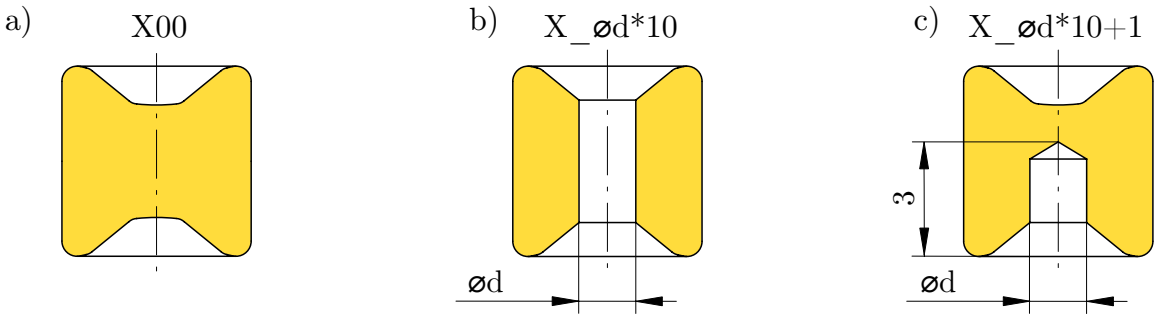
Rys. 3.8. *Odchyłki płaskości powierzchni w obszarze docelowego położenia złącza*

W ramach analizy wpływu zmiany twardości dodatkowego elementu odkształcalnego wykonano badanie utraty nośności, a także sprawdzono wartość momentu utraty nośności skrętnej.

3.2.4 Wpływ zmiany geometrii dodatkowego elementu odkształcalnego na charakterystykę złącza *CR*

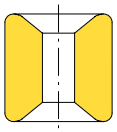
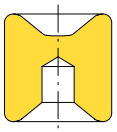
W wyniku dokonania krytycznej analizy stanu zagadnienia zauważono, że jest wąski zakres prac podejmujących problematykę obniżenia siły formowania. Poprzez redukcję siły kształtującej złącze możliwe jest wydłużenie trwałości zmęczeniowej narzędzi oraz energochłonności procesu.

W pracy doktorskiej zaplanowano kolejne zadanie - badania ukierunkowane na zmniejszenie siły formowania połączenia *CR* przez modyfikację kształtu nita (rys. 3.9a). Jako bazowy kształt nita zastosowano komercyjny nit (*X00*), a jego obróbkę wykonano przy użyciu trójosiowej frezarki sterowanej numerycznie. Zmodyfikowany nit, przez wykonanie określonych ubytków materiału, pozwolił na obniżenie masy łącznika. Zredukowanie masy nita uzyskano przez wykonanie w jego osi otworu w dwóch wariantach: z otworem przelotowym (rys. 3.9b), a także z otworem na określoną głębokość (rys. 3.9c).
Przyjęty system oznaczenia określonych kształtów nita zestawiono w tabeli 3.7.



Rys. 3.9. *Nit bazowy oraz istota zmiany kształtu nita komercyjnego: a) bez modyfikacji - X00, b) z otworem przelotowym w osi - X_ϕd*10, c) z otworem na głębokość 3 mm X_ϕd*10+1*

Tabela 3.7. *Zestawienie oznaczeń modyfikowanych typów nitów oraz określone wartości zmiennej ich geometrii*

Lp.	Oznaczenie wariantu modyfkacji nita	Średnica otworu „ød"	Głębokość otworu	
		[mm]	[mm]	
1	*X10*	1,0	-	
2	*X15*	1,5		
3	*X20*	2,0		
4	*X11*	1,0	3	
5	*X16*	1,5		
6	*X21*	2,0		

3.2.5 Wpływ głębokości wtłoczenia nita na charakterystykę złącza *CR*

W wyniku analizy literatury oraz wykonania wstępnych badań w kierunku możliwości łączenia materiałów o podwyższonych właściwościach mechanicznych, postanowiono przeanalizować wpływ głębokości wtłoczenia nita *CR* w łączone materiały na wybrane parametry zamka.

Wyznaczenie pozycji stempla wtłaczającego nita w technologii *CR*, polega na jego wyrównaniu z poziomem górnej powierzchni z łączonych warstw. Można to można opisać jako sumę łącznej grubości łączonych warstw i głębokości wnęki matrycy formowania. W niniejszej dysertacji postanowiono zaimplementować rozwiązanie analogiczne do zastosowanego w artykule [20], które polegało na zmianie odległości czoła stempla od dna matrycy formowania złącze przetłaczane. W związku z zaplanowanymi badaniami pozycje stempla względem dna wnęki matrycy, opisano jako zależność 3.1, która opisuje głębokość wtłaczania G_w, czyli sumaryczną grubość łączonych warstw (t_s), odległość pomiędzy dolną powierzchnią blach, a dnem matrycy formowania (h_d), a także wartość przesunięcia pozycji stempla opisana jako O_f:

gdzie:

$$G_w = t_c + h_d - O_f, \tag{3.1}$$

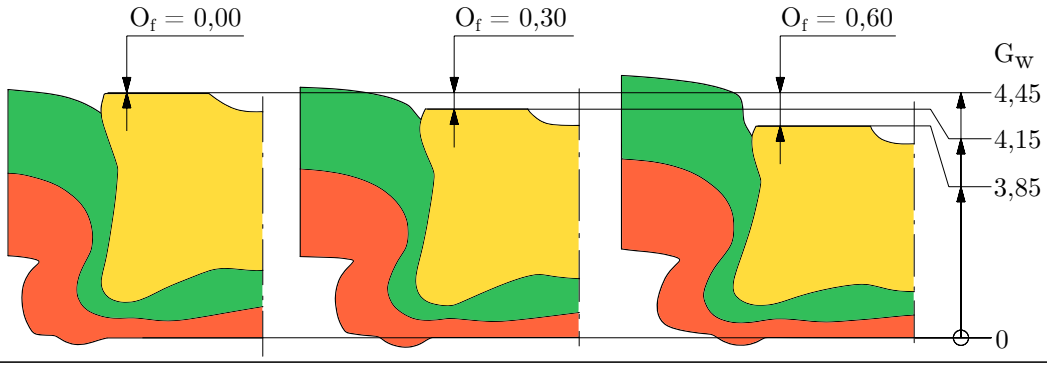
t_c - suma grubości łączonych warstw;

h_d - odległość pomiędzy dolną powierzchnią blach, a dnem matrycy formowania;

O_f - wartość przesunięcia pozycji stempla.

W tabeli 3.8 przedstawiono oznaczenie próbek wraz z graficzną reprezentacją zależności z równania 3.1. Pierwszy po lewej opisany jako wariant *0.00* jest rezultatem standardowej głębokości wtłaczania, która w przypadku łączenia dwóch blach o grubości 1,5 mm ($t_s = 3$ mm) i odległości pomiędzy dolną powierzchnią blach, a dnem matrycy formowania dla $h_d = 1,45$ wynosi 4,45 mm. Na środku przedstawiono złącze *0.30*, dla którego przyjęto wartość $O_f = 0,30$. Dla ostatniej próbki *0.60* przesunięcia stempla wyniosło $O_f = 0,60$.

Tabela 3.8. *Zestawienie aranżacji wykorzystanych do analizy wpływu zmiany parametru G_w*

Lp.	1	2	3
Oznaczenie próbki	*0.00*	*0.30*	*0.60*
			

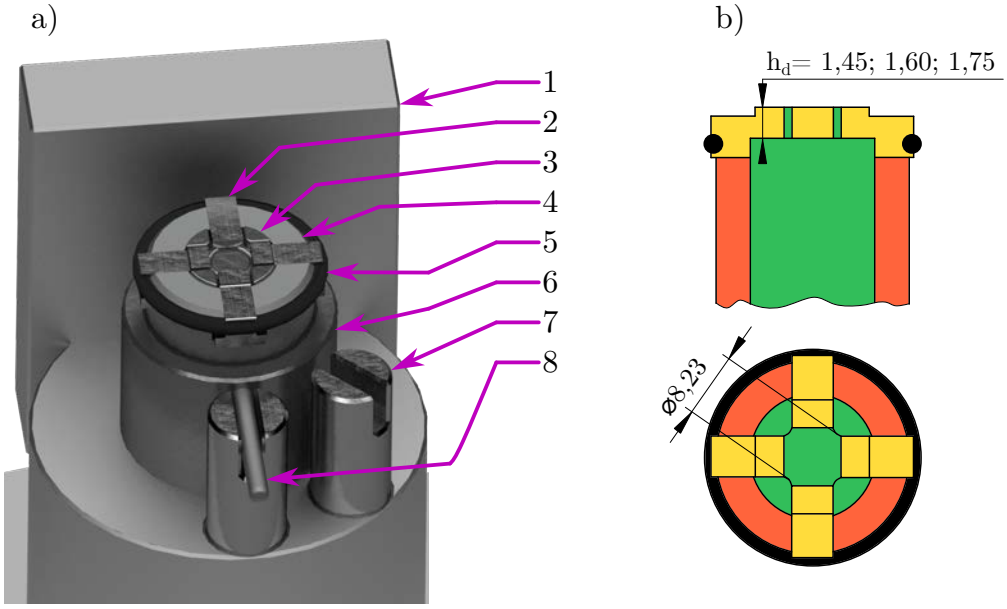
Wtłaczanie nita na większą głębokość, wpływa na zwiększenie wypychanego materiału w wykrój matrycy. To z kolei może doprowadzić do zwiększenia deformacji powierzchni zewnętrznych łączonych warstw materiału. W związku z tym dokonano analizy deformacji powierzchni w obszarze złącza względem ich wejściowego położenia.

W celu kompleksowej oceny wpływu wielkości wtłoczenia nita w łączone warstwy wykonano również badania nośności w próbie rozciągania złącza zakładkowego, a także sprawdzono wartość momentu utraty nośności skrętnej. Uzyskane wyniki potwierdziły znaczący wpływ wzajemnego usytuowania narzędzi formujących, zarówno na deformację, formowanie, jak i nośność złączy wykonanych w technologii *CR*.

3.2.6 Wpływ zmiany geometrii oraz głębokości wykroju matrycy na charakterystykę złącza *CR*

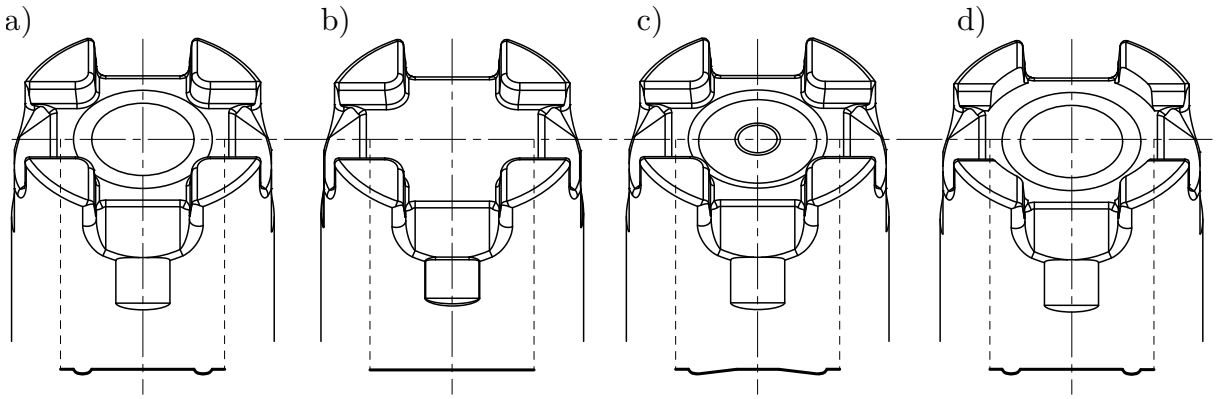
Do przeprowadzenia analizy wpływu zmiany geometrii wykroju matrycy na formowanie i nośność połączenia przetłaczanego z dodatkowym odkształcalnym nitem zaprojektowano i wykonano nowe rozwiązanie zespołu matrycy. Schemat matrycy wraz z ozna-

czeniem części składowych przedstawiono na rysunku 3.10a. Numerem 1 oznaczono płytę oporową (zderzak), której zaprojektowaną funkcjonalnością jest zachowanie powtarzalności założonej pozycji złącza. Element ten jest demontowalny. Wykonana matryca zawiera cztery segmenty ruchome oznaczone numerem 2 i cztery segmenty stałe będące integralną częścią trzpienia (numer 3). Ruch segmentów ruchomych jest liniowy i odbywał się w rowku teowym oprawy oznaczonej numerem 4. Rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia wymianę zarówno segmentów ruchomych, jak i trzpienia. Kolejnym elementem zespołu matrycy jest kołek pozycjonujący (numer 8) dla którego przewidziano dwie możliwe pozycje kształtowania złącza. Pierwszą z nich pokazano na rysunku 3.10a, zaś uzyskanie pozycji obróconej o 45° możliwe jest przez przestawienie kołka blokującego do rowka wewnątrz trzpienia blokującego (oznaczonego numerem 7). Powrót segmentów ruchomych po wykonaniu złącza wymusza elastomerowy pierścień typu "O-ring"(numer 5).



Rys. 3.10. *Zespół matrycy opracowanej do badań: a) (1- płyta oporowa (zderzak), 2- element ruchomy (suwak), 3- trzpień formujący, 4- prowadnica suwaków, 5- O-ring, 6- obudowa, 7- i 8- trzpienie blokujące), b) identyfikacja zmiennej głębokości wykroju*

Wykonano analizę w zakresie wpływu geometrii dna na trzpieniu formującym. Opracowane i wykonane zostały 4 warianty matrycy, których geometria została pokazana na rysunku 3.11. Wszystkie trzpienie wykorzystane w tym etapie, posiadały wysokość $h_d = 1,45$ mm.



Rys. 3.11. *Różne kształty wykroju matrycy uzyskane przez zmianę geometrii wymiennych trzpieni. Model: a) bazowy - 1.45CR, b) z płaskim dnem - 1.45PL, c) z dodatkowym wgłębieniem - 1.45KT, d) z fragmentem powierzchni cylindrycznej na stałych segmentach - 1.45WA*

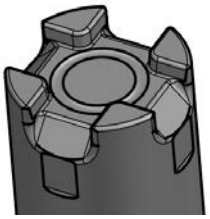
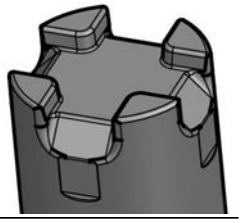
Pierwszy z wariantów (3.11a) jest geometrycznie zbliżonym rozwiązaniem do matrycy *TOX Pressotechnik*. Posiada charakterystyczny pierścień na powierzchni dna. Drugim wariantem jest trzpień opisany jako *1.45PL* (rys. 3.11b). Rozbieżność pomiędzy geometrią trzpieni *1.45CR* i *1.45PL*, polega na pozostawieniu płaskiej geometrii na całym dnie formującym. Trzpień *KT1.45* ze zmianą kształtu rowka został zaprezentowany na rysunku 3.11c. Zakończenie i maksymalna wartość pogłębienia są zbieżne z wariantem *1.45CR*. Różnica geometryczna polega na wykonaniu stycznego przejścia od zewnętrznej geometrii rowka biegnącą pod kątem 4 stopni, aż do dna matrycy. Ostatnim z wykonanych trzpieni jest wariant *1.45WA*, przedstawiony na rysunku 3.11d. Wprowadzono redukcję materiału poprzez frezowanie w miejscu segmentów stałych o średnicy 10 mm. Efektem tej modyfikacji jest kształtowanie złącza bez wpływu segmentów stałych na kształt wypływki. Kształt rowka jest taki sam jak w przypadku wariantu *1.45CR*.

Z zastosowaniem opisanych narzędzi dokonano analizy siły formowania oraz poddano obserwacji struktury budowy na przekroju złącza i deformację w pobliżu miejsca scalenia. Wykonano badania nośności złączy w próbie wytrzymałościowej, a także sprawdzono wartość momentu utraty nośności skrętnej.

3.2.7 Wpływ zmiany głębokości wnęki matrycy na charakterystykę złącza *CR*

W celu wykazania istotności głębokości wykroju matrycy wykonano analizę porównawczą formowania z zastosowaniem matryc o 3 głębokościach trzpieniami zarówno z rowkiem *CR*, jak i bez niego *PL*. Przyrost wartości h_d zrealizowano w dwóch krokach co 0,15 mm. Listę aranżacji w ramach przeprowadzonej analizy przedstawiono w tabeli 3.9.

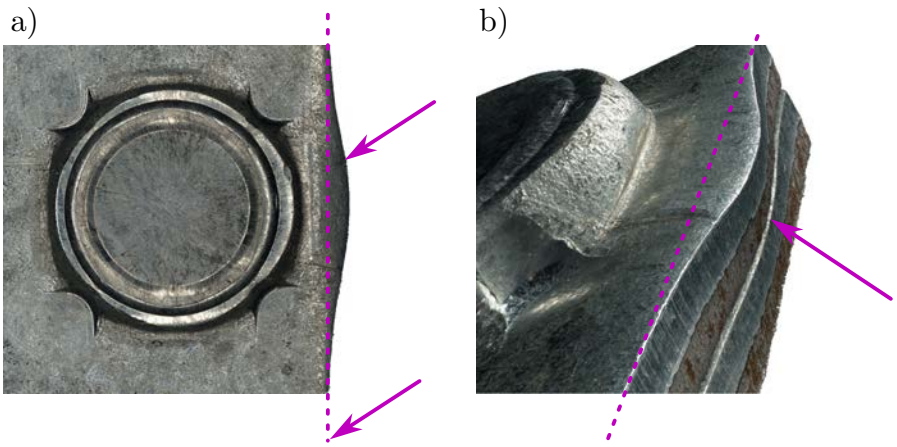
Tabela 3.9. *Warianty wykonania trzpieni z rowkiem pierścieniowym i bez dla trzech różnych głębokości wykroju h_d i ich oznaczenie*

Lp.	Oznaczenie trzpienia	Wartość h_d [mm]	Model 3D
1	*1.45CR*	1,45	
2	*1.60CR*	1,60	
3	*1.75CR*	1,75	
4	*1.45PL*	1,45	
5	*1.60PL*	1,60	
6	*1.75PL*	1,75	

Wykonana analiza procesu formowania potwierdziła wpływ zmian geometrycznych na wartość siły formowania. Obserwowano strukturę budowy na przekroju złącza, a także deformacje górnej powierzchni blach. Z uwagi na ingerencję w wysokość h_d wymieniano również segmenty ruchome. Celem określenia wpływu wynikającego z zastosowanych zmian, wykonano badania nośności w próbie rozciągania, a także sprawdzono wartość momentu utraty nośności skrętnej.

3.2.8 Wpływ położenia złącza *CR* względem krawędzi łączonych warstw na charakterystykę zakładkowego połączenia

W przypadku łączenia cienkościennych elementów bardzo często punkty scalenia występują blisko zewnętrznych krawędzi elementów. Ze względu na ograniczony dostęp narzędzi do miejsca, w którym maja być wykonane połączenia. Producenci narzędzi, a w szczególności dedykowanych do operacji ręcznych, prześcigają się w rozwiązaniach pozwalających łączyć blachy w miejscach trudno dostępnych. Złącza zlokalizowane tuż przy krawędzi mogą nie być wystarczająco zablokowane poprzez dociskacz i materiał zostaje promieniowo wypchnięty. Przykład takiego lokalnego wypchnięcia materiału przedstawiono na rysunku 3.12a. Z kolei rysunek 3.12b przedstawia fotografię w widoku izometrycznym. Widoczna jest asymetria złącza spowodowana zróżnicowanymi oporami płynięcia. W przypadku kierunków, gdzie promieniowe płynięcie materiału jest dociśnięte przez materiał geometria jest zbliżona. Większą odchyłkę liniowości zaobserwowano w przypadku warstwy położonej bezpośrednio na zespole matrycy formowania.

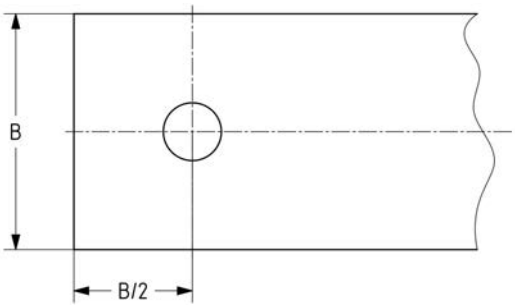


Rys. 3.12. *Deformacja materiału łączonych warstw w pobliżu krawędzi materiału: a) w płaszczyźnie dolnej blachy, b) oznaczone wybrzuszenie w materiale dolnej warstwy*

Do analizy wpływu zmiany położenia złącza *CR* względem krawędzi, wykonano sześć próbek, ze zmianą szerokości *B* od 15 do 40 mm, z zmianą wartości co 5 mm. Przeprowadzona analiza formowania wykazała, że występują różnice w maksymalnej wartości siły niezbędnej do uzyskania połączenia *CR*. Postanowiono wykonać pomiar geometrii rzeczywistej próbek w pobliżu miejsca scalenia z zastosowaniem skanera optycznego 3D. Z uwagi na zaobserwowane różnice, wykonano analizę nośności połączeń zakładkowych, o szerokości próbek zbieżnej z wariantami przedstawionymi w tabeli 3.10.

Tabela 3.10. *Zestawienie odległości położenia miejsca scalenia w zależności od szerokości łączonych pasm*

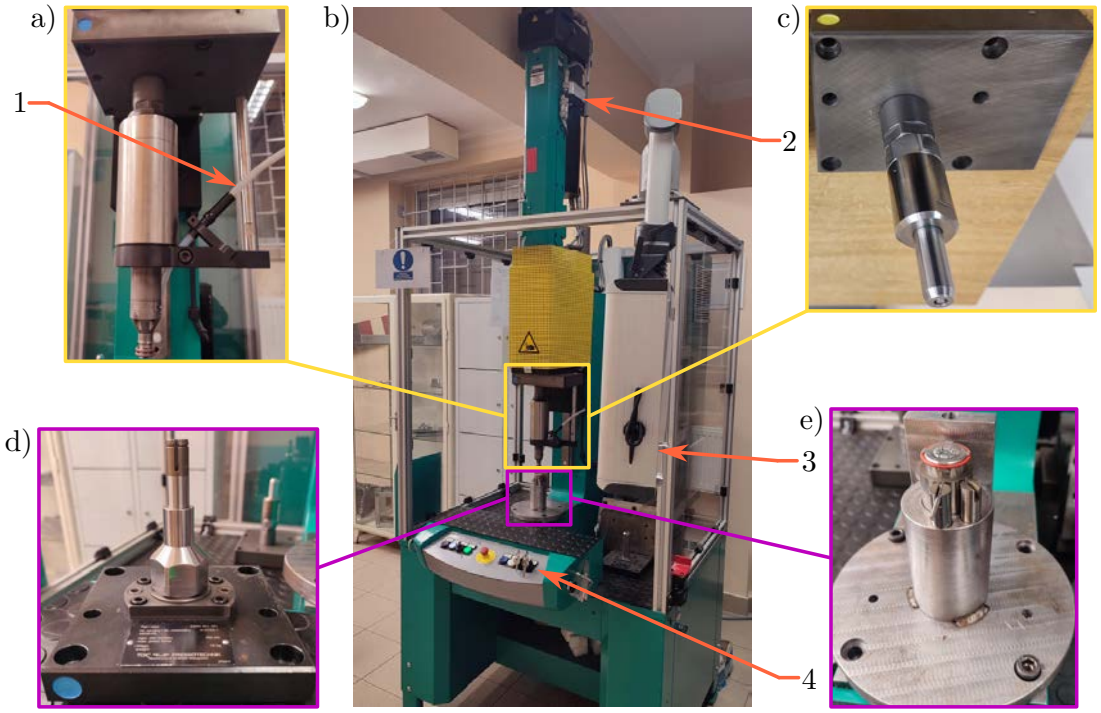
Oznaczenie próbki	**Wymiar B [mm]**
1.5x1.5_15	15
1.5x1.5_20	20
1.5x1.5_25	25
1.5x1.5_30	30
1.5x1.5_35	35
1.5x1.5_40	40



3.3 Aparatura badawcza

3.3.1 Stanowisko zastosowane do formowania złączy przetłaczanych

Złacza w obu technologiach *CL* i *CR* wykonano z zastosowaniem prasy będącej na wyposażeniu *Laboratorium Połączeń Prasowanych Katedry Konstrukcji Maszyn Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej* producenta *TOX PRESSOTECHNIK*, przedstawionej na rysunku 3.13. Przy założeniu zastosowania stabilnych termicznie warunków pracy, błąd pozycjonowania narzędzi formujących wynosi 0,01 mm, zaś błąd pomiarowy siły kształtowania wynosi 0,5%. Zastosowany układ tensometryczny umożliwia rejestrację siły w zakresie pomiarowym do 110 kN, jednakże maksymalna zalecana przez producenta wartość wynosi 100 kN. W przypadku obciążenia napędu w trakcie ruchu zwrotnego, wartość maksymalna wynosi 30 kN. W zależności od zastosowanego oprzyrządowania istnieje możliwość wykonywania złączy zarówno z zestawem narzędzi do technologii *CL*, jak i *CR*.



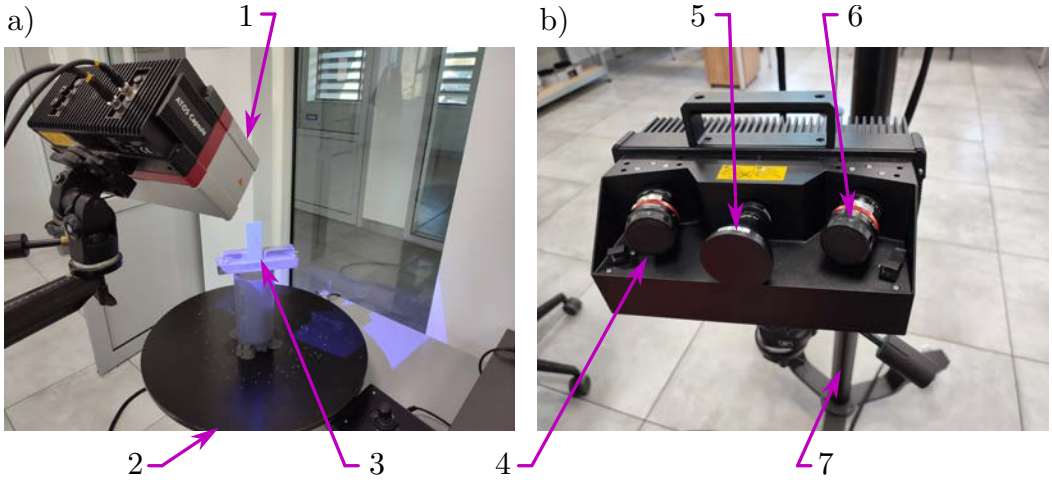
Rys. 3.13. *Stanowisko do realizacji połączeń przetłaczanych: a) kompletna głowica nitowa z podajnikiem nitów, b) prasa , c) płyta stemplowa CL, d) płyta z matrycą komercyjną CR, e) nowa płyta z wymiennymi elementami matrycy (1-rurka wlotowa nitów, 2- napęd liniowy, 3- panel HMI, 4- konsola sterownicza*

Prasa posiada liniowy napęd elektryczny typu *EMPK*, składający się z serwo-napędu liniowego *TOX ElectricDrive* oznaczonego numerem 2. Złącza wykonane z zastosowaniem zestawów narzędzi, opisane jako *CL/CR*, utworzono komercyjnymi narzędziami producenta TOX Pressotechnik stempla *CL* (3.13c), oraz zespołem matrycowym (3.13d). Ma-

szyna obsługiwana była z poziomu dotykowego panelu HMI (numer 3), za pomocą którego definiowane były niezbędne parametry procesu łączenia. Operator, z poziomu konsoli (numer 4), realizował ruchy nastawne oraz robocze. Zespół narzędziowy do formowania w technologii *CR* od strony stemplowej jest bardziej skomplikowany w stosunku do stosowanego dla połączeń *CL* z uwagi na konieczność wprowadzenia dodatkowego elementu odkształcalnego. Nit podawany był przez rurkę podawczą (numer 1), a następnie pozycjonowany w głowicy nitowej. Zespół matrycy umożliwiający wymianę trzpieni formujących przedstawiono na rysunku 3.13e.

3.3.2 Skaner 3D wykorzystany do analizy odkształceń powierzchni wybranych połączeń

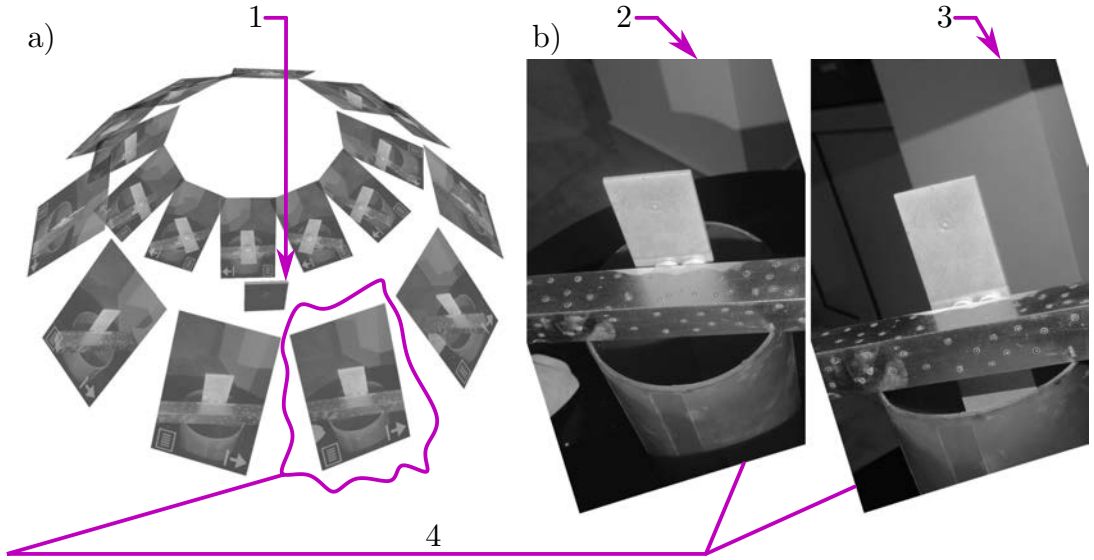
Do analizy odkształceń powierzchni zastosowano skaner 3D *ATOS Capsule*, który jest systemem optycznym szeroko stosowanym w przemyśle do digitalizacji fizycznych obiektów. Zmierzone punkty na skanowanym obiekcie mają przypisane współrzędne, a w wirtualnym środowisku możliwe jest przedstawienie ich w formie wirtualnej chmury punktów. Rejestrowanie danych polega na rzutowaniu sekwencji prążków na obiekt znajdujący się w przestrzeni pomiarowej. Zarejestrowanie danych zrealizowane jest z wykorzystaniem dwóch kamer. W niniejszej dysertacji zastosowano optykę o oznaczeniu producenta *MV200*, charakteryzującą się przestrzenią pomiarową 200 mm × 140 mm i odległością roboczą 290 mm. Dokładność zastosowanej optyki potwierdzona jest certyfikatem *GOM Acceptance Test* wykonanym w nawiązaniu do „VDI/VDE 2634, part 3" [100]. Charakterystyczne wartości potwierdzone certyfikatem dla zastosowanej optyki określają: błąd dopasowania sfery wynosił 0,008 mm, zaś w przypadku pomiarów odległości liniowej niezgodność wynosiła 0,009 mm. Stanowisko do skanowania przedstawiono na rysunku 3.14.



Rys. 3.14. *Stanowisko do wykonywania skanów próbek: a) skaner i stolik z uchwytem, b) elementy skanera widoczne po zdjęciu obudowy osłaniającej (1-obudowa osłaniająca zestaw optyki, 2- stolik obrotowy, 3- element skanowany, 4- lewy obiektyw, 5- projektor, 6- prawy obiektyw, 7-statyw)*

Po zdjęciu osłony, wewnątrz głowicy skanującej znajdowały się dwie optyki (numery 4 i 6 przedstawione na rysunku 3.14b) i projektor (numer 5). Kompletny zespół głowicy skanującej zamontowany był na statywie (numer 7).) Zintegrowany stół obrotowy (numer 3) umożliwia pracę zarówno w trybie automatycznym, jak i manualnym. W przypadku pierwszego z wymienionych trybów operator ustala liczbę zdjęć przypadających na pełen obrót w środowisku *ATOS*, stanowiącym integralną część stanowiska pomiarowego. W przypadku pracy ręcznej, osoba skanująca używa konsoli do obracania stołem. Na rysunku 3.14a przedstawiono położenie skanowanego obiektu (numer 3).

Zależnie od wymaganej dokładności, skomplikowania geometrii i rozmiaru skanowanego elementu, uzyskanie skanu wymaga różnej ilości wykonanych ujęć. Wspólna orientacja pomiędzy zdjęciami realizowana jest poprzez punkty referencyjne. Ich rozmiar zależy od wielkości zastosowanej optyki - kalibracja dokonywana jest na dedykowanej płycie, na której znajdują się punkty odpowiadające rozmiarem punktom referencyjnym. Przykład zeskanowanego elementu przedstawiono na rysunku 3.15. Zdjęcia przedstawione na grafice zostały wykonane z zastosowaniem automatycznej pracy stołu obrotowego. Widoczne są dwa poziomy wykonanych zdjęć z uwagi na zmianę pozycji głowicy *Atos Capsule*. Pojedyncze ujęcie oznaczone numerem 4, składa się z dwóch zdjęć. numerem 2 i 3 opisano odpowiednio zdjęcie wykonane lewą i prawą kamerą. Zeskanowany obiekt w wirtualnej przestrzeni pomiarowej, został opisany jaku numerem 1 na rysunku 3.15.



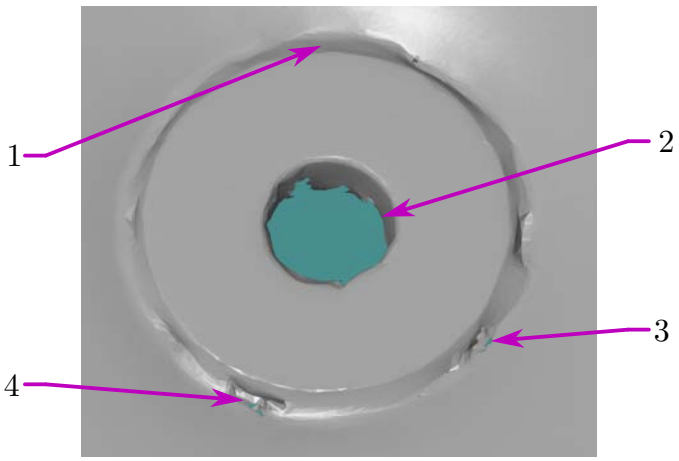
Rys. 3.15. *Przykładowe ujęcia skanowanego obiektu - a) widok zeskanowanego obiektu wraz z seriami pomiarowymi, oraz b) zdjęcia zarejestrowane przez kamery w ramach jednego ujęcia*

Zeskanowany element w postaci chmury punktów poddany został poligonizacji. Kolejnym bardzo ważnym etapem w przypadku analizy zeskanowanych elementów jest ich odpowiednia orientacja w wirtualnym środowisku pomiarowym. W praktyce inżynierskiej skany najczęściej przekazywane są w formacie *STL* (ang.: *stereolithography*) z uwagi na możliwość importu do różnych środowisk 3D. Każdy pomiar obarczony jest pewnym błędem pomiarowym. Pomimo wartości zawartych w certyfikacie, istnieją sytuacje, w których

odwzorowanie powierzchni będzie rozbieżne z rzeczywistością. Odchyłki przekraczające dane z certyfikatu mogą być spowodowane między innymi przez:

- niedostateczne przygotowanie powierzchni przed skanowaniem,
- w przypadku elementów, które wymagają zastosowania nałożenia proszku celem osiągnięcia zmatowienia. Sytuacja taka występuje na przykład w przypadku przeźroczystych obiektów lub posiadających lustrzaną powierzchnię. Ilość nałożonego środka nie może być ani zbyt mała - gdyż spowoduje wystąpienie otworów w siatce - ani zbyt duża z uwagi na to, iż grubość nałożonego środka generuje większą odchyłkę od powierzchni rzeczywistej,
- występowanie nieprzelotowych otworów o małej średnicy - jeżeli powierzchnia wymaga zmatowienia, a fizycznie nie ma możliwości jej pokrycia to punkty pomiarowe nie zostaną zarejestrowane,
- błędne ustawienie czasów naświetlenia podczas wykonywania zdjęć,
- występowanie miejsc na skanowanym obiekcie niedostępnym dla obu kamer,
- odbicia światła.

Jeden z przykładów uzyskanego skanu z błędem zniekształcenia powierzchni przedstawiono na rysunku 3.16. Wada opisana numerem 1 może być spowodowana przez występowanie zanieczyszczeń bądź niedostatecznej ilości zdjęć. Wada oznaczona numerem 2, spowodowana była występowaniem małego otworu, gdzie zmatowienie powierzchni nie było możliwe. Pomimo tego, iż obydwie kamery widziały ten obszar nie było możliwości zarejestrowania geometrii. Numery 3 i 4 to zniekształcenia spowodowane refleksami światła.



Rys. 3.16. *Przykład zarejestrowanej i odtworzonej geometrii z defektami*

3.3.3 Mikroskop wykorzystany do pomiaru geometrii na przekroju złącza i analizy deformacji powierzchni blach

Do pomiaru geometrii na przekroju złącza i analizy deformacji powierzchni blach zastosowano mikroskop *VHX-7000*. wyposażony w obiektyw Z20 umożliwia obserwację przy powiększeniu 20; 30; 50; 100 i 200×. Kalibracja mikroskopu została wykonana z wykorzy-

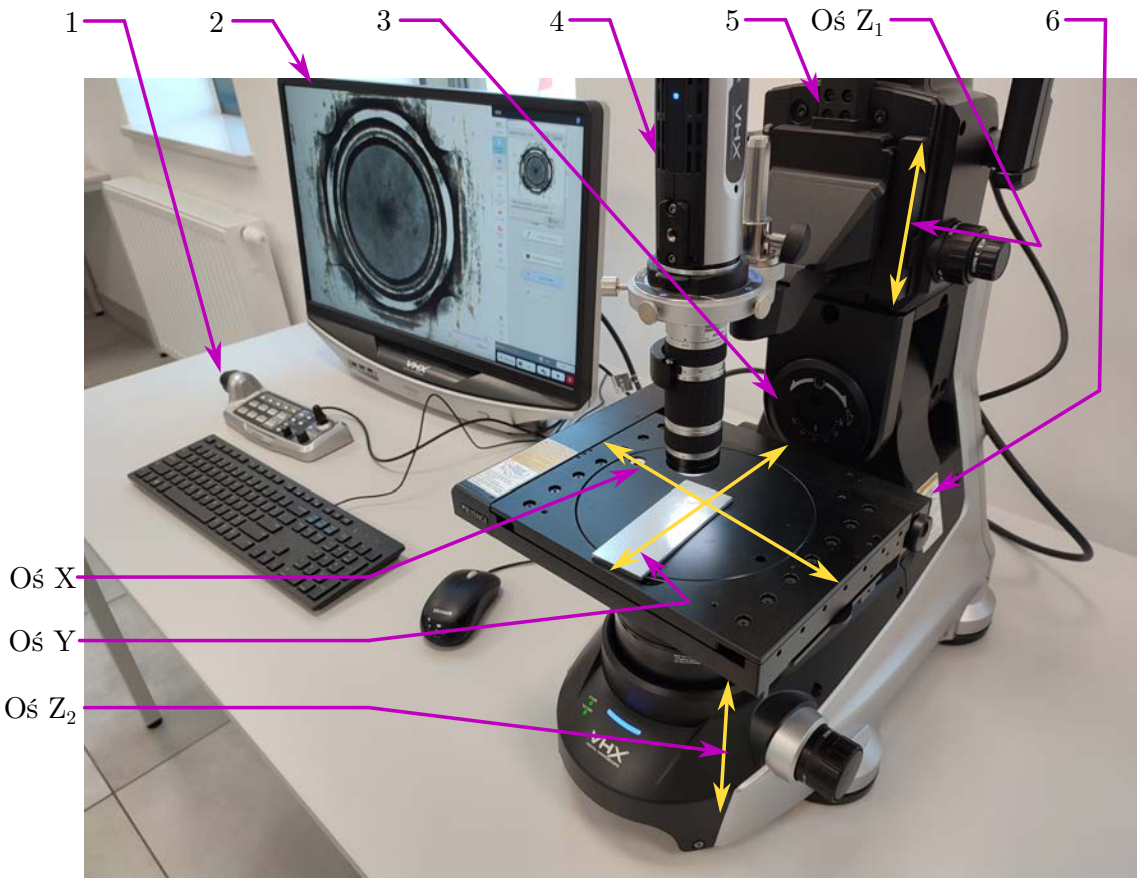
staniem automatycznego algorytmu, wbudowanego w oprogramowanie tego mikroskopu. Zastosowano wzorzec *OP-88592*. W kalibracji uzyskano wielkości piksela, którego rozmiar w zależności od zastosowanego powiększenia, przedstawiono w tabeli 3.11.

Tabela 3.11. *Określona wielkość piksela po skalibrowaniu mikroskopu VHX7000*

Powiększenie	**Rozmiar piksela**
	[mm/piksel]
x20	0,00752
x30	0,00513
x50	0,00308
x100	0,00154
x150	0,00102
x200	0,00077

Pole widzenia pojedynczego ujęcia miało wymiar 1536×2048 pikseli. oznacza to, iż w zależności od przyjętego powiększenia możliwa była obserwacja większego obszaru dla mniejszego powiększenia. Jedną z zalet urządzenia *VHX-7000*, jest możliwość składania poszczególnych zdjęć. Maksymalny obszar, możliwy do zarejestrowania to 50000 pikseli w obydwu kierunkach. Zintegrowany system umożliwia użytkownikowi wykonanie wielu podstawowych pomiarów, tworzenie geometrii i analizy odległości pomiędzy nimi.

Rozwiązanie zastosowane w mikroskopie optycznym *Keyence VHX-7000* umożliwiało wykonywanie obrazów o szerszym zakresie głębi ostrości i reprezentacji uzyskanego obrazu w formie trójwymiarowej dzięki kompozycji głębi ostrości. Obraz konstruowany był przez obliczenie wysokości na podstawie różnic tekstury powierzchni. Obszary, dla których tekstura nie jest wyrazista traktowane są przez algorytm przetwarzania obrazu jako szum co umożliwia rejestrację danych w postaci 3D. Tak samo jak w przypadku pomiarów 2D tu również była możliwość rejestracji wielu obrazów podczas ruchu stolika i łączeniu ujęć. Na rysunku 3.17 przedstawiono mikroskop *VHX7000* wraz z opisem jego elementów składowych.



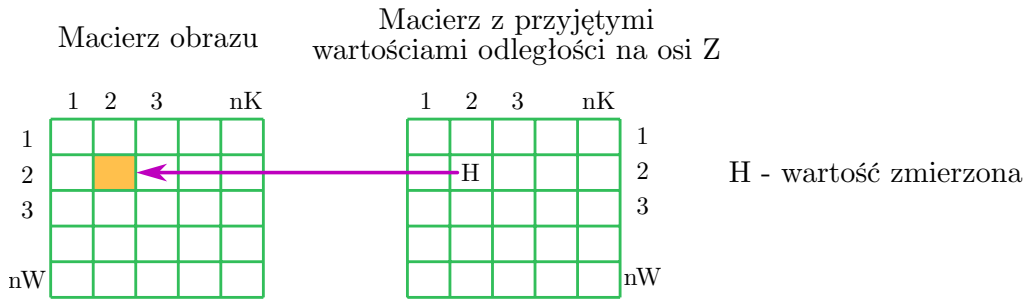
Rys. 3.17. *Kompletne stanowisko do obserwacji i pomiarów geometrii połączeń; 1- konsola sterująca; 2- komputer z wyświetlaczem aktualnego obrazu przechwyconego przez obiektyw; 3- kamera podglądu odległości roboczej; 4- obiektyw Z20; 5- Stół z funkcją szybkiego automatycznego ustawiania ostrości; 6- zmotoryzowany stolik*

Oznaczona numerem 1 konsola, ułatwia obsługę urządzenia. Głównym elementem wykorzystywanym do robienia zdjęć jest optyka (numer 4). Zastosowany układ pozwala na przemieszczenie w zakresie osi X i Y na zmotoryzowanym stoliku pomiarowym (3.17 numer 6). Zakres ruchu na osi Z podzielony jest pomiędzy korpusem urządzenia, opisanym numerem 5, a stolikiem pomiarowym. Obraz w czasie rzeczywistym wyświetlany był na ekranie komputera (numer 2). Mikroskop wraz z oprogramowaniem posiada kilka unikalnych możliwości do których należą:

- składanie obrazów 2D i 3D z możliwością wykonywania pomiarów,
- efekt cienia optycznego - możliwość wykonania zdjęcia z różnymi parametrami oświetlania, dzięki którym możliwe jest uwidocznienie struktury powierzchni,
- usuwanie odblasków - możliwość redukcji efektu prześwietlenia obrazu,
- multi-oświetlenie - obraz wykonywany jest z różnymi parametrami oświetlenia i umożliwia użytkownikowi zmianę pozycji z której obiekt jest oświetlany, co w rezultacie może wykazać więcej szczegółów, niż obraz z światłem jednolitym.

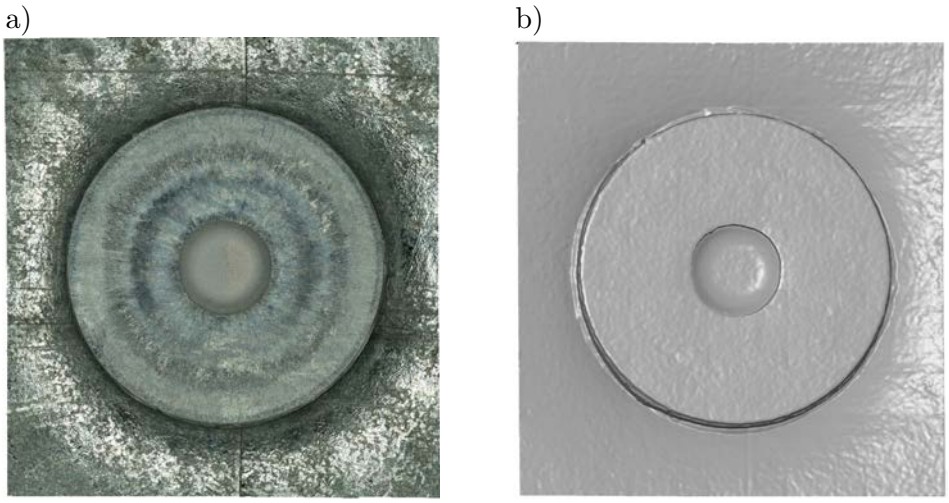
Istnieje możliwość eksportu punktów pomiarowych przypisanych poszczególnym pikse-

lom do pliku o formacie *CSV* (ang.: *Comma-Separated Values*). Arkusz danych, odzwierciedla numer piksela na osiach *X* wierszami, zaś w przypadku osi *Y* ich identyfikacja odnosi się do numeru kolumny. Zobrazowanie danych, przedstawiono na rysunku 3.18.



Rys. 3.18. *Opis danych zawierających współrzędną wysokości przetworzoną przez algorytm*

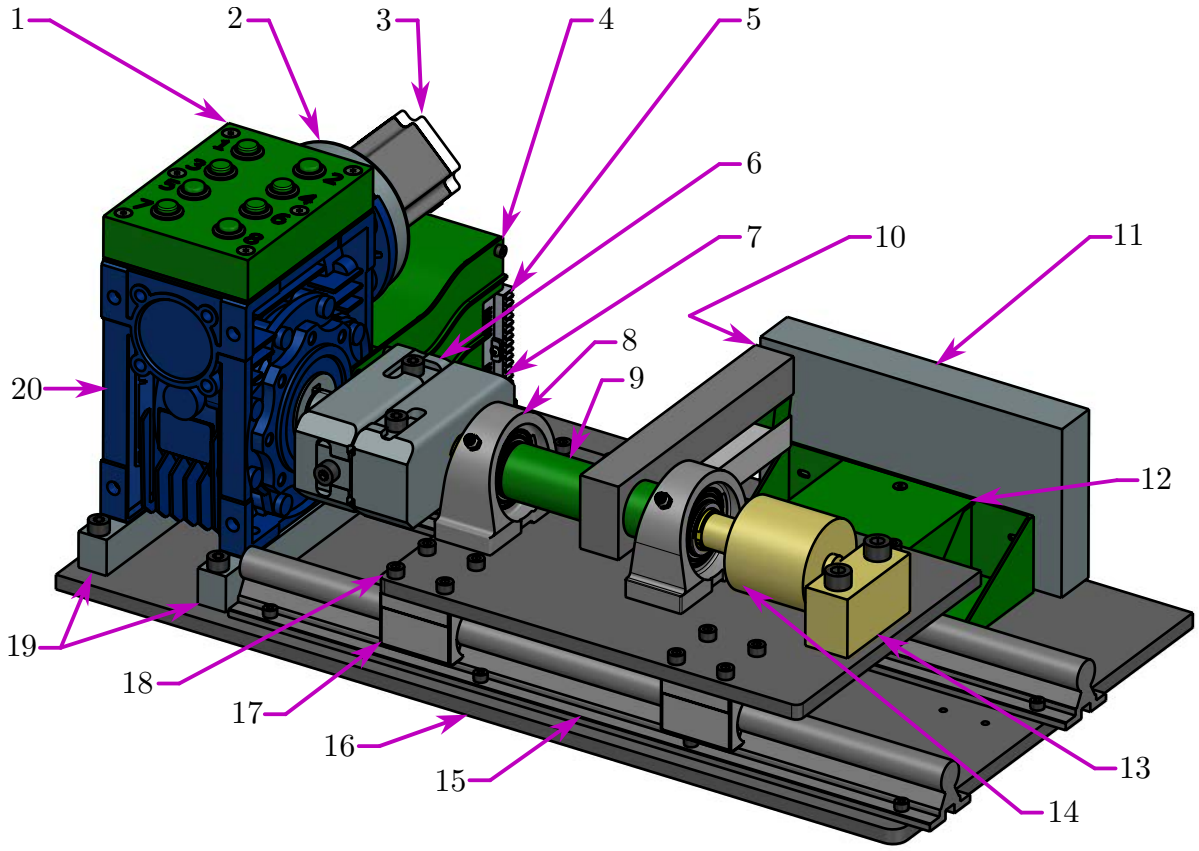
Na podstawie danych uzyskanych w wyniku kalibracji w postaci wielkości pikseli, przedstawionych w tabeli 3.11 istnieje możliwość reprezentacji danych w układzie kartezjańskim (*X, Y, Z*). Następnie dla uzyskanych punktów, istnieje możliwość wykonania poligonizacji, efektem której była siatka trójkątów w formacie *STL* (ang.: *Stereolithography*). Uzyskany obiekt podobnie jak skan 3D można zaimportować do systemów wspomaganych komputerowo i wykonać np analizę odchylenia. Powierzchnia cechuje się wyższym poziomem odwzorowania szczegółów niż obszar uzyskany na skanerze 3D. Pozwala również na lepszą obserwację miejsc w których występuje potencjalne ryzyko powstania wad przedstawionych na rysunku 3.16. W przypadku jeżeli należy dokonać analizy małego obszaru i obraz widoczny jest z jednej pozycji - uzyskanie siatki 3D z zastosowaniem mikroskopu *VHX7000* może być osiągnięte w krótszym czasie, ponieważ nie ma konieczności przeprowadzenia procesu przygotowania powierzchni tak jak ma to miejsce w przypadku skanowania 3D z zastosowaniem skanera *Atos GOM*.



Rys. 3.19. *Transformacja zdjęcia do poligonu o wysokiej dokładności odwzorowania: a) widok zdjęcia uzyskanego za pomocą mikroskopu, b) widok siatki wygenerowanej na podstawie danych pomiarowych*

3.3.4 Stanowisko do badania nośności skrętnej

Stanowisko do badań nośności skrętnej zostało zaprojektowane z wykorzystaniem profesjonalnego oprogramowania *CAD* - siemens NX, a jego wizualizacja wraz z oznaczeniem elementów składowych została przedstawiona na rysunku 3.20.



Rys. 3.20. *Budowa stanowiska do badania nośności skrętnej złączy przetłaczanych*

Sterowanie ruchem stanowiskiem odbywa się poprzez konsolę (rys 3.20) oznaczoną numerem 1 na rysunku 3.20 zlokalizowaną na przekładni ślimakowej (numer 5). Obudowa przycisków została wykonana na drukarce 3D w technologii *FDM* (ang.: *Fused Deposition Modeling*). Zawiera ona 8 przycisków, które zostały zaprogramowane z wykorzystaniem środowiska *Arduino IDE* (ang.: *Integrated Development Environment*). Opis działania maszyny w zależności od aktywowanego przycisku przedstawiono w tabeli 3.12.

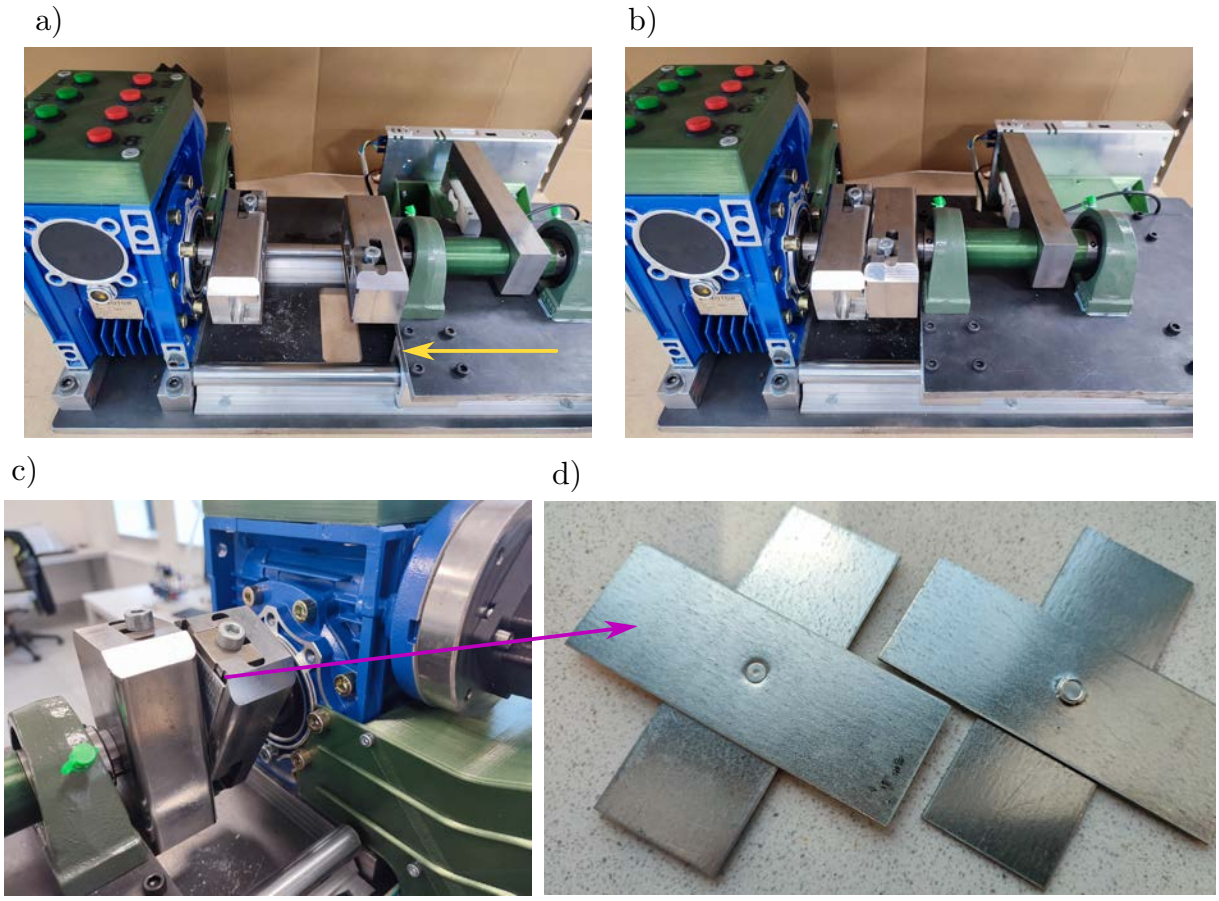
Tabela 3.12. *Opis akcji wykonywanych przez stanowisko do badań nośności skrętnej po wywołaniu odpowiedniego przycisku na konsoli sterującej.*

Nr przycisku	Opis działania
1	Uruchomienie pracy silnika zgodnie z kierunkiem pomiarów. Prędkość obrotowa na wale wyjściowym z przekładni wynosi 0,25 obr/min
2	Uruchomienie pracy silnika przeciwnie do kierunku pomiarów. Prędkość obrotowa na wale wyjściowym z przekładni wynosi 0,25 obr/min
3	Uruchomienie pracy silnika zgodnie z kierunkiem pomiarów. Prędkość obrotowa na wale wyjściowym z przekładni wynosi 0,025 obr/min
4	Uruchomienie pracy silnika przeciwnie do kierunku pomiarów. Prędkość obrotowa na wale wyjściowym z przekładni wynosi 0,025 obr/min
5	Zmienia aktualną wartość kąta obrotu zarejestrowaną przez mikrokontroler na 0
6	Zmienia aktualną wartość momentu obrotowego na 0 Nm
7	Zatrzymanie pracy silnika
8	

W celu uzyskania wysokiej precyzji i możliwości sterowania jako napęd zastosowano silnik krokowy (numer 3 na rys. 3.20) o oznaczeniu katalogowym *60BYG-84-3A*. Silnik ten charakteryzował się momentem trzymającym o wartości 3 Nm. Typ zastosowanego silnika pozwala na zmianę pozycji realizując pełny obrót w 200 krokach. Oznacza to, iż jeden krok zmienia pozycję silnika o 1,8°. Silnik zasilany jest przez zasilacz impulsowy (numer 11 na rys. 3.20) o mocy 350 W i napięciu wyjściowym 24 V. W opracowanym układzie zastosowano sterownik *DM542* (numer 5 na rys.3.20). Silnik posiada obudowę *Nema24* i jego bezpośredni montaż na przekładni ślimakowej (numer 20 na rys. 3.20) nie byłby możliwy. Z tego powodu wykonano stalowy kołnierz (numer 2 na 3.20) umożliwiający montaż silnika dostosowując go do standardu kołnierza przekładni. Zastosowano reduktor firmy *Promotor PM 063 i=60 71B14*, o przełożeniu wynoszącym 60. Uchwyt do montażu próbki (numer 6 na rys. 3.20) osadzony był na wale wyjściowym z przekładni. Wewnątrz tego uchwytu mocowana była skręcana warstwa próbki. Druga blacha przytwierdzana była w uchwycie (numer 7 na rys. 3.20) osadzonym na wale znajdującym na płycie ruchomej (numer 18 na rys. 3.20). Ruch, który umożliwia montaż próbek zrealizowany był poprzez łożyska liniowe *SME20UU* (numer 17 na rys. 3.20). Dzięki łożyskom część ruchoma stanowiska wykonuje ruch liniowy po prowadnicach (numer 15 na rys. 3.20) z wałkami o średnicy 20 mm. Wał przenoszący moment obrotowy zamontowany był na płycie zespołu ruchomego. Jego obrót był możliwy dzięki zastosowaniu łożysk samonastawnych w żeliwnej obudowie. Średnica wałów zdawczych zarówno zamontowanego w przekładni ślimakowej jak i należącego do ruchomej części stanowiska do badań nośności skrętnej wynosiła 25 mm. Moment obrotowy w trakcie próby skręcania przenoszony był poprzez ramię (numer 10 na rys. 3.20) na belkę tensometryczną *YZC-1B(97)*. Sy-

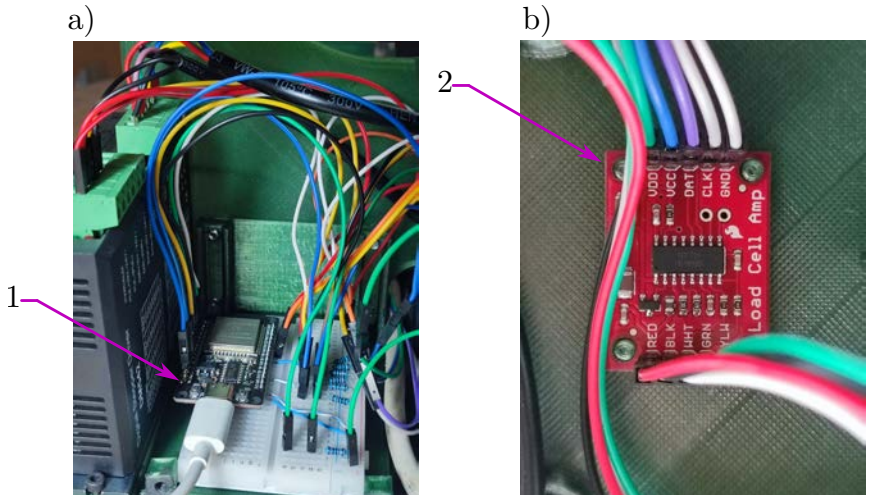
gnał z belki tensometrycznej przetwarzany był przez wzmacniacz *HX711* zlokalizowany w obudowie (numer 12 na rys. 3.20).

Na rysunku 3.21a przedstawiono stanowisko do badań nośności skrętnej przed zamontowaniem próbki połączenia. By było możliwe przeprowadzenie badania nośności skrętnej złącza należało połączyć układ napędowy z zdawczym. Możliwość wykonania ruchu liniowego jest znaczącym ułatwieniem do montażu próbek przy jednoczesnym zachowaniu współosiowości układu. Układ części chwytowych z zamocowaną próbką złącza przedstawiono na rysunku 3.21b.



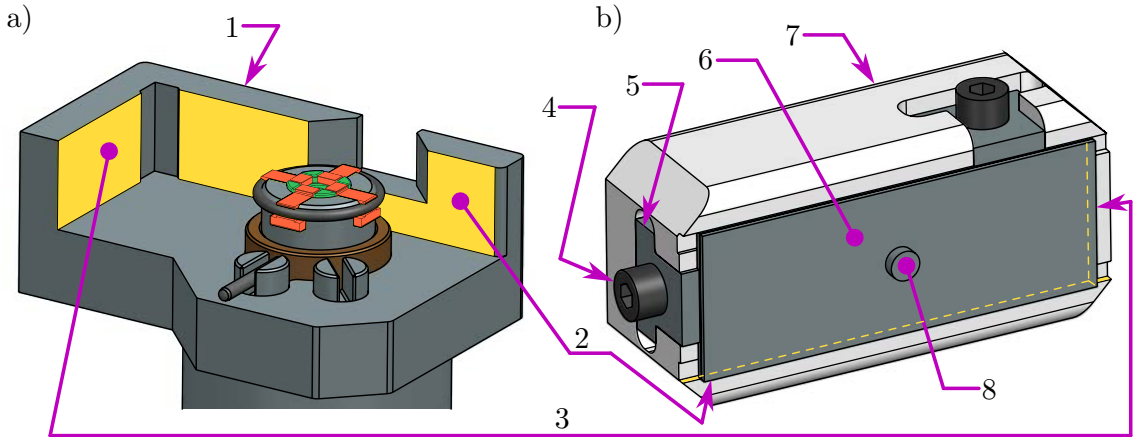
Rys. 3.21. *Urządzenie do badania nośności skrętnej połączeń przetłaczanych: a) układ z rozsuniętymi szczękami do mocowania próbki, b) układ szczęk po zamocowaniu próbki przeznaczonej do badań, c) ujęcie obrotu szczęk z próbką podczas testu, d) widok próbki po badaniu*

Wartości momentu obrotowego wyświetlane na ekranie komputera zostały skalibrowane z elektronicznym adapterem dynamometrycznym *Jonnesway T19030N* (numer 14 na rys. 3.20) o zakresie pomiarowym od 3 Nm do 30 Nm. Adapter został zamontowany w uchwycie (numer 13 na rys. 3.20). Dokładność reprezentowanych pomiarów potwierdzony został przez fabryczny certyfikat kalibracji i wynosił ±2% przy obrocie w prawo (zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara) oraz ±3% w kierunku przeciwnym. Na rysunku 3.22a zaprezentowano mikrokontroler opisany numerem 1 i wzmacniacz sygnału *HX711* (numer 2), który w stanowisku do badań nośności skrętnej zlokalizowany był wewnątrz obudowy (numer 12 na rys. 3.20).



Rys. 3.22. *Elementy elektroniki zastosowane do sterowania układem do badań nośności skrętnej: a) płytka prototypowa wraz z mikrokontrolerem ESP32 zloklalizowana wewnątrz obudowy przedstawionej na rysunku (3.20 - numer 4) b) wzmacniacz sygnału belki tensometrycznej HX711*

Z uwagi na to, iż stanowisko zostało wykonane w ramach niniejszej dysertacji, wykonano szereg operacji mających na celu redukcję rozbieżności w wynikach badań wstępnych. Celem zachowania współosiowości złącza, zlecono wykonanie blach na laserze *CNC* (ang.: *Computer Numerical Control*), zapewniając wysoką powtarzalność i precyzję ich wykonania. Wykonano specjalne oprzyrządowanie w postaci uchwytu przedstawionego na rysunku 3.23a oznaczonego numerem 1, z kolei na rysunku 3.23b przedstawiono uchwyt do montażu próbki do analizy nośności skrętnej.



Rys. 3.23. *Opracowany zderzak do pozycjonowania pasm blach przed łączeniem: a) widok zderzak i jego powierzchni bazowych, b) uchwyt z próbką wraz z oznaczeniem wspólnych baz z zderzakiem*

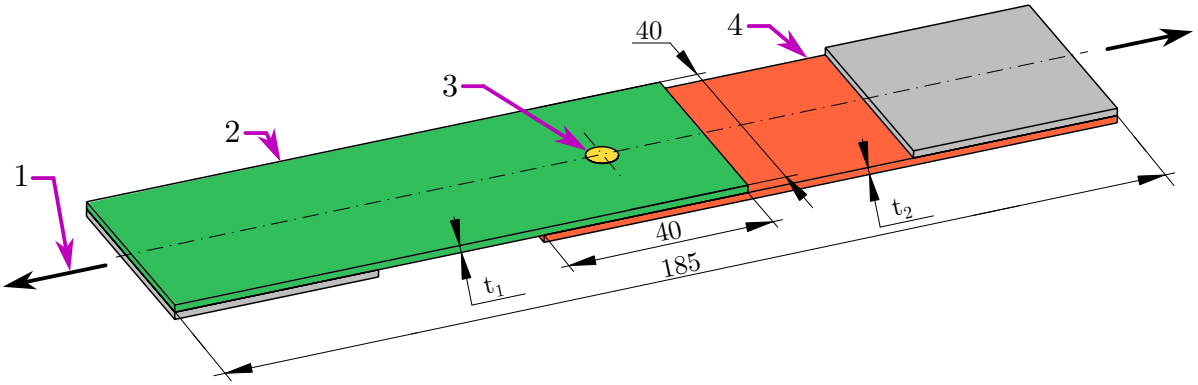
W celu zachowania wspólnego układu odniesienia, wykorzystano bazy opisane numerami 2 i 3 na rysunku 3.23. Docisk (numer 5) dociska próbkę przemieszczający się liniowo w rowku teowym wewnątrz uchwytu (numer 7) pozycjonuje próbkę względem wyfrezowanych na uchwycie baz. Śruby oznaczone numerem 4 służyły do przykręcenia i zablokowania docisków. Dzięki zachowaniu operacji, w ramach prób na skręcanie uzyskano akceptowalną

powtarzalność dla pozycji złącza opisanego jako numer 8 na rysunku 3.23.

Rejestracja danych pomiarowych w postaci kąta obrotu (φ) silnika i wartości momentu obrotowego (M) odbywa się w trybie ciągłym, a dane transferowane są z mikrokontrolera *ESP32* bazującego na dwurdzeniowym procesorze *Dual Core Tensilica LX6*. Pierwotna wersja stanowiska zakładała zastosowanie mikrokontrolera *Arduino UNO*, jednakże program transferując dane przez port *USB* spowalniał pracę silnika co w rezultacie dawało inną niż zakładano prędkość obrotową. Dzięki zastosowaniu mikrokontrolera *ESP32* rozdzielono pracę silnika i odczyt aktualnej wartości momentu obrotowego na dwa rdzenie. Do odczytu danych wykorzystano program *CoolTerm*.

3.4 Badania nośności i energochłonności zniszczenia złączy CR wg przedmiotowej normy ISO 12996

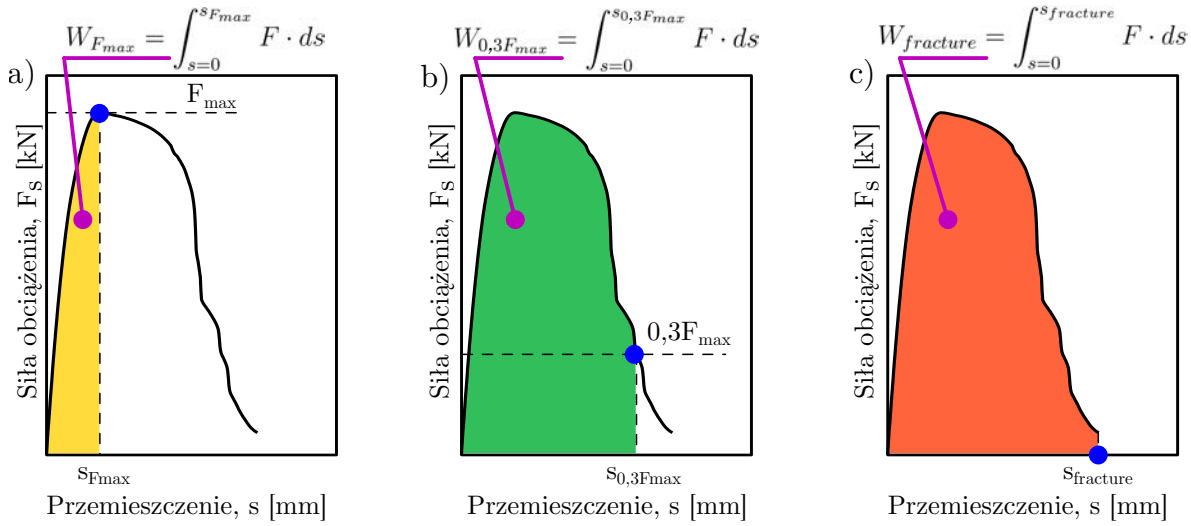
W środowisku naukowym, zależnie od zespołu naukowców stosowane są różne szerokości próbek przez co uzyskane dane nie są spójne. W niniejszej dysertacji analizy nośności zostały wykonane w oparciu o zalecenia zawarte w normie ISO 12996 [15]. Na rysunku 3.24 przedstawiono schemat przygotowanej próbki przeznaczonej do przeprowadzonych badań wytrzymałościowych. Numerem 1 oznaczono kierunek działania siły obciążenia. Numerem 2 oznaczono górną spośród łączonych warstw, na której widać położenie miejsca scalenia (numer 3). Dolna warstwa materiału została oznaczona numerem 4.



Rys. 3.24. *Próbka złącza zakładkowego i jej charakterystyczna geometria*

Krzywe zależności siły obciążenia względem przemieszczenia zarejestrowano z zastosowaniem maszyny Instron 3382. W trakcie prób przyjęto wartość przemieszczenia 10 mm/min. Dla każdego z analizowanych wariantów wykonano po 5 próbek.

Energia zniszczenia w próbie rozciągania jest obliczana w celu oceny zdolności materiału do absorbowania energii przed zniszczeniem. Znając charakterystykę jego zachowania, można projektować konstrukcje z uwzględnieniem rzeczywistego współczynnika bezpieczeństwa. Zgodnie z normą ISO 12996 [15], dla złączy przetłaczanych definiuje się 3 zależności do określania energii wynikającej z przenoszonego obciążenia przez złącze, a ich graficzną reprezentację przedstawiono na rysunku 3.25.



Rys. 3.25. *Graficzna interpretacja określanej energii wg normy ISO 12996 dla: a) maksymalnej siły nośności, b) do osiągnięcia 0,3Fmax, c) całkowitego przemieszczenia rozdzielenia złącza*

Pierwszą wartością energii określoną jako $W_{F_{max}}$ jest pole powierzchni mierzone (rysunek 3.25a) pod krzywą z próby rozciągania zakładkowego połączenia do osiągnięcia maksymalnej wartości siły F_{max}. Obszar pomiaru w przypadku energii zniszczenia $W_{0,3F_{max}}$ (3.25b) mierzony jest do osiągnięcia wartości $F_{0.3Max}$ po przekroczeniu maksymalnej wartości siły. Z kolei pole powierzchni zależności siły obciążenia od przemieszczenia dla całkowitej energii zniszczenia($W_{fracture}$), który obejmuje pełny zarejestrowany zakres w próbie rozciągania przedstawiono na rysunku 3.25c.

4 Badania doświadczalne i analizy uzyskanych wyników

4.1 Wpływ zastosowania dodatkowego elementu odkształcalnego na formowanie złącza przetłaczanego

4.1.1 Połączenia dwóch warstw wybranych gatunków materiału o grubości 1,5 mm

W celu określenia wpływu dodatkowego elementu odkształcalnego na formowania złącza przetłaczanego z zastosowaniem dwóch warstw wybranych gatunków materiału o grubości 1,5 mm wykonano obserwację geometrii na przekroju złącza. Zestawienie aranżacji przedstawiono w tabeli 4.1. W zastawieniu zawarto identyfikator złącza Lp., oznaczenie gatunku materiału dla poszczególnych warstw, a także wynik z pomiaru charakterystycznych parametrów zamka definiowanych dla połączenia przetłaczanego. Celem lepszego zobrazowania uzyskanych wyników, zastosowano wypełnienie komórek, których oznaczenie zawarto w tabeli 4.2.

Tabela 4.1. *Zestawienie aranżacji łączenia dwóch warstw materiału grubości 1,5 mm ze zmiennym gatunkiem i wzajemnym usytuowaniem blach*

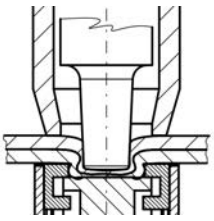
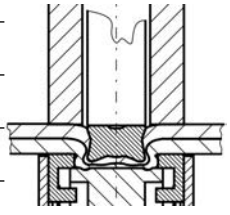
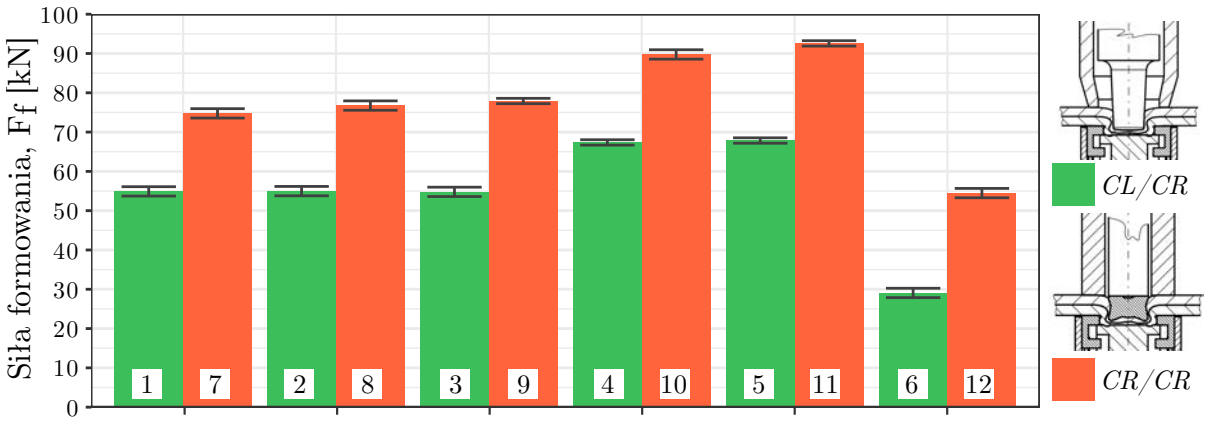
Lp.	Zestaw narzędzi	Górna blacha	Dolna blacha	Charakterystyczne parametry zamka defniowane dla połączenia przetłaczanego	
		Oznaczenie gatunku materiału		t_n [mm]	t_u [mm]
1	 *CL/CR*	DX51D+Z	DX51D+Z	0,35	0,23
2		DX51D+Z	HX340LAD	0,38	0,17
3		HX340LAD	DX51D+Z	0,35	0,19
4		DX51D+Z	HCT690T	0,33	0,10
5		HCT690T	DX51D+Z	0	0
6		EN AW-5754	EN AW-5754	0,46	0,23
7	 *CR/CR*	DX51D+Z	DX51D+Z	0,27	0,34
8		DX51D+Z	HX340LAD	0,33	0,21
9		HX340LAD	DX51D+Z	0,35	0,22
10		DX51D+Z	HCT690T	0	0
11		HCT690T	DX51D+Z	0	0
12		EN AW-5754	EN AW-5754	0,27	0,55

Tabela 4.2. *Przyjęty system oznaczenia związany z uformowanym połączeniem*

Kolor	Wyjaśnienie zastosowanego oznaczenia
	Wartość parametru t_n lub t_u mniejsza niż 0,15 mm
	Brak ukształtowanego połączenia pomiędzy warstwami materiału
	Przerwanie ciągłości górnej warstwy materiału
	Przerwanie ciągłości dolnej warstwy materiału

Przyjęte oznaczenia Lp. z zestawienia zawartego w tabeli 4.1, zostały wykorzystane do identyfikacji złączy z uwzględnieniem dwóch zastosowanych zestawów narzędzi. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu słupkowego na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. *Zestawienie siły formowania złącza przetłaczanego wykonanego zestawem narzędzi CL/CR i CR/CR dla różnych materiałów blach*

W przypadku łączenia dwóch blach DX51D+Z zastosowanie dodatkowego elementu odkształcalnego spowodowało wzrost maksymalnej wartości siły formowania o 36,16%.

Dla połączeń, w których jako górną blachę zastosowano DX51D+Z zaś dolną spośród łączonych warstw była blacha w gatunku HX340LAD zaobserwowano wzrost siły formowania z zestawem narzędzi *CR/CR* o 39,6%. Zastosowanie nita w złączach o odwrotnym usytuowaniu blach DX51D+Z i HX340LAD skutkowało wzrostem siły formowania o 42,19%.

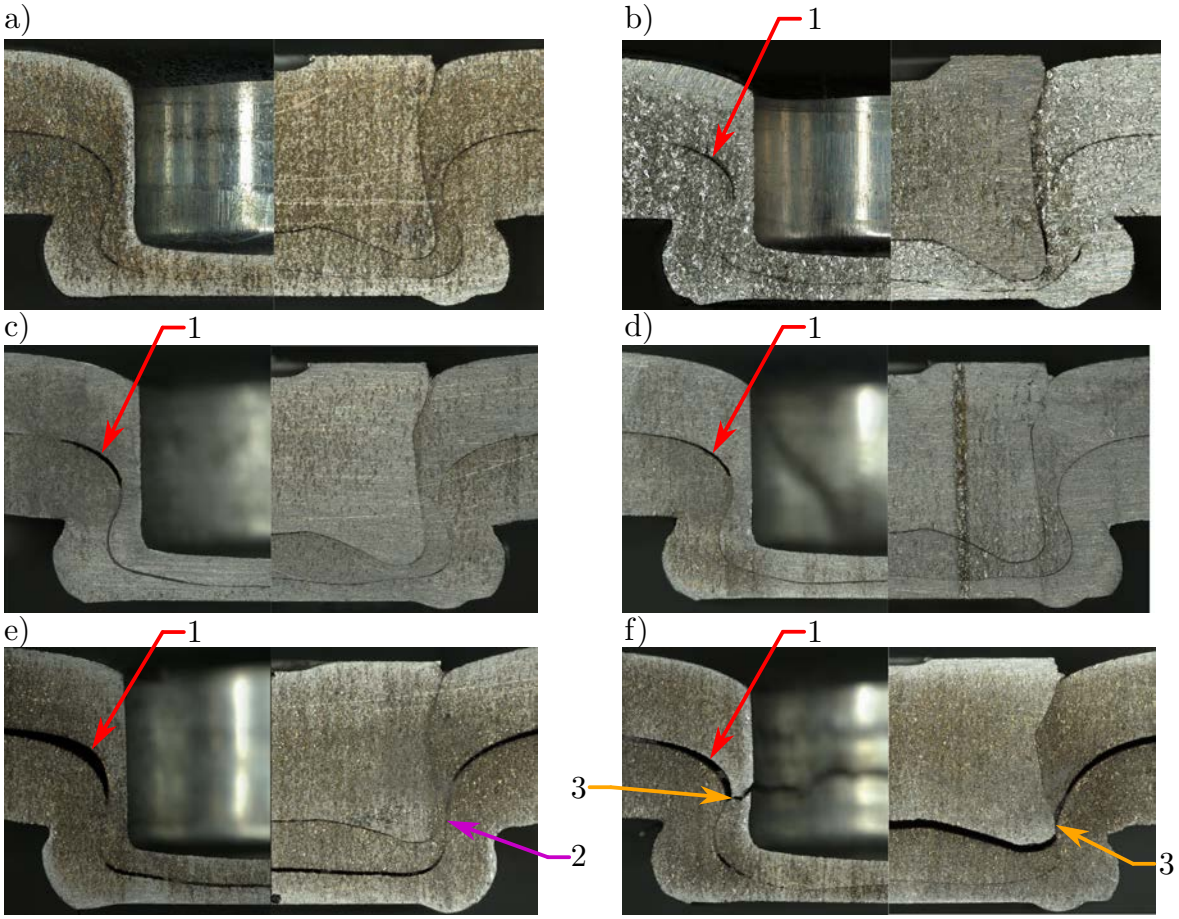
Połączenia w których podjęto próbę scalenia blachy DX51D+Z i HCT690T cechowały się największą spośród obserwowanych aranżacji wartości siły formowania. W przypadku ułożenia blachy DX51D+Z jako górna warstwa w metodzie *CR/CR* zaobserwowano wzrost o 33,23% wartości siły formowania. W odwrotnej aranżacji warstw z gatunku HCT690T i DX51D+Z wzrost siły formowania był większy i wyniósł 36,41%.

Spośród obserwowanych aranżacji największy wzrost pomiędzy metodami *CL/CR* i *CR/CR* został zaobserwowany w przypadku połączenia dwóch blach z gatunku EN AW-5754 i wynosi 87,4%.

Dla wszystkich aranżacji układu materiałów blach wykonanych z zastosowaniem do-

datkowego elementu odkształcalnego wymagały większej siły do ukształtowania złącza w stosunku do połączeń wykonanego zestawem narzędzi *CL/CR*.

Na rysunku 4.2 przedstawiono makrostruktury wykonanych złączy. Dla każdego z rysunków po lewej stronie pokazano strukturę budowy ukształtowaną zestawem narzędzi *CL/CR*, zaś po prawej przedstawiono strukturę budowy na przekroju złącza z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego (*CR/CR*).



Rys. 4.2. *Przekroje złączy przetłaczanych wykonanych zestawami narzędzi CL/CR i CR/CR dla blach o grubości 1,5 mm w zależności od zastosowanych materiałów, opisanych jako blacha górna x dolna: a) DX51D+Z x DX51D+Z, b) EN AW-5754 x EN AW-5754, c) DX51D+Z x HX340LAD, d) HX340LAD x DX51D+Z, e) DX51D+Z x HCT690T, f) HCT690T x DX51D+Z*

Prawidłowo wykonane złącze zarówno z zastosowaniem zestawu narzędzi *CL/CR* jak i *CR/CR* charakteryzuje się dodatnią wartością parametrów t_n i t_u, a także zachowaniem ciągłości łączonych warstw.

Wartość najmniejszej grubości górnej warstwy w obszarze ukształtowanej geometrii zamka dla dwóch blach w gatunku DX51D+Z (rysunek 4.2a) (t_n) w metodzie *CR/CR* był mniejszy o 22,8% w stosunku do zastosowanego zestawu narzędzi *CL/CR*, z kolei wzajemna wartość zablokowania materiału t_u była większa o 47,8%.

Połączenia dwóch warstw blach aluminiowych EN AW-5754 (rysunek 4.2b) charakteryzują największe różnice pomierzonych wartości spośród całego zestawienia w ramach

analizowanej kategorii. Parametr złącza przetłaczanego t_n z zastosowaniem zestawu narzędzi *CR/CR* był mniejszy o 41%. Zaobserwowano większą wartość wzajemnego zablokowania materiału t_u o 139%. Zauważono i oznaczono na rysunku 4.2 numerem 1 szczelinę w przypadku złącza ukształtowanego zestawem narzędzi *CL/CR*.

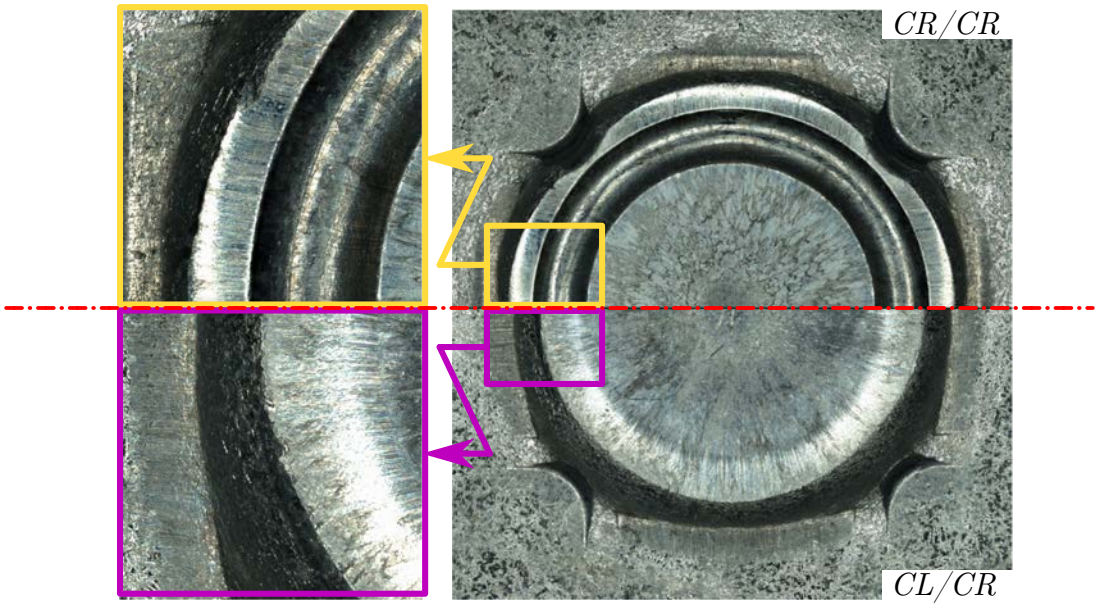
W przypadku złączy gdzie górną warstwą materiału był gatunek DX51D+Z zaś dolną HX340LAD z zastosowaniem zestawu narzędzi *CL/CR* również zaobserwowano szczelinę pomiędzy łączonymi warstwami (numer 1 na rysunku 4.2c). Pomiar charakterystycznych parametrów zamka połączenia przetłaczanego wykazał, iż warianty z nitem osiągnęły mniejszą wartość t_n o 13,1%. Wartość wzajemnego zablokowania materiału w tej aranżacji była większa o 23,5% dla połączeń z łącznikiem.

Dla przeciętego złącza gdzie górną warstwą był gatunek HX340LAD, a dolną DX51D+Z tak samo jak w odwrotnej aranżacji w połączeniu bez nita zaobserwowano szczelinę (numer 1 na rysunku 4.2c). Średnia wartość wyniku z pomiaru parametru t_n w obu metodach był identyczny. Różnicę zaobserwowano w wielkości uformowanego zamka t_u, która dla złącza z nitem była większa o 15,7%.

Dla złączy w których jako górną warstwą zastosowano gatunek DX51D+Z, a dolną HCT690T prawidłowo ukształtowane złącze osiągnięto jedynie z zastosowaniem zespołu narzędzi *CL/CR*. Zaobserwowano szczelinę wewnątrz złącza oznaczoną na rysunku 4.2e numerem 1. Połączenie z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego nie uformowało zamka (4.2e numer 2).

Obserwacja na przekroju złącza gatunku HCT690T jako górna warstwa z blachą DX51D+Z wykazała dla obu zestawów narzędzi pęknięcie górnej spośród łączonych blach. Miejsce defektu oznaczono numerem 3 na rysunku 4.2f.

Na rysunku 4.3 przedstawiono zestawienie wyglądu przetłoczenia powstałego od strony matrycy złącza dwóch blach gatunku DX51D+Z przetłaczanego wykonanego dwoma metodami kształtowania.



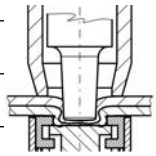
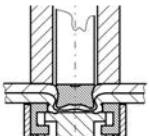
Rys. 4.3. *Wygląd przetłoczenia złącza uformowanego zestawem narzędzi i nitem - CR/CR (rysunek górny), oraz zestawem i stemplem - CL/CR (rysunek dolny). Materiał DX51D+Z o grubości t1=t2=1,5 mm*

Pomimo zastosowania tej samej matrycy formowania złącze, uformowany kształt przetłoczenia widoczny od strony matrycy znacząco się różni. Jest to związane z objętością materiału jaka była wtłaczana w wykrój matrycy. W przypadku metody *CL/CR* stempel kończy formować złącze w odległości oddalonej od dna matrycy o 0,75 mm, czyli mierząc od górnej powierzchni blachy wciskany był w materiale na głębokość 2,25 mm. W przypadku metody *CR/CR* objętość wtłaczana odpowiada objętości odkształcalnego nita.

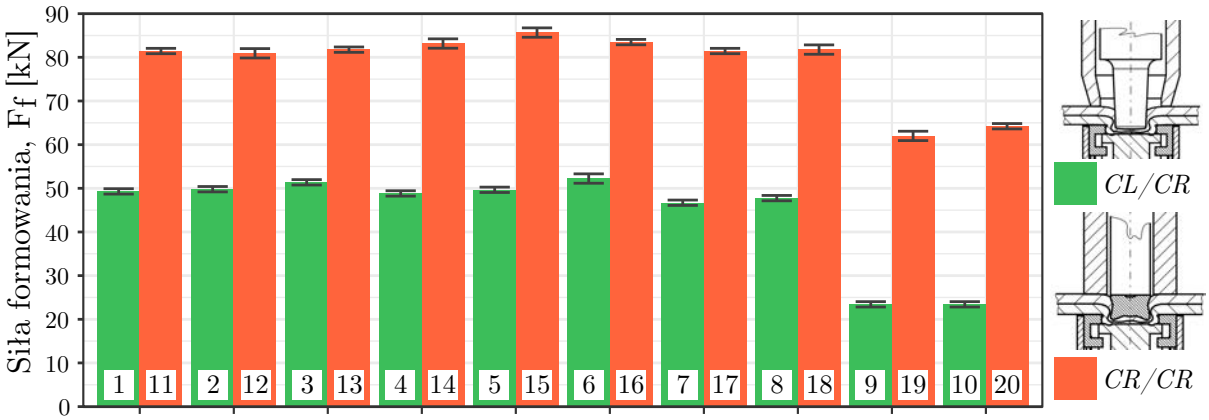
4.1.2 Połączenia dwóch warstw wybranych gatunków materiału o grubości 0,7 i 1,5 mm

W celu określenia wpływu dodatkowego elementu odkształcalnego na formowania złącza przetłaczanego z zastosowaniem dwóch warstw wybranych gatunków materiału o grubości 0,7 i 1.5 mm, wykonano obserwację geometrii na przekroju złącza. Zestawienie aranżacji przedstawiono w tabeli 4.3. W zastawieniu tym zawarto identyfikator złącza Lp., oznaczenie gatunku i grubości materiału dla poszczególnych warstw, a także wynik z pomiaru charakterystycznych parametrów zamka, definiowanych dla połączenia przetłaczanego.

Tabela 4.3. *Zestawienie parametrów t_n i t_u dla rożnego układu warstw i materiałów o dwóch rożnych grubościach 0,7 mm i 1,5 mm*

Lp.	Zestaw narzędzi	Górna blacha		Dolna blacha		Charakterystyczne parametry zamka defniowane dla połączenia przetłaczanego	
		Oznaczenie gatunku materiału	t_1 [mm]	Oznaczenie gatunku materiału	t_2 [mm]	t_n [mm]	t_u [mm]
1	 *CL/CR*	DX51D+Z	1,5	DX51D+Z	0,7	0,62	0,19
2		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	1,5	0,13	0,28
3		DX51D+Z	1,5	HX340LAD	0,7	0,65	0,1
4		HX340LAD	0,7	DX51D+Z	1,5	0,19	0,1
5		HX340LAD	1,5	DX51D+Z	0,7	0,7	0,09
6		DX51D+Z	0,7	HX340LAD	1,5	0,11	0,18
7		DX51D+Z	1,5	H220PD	0,7	0,66	0,09
8		H220PD	0,7	DX51D+Z	1,5	0,24	0,10
9		EN AW-5754	1,5	EN AW-5754	0,7	0,64	0,12
10	 *CR/CR*	EN AW-5754	0,7	EN AW-5754	1,5	0,19	0,26
11		DX51D+Z	1,5	DX51D+Z	0,7	0,36	0,40
12		DX51D+Z	0,7	DX51D+Z	1,5	0,11	0,40
13		DX51D+Z	1,5	HX340LAD	0,7	0,52	0,31
14		HX340LAD	0,7	DX51D+Z	1,5	0	0
15		HX340LAD	1,5	DX51D+Z	0,7	0,49	0,34
16		DX51D+Z	0,7	HX340LAD	1,5	0	0
17		DX51D+Z	1,5	H220PD	0,7	0,42	0,42
18		H220PD	0,7	DX51D+Z	1,5	0,19	0,30
19		EN AW-5754	1,5	EN AW-5754	0,7	0,38	0,71
20		EN AW-5754	0,7	EN AW-5754	1,5	0,06	0,63

Przyjęte oznaczenia Lp. zawarte w tabeli 4.3, zostały wykorzystane do zestawienia maksymalnych wartości siły formowania, z uwzględnieniem dwóch zastosowanych zestawów narzędzi. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu słupkowego na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. *Zestawienie sił formujących złączy przetłaczanych wykonanych metodami CL/CR i CR/CR*

Połączenie dwóch warstw materiału w gatunku DX51D+Z metodą *CR/CR* z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego dla aranżacji, gdzie blacha o grubości 1,5 mm została zastosowana jako górna warstwa (Lp. 1 i 11) wymagało o 65,2% większej siły formowania w stosunku do złącza ukształtowanego zestawem narzędzi *CL/CR*. Ułożenie z blachą 0,7 mm jako górna blacha wymagało zwiększenia siły o 62,5%.

Aranżacja w której jako górną warstwę zastosowano gatunek DX51D+Z o grubości 1,5 mm zaś dolną warstwą była blacha HX340LAD o grubości 0,7 mm (Lp. 2 i 12) w połączeniu z nitem wymagała siły większej o 59,2% niż dla złącza wykonane bez nita. Z kolei odwrotne usytuowanie warstw (Lp. 3 i 13) wymagało większej siły o 70,4%.

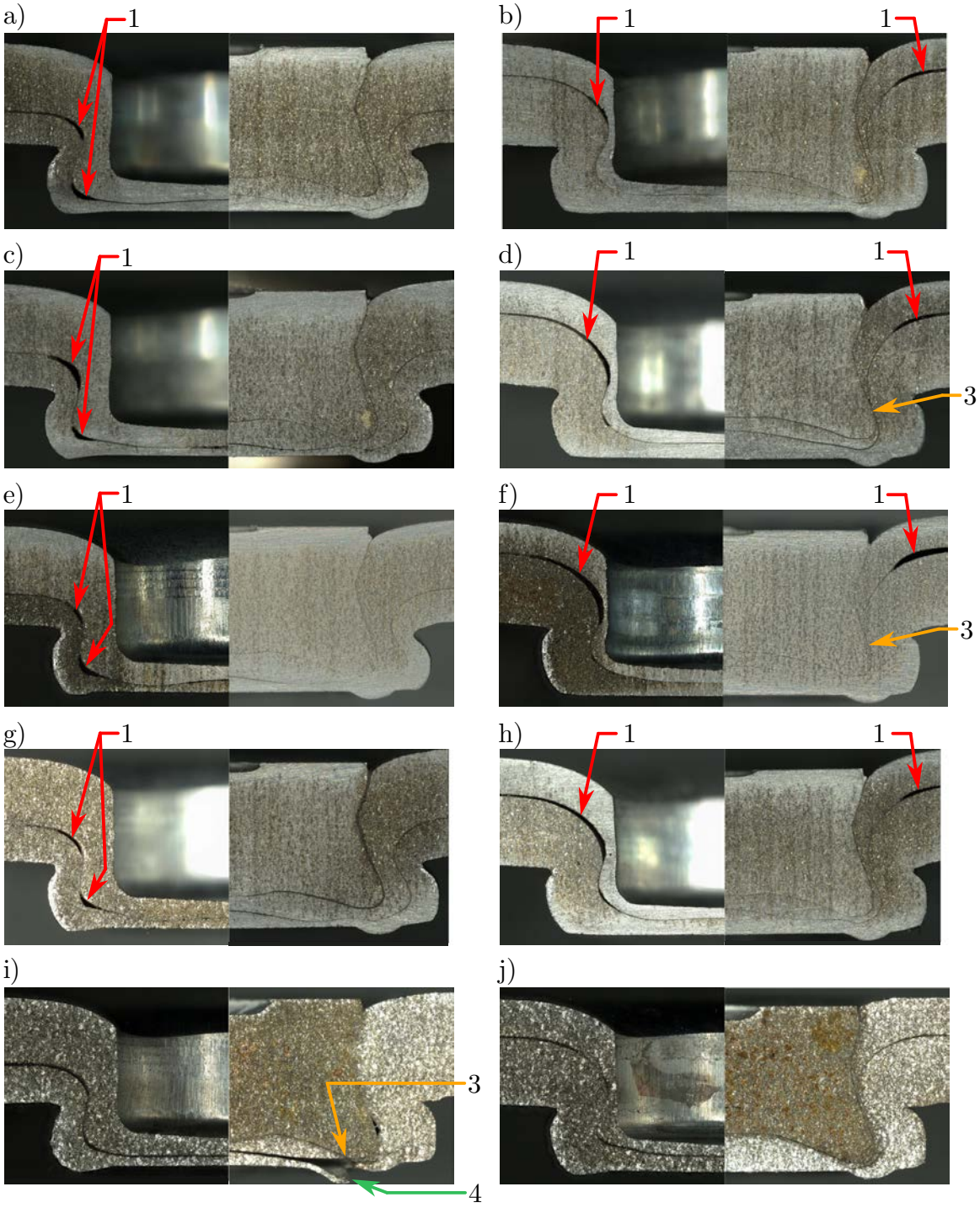
Kolejnym wariantem było połączenie składające się z blachy w gatunku HX340LAD o grubości 1,5 mm i dolnej warstwy DX51D+Z o grubości 0,7 mm (Lp. 5 i 15). W tym przypadku wzrost siły względem metody *CL/CR* wyniósł 72,6%. Dla połączenia wykonanego metodą *CR/CR* z odwróconym usytuowaniem łączonych warstw (HX340LAD 1,5 mm jako dolna blacha tj. Lp. 6 i 16), zaobserwowano większą wartość siły formowania o 59,8% w stosunku do połączenia bez nita.

Połączenie warstwy o grubości 1,5 mm w gatunku DX51D+Z z blachą H220PD o grubości 0,7 mm (Lp 7 i 17) metodą *CR/CR* wymagało większej siły formowania o 74,4% w porównaniu do złącza ukształtowanego zestawem narzędzi *CL/CR*. Do wykonania połączenia z nitem w odwrotnej aranżacji warstw (H220PD o grubości 0,7 mm jako górna blacha tj. Lp. 8 i 18), maszyna zarejestrowała wartość większą o 71,2%.

Największym wzrostem siły formowania w metodzie *CR/CR* w odniesieniu do połączeń *CL/CR* charakteryzowały się złącza dwóch warstw wykonanych w blachach aluminiowych w gatunku EN AW-5754. W przypadku zastosowania górnej blachy o grubości 1,5 mm i dolnej 0,7 mm (Lp. 9 i 19) połączenie z nitem wymagało siły większej o 164,8%. Porównanie siły formowania złącza dla aranżacji, w której jako górną blachę zastosowano cieńszą spośród łączonych warstw (Lp 10 i 20) wykazało, że do ukształtowania złącza z nitem wymagana siła była większa o 174,1% niż w połączeniu bez łącznika.

Na rysunku 4.5 przedstawiono makrostruktury wykonanych złączy. Dla każdego z zestawień po lewej stronie pokazano strukturę budowy ukształtowaną zestawem narzędzi

CL/CR, zaś po prawej widoczna jest struktura budowy na przekroju złącza z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego (*CR/CR*).



Rys. 4.5. *Makrostruktury złączy przetłaczanych wykonane metodami CL/CR i CR/CR. Warianty opisano jako gatunek górnej blachy- jej grubość x gatunek dolnej blachy - jej grubość w mm: a) DX51D+Z-1,5 x DX51D+Z-0,7, b) DX51D+Z-0,7 x DX51D+Z-1,5, c) DX5D1-1,5 x HX340LAD-0,7, d) HX340LAD-0,7 x DX51D+Z-0,7, e) HX340LAD-1,5 x DX51D+Z-0,7, f) DX51D+Z-0,7 x HX340LAD-1,5, g) DX51D+Z-1,5 x H220-0,7, h) H220-0,7 x DX51D+Z-1,5, i) EN AW-5754-1,5 x EN AW-5754-0,7, j) EN AW-5754-0,7 x EN AW-5754-1,5*

Na rysunku 4.5a przedstawiono połączenia dwóch warstw w gatunku DX51D+Z, gdzie grubość górnej warstwy wynosi 1,5 mm. Dla metody *CL/CR* zauważono szczeliną wewnątrz złącza oznaczoną numerem 1. Pomiar charakterystycznych parametrów ukształtowania blach wykazał, iż wartość t_n w metodzie łączenia *CR/CR* osiągnięto wartość mniejszą o 41,9% w stosunku do złącza bez nita. Wzajemne zapłynięcie blach t_u dla złącza z zastosowaniem łącznika jest większa o 110%. Dla aranżacji o odwróconej kolejności warstw (z zastosowaniem blachy 0,7 mm od strony stempla) parametr t_n w złączu z nitem miał mniejszą wartość o 15,3%. Wartość zamka t_u dla złącza *CR/CR* była większa w stosunku do metody *CL/CR* o 42,8%. Zaobserwowano również wystąpienie szczelin, których położenie oznaczono numerem 1 na rysunku 4.5b.

Zestawienie geometrii na przekroju złącza w której jako górną warstwę o grubości 1,5 mm w gatunku DX51D+Z połączono z blachą 0,7 mm HX340LAD przedstawiono na rysunku 4.5c. Zaobserwowano szczeliny wewnątrz złącza w obszarze zamka w przypadku metody *CL/CR*. Zmierzona wartość parametru t_n w połączeniu z zastosowanym dodatkowym elementem odkształcalnym była mniejsza o o 20% w stosunku do próbki wykonanej zestawem narzędzi *CL/CR*. Duży wzrost wartości zaobserwowano w przypadku wzajemnego zablokowania materiału t_u, która była o 210% większa w odniesieniu do połączenia bez nita. Odwrotne usytuowanie łączonych warstw (HX340LAD o grubości 0,7 mm jako górna blacha) przedstawiono na rysunku 4.5d. Dla obu metod widoczna jest szczelina oznaczona numerem 1. Prawidłowo wykonane złącze uzyskano jedynie w metodzie *CL/CR*. W przypadku połączenia z nitem (*CR/CR*) doszło do zerwania ciągłości materiału górnej powierzchni blachy w miejscu opisanym numerem 3.

Połączenie blachy HX340LAD o grubości 1,5 mm z blachą DX51D+Z 0,7 mm w przypadku metody *CL/CR* również wykazało powstanie szczelin wewnątrz złącza w pobliżu uformowanego zamka, (rys. 4.5e). Wartość uzyskana z pomiaru charakterystycznego parametru zamka na przekroju złącza t_n w połączeniu z dodatkowym elementem odkształcalnym była mniejsza o 30% w porównaniu do złącza bez łącznika. Znacznie większą wartość zaobserwowano w przypadku wzajemnego zablokowania materiału t_n, która była większa o 278% dla wariantu z nitem. W przypadku aranżacji o odwrotnym usytuowaniu łączonych warstw (blacha DX51D+Z 0,7 mm od strony stempla) z warstwą HX340LAD o grubości 1,5 mm uzyskała prawidłowo wykonane złącze jedynie w przypadku metody *CL/CR*. Zastosowanie dodatkowego elementu odkształcalnego skutkowało zerwaniem ciągłości górnej, cieńszej warstwy. Miejsce przerwania oznaczono numerem 3 na rysunku 4.5f. Dla obu metod zaobserwowano powstanie szczelin wewnątrz złącza.

Analiza geometrii na przekroju złącza wykonanego zestawem narzędzi *CL/CR* górnej warstwy w gatunku DX51D+Z o grubości 1,5 mm z dolną blachą H220PD o grubości 0,7 mm przedstawiono na rysunku 4.5g. Zaobserwowano i oznaczono szczelinę wewnątrz złącza w obszarze zamka numerem 1. Dla obu metod uzyskano prawidłowo ukształtowane połączenie. Pomiar wartości t_n w połączeniu z nitem był mniejszy o 36,3% w stosunku do złącza bez łącznika. Znaczący wzrost zauważono w przypadku wielkości uformowanego zamka t_u, którego wartość była większa o 366%. Przekrój połączenia dla odwrotnej aranżacji blach został przedstawiony na rysunku 4.5h. Pomimo widocznych szczelin wewnątrz

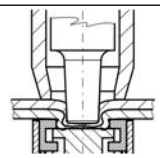
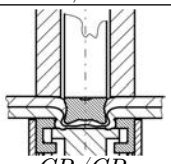
złącza dla obu metod formowania uzyskano prawidłowo wykonane scalenie blach. Wartość t_n w metodzie *CR/CR* była mniejsza o 20,8% a wielkość zamka t_u w przypadku połączenia z nitem wzrosła o 200%.

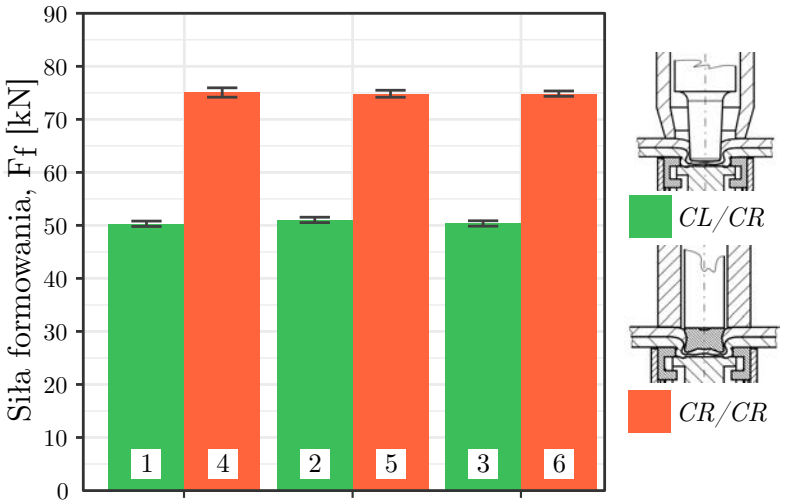
Połączenie dwóch blach aluminiowych gatunku EN AW-5754 o grubości górnej warstwy 1,5 mm i dolnej 0,7 mm zostało prawidłowo ukształtowane jedynie dla złącza wykonanego zestawem narzędzi *CL/CR*. Dla złącza wykonanego w technologii *CR* zaobserwowano przebicie zarówno górnej jak i dolnej warstwy. Miejsce przerwania oznaczono numerami odpowiednio dla górnej numerem 3 i 4 w przypadku dolnej blachy (rys. 4.5i). Pomimo lokalnego zerwania materiału blach uzyskano dodatnie wartości charakterystycznych parametrów dla złączy przetłaczanych. Wartość t_n w połączeniu z nitem była o 40% mniejsza, z kolei wartość zamka t_u uległa największemu wzrostowi spośród obserwowanych aranżacji bo aż o 490%. Przy odwrotnym ułożeniu grubości warstw, pomimo cieńszej warstwy zastosowanej od strony stemplowej w obydwu metodach uzyskano złącze z zachowaniem ciągłości blach. Dla połączenia z nitem zaobserwowano spadek wartości t_u o 68,4% i najmniejszą grubość blachy tuż pod nitem o grubości 0,06 mm. Podobnie jak w pozostałych połączeniach wartość zamka ukształtowanego zestawem narzędzi *CR/CR* z dodatkowym łącznikiem była wyższa o 142,3%. Przekroje dla obu metod przedstawiono na rysunku 4.5j.

4.1.3 Łączenie trzech warstw materiału o zmiennym ułożeniu ich grubości 1,5, 0,7, 0,7 mm

W celu określenia wpływu dodatkowego elementu odkształcalnego na formowania złącza przetłaczanego z zastosowaniem trzech warstw materiału w gatunku DX51D+Z wykonano obserwację geometrii na przekroju złącza. Zestawienie aranżacji grubości wraz z ich usytuowaniem przedstawiono w tabeli 4.4. W zastawieniu zawarto identyfikator złącza Lp., lokalizację grubości blachy poszczególnych warstw, a także wynik z pomiaru charakterystycznych parametrów geometrii zamka definiowanych dla połączenia przetłaczanego.

Tabela 4.4. *Zestawienie parametrów t_n i t_u dla rożnego układu warstw materiału blach DX51D+Z o dwóch rożnych grubościach 0,7 mm i 1,5 mm grubości 1,5 mm*

Lp.	Zestaw narzędzi	Górna blacha	Środkowa blacha	Dolna blacha	Charakterystyczne parametry zamka defniowane dla połączenia przetłaczanego			
		t_1 [mm]	t_s [mm]	t_2 [mm]	$t_{n\text{-}g\text{-}s}$ [mm]	$t_{u\text{-}g\text{-}s}$ [mm]	$t_{n\text{-}s\text{-}d}$ [mm]	$t_{u\text{-}s\text{-}d}$ [mm]
1	 *CL/CR*	1,5	0,7	0,7	0,46	0,14	0,46	0,07
2		0,7	1,5	0,7	0,11	0,12	0,74	0,11
3		0,7	0,7	1,5	0,13	0,10	0,25	0,15
4	 *CR/CR*	1,5	0,7	0,7	0,34	0,33	0,37	0,26
5		0,7	1,5	0,7	0,07	0,32	0,57	0,29
6		0,7	0,7	1,5	0	0	0,16	0,26



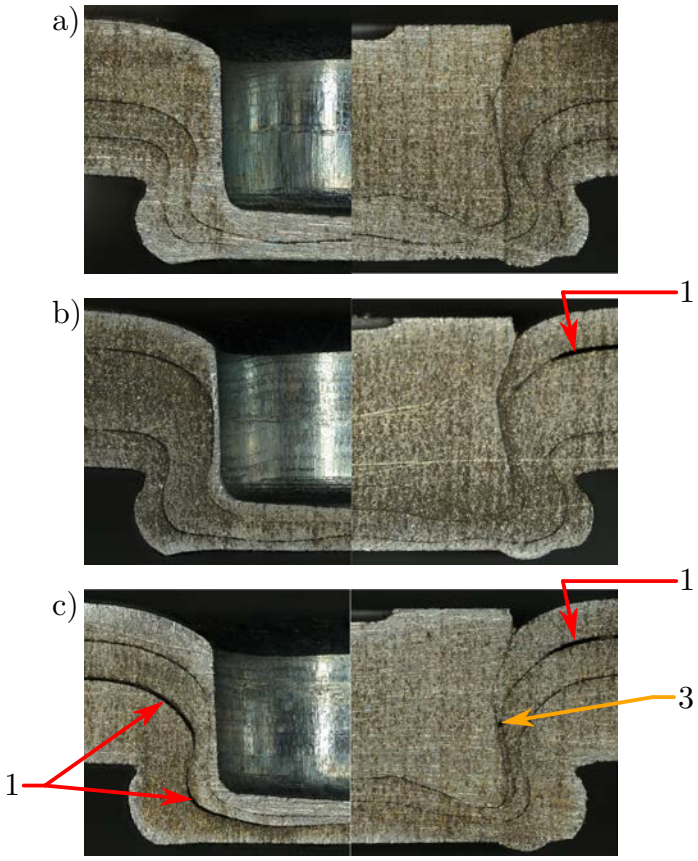
Rys. 4.6. *Zestawienie maksymalnej wartości sił formowania dla złączy przetłaczanych wykonanych metodami CL/CR i CR/CR dla trzeh warstw materialu*

Przyjęte oznaczenia Lp. zawarte w tabeli 4.4, zostały wykorzystane do zestawienia maksymalnych wartości siły formowania, z uwzględnieniem dwóch zastosowanych zestawów narzędzi. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu słupkowego na rysunku 4.6.

Wartość siły formowania dla połączenia w którym jako górną warstwę umieszczono blachę o grubości 1,5 mm była wyższa o 49% dla złącza przetłaczanego z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego (*CR/CR*). Siła potrzebna do uformowania połączenia z nitem w przypadku gdy warstwa o grubości 1,5 mm znajdowała się na pozycji środkowej w pakiecie blach, również była wyższa niż w przypadki złącza wykonanego zestawem narzędzi *CL/CR* o 47%. Ostatnią z obserwowanych pozycji była aranżacja, w któ-

rej blacha o grubości 1,5 mm znajdowała się na matrycy formowania (dolna warstwa). Do ukształtowania połączenia metodą *CR/CR* siła potrzebna do uformowania złącza przetłaczanego wzrosła o 49%, w stosunku do maksymalnej wartości siły formowania złącza *CL/CR*.

Na rysunku 4.7 przedstawiono makrostruktury wykonanych złączy, gdzie odpowiednio dla każdego z rysunków po lewej stronie pokazano strukturę budowy ukształtowaną zestawem narzędzi *CL/CR*, zaś po prawej widoczna przedstawiono strukturę budowy na przekroju złącza z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego (*CR/CR*).



Rys. 4.7. *Przekrój połączenia wykonanego dla trzech warstw materiałów DX51D+Z o różnym położeniu grubszej blachy 1,5 mm względem cieńszych o grubości 0,7 mm:*
a) górne (t_1), b) środkowe (t_s), c) dolne (t_2)

Złącza wykonane z wykorzystaniem zestawów narzędzi *CL/CR* i *CR/CR* dla połączenia trzech warstw materiału o grubości górnej blachy 1,5 mm zostały prawidłowo ukształtowane, a ich struktura budowy na przekroju złącza została przedstawiona na rysunku 4.6a. Zmierzone zostały charakterystyczne parametry zamka pomiędzy każdą z warstw. W połączeniach *CR/CR* podobnie jak w przypadku łączenia dwóch blach, zaobserwowano spadek wartości najmniejszej grubości pomiędzy poszczególnymi warstwami materiału. Wartość t_{n-g-s} była mniejsza o 26%, zaś pocienienie środkowej warstwy materiału t_{n-s-d} również osiągnęło mniejszą wartość o 19,5%, w stosunku do złącza *CL/CR*. Wartość wzajemnego zablokowania w obszarze pomiędzy górną, a środkową warstwą t_{u-g-s} w połączeniu z nitem była większa o 135%, z kolei zamek ukształtowany w relacji bla-

chy środkowej i dolnej w metodzie *CR/CR* był większy o 271% w stosunku do połączeń wykonanych zestawem narzędzi *CL/CR*.

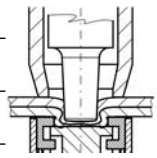
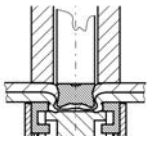
Obserwacja geometrii na przekroju złącza połączenia trzech warstw materiału w którym blachę o grubości 1,5 mm usytuowano na pozycji środkowej warstwy wykazała prawidłowo ukształtowane złącze zarówno z zastosowaniem zestawu narzędzi *CL/CR* jak i *CR/CR*. Zaobserwowano szczelinę wewnątrz złącza wykonanego dedykowanym zestawem do technologii *CR*, której lokalizacja została oznaczona numerem 1 na rysunku 4.6b. Pomiar charakterystycznych parametrów zamka wykazał, iż w przypadku złącza wykonanego w technologii *CR* osiągnięto mniejszą wartość zarówno t_{n-g-s} o 36,3% jak i t_{n-s-d} o 23% w odniesieniu do połączenia bez nita. Dla obu warstw wartość wzajemnego zablokowania materiału była większa w technologii *CR*. Wartość zamka t_{u-g-s} była większa o 166% zaś w przypadku t_{u-s-d} o 163,6%.

Ostatnią z aranżacji był wariant w którym blacha o grubości 1,5 mm umieszczona została jako dolna warstwa. Strukturę budowy na przekroju złączy przedstawiono na rysunku 4.6c. Połączenie metodą *CL/CR* pomimo widocznych szczelin pomiędzy środkową, a dolną warstwą zachowało ciągłość łączonych warstw przy dodatnich parametrach zamka. W przypadku złącza wykonanego metodą *CR/CR* doszło do utraty ciągłości materiału górnej blachy, oznaczonej na rysunku numerem 3.

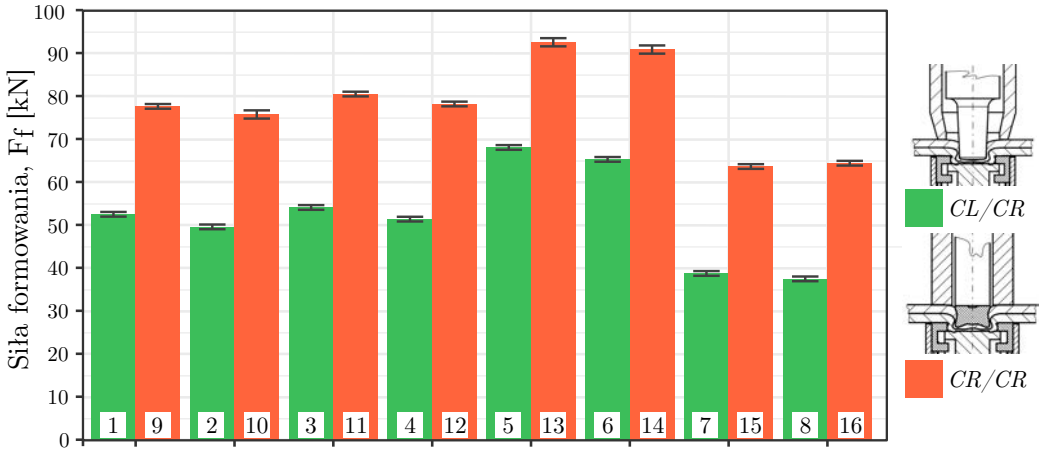
4.1.4 Połączenia trzech warstw wybranych gatunków z dwiema blachami DX51D+Z o grubości 0,7 mm

W celu określenia wpływu dodatkowego elementu odkształcalnego na formowania złącza przetłaczanego z zastosowaniem trzech warstw wybranych gatunków materiału o grubości 1,5 mm z dwiema warstwami blachy DX51D+Z o grubości 0,7 mm wykonano obserwację geometrii na przekroju złącza. Zestawienie aranżacji przedstawiono w tabeli 4.5. W zastawieniu zawarto identyfikator złącza Lp., oznaczenie gatunku materiału oraz określono jego położenie w złączu. Przedstawiono również wynik pomiaru charakterystycznych parametrów zamka definiowanych dla połączenia przetłaczanego.

Tabela 4.5. *Zestawienie parametrów połączenia t_n i t_u dla kombinacji układu trzech warstw. Dla każdej aranżacji jako środkową blachą zastosowano DX51D+Z o grubości $t_s = 0,7$ mm*

Lp.	Zestaw narzędzi	Górna blacha		Dolna blacha		Charakterystyczne parametry zamka defniowane dla połączenia przetłaczanego			
		Oznaczenie gatunku materiału	t_1 [mm]	Oznaczenie gatunku materiału	t_2 [mm]	$t_{n\text{-}g\text{-}s}$ [mm]	$t_{u\text{-}g\text{-}s}$ [mm]	$t_{n\text{-}s\text{-}d}$ [mm]	$t_{u\text{-}s\text{-}d}$ [mm]
1	 *CL/CR*	**HX340LAD**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	0,48	0,15	0,46	0,09
2		DX51D+Z	0,7	**HX340LAD**	1,5	0,09	0,13	0,26	0,08
3		**HX420LAD**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	0,48	0,14	0,47	0,08
4		DX51D+Z	0,7	**HX420LAD**	1,5	0,10	0,12	0,21	0,04
5		**HCT690T**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	0,47	0,14	0,46	0,18
6		DX51D+Z	0,7	**HCT690T**	1,5	0,11	0,06	0,22	0,03
7		**EN AW-5754**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	0,42	0,10	0,46	0,02
8		DX51D+Z	0,7	**EN AW-5754**	1,5	0	0	0,29	0,07
9	 *CR/CR*	**HX340LAD**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	0,33	0,28	0,42	0,25
10		DX51D+Z	0,7	**HX340LAD**	1,5	0,08	0,24	0,18	0,13
11		**HX420LAD**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	0,32	0,25	0,42	0,19
12		DX51D+Z	0,7	**HX420LAD**	1,5	0,06	0,26	0,14	0,08
13		**HCT690T**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	0	0	0,41	0,23
14		DX51D+Z	0,7	**HCT690T**	1,5	0,05	0,15	0,05	0
15		**EN AW-5754**	**1,5**	DX51D+Z	0,7	0,29	0,35	0,36	0,24
16		DX51D+Z	0,7	**EN AW-5754**	1,5	0	0	0,27	0,28

Przyjęte oznaczenia Lp. zawarte w tabeli 4.5, zostały wykorzystane do zestawienia maksymalnych wartości siły formowania, z uwzględnieniem dwóch zastosowanych zestawów narzędzi. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu słupkowego na rysunku 4.8.



Rys. 4.8. *Zestawienie maksymalnych wartości sił formowania złączy przetłaczanych składających się z trzech łączonych warstw, wykonanych zestawem narzędzi CL/CR i CR/CR*

Dla połączenia o trzech warstwach materiału w którym górne położenie stanowiła blacha HX340LAD i grubości 1,5, a dwoma pozostałymi były warstwy DX51D+Z o grubości 0,7 mm (Lp. 1 i 9) zaobserwowano różnice w sile potrzebnej do ukształtowania złącza. Tak jak w przypadku dwóch warstw materiału, połączenie z dodatkowym elementem odkształcalnym wymagało siły większej o 47,8% w stosunku do złącza wykonanego zestawem narzędzi *CL/CR*. W przypadku złącza w którym blacha HX340LAD została usytuowana jako dolna warstwa (Lp. 2 i 10), wartość siły w przypadku zestawu narzędzi *CR/CR* była większa o 52,7% niż w połączeniu bez zastosowania łącznika (*CL/CR*).

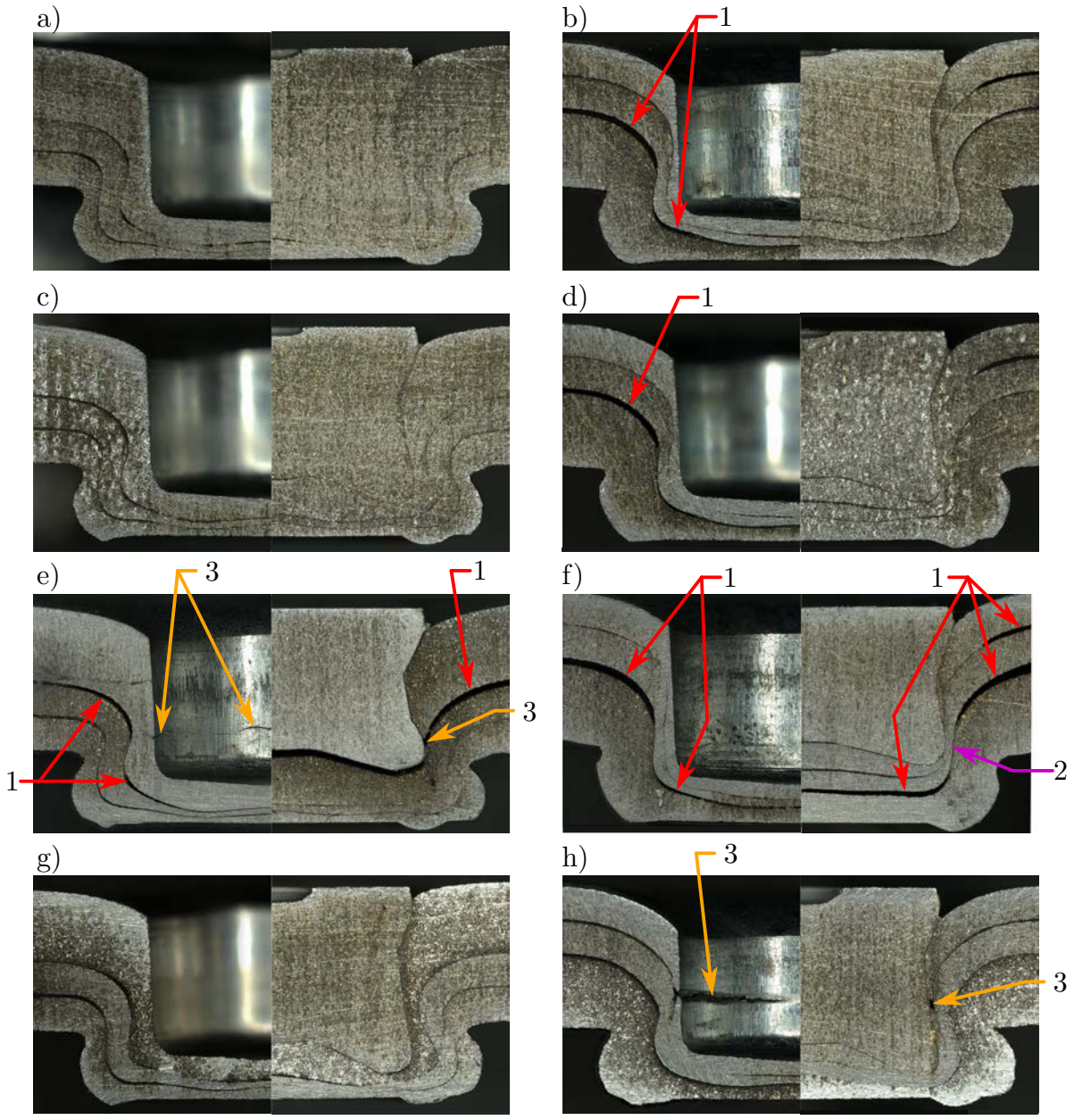
Zastosowanie łączenia z dodatkowym nitem, w przypadku połączenia blachy HX420LAD o grubości 1,5 mm z dwiema blachami w gatunku DX51D+Z o grubości 0,7 mm ułożonej na górze (Lp. 3 i 11), spowodowało zwiększenie wartości siły formowania o 47,7% w stosunku do metody *CL/CR*. W przypadku aranżacji o odwróconej kolejności położenia warstw (Lp. 4 i 12) połączenie z nitem również wymagało siły większej o 52% w odniesieniu do złącza bez dodatkowego nita.

Największą wartość siły formowania spośród badanych wariantów dla obu metod łączenia zaobserwowano w przypadku zastosowania warstwy o oznaczeniu gatunku HCT690T i grubości 1,5 mm (Lp. 5 i 13). Wykonanie złącza zestawem narzędzi *CR/CR* wariantu w którym blacha HCT690T ułożona została jako górna warstwa wymagało siły większej o 35,9%. Różnica w sile formowania pomiędzy metodami *CL/CR* i *CR/CR* w przypadku kombinacji, gdzie blacha HCT690T została przeniesiona na pozycję dolnej warstwy (Lp. 6 i 14) wyniosła o 39,1% więcej w stosunku do połączenia formowanego samym stemplem.

Połączenie blachy aluminiowej w gatunku EN AW-5754 o grubości 1,5 mm z dwiema warstwami 0,7 mm w DX51D+Z dla obu metod przyjmowało najmniejsze wartości spośród zbadanych wariantów. Ułożenie aranżacji materiałów, w którym blacha EN AW-5754 usytuowana była na pozycji górnej blachy (Lp. 7 i 15), przy zastosowaniu metody *CR/CR* odnotowało siłę większą o 64,1%. Różnica pomiędzy maksymalną siłą formowania złącze w metodzie z dodatkowym elementem odkształcalnym, po przeniesienie blachy aluminiowej na pozycje dolnej warstwy (Lp. 8 i 16), była większa o 71,6% niż w przypadku

CL/CR.

Na rysunku 4.9 przedstawiono makrostruktury wykonanych złączy, gdzie odpowiednio dla każdego z rysunków po lewej stronie pokazano strukturę budowy ukształtowaną zestawem narzędzi *CL/CR*, zaś po prawej widoczna przedstawiono strukturę budowy na przekroju złącza z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego (*CR/CR*).



Rys. 4.9. *Przekroje złączy przetłaczanych wykonanych metodami CL/CR i CR/CR składających się z dwóch warstw w gatunku DX51D+Z o grubości 0,7 mm i jednej blachy o grubości 1,5 mm i wyszczególnionym gatunku a-b) HX340LAD, c-d) HX420LAD, e-f) HCT690T, g-h) EN AW-5754*

Zestawienie geometrii na przekroju złącza dla trzech warstw o oznaczeniu gatunku DX51D+Z i grubości 0,7 mm połączonych z blachą HX340LAD usytuowaną od strony zespołu stempla przedstawiono rysunku 4.9a. Zarówno złącze ukształtowane samym stem-

plem (*CL/CR*) jak i z nitem (*CR/CR*) uzyskało dodatnie parametry zamka przy zachowaniu ciągłości łączonych warstw. Wartość t_{n-g-s} w połączeniu z nitem została była mniejsza o 31% w stosunku do metody *CL/CR*. Pocienienie na warstwie środkowejt_{n-s-d} przyjęło mniejszą wartość o 8,6%. Wartość zamka utworzonego pomiędzy górną, a środkową warstwą t_{u-g-s} była większa o 86,6% dla złącza z nitem. Większy przyrost zamka zaobserwowano w przypadku połączenia pomiędzy blachą środkową i dolną t_{u-s-d}, który wyniósł 177,7% w stosunku do połączenia bez dodatkowego elementu odkształcalnego (*CL/CR*).

Strukturę budowy przekroju dla połączenia trzech blach o grubości 0,7 mm DX51D+Z z blachą w gatunku HX340LAD na dolnej pozycji przedstawiono na rysunku 4.9b. Numerem 1 oznaczono miejsca w których zaobserwowano wystąpienie szczelin wewnątrz złącza. Pomimo znacznego pocienienia górnej warstwy w obserwowanym zakresie nie zauważono przerwania ciągłości. Pocienienie materiału w obszarze zamka górnej blachy t_{n-g-s} zostało było mniejsze o 11,1% w połączeniu z nitem. wartość t_{n-s-d} na środkowej warstwie uległa również była mniejsza o 30,7%. Zamek utworzony pomiędzy górną, a środkową blachą t_{u-g-s} w metodzie *CR/CR* był o 84,6% większy. Zaobserwowano również większą wartość dolnego wzajemnego zablokowania materiałów t_{u-s-d} o 62,5% w stosunku do złącza ukształtowanego samym stemplem *CL/CR*.

Zestawienie geometrii na przekroju złącza w rozwiązaniu, gdzie jako górną blachę zastosowano gatunek HX420LAD o grubości 1,5 mm przedstawiono na rysunku 4.9c. Pocienienie materiału w obszarze złącza górnej warstwy t_{n-g-s} w metodzie *CR/CR* miało mniejszą wartość o 33,3% w stosunku do połączenia ukształtowanego zestawem narzędzi *CL/CR*. Wartość pocienienia t_{n-s-d} również była mniejsza dla złącza z nitem o 10,6%. Zamek t_{u-g-s} pomiędzy górną, a środkową był większy o 78,5%, natomiast pomiędzy środkową, a dolną blachą t_{u-s-d}, zaobserwowano również większą wartość o 137,5% w stosunku do połączenia bez nita.

W przypadku połączenia w którym blacha o oznaczeniu gatunku HX420LAD została usytuowana na pozycji dolnej warstwy zaobserwowano szczelinę wewnątrz złącza, której położenie oznaczono numerem 1 na rysunku 4.9d. Pomimo znacznemu pocienieniu górnej warstwy w widocznym zakresie nie zaobserwowano przerwania ciągłości blach. Wartość parametru t_{n-g-s} w połączeniu wykonanym zestawem narzędzi *CR/CR* była o 40% mniejsza niż w złączu formowanym samym stemplem (*CL/CR*). Grubość w najbardziej pocienionym miejscu środkowej warstwy w obszarze złącza t_{n-s-d} tak jak dla wyższej warstwy była mniejsza o 33,3%. Wartość zamka na obu poziomach została zwiększona odpowiednio o 116,6% w przypadku t_{u-g-s}, zaś pomiędzy warstwą środkową, a dolną t_{u-s-d} wartość była większa o 100%.

Strukturę budowy na przekroju złącza dla próbek w których podjęto próbę połączenia trzech blach o oznaczeniu gatunku DX51D+Z i grubości 0,7 mm z HCT690T o grubości 1,5 mm usytuowanej jako górna warstwa przedstawiono na rysunku 4.9e. W przypadku obu złączy zaobserwowano uszkodzenia górnej warstwy materiału, a miejsce wystąpienia wady oznaczono numerem 3. W przypadku złączy bez nita widoczne są pęknięcia, a z kolei w połączeniu z dodatkowym elementem odkształcalnym doszło do pełnej separacji. Wi-

doczne były również szczeliny wewnątrz złącza, których lokalizację oznaczono numerem 1.

Podjęto również próbę scalenia dwóch warstw materiału DX51D+Z o grubości 0,7 mm z blachą o grubości 1,5 HCT690T ułożoną na dolnej pozycji. Obserwacja geometrii na przekroju złącza wykazała, że wystąpiły szczeliny wewnątrz połączenia dla obu metod łączenia. Miejsce ich występowania oznaczono numerem 1 na rysunku 4.9f. W przypadku złącza z dodatkowym elementem odkształcalnym nie uzyskano wzajemnego zablokowania materiału pomiędzy środkową, a dolną blachą, którego położenie oznaczono numerem 2. Prawidłowo ukształtowane złącze zostało wykonane z zastosowaniem zestawu narzędzi *CL/CR*.

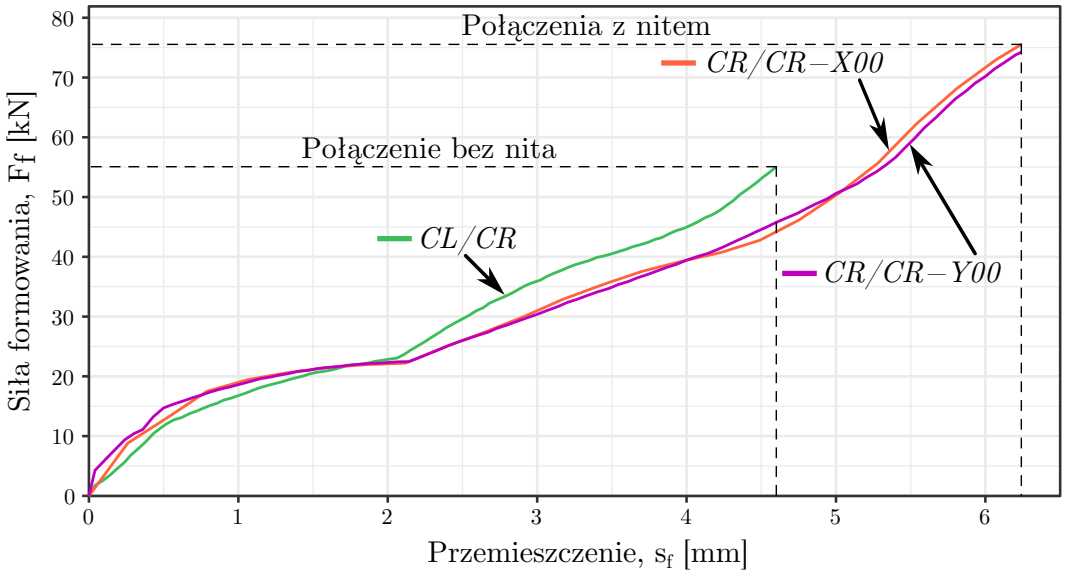
Podczas obserwacji geometrii na przekroju złącza w przypadku aranżacji, w której połączono blachę o oznaczeniu gatunku EN AW-5754 i grubości 1,5 mm jako górną warstwę z dwoma blachami stalowymi DX51D+Z o grubości 0,7 mm zaobserwowano prawidłowo ukształtowane połączenia (rys. 4.9h). Pomiar wartości zamka ukształtowanego pomiędzy środkową, a dolną blachą t_{u-s-d} w złączu ukształtowanym stemplem bez dodatkowego elementu miał bardzo małą wartość, która wyniosła jedynie 0,02 mm. Zmiana metody scalenia na *CR* znacząco poprawiła wartości uzyskanych parametrów zamka. Wartość ta była większa zarówno między warstwą górną, a środkową t_{u-g-s} o 250% jak i pomiędzy środkową, a dolną, t_{u-g-s} o 1100%. Pomiar grubości w miejscu pocienienia dla złączy z nitem (*CR/CR*) podobnie jak w pozostałych wariantach przyjął mniejszą wartość zarówno dla górnej jak i środkowej warstwy i wyniosła mniej o 30% dla parametru t_{n-g-s}, zaś t_{n-s-d} różnica była mniejsza i wyniosła 21,7%.

Struktura budowy na przekroju złącza w przypadku konfiguracji, w której blachę o oznaczeniu gatunku EN AW-5754 i grubości 1,5 mm umieszczono w położeniu dolnej blachy została przedstawiona na rysunku 4.9h. Zaobserwowano przerwanie ciągłości materiału górnej warstwy, miejsce wystąpienia wady oznaczono na rysunku numerem 3.

4.2 Ocena efektów zastosowania nita na charakterystykę złącza przetłaczanego

4.2.1 Przebieg i efekty formowania złącza

Analiza wpływu zastosowania komercyjnego nita została przeprowadzona dla dwóch warstw materiału DX51D+Z i grubości 1,5 mm. Zestawienie przebiegu krzywych formowania dla złączy wykonanych dwoma zestawami narzędzi *CL/CR* i *CR/CR* przedstawiono na rysunku 4.10. W przypadku połączeń z nitem przedstawione zostały dwie krzywe z uwagi na zastosowanie dwóch różnych łączników. Złącza dla którego zastosowano dodatkowy element odkształcalny o średniej wartości twardości 35 HRC oznaczono jako *CR/CR-Y00*, zaś wariant z zastosowaniem nita o twardości 41 HRC opisano jako *CR/CR-X00*.

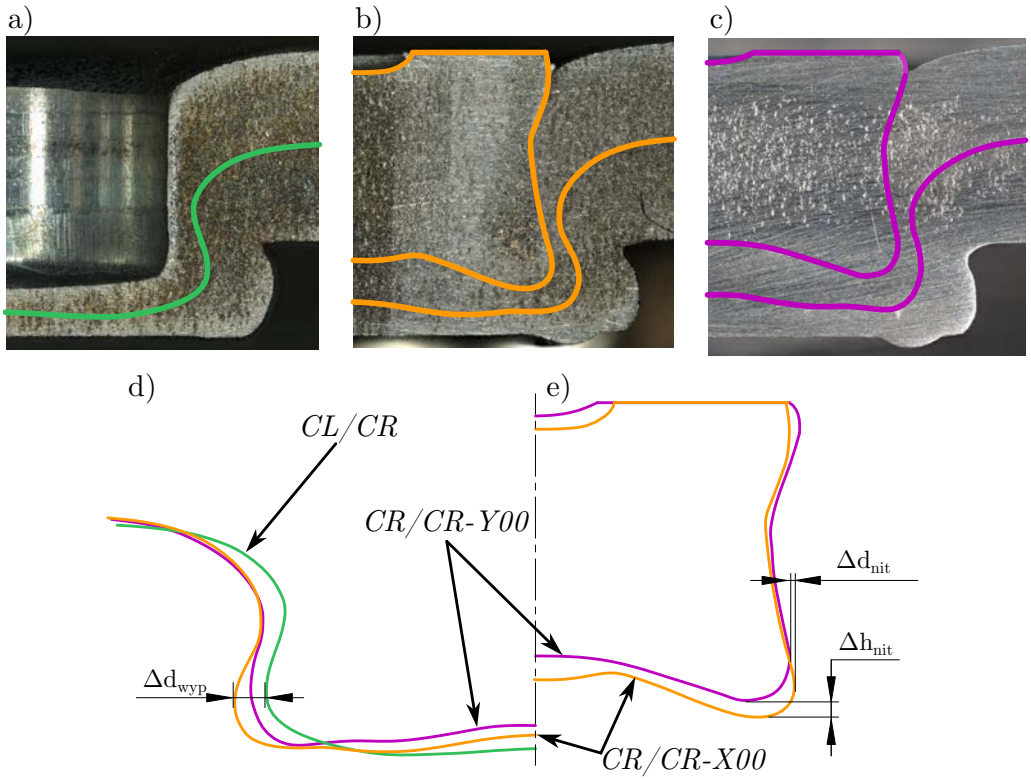


Rys. 4.10. *Krzywe formowania połączeń wykonanych metodami CL/CR i CR/CR dla zastosowanych dwóch różnych komercyjnych nitów*

Formowanie połączenia w technologii *CL* w głównej mierze dotyczy pracy plastycznego odkształcenia materiału w miejscu łączenia warstw. Zaś w przypadku zastosowania dodatkowego i odkształcalnego elementu praca kształtowania złącza obejmuje również energie plastycznego odkształcenia nita. W obydwu przypadkach występują jeszcze energetyczny wydatek na opory tarcia występujące pomiędzy odkształcanymi materiałami, górnej warstwy materiału, a nitem, oraz narzędziami. Z racji, że nit musi zostać wtłoczony w łączone materiały, przemieszczenie s_f jest większe dla połączeń ukształtowanych z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego.

Dla złączy wykonanych w technologii *CR* zaobserwowano większą maksymalną wartość siły formowania w odniesieniu do połączenia ukształtowanego samym zespołem stempla i matrycy (*CL/CR*). W przypadku złącza *CR/CR-X00* wartość siły była większa o 37,4%, zaś dla połączeń *CR/CR-Y00* różnica wyniosła 33,4%. Poza zwiększoną wartością maksymalnej siły formowania potrzebnej do ukształtowania złącza, przemieszczenie stempla w technologii *CR* było większe niż w przypadku złączy bez zastosowania dodatkowego elementu odkształcalnego. Dokonano porównania energochłonności procesu formowania, której wartość maksymalna była wyższa dla złączy ukształtowanych z nitami *X00* i *Y00* o odpowiednio 70% i 66,1%.

W dalszej kolejności przeprowadzono obserwację struktury budowy na przekroju złącza analizowanych próbek, a ich zestawienie przedstawiono na rysunku 4.11. Zawarto na nim również zestawienia zarysów zarówno dla krawędzi pomiędzy łączonymi warstwami, a także nitów. Na podstawie fotografii dokonano pomiaru wybranych cech, których wyniki wraz z oznaczeniem złączy, średnią wartością maksymalnej siły formowania i energochłonności procesu formowania zestawiono w tabeli 4.6.



Rys. 4.11. *Struktura budowy na przekroju złączy: a) wykonanych zestawem narzędzi CL/CR, a także CR/CR z zastosowaniem nita b) X00 (41 HRC), c) Y00 (35HRC). Zestawienie zarysów: d) pomiędzy łączonymi warstwami, e) odkształconych nitów*

Tabela 4.6. *Zestawienie wartości sił oraz energii wyznaczonych w procesie formowania i pomiaru geometrii, wykonanych na podstawie przekrojów złączy*

Oznaczenie złącza	**Średnia wartość maksymalnej siły formującej**	**Średnia wartość energochłonności procesu formowania**	**Pomiary geometrii na przekroju złącza zgodnie z oznaczeniami na rysunku 3.6**						
	F_f [kN]	**W_f [J]**	**d_{nit} [mm]**	**d_{wyp} [mm]**	**d_{zew} [mm]**	**h_{nit} [mm]**	**$h_{b\text{-}min}$ [mm]**	**t_n [mm]**	**t_u [mm]**
CL/CR	55,17	130,43	-	6,33	8,32	-	-	0,36	0,27
CR/CR-X00	75,82	221,73	5,87	6,84	8,68	3,75	0,3	0,27	0,32
CR/CR-Y00	73,61	216,59	5,97	6,66	8,45	3,47	0,42	0,27	0,13

Na podstawie wykonanych pomiarów struktury budowy zaobserwowano, że pocienienie górnej warstwy t_n dla obu złączy z nitem przyjęła równą wartość, która była mniejsza o 25% w stosunku do połączenia ukształtowanego bez dodatkowego łącznika (*CL/CR*). Zaobserwowano wpływ samego łącznika na wielkość wzajemnego zablokowania materiału t_u, która w przypadku złączy *CR/CR-X00* była większa o 15,5% zaś w przypadku połączeń *CR/CR-Y00* zaobserwowano mniejszą wartość niż w połączeniu wykonanym *CL/CR* o 51,8%.

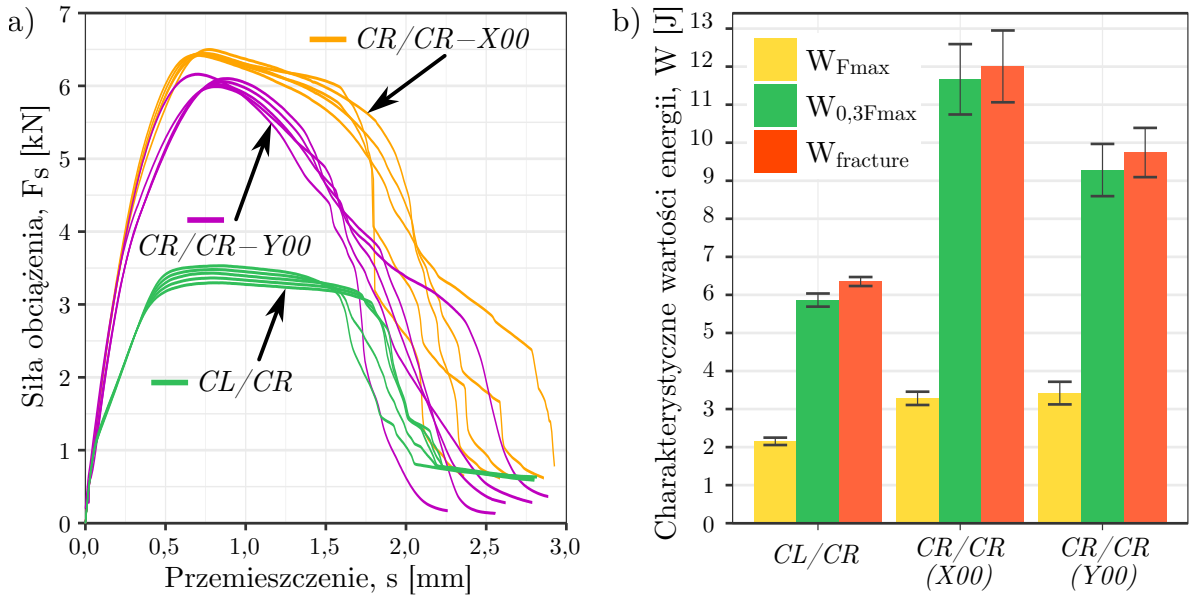
Przesunięcie zarysu krawędzi wewnątrz złącza *CL/CR* widoczne na rysunku 4.11d,

względem połączeń z nitem spowodowane było różnicą w wtłaczanej objętości. W przypadku formowania złącza bez nita w blasze pozostaje wnęka po stemplu, który zatopił się do określonej głębokości. W przypadku połączeń wykonanych w technologii *CR*, nit wtłaczano do zrównania stempla z poziomem górnej blachy co spowodowało pełne zatopienie nita wraz z jego objętością w blasze. Wartość d_{wyp} dla złączy z nitami była większa o odpowiednio 8,1% i 5,2% dla *CR/CR-X00* i *CR/CR-Y00* w stosunku do połączeń bez łącznika.

Zaobserwowano różnice w zarysie samego nita wewnątrz złącza. W przypadku połączenia, gdzie uzyskano większą wartość wzajemnego zablokowania warstw t_u (*CR/CR-X00*), łącznik zatopił się głębiej o 8,1% niż w połączeniu *CR/CR-Y00*. Różnica średnic u podstawy nita d_{nit} wyniosła 0,1 mm, a jej wartość była większa w przypadku złącza z zastosowaniem nita o mniejszej twardości.

4.2.2 Nośność w próbie ścinania

Zależność siły obciążenia od przemieszczenia z badań nośności złączy została przedstawiona w postaci krzywych na rysunku 4.12a. Zestawienie zawiera zarejestrowane przebiegi zarówno dla złączy ukształtowanych samym stemplem jak i nitami *X00* i *Y00*. Na podstawie uzyskanych przebiegów wyznaczono charakterystyczne wartości energii zniszczenia (rys. 4.12b).



Rys. 4.12. *Wykresy utworzone na podstawie danych uzyskanych w próbie ścinania złączy przetłaczanych a) zestawienie przebiegu krzywych z rozciągania próbek, b) zestawienie energii, wyznaczonych na podstawie badań nośności*

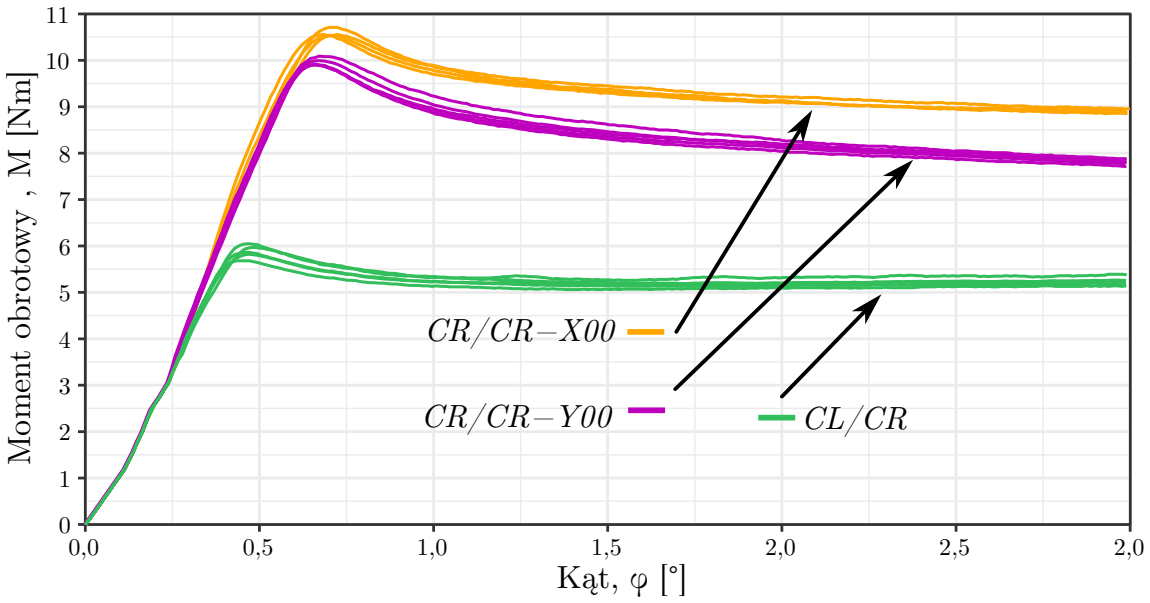
Dla złączy utworzonych z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego zaobserwowano większą nośność uzyskaną w próbie ścinania. Średnia wartość maksymalnej siły obciążenia w przypadku połączenia *CR/CR-X00* była większa o 88,1% w odniesieniu do połączenia wykonanego metodą *CL/CR*. Złacza z nitem o mniejszej twardości *CR/CR-*

Y00 również wykazały znaczący wzrost wytrzymałości złącza, której średnia wartość była większa o 77,3%.

Na rysunku 4.12b przedstawiono zestawienie średnich wartości energii wyznaczone zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie ISO 12996. Energia W_{Fmax} (liczona do wystąpienia największej wartości siły w próbie ścinania) osiągnęła największą wartość w złączu *CR/CR-Y00* i w odniesieniu do metody *CL/CR* była większa o 58,9%. Energia ta dla złączy z nitem *X00* również była większa o 52,5% niż w przypadku połączeń formowanych bez dodatkowego elementu odkształcalnego. Energia zniszczenia mierzona do trzech dziesiątych wartości maksymalnej siły w próbie ścinania $W_{0,3Fmax}$ w połączeniach z nitem również wzrosła i wyniosła odpowiednio o 98,9% więcej w przypadku nita *X00* i 58,3% dla złącza z zastosowaniem łącznika *Y00*. Energia $W_{fracture}$ dla złączy z nitem również była większa w odniesieniu do metody *CL/CR*, a jej wartość była większa o odpowiednio 89% dla połączenia *CR/CR-X00* z nitem o większej twardości, zaś w przypadku złączy *CR/CR-Y00* różnica wyniosła 53,4%.

4.2.3 Nośność skrętna złączy

Zależność momentu obrotowego od przemieszczenia kątowego zarejestrowana w próbach nośności skrętnej złączy przetłaczanych z wykorzystaniem autorskiego stanowiska do badań została przedstawiona w postaci zestawienia krzywych na rysunku 4.13.



Rys. 4.13. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób badania utraty nośności skrętnej złącza przetłaczanego*

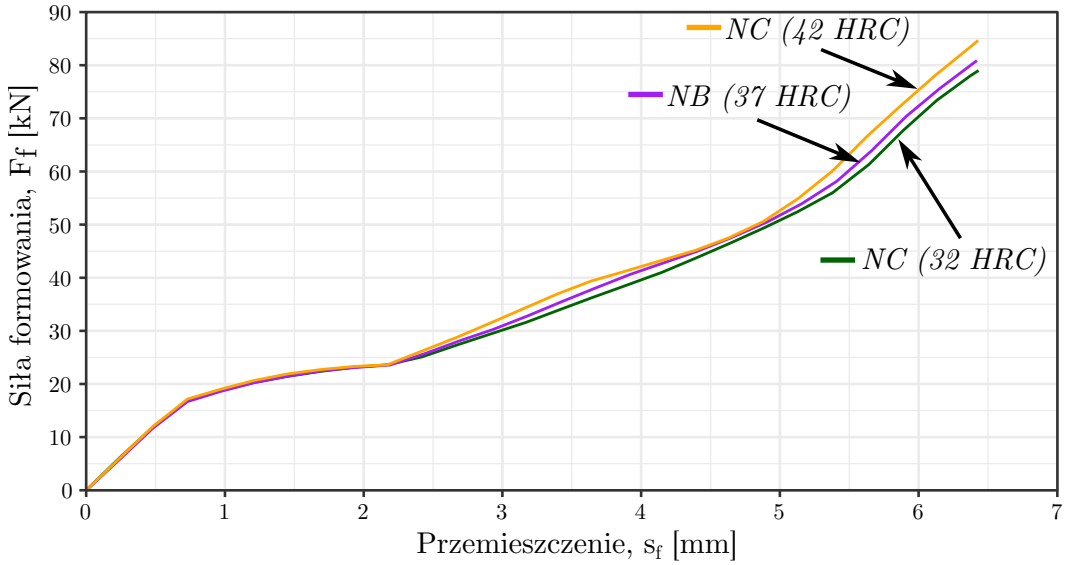
Badania dotyczące analizy wartości momentu obrotowego utraty nośności sekretnej złączy *CL/CR* oraz *CR/CR-X00* i *CR/CR-Y00* wykazały, że występuję podobna relacją w wynikach jak w przypadku testów wytrzymałości na rozciągania zakładkowego połączenia. Dodatkowy element wypełniający wnękę przetłoczenia spowodował, wzrost nośności

skrętnej połączenia w porównaniu do złącza formowanego sztywnym stemplem. Dla złącza z zastosowaniem nita komercyjnego z większą twardością *CR/CR-X00* zaobserwowano wartość momentu większą o 79,8% z kolei połączenia *CR/CR-Y00* charakteryzowały się wzrostem o 69%.

4.3 Wpływ zmiany twardości dodatkowego elementu odkształcalnego na charakterystykę złącza *CR*

4.3.1 Przebieg i efekty formowania złącza

Analiza wpływu zastosowania różnej twardości dodatkowego elementu odkształcalnego na proces formowania złącza została przeprowadzona na dwóch warstwach materiału o oznaczeniu gatunku DX51D+Z i grubości 1,5 mm. Przebiegi krzywych formowania dla złączy utworzonych z nowymi nitami przedstawiono na rysunku 4.14.

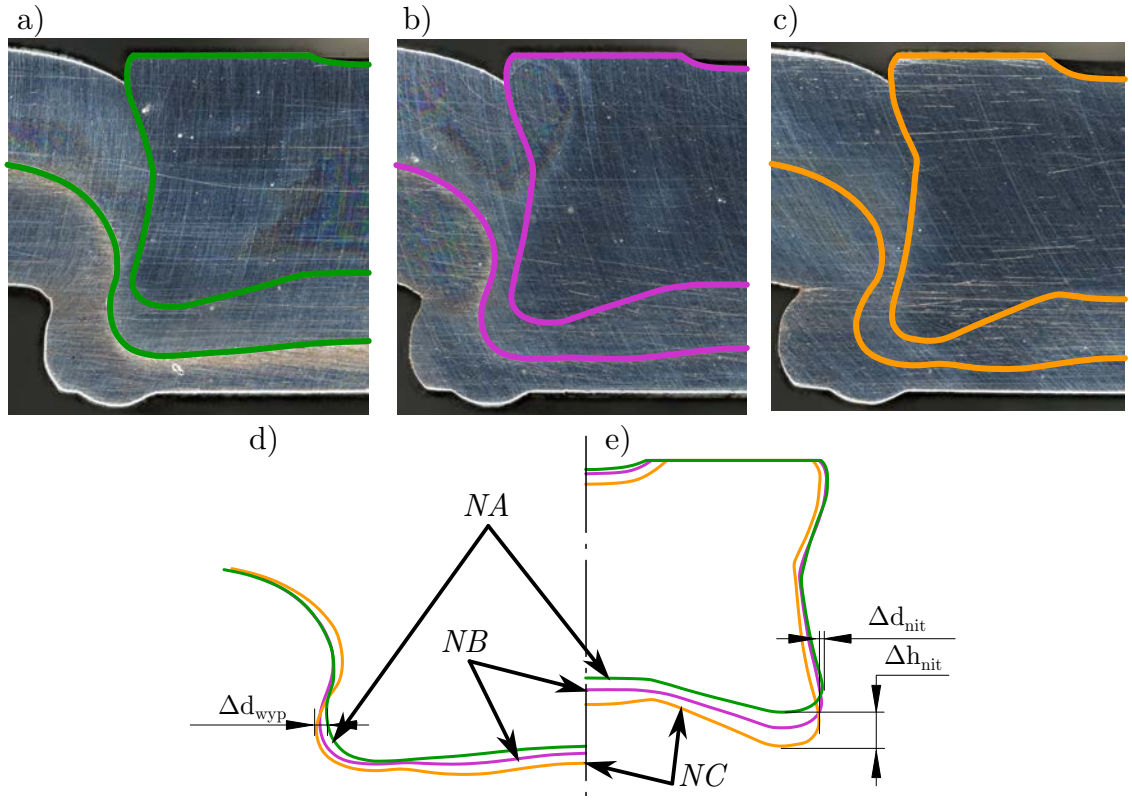


Rys. 4.14. *Zestawienie przebiegu krzywych siły formowania złącza przetłaczanego z zastosowaniem nitów o różnym stopniu twardości*

Wraz ze wzrostem twardości opracowanego nita, zaobserwowano zmiany w przebiegu krzywych formowania. Nit o najmniejszej twardości *NA* (32 HRC), zakończył proces kształtowania połączenia przy średniej wartości siły formowania 78,4 kN. W przypadku złączy wykonanych z nitem *NB* (37 HRC) zaobserwowano większą wartość wymaganą do utworzenia złącza o 2,5%. Zastosowanie nita o największej twardości *NC* (42 HRC) osiągnęło największą wartość spośród badanych wariantów, której przyrost wyniósł 6,6% w stosunku do próbek wykonanych z nitami *NA*. Wraz ze zmianą wartości siły formowania zaobserwowano wzrost energochłonności procesu formowania, a jej wartość była wyższa o 3,4% dla złączy *NB* i o 9,9% dla *NC*.

Strukturę budowy na przekroju złącza z wykorzystaniem nitów o różnych stopniach

twardości przedstawiono na rysunku 4.15. Na grafice zawarto również zestawienie zarysów krawędzi pomiędzy łączonymi warstwami i nitów. Na podstawie fotografii (rysunek 4.15a-c) dokonano pomiaru wybranych cech, których wyniki wraz z oznaczeniem złączy, średnią wartością maksymalnej siły i energochłonności procesu formowania zestawiono w tabeli 4.7.



Rys. 4.15. *Widok wewnętrznej budowy połączeń, wykonanych z zastosowaniem nita o twardości: a) 32 HRC (NA) i b) 37 HRC (NB) c) 42 HRC (NC) oraz porównanie linii zarysu: d) zamka blach, e) nitów*

Tabela 4.7. *Średnie wartości maksymalnej siły i energii procesu formowania oraz ważniejszych parametrów geometrycznych złącza wykonanego z zastosowaniem nita o trzech różnych twardościach*

Oznaczenie złącza	**Średnia wartość maksymalnej siły formującej**	**Średnia wartość energochłonności procesu formowania**	**Pomiary geometrii na przekroju złącza zgodnie z oznaczeniami na rysunku 3.6**						
	F_f [kN]	**W_f [J]**	**d_{nit} [mm]**	**d_{wyp} [mm]**	**d_{zew} [mm]**	**h_{nit} [mm]**	**$h_{b\text{-}min}$ [mm]**	**t_n [mm]**	**t_u [mm]**
NA	78,4	227,09	5,99	6,62	8,36	3,46	0,48	0,25	0,08
NB	80,39	234,67	5,98	6,74	8,58	3,51	0,40	0,26	0,18
NC	83,55	249,55	5,88	6,82	8,79	3,73	0,33	0,28	0,32

Twardość dodatkowego elementu odkształcalnego miała duży wpływ na ukształtowaną strukturę budowy zarówno zewnątrz jak i wewnątrz połączenia przetłaczanego. Wymiar u podstawy nita d_{zew} osiągnął najmniejszą wartość w przypadku złącza wykonanego nitem o najniższej twardości. Połączenia ukształtowane z wykorzystaniem nita *NB* odnotowały przyrost wymiaru zewnętrznego o 2,6%. Pomiar wartości d_{zew} na przetłoczeniu złącza z nitem *NC* był o 5,1% większy w odniesieniu do wariantu z dodatkowym elementem odkształcalnym *NA*.

Dla każdego z wariantów uzyskano dodanie wartości parametrów zamka przy zachowaniu ciągłości materiału łączonych warstw. Dla złączy wykonanych z nitem *NA* wartość pocienienia górnej warstwy materiału t_n wyniosła 0,25 mm. W przypadku zastosowania pozostałych nitów zaobserwowano przyrost wartości t_n o 4% w złączach z nitem *NB* i 12% dla wariantu *NC* w odniesieniu do połączeń z zastosowaniem nita o najmniejszej twardości (NA). Znaczący wzrost wzajemnego zablokowania łączonych warstw t_u zaobserwowano zarówno dla połączeń o oznaczeniu *NB* jak i *NC*, których wartość była większa o odpowiednio 125% i 300% w stosunku do połączeń z nitem o najmniejszej twardości (NA).

Zaobserwowano, iż grubość dolnej warstwy materiału była największa w połączeniu wykonanym z nitem *NA*. Dla złączy z zastosowaniem nita *NB* dolna warstwa została pocieniona o 16,7% w odniesieniu do połączeń *NA*. Największe pocienienie dolnej blachy zaobserwowano w przypadku złączy wykonanych z nitem *NC*, którego wartość była mniejsza o 31,2% niż w złączu w którym łącznik nit o najmniejszym stopniu twardości.

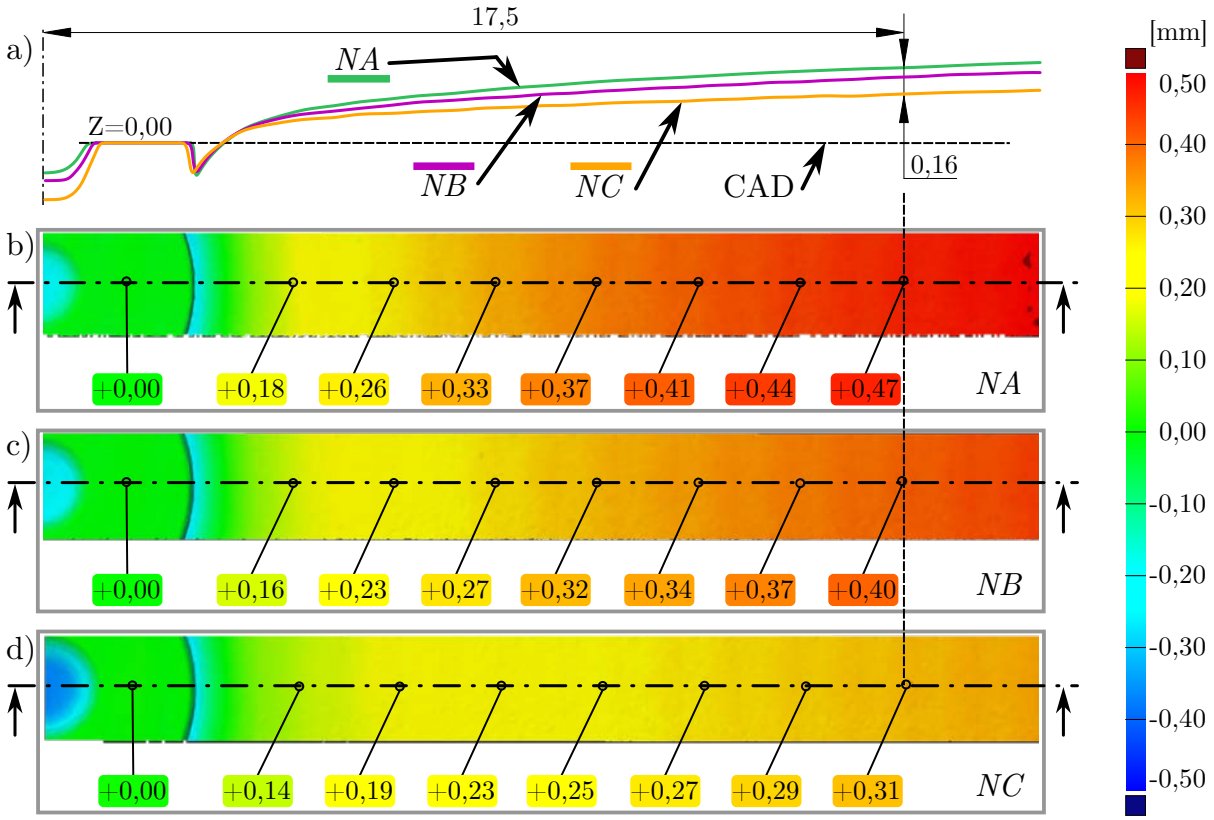
Ponadto w wyniku analizy wyników zaobserwowano zmianę w wysokości nitów (h_{nit}), której wartość dla połączeń z zastosowaniem nita *NA* wyniosła 3,46 mm. Wraz ze wzrostem stopnia twardości dodatkowego elementu odkształcalnego jego wysokość w złączu była coraz większa. Dla złączy z nitem *NB* h_{nit} zwiększyła swoją wartość o 1,5%, a w przypadku wykorzystania nita o najwyższym stopniu twardości *NC* zaobserwowano powiększenie wartości o 7,8%.

Szerokość nita u podstawy d_{nit} była największa w złączach z nitem *NA*. Dla pozostałych wariantów zaobserwowano pomniejszenie wartości d_{nit} 0,2% dla nita *NB* i 1,8% przy połączeniach z dodatkowym elementem odkształcalnym o najwyższym stopniu twardości.

4.3.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza

Podczas formowania złącza prasowanego w tym z zastosowaniem technologii CR dochodzi do dużych jednostkowych plastycznych odkształceń łączonych materiałów. W zaplanowanych badaniach jednym z punktów analizy eksperymentalnej było dokonanie pomiarów deformacji powierzchni w obszarze miejsca ich połączenia. W ramach przeprowadzenia analizy wpływu zmiany twardości dodatkowego elementu odkształcalnego na deformacje powierzchni w obszarze złącza, opracowane wyniki uzyskanych chmur punktów przedstawiono w postaci map odchyłek, dla trzech twardości opracowanego nita. Kolorowa mapa odchyłek jest reprezentacją różnic odległości pomiędzy modelami odwzorowanych obiektów rzeczywistych, a płaszczyzną (4.16b-d). Na podstawie uzyskanych wyników wy-

konano zestawienie krzywych zarysów na powierzchni górnej blachy (rys. 4.16a).



Rys. 4.16. *Rozkład odchyłek powierzchni blach na próbce złącza formowanego nitem o różnej twardości: b) NA (32 HRC), c) NB (37 HRC), d) NC (42 HRC), oraz a) porównanie zarysu w przekroju złącza*

Płaszczyznę odniesienia oznaczoną linią przerywaną ustalono określając pozycję stempla i nita na poziomie równym sumarycznej grubości łączonych blach. Zaobserwowano, iż największe wartości deformacji wystąpiły w przypadku połączeń wykonanych z zastosowaniem nita o najmniejszym stopniu twardości *NA* (32 HRC).

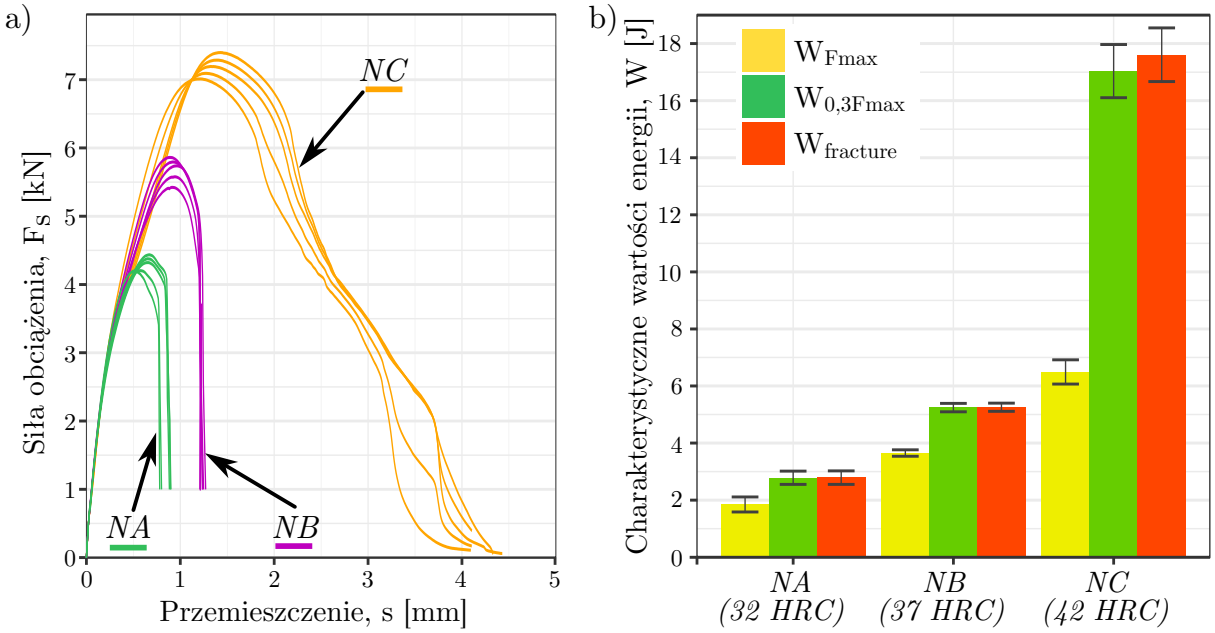
Na rysunku 4.16b-d określono wartości odchyłek wzdłuż linii prostej dla tych samych współrzędnych wybranych punktów. W celu lepszego zobrazowania uzyskanych wyników wykonano analizę odchyłki punktu oddalonego o 17,5 mm od osi złącza. Na rysunku 4.16b przedstawiono deformację złącza wykonanego z zastosowaniem nita *NA*. Odchylenie punktu względem modelu *CAD* wyniosło 0,47 mm. Deformacja w tej samej odległości dla połączeń wykonanych z pozostałymi nitami wyniosło odpowiednio 0,40 dla *NB* i 0,31 w przypadku próbki oznaczonej jako *NC*. Różnica pomiędzy punktami w złączach *NA* i *NC* wyniosła 0,16 mm.

Generalnie wystąpiła tendencja: im większa twardość nita tym zamek t_u był większy (tabela 4.7), a wartości odchyłek powierzchni górnej blachy były mniejsze (rys. 4.16). Im twardszy nit tym później rozszerzał się w jego części dolnej i bardziej intensywnie wypychał materiał w kierunku promieniowym przesuwu ruchomych segmentów. Pomiędzy złączem z nitem *NA* a *NB* i *NC* względna różnica pomiędzy wartościami odchyłek

w określonych punktach rosła w miarę zwiększenia się odległości od osi miejsca scalenia (rys. 4.16).

4.3.3 Nośność w próbie ścinania

Graficzna reprezentacja wyników uzyskanych w próbach nośności złącza została przedstawiona na rysunku 4.17. Zawarto na niej zestawienie przebiegu krzywych z prób nośności na ścinanie, a także energie zniszczenia złączy.



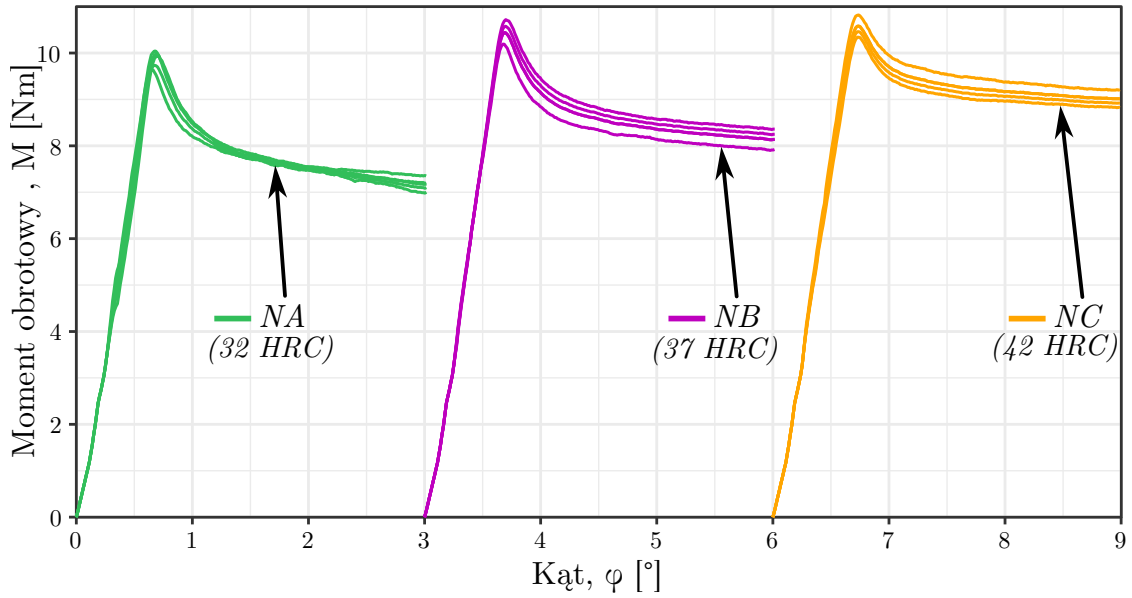
Rys. 4.17. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób wytrzymałości na ścinanie*

Połączenia z nitem *NA* uległy zniszczeniu przy najmniejszą wartości siły spośród analizowanych złączy. Dla połączenia z oznaczeniem próbki *NB* w porównaniu do złączy wykonanych z zastosowaniem nita o najniższym stopniu twardości zaobserwowano większą zdolność do przenoszenia obciążenia o 31,4%. Różnica w nośności złącza pomiędzy nitem *NA* i *NC* wyniosła 65,7%.

Najmniejsze wartości każdej z energii zniszczenia cechowały złącza wykonane z zastosowaniem nita *NA*. Wartość energochłonności mierzonej do osiągnięcia największej siły obciążenia W_{Fmax} dla nita *NB* wzrosła o 97,6%. Znaczący wzrost energii zaobserwowano w złączach z nitem o najwyższym stopniu twardości *NC*, który był większy o 251,3% w odniesieniu do złączy z nitem *NA*. Przyrost energii $W_{0,3Fmax}$ dla nita *NB* wyniósł 88,3%. Próbki wykonane z wykorzystaniem nita *NC* osiągnęły wartość energii $W_{0,3Fmax}$ większą o 511,9%. Energochłonność mierzona do całkowitego zniszczenia $W_{fracture}$ była wyższa o 88,5% w złączach z nitem *NB* i 531,6% większa dla złączy z nitem o najwyżej twardości *NC*, w odniesieniu do połączeń wykonanych z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego o najmniejszym poziomie twardości *NA*.

4.3.4 Nośność skrętna złączy

Na rysunku 4.18 przedstawiono przebieg krzywych zmienności skręcającego momentu oporowego w funkcji kata skręcenia złącza. Uzyskane charakterystyki dotyczą złącza *CR* uformowanego z zastosowaniem nita o trzech różnych jego twardościach.



Rys. 4.18. *Przebieg krzywych uzyskanych z próby badania nośności skrętnej złączy CR wykonanych z zastosowaniem nita o trzech twardościach jego materiału*

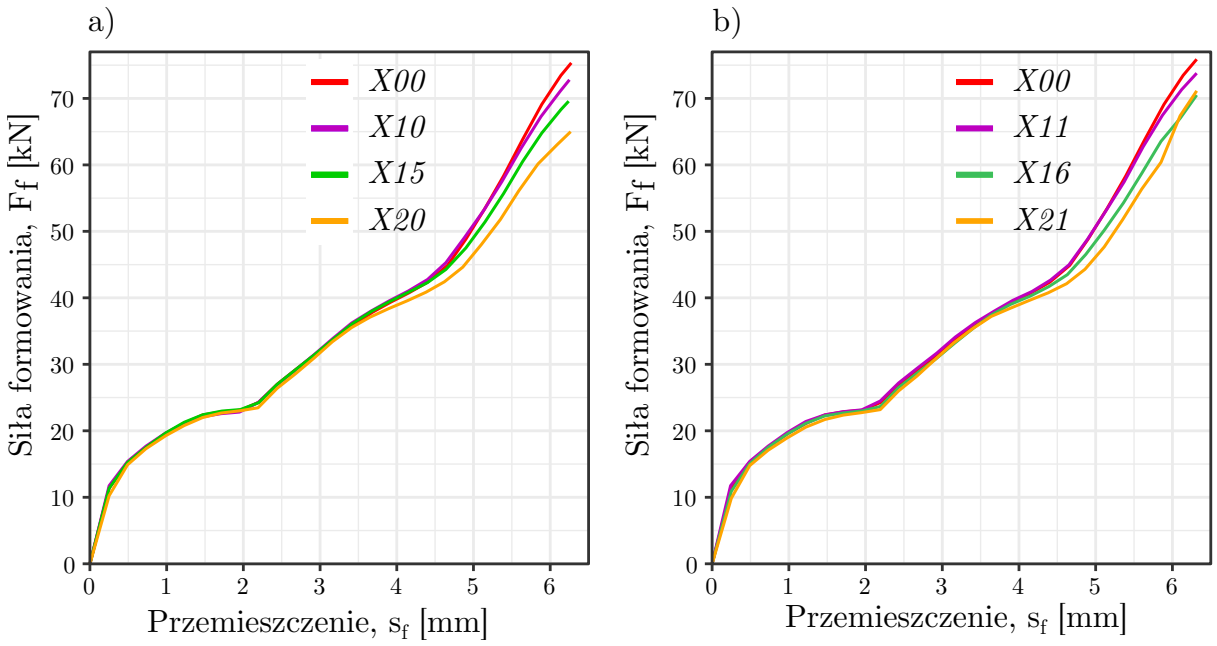
Złącze z nitem o twardości 32 HRC (*NA*) wykazało najmniejszą maksymalną nośnością skrętną. Po osiągnięciu maksymalnej wartości momentu obrotowego nastąpił gwałtowny spadek oporów ruchu obrotowego (krzywe koloru zielonego). W przypadku zastosowania nita *NB* o twardości 37 HRC (15,6%) maksymalny moment oporowy wzrósł o 6%. Natomiast w przypadku zastosowania nita o największej twardości (wzrost o 31,3%) maksymalna nośność skrętna złącza wzrosła o 7,2%. Wzrost twardości nita z 37 HRC na 42 HRC przyczynił się nieznacznie do zwieszenia maksymalnej nośności złącza *CR*. Jak wykazano wczesnej wzrost twardości nita ma bardzo istotne znaczenie w przypadku nośności na ścinanie (rys. 4.17a), natomiast w znacznie mniejszym stopniu gdy dotyczy nośności skrętnej (rys. 4.18).

4.4 Wpływ zmiany geometrii dodatkowego elementu odkształcalnego na charakterystykę złącza *CR*

4.4.1 Przebieg i efekty formowania złącza

Zestawienie krzywych z procesu formowania dla złączy z zastosowaniem zmodyfikowanych nitów komercyjnych przedstawiono na rysunku 4.19. Grafikę podzielono na dwie grupy, zgodnie z zaplanowanym sposobem modyfikacji nita. Zarówno przebiegi dla otwo-

rów wykonanych przelotowo jak i na określoną głębokość porównano do złącza bez wykonanej modyfikacji o oznaczeniu *X00*.



Rys. 4.19. *Zestawienie krzywej formowania złącza X00 wraz z modyfikacją poprzez wprowadzenie otworu: a) przelotowego, b) na określoną głębokość*

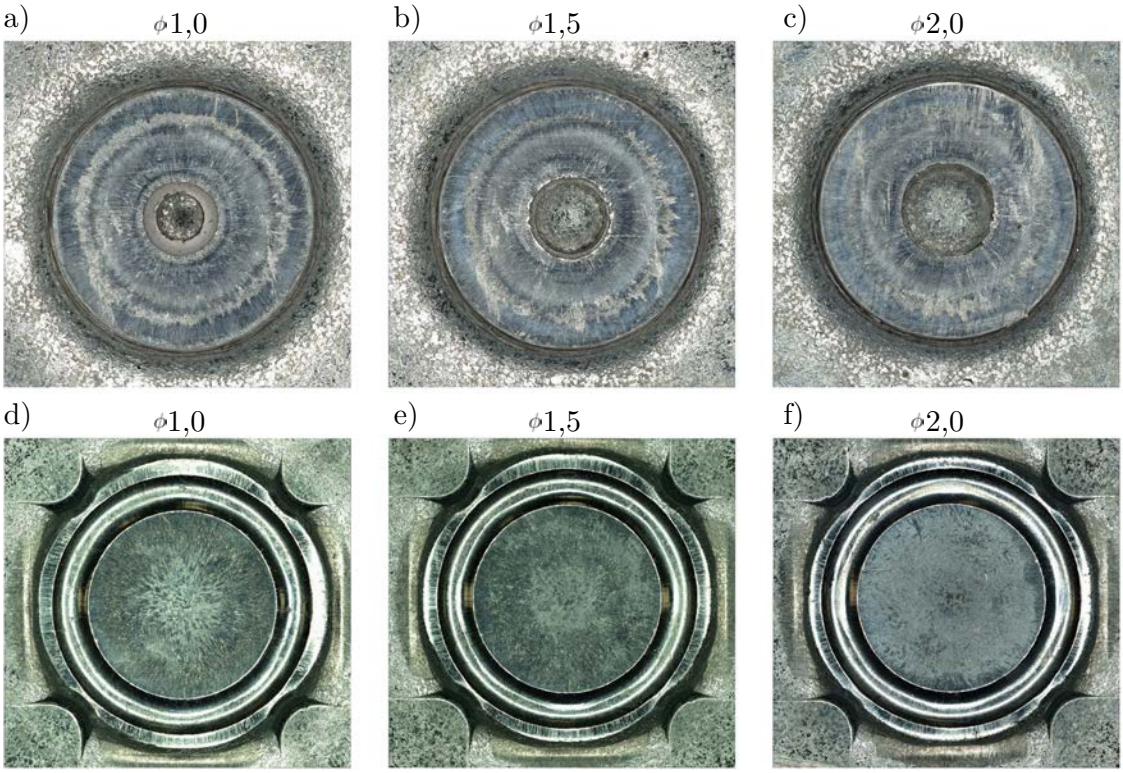
Wprowadzenie modyfikacji geometrii dodatkowego elementu odkształcalnego w postaci otworu przelotowego spowodowało zmiany w wartości maksymalnej siły formowania potrzebnej do utworzenia złącza. Wartość w przypadku połączenia z zastosowaniem nita z otworem przelotowym ϕ1,0 mm (*X10*) została zredukowana o 4,1%. Wraz z powiększaniem otworu przelotowego zaobserwowano dalszy spadek wartości siły potrzebnej do ukształtowania połączenia. Redukcja siły w przypadku złącza z nitem *X15* wyniosła 8,4% z kolei dla połączeń z łącznikiem, w którym wykonano otwór ϕ 2,0 mm (X20) zaobserwowano spadek na poziomie 15,9% w odniesieniu do złącza bez otworu (*X00*).
Wraz z redukcją potrzebnej siły formowania zaobserwowano spadek energochłonności procesu kształtowania złącza. Dla połączeń z zastosowaniem nita *X10* wyniósł on 1,9%. Energia obliczona dla formowania połączenia z nitami *X15* i *X20* była odpowiednio o 4,9% i 9,9% mniejsza w odniesieniu do złączy wykonanych z nitem bez otworu (*X00*).

Badania przeprowadzone z zastosowaniem nitów z otworem nieprzelotowym również wykazały spadek maksymalnej wartości siły formowania. Średnia wartość siły potrzebnej do ukształtowania złącza z nitem *X11* została zredukowana o 3,9%. Warianty w których wykorzystano nity *X16* i *X21* odnotowały spadek energii o odpowiednio 9,2% i 7,3%. Spadek maksymalnej wartości siły formowania w przypadku otworu nieprzelotowego ϕ 2,0 mm (X21) był mniejszy niż w wariancie z nitem *X20*. Różnica wynika z kontaktu materiału górnej blachy z powierzchnią powstałą po czole wiertła. Wraz ze spadkiem maksymalnej wartości siły formowania zaobserwowano redukcję energochłonności procesu, która w odniesieniu do złącza wykonanego z pełnym nitem wyniosła 1,6% dla połączeń *X11*, 5,5%

z zastosowaniem łącznika *X16* i 7,2% dla złącza *X21*.

Jak widać na podstawie wyników zastosowanie nita z otworem pozwoliło na zmniejszenie maksymalnej siły formowania i energochłonności procesu scalenia. W każdym z badanych przypadków zastosowania modyfikacji nita siła formowania i energochłonność procesu była mniejsza od przypadku zastosowania nita pełnego.

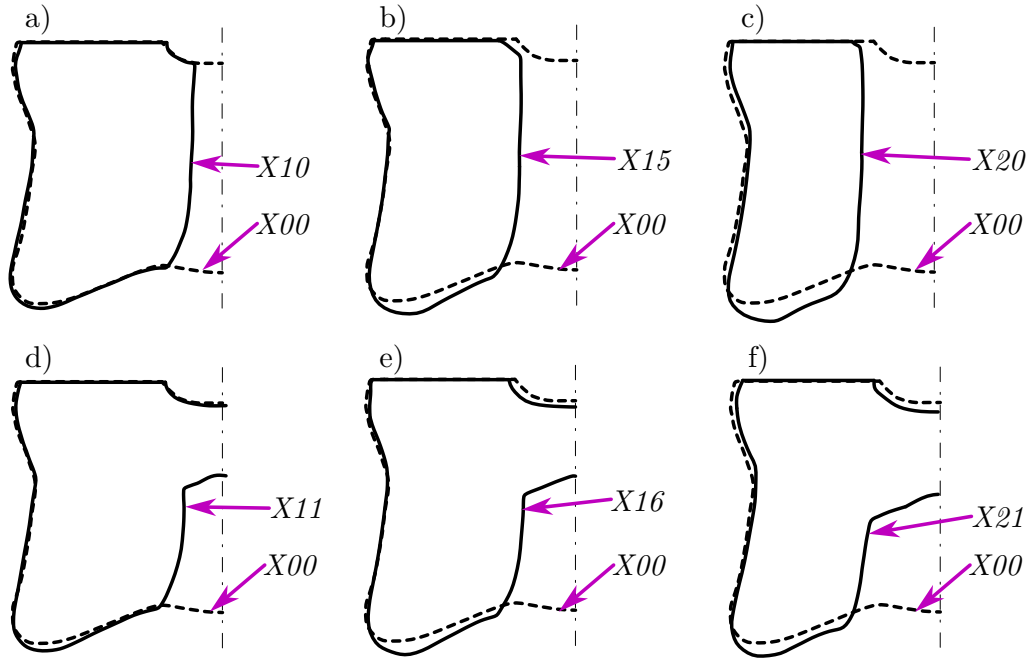
Na rysunku 4.20 przedstawiono widok złączy przetłaczanych zarówno od strony stemplowej jak i matrycowej z zastosowaniem nitów wierconych przelotowo.



Rys. 4.20. *Miejsce scalenia dla połączenia wykonanego z zastosowaniem nita z otworem przelotowym. Widok od strony: a-c) stempla, d-f) matrycy*

Wykorzystanie nitów w technologii *CR* z otworami wpłynęło na wymiar zewnętrzny ukształtowanego przetłoczenia. W przypadku wykorzystania nita *X10* zaobserwowano redukcję wartości d_{zew} o 0,6%. Dla pozostałych nitów wierconych przelotowo *X15* i *X20* zaobserwowano spadek o odpowiednio 1% i 2,2%. Połączenia w których zastosowano nity wiercone nieprzelotowo również charakteryzowały się mniejszym wymiarem zewnętrznym w stosunku do połączeń z pełnym nitem. Dla złączy z nitem *X11* zaobserwowano spadek d_{zew} o 0,2% z kolei przy zastosowaniu nitów *X16* i *X21* do scalenia warstw spadek wyniósł 1,2% i 1,3%.

Zarysy zmodyfikowanych nitów, wykonane na podstawie struktury budowy na przekroju złączy zestawiono z ukształtowanym konturem nita bez otworu na rysunku 4.21. Dokonano pomiaru wybranych cech widocznych na przekroju złącza, a ich wyniki wraz z oznaczeniem złączy, średnią wartością maksymalnej siły i energochłonności procesu formowania zestawiono w tabeli 4.8.



Rys. 4.21. *Zestawienie obrysu nita pełnego z geometrią ukształtowaną z zastosowaniem nita zmodyfikowanego: a) X10, b) X15, c) X20, d) X11, e) X16, f) X20*

Tabela 4.8. *Zestawienie wartości sił i energii wyznaczonych w procesie formowania i pomiaru geometrii, wykonanych na podstawie przekrojów złączy dla badań eksperymentalnych*

Oznaczenie złącza	**Średnia wartość maksymalnej siły formującej**	**Średnia wartość energochłonności procesu formowania**	**Pomiary geometrii na przekroju złącza zgodnie z oznaczeniami na rysunku 3.6**						
	F_f [kN]	**W_f [J]**	**d_{nit} [mm]**	**d_{wyp} [mm]**	**d_{zew} [mm]**	**h_{nit} [mm]**	**$h_{b\text{-}min}$ [mm]**	**t_n [mm]**	**t_u [mm]**
X00	75,82	231,4	5,88	6,84	8,68	3,75	0,3	0,27	0,32
X10	72,68	226,9	5,88	6,83	8,63	3,8	0,28	0,27	0,31
X15	69,47	220,08	5,86	6,82	8,59	3,87	0,27	0,28	0,31
X20	63,75	208,59	5,79	6,71	8,49	3,95	0,22	0,29	0,31
X11	72,87	227,68	5,87	6,81	8,66	3,82	0,29	0,27	0,30
X16	68,86	218,68	5,83	6,76	8,62	3,88	0,26	0,28	0,30
X21	70,28	214,74	5,88	6,75	8,5	3,89	0,24	0,26	0,30

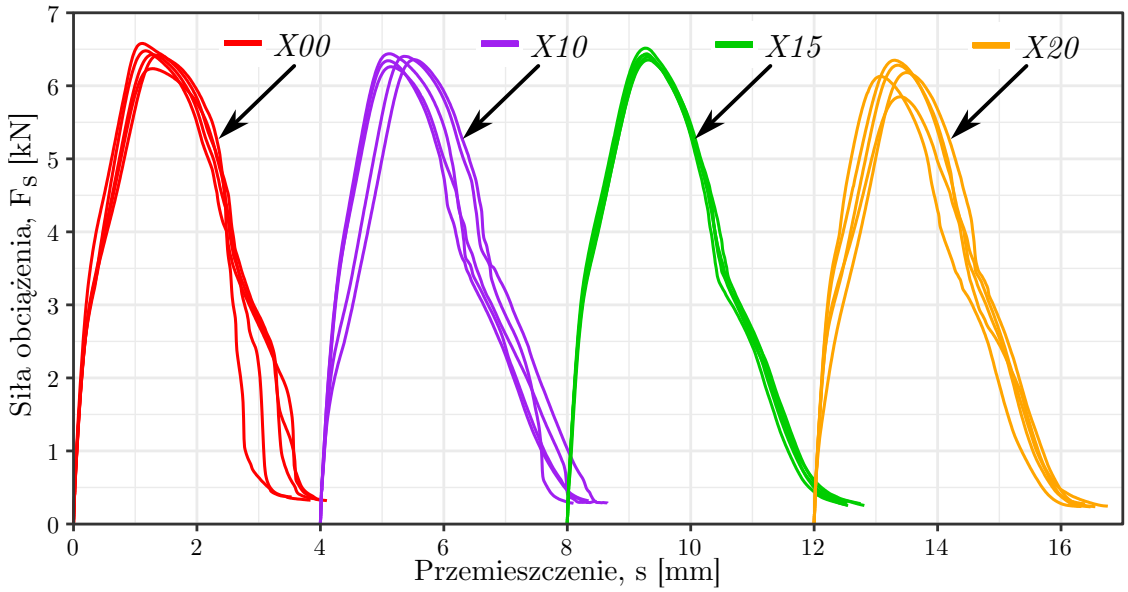
Dla wszystkich złączy w badaniach eksperymentalnych osiągnięto dodatnie parametry ukształtowanego zamka z zachowaniem ciągłości łączonych warstw. Wartość t_n dla scalenia z nitem *X10* pozostała taka sama jak w przypadku wariantu bez modyfikacji łącznika (*X00*). Zauważono wzrost grubości w złączach z wykonanych z zastosowaniem nitów *X15* i *X20* o odpowiednio 0,01 mm i 0,02 mm. Złącze z nitem *X11* osiągnęło taką samą wartość

t_n jak *X00*. W przypadku nita *X16* zaobserwowano przyrost o 0,01 mm zaś dla złączy z nitem *X21* pomiar wykazał spadek o 0,01 mm. Wartość ukształtowanego zamka t_u dla wszystkich połączeń wykonanych z otworem przelotowym była mniejsza o 0,01 mm. Zkolei dla nitów wierconych nieprzelotowo uzyskano wynik mniejszy o 0,02 mm.

Zmodyfikowany nit w gotowym złączu został zatopiony głębiej w materiale górnej blachy niż jego podstawowa wersja. Wartość wysokości h_{nit} odnotowana na podstawie danych eksperymentalnych była większa o 1,3% dla złączy z nitem *X10*. Przyrost dla nitów *X15* i *X20* wyniósł odpowiednio 3,2% i 5,3%. Przyrost h_{nit} dla nitów wierconych nieprzelotowo wyniósł odpowiednio 1,9%, 3,5% i 3,7% dla nitów *X11*, *X16* i *X21*. Szerokość ukształtowanego łącznika u jego podstawy d_{nit} była taka jak w przypadku nita pełnego dla wariantów *X10* i *X21*. W pozostałych przypadkach zaobserwowano niewielki spadek wartości. Dla nitów wierconych przelotowo *X15* i *X20* wyniósł 0,3% i 1,5%, zaś dla nitów wierconych nieprzelotowo zaobserwowano spadek wielkości 0,2% w złączach z nitem *X10* i 0,9% dla połączeń, w których zastosowano nit *X16*.

4.4.2 Nośność w próbie ścinania

Zestawienie przebiegu krzywych wyznaczonych w badaniach nośności na ścinanie przedstawiono na rysunku 4.22. Zawarto na nim krzywe dla połączeń z niezmodyfikowanym nitem (*X00*) wraz z połączeniami z zastosowaniem łączników z otworami wykonanymi przelotowo (ϕ *1,0 mm - X10,* ϕ *1,5 mm - X15 i* ϕ *2,0 mm - X20*)

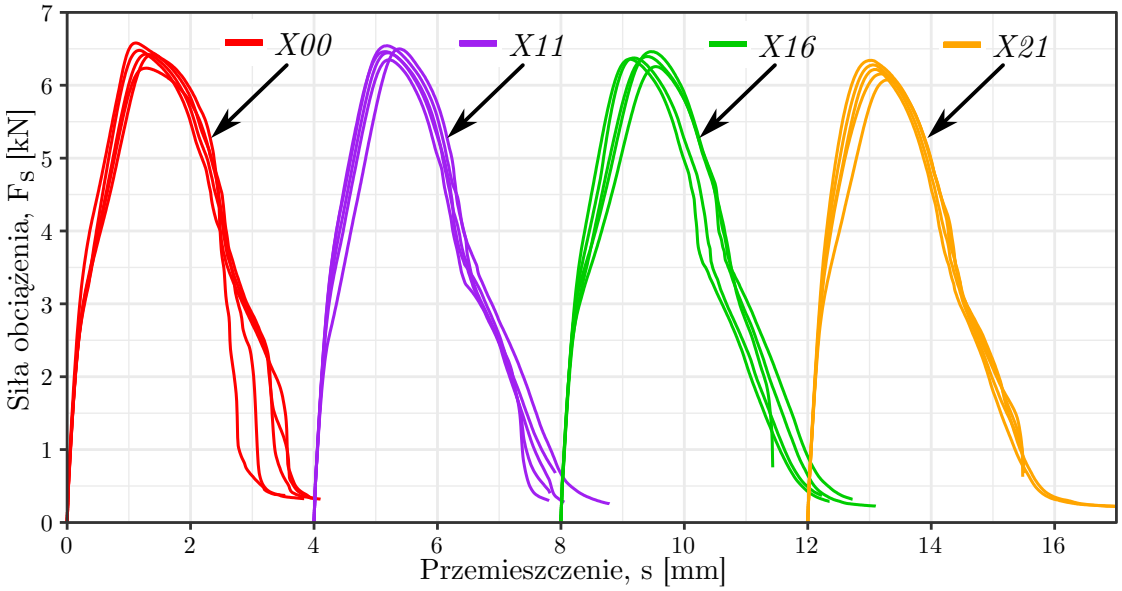


Rys. 4.22. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób nośności na ścinanie dla złączy z nitem podstawowym (X00) oraz z jego modyfikacjami w postaci otworu przelotowego*

Średnia wartość maksymalnej siły obciążenia w przypadku złączy, dla których zastosowano nit *X10* była niższa o 0,6% w stosunku do połączeń z łącznikiem niezmodyfikowanym (X00). W przypadku złączy z nitem *X15* zaobserwowano wzrost siły o 0,5%. Próbki w których jako dodatkowy element odkształcalny zastosowano nit wiercony przelotowo *X20*

odnotowały spadek siły obciążenia o 1,7%.

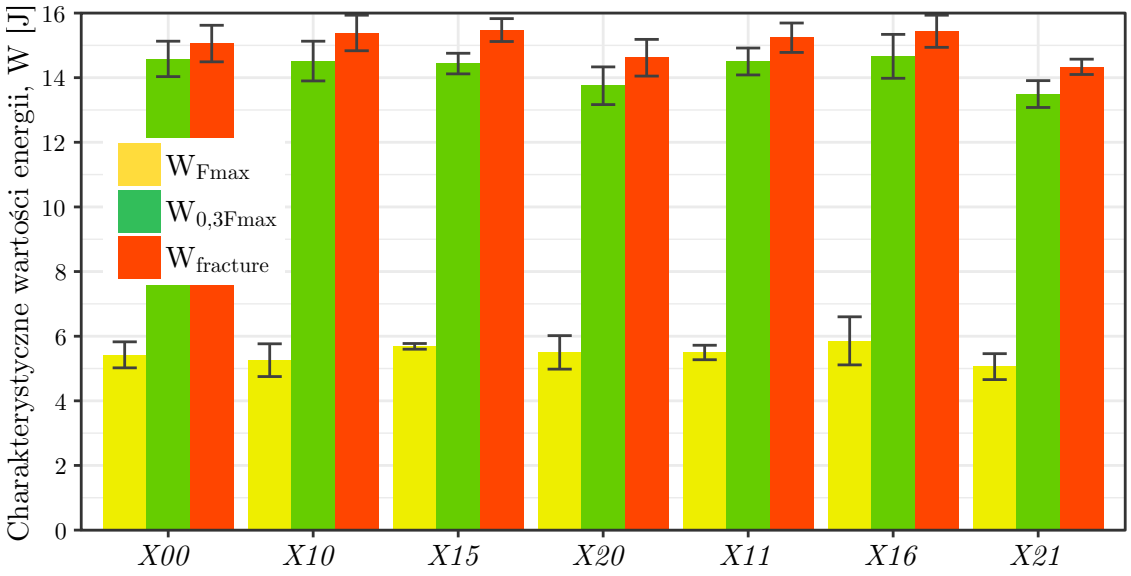
Zestawienie krzywych wyznaczonych w próbie ścinania zakładkowego połączenia CR z nitem pełnym wraz z jego modyfikacjami w postaci otworu wykonanego nieprzelotowo, przedstawiono na rysunku 4.23.



Rys. 4.23. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób nośności na ścinanie dla złączy z nitem podstawowym (X00) oraz z jego modyfikacjami w postaci otworu nieprzelotowego*

Średnia wartość maksymalnej siły obciążenia w przypadku połączeń z modyfikacją nita w postaci otworu nieprzelotowego o średnicy 1 mm (*X11*) i 1,5 mm (*X16*) wzrosła w stosunku do podstawowego wariantu o odpowiednio 1,4% i 0,7%. W przypadku złączy z największym wierconym nieprzelotowo otworem w modyfikowanym nicie (*X21*) zaobserwowano spadek wartości siły o 1,9%.

Zestawienie energii zniszczenia złączy wyznaczone na podstawie krzywych z prób ścinania połączenia zakładkowego przedstawiono na rysunku 4.24. Uwzględniono w nim zarówno energię dla złączy z pełnym nitem, a także obu zastosowanych modyfikacji tj. z otworem na pełną i ograniczoną głębokość.



Rys. 4.24. *Zestawienie wartości energii, wyznaczonych na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie*

Energia W_{Fmax} wyznaczona do osiągnięcia maksymalnej wartości siły obciążenia, w przypadku złączy wykonanych z nitem *X10* była mniejsza o 3,1% w stosunku do połączeń z zastosowaniem nita pełnego. W przypadku dwóch pozostałych wariantów z nitami wierconymi przelotowo, zaobserwowano przyrost W_{Fmax} o 4,9% w złączach z nitem *X15* i 1,4% dla połączeń *X20*. Połączenia w których zastosowano nity wiercone nieprzelotowo *X11* i *X16* odnotowały wzrost o 1,3% i 8%. Energia W_{Fmax} dla wariantu *X21* była mniejsza o 6,7% w odniesieniu do złącza z pełnym nitem.

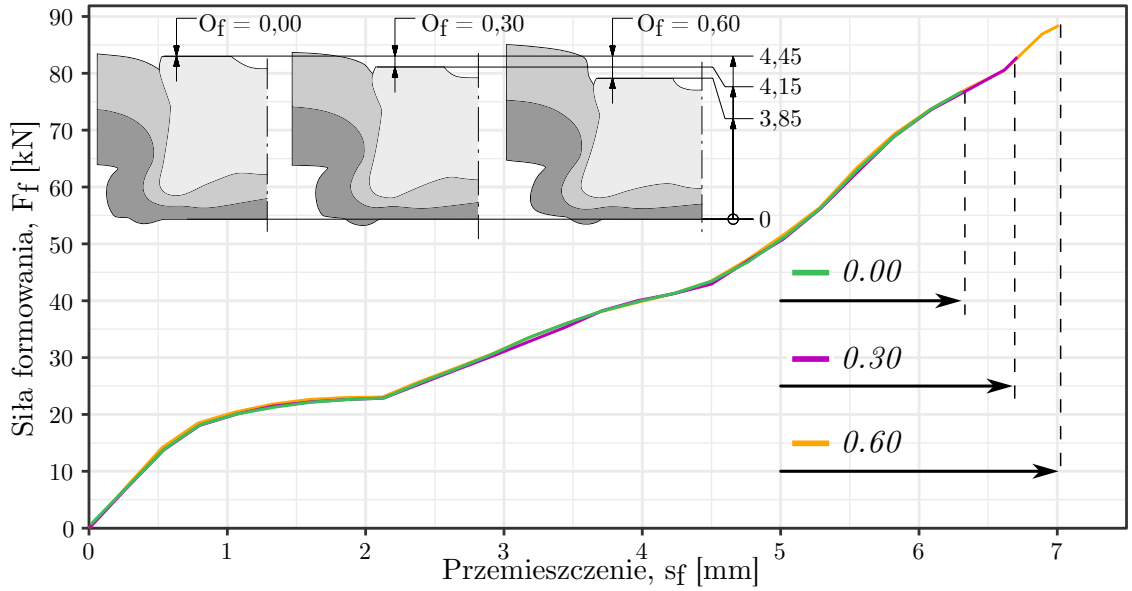
Na podstawie wykonanego pomiaru energii mierzonej do osiągnięcia punktu $0,3F_{max}$ dla wszystkich wariantów z zastosowaniem nitów wierconych zaobserwowano mniejszą jej wartość w stosunku do połączenia z pełnym nitem. Próbki w których scalenie warstw wykonano z nitami *X10* i *X15* miały mniejszą wartość $W_{0,3Fmax}$ o 0,5% i 1%. W przypadku złączy wykonanych z nitem X20 różnica ta była większa i wyniosła 5,7%. Pomiar energii $0,3F_{max}$ dla połączeń z nitami wierconymi nieprzelotowo wykazał spadek jej wartości dla nitów *X11* i *X21* o 0,5% i 7,5%. W przypadku zastosowania nita *X16* wartość energii $0,3F_{max}$ była większa niż w połączeniach z pełnym nitem o 0,6%.

Energia zniszczenia mierzona aż do punktu pełnej separacji łączonych warstw $W_{fracture}$ miała mniejszą wartość względem połączeń z pełnym nitem o 2,9% dla złączy z modyfikacją w postaci otworu *phi* 2 mm w wersji przelotowej (*X20*) i 4,8% dla połączeń *X21*. W pozostałych przypadkach wartość energii $W_{fracture}$ była większa dla zmodyfikowanych nitów o 2,2% i 2,8% dla próbek z nitami *X10* i *X15*. Z kolei dla połączeń z nitami wierconymi nieprzelotowo *X11* i *X16* zaobserwowano przyrost o 1,2% i 2,3%.

4.5 Wpływ zmiany głębokości wtłoczenia nita na charakterystykę złącza *CR*

4.5.1 Przebieg i efekty formowania złącza

Kolejną zbadaną modyfikacją procesu formowania połączenia *CR* była zmiana finalnej pozycji stempla przed jego wycofaniem do zakończenia kształtowania scalenia. Postanowiono przeanalizować jak wpływa wielkość wtłoczenia nita poniżej powierzchni łączonych blach na siłę formowania i parametry zamka złącza. Krzywe formowania z pozycją standardową, a także zwiększoną odpowiednio o 0,30 i 0,60 mm, przedstawiono na rysunku 4.25.

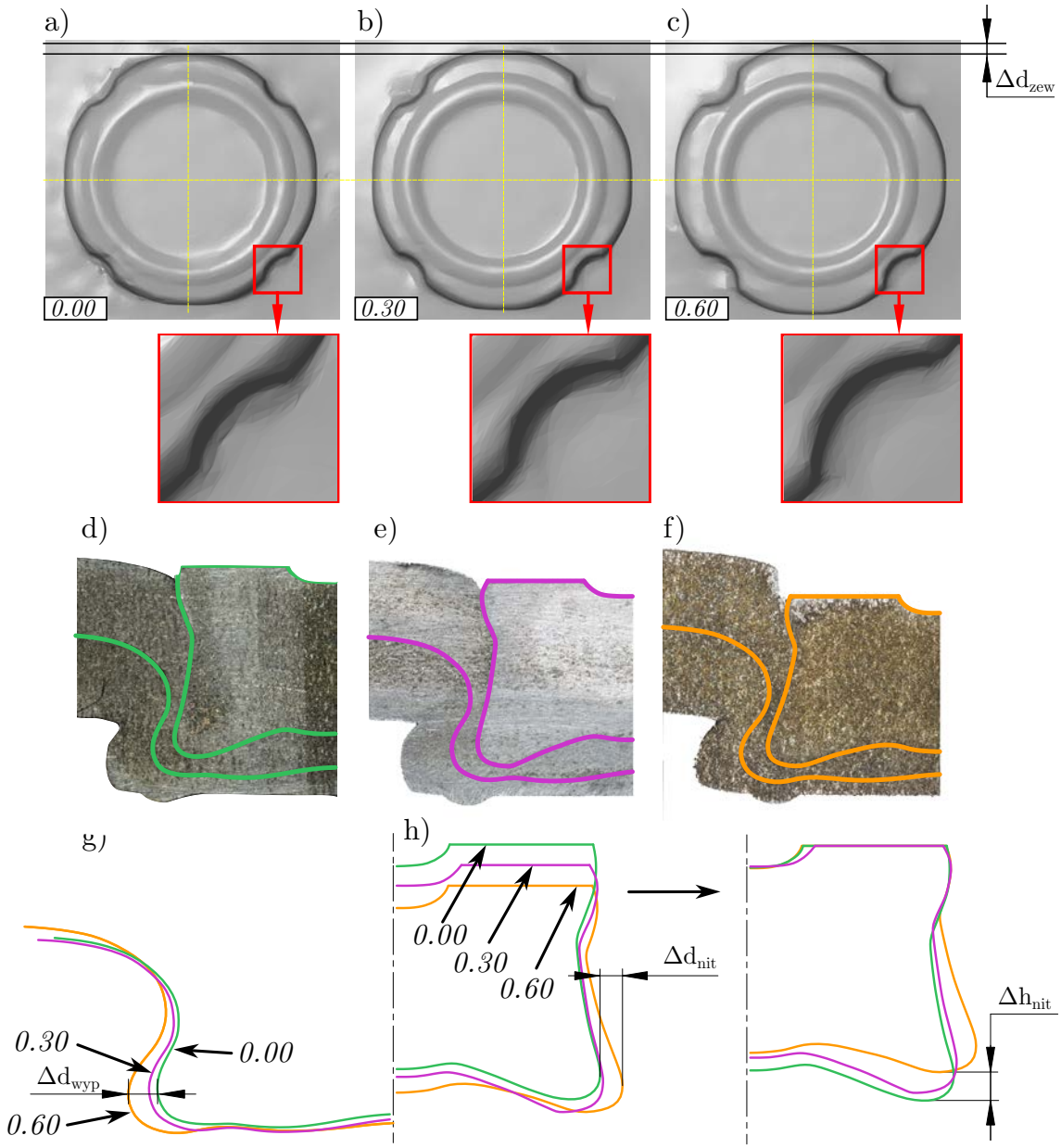


Rys. 4.25. *Zestawienie krzywych formowania połączenia CR dla rożnej pozycji końcowej czoła stempla wtłaczającego nit*

Zmniejszenie odległości pomiędzy stemplem, a dnem matrycy o 0,30 mm skutkowało zwiększeniem maksymalnej wartości siły formowania o 8,9% w stosunku do wariantu *0.00*. W przypadku aranżacji w której odległość została zmniejszona o 0,60 mm wartość maksymalnej siły formowania wzrosła o 17,2%. Wydłużony proces kształtowania złącza przetłaczanego wpłynął na wartość energii wymaganej do uformowania złącza. Dla pozycji stempla wydłużonej o 0,30 mm (złącze opisane jako *0.30*) wartość była większa o 15,4%, a w przypadku procesu kształtowania wydłużonym o 0,60 mm (*0.60*) przyrost wyniósł 28,3%.

Wydłużony ruch stempla poniżej powierzchni łączonych blach wprowadził znaczące zmiany w ukształtowanej geometrii. Zestawienie przetłoczenia uformowanego w wykroju matrycy - odwzorowanego z zastosowaniem skanera 3D - zestawiono na rysunkach 4.26a-c. Struktura budowy przekroju złączy przetłaczanych ze standardową i zwiększoną pozycją stempla wtłaczającego nit w technologii *CR* przedstawiono na rysunku 4.26d-f. Na grafice

zawarto zarysy krawędzi pomiędzy łączonymi warstwami i nitów.



Rys. 4.26. *Widok przetłoczenia materiału dolnej blachy dla wariantu: a) 0.00 b) 0.30 c) 0.60. Struktura budowy na przekroju złączy z głębokością wtłaczania powiększoną o: d) 0,00 mm, e) 0,30 mm, f) 0,60 mm. Zestawienie zarysów: g) krawędzi pomiędzy łączonymi warstwami, h) ukształtowanych nitów*

Na podstawie struktury budowy złącza na przekroju dokonano pomiaru wybranych cech. Wyniki wraz z przyjętym oznaczeniem złączy, średnią wartością maksymalnej siły i energochłonności procesu formowania zestawiono w tabeli 4.7.

Tabela 4.9. *Zestawienie średnie wartości sił i energochłonności formowania oraz charakterystycznych parametrów zamka w zależności od głębokości wtłaczania*

Oznaczenie złącza	Średnia wartość maksymalnej siły formującej	Średnia wartość energochłonności procesu formowania	Pomiary geometrii na przekroju złącza zgodnie z oznaczeniami na rysunku 3.6						
	$\mathbf{F_f}$ [kN]	$\mathbf{W_f}$ [J]	$\mathbf{d_{nit}}$ [mm]	$\mathbf{d_{wyp}}$ [mm]	$\mathbf{d_{zew}}$ [mm]	$\mathbf{h_{nit}}$ [mm]	$\mathbf{h_{b\text{-}min}}$ [mm]	$\mathbf{t_n}$ [mm]	$\mathbf{t_u}$ [mm]
0.00	76,32	221,73	5,87	6,84	8,68	3,83	0,27	0,29	0,32
0.30	83,11	255,94	6,07	7,07	9,00	3,61	0,26	0,29	0,39
0.60	89,43	284,57	6,63	7,61	9,36	3,3	0,23	0,24	0,52

Zmiana finalnej pozycji stempla w procesie formownia wpłynęła na rozmiar utworzonego przetłoczenia w wykroju matrycy. Dla głębokości wtłaczania zwiększonej o 0,30 mm przyrost wartości d_{zew} wyniósł 3,7%, z kolei dla wariantu z najmniejszą odległością stempla względem dna wnęki matrycy (*0.60*) wartość była większa o 7,8% w stosunku do wariantu podstawowego. Wraz ze powiększaniem rozmiaru przetłoczenia zaobserwowano znacząco większy wpływ segmentów stałych trzpienia formującego w postaci odcisków. (rys. 4.26a-c).

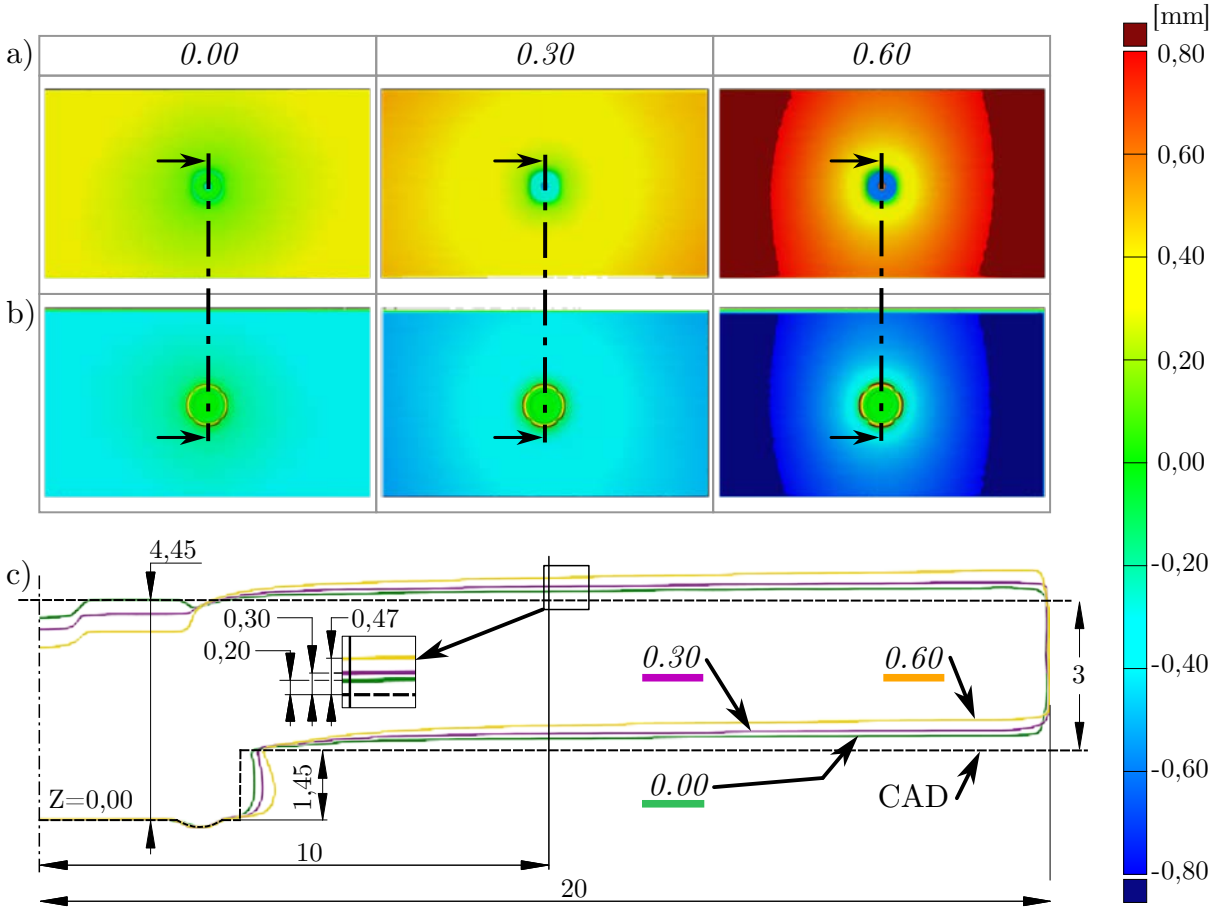
Wraz z przyrostem wymiaru zewnętrznego wypływki, położenie wysuniętego najdalej od osi złącza punktu na zamku d_{wyp} uległo przesunięciu względem osi połączenia. Wariant z głębokością wtłaczania zwiększoną o 0,30 mm spowodował przesunięcie o 3,4% natomiast dla wariantu *0.60* zaobserwowano większy przyrost, który wyniósł 11,3% w odniesieniu do standardowego rozwiązania.

Zmiana głębokości wtłaczania wpłynęła również na charakterystyczne parametry zamka ukształtowanego połączenia. Pocienienie materiału w obszarze zamka górnej blachy (t_n) w przypadku wariantu *0.30* było takie samo jak dla standardowego rozwiązania. W przypadku wariantu *0.60* wartość ta uległa pomniejszeniu o 17,2%. Wzajemne zapłynięcie materiału t_u wraz z zwiększaniem głębokości wtłaczania uległo przyrostowi o 21,9% dla wariantu pośredniego i 62,5% dla rozwiązania gdzie droga procesu formowania została zwiększona o 0,60 mm.

Na podstawie obserwacji struktury budowy w ukształtowanym złączu stwierdzono różnice w geometrii nita. Wysokość h_{nit} uległa zmniejszeniu wraz z pomniejszaniem odległości finalnej pozycji stempla względem dna matrycy. Przy rozwiązaniu *0.30* wysokość nita po ukształtowaniu połączenia była mniejsza o 5,7% z kolei dla wariantu z największą głębokością wtłaczania zmierzona wartość była zredukowana o 13,8% w odniesieniu do podstawowego rozwiązania (*0.00*). Szerokość nita u jego podnóża (d_{nit}) uległa zwiększeniu co wpłynęło zarówno na przesunięcie linii zarysu jak i wielkość zamka. Wydłużenie procesu formowania spowodowało również pocienienie grubości dolnej warstwy h_{b-min} w jej najcieńszym miejscu.

4.5.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza

Mimo stosowania elementu dociskowego materiał blach i tak ulega deformacjom wynikającym z plastycznego jego płynięcia. Zachowanie stosunkowo płaskiej powierzchni połączonych blach jest istotne z punktu widzenia dalszego montażu cienkościennych zespołów. W związku z powyższym dokonano analizy deformacji blach w gotowym złączu. Analizę deformacji w obszarze połączenia przetłaczanego wykonano z wykorzystaniem skanera 3D. Modele powierzchniowe zeskanowanych próbek o wymiarze 110 mm x 40 mm ze złączem zlokalizowanym w jej centrum porównano do uproszczonej geometrii CAD. Teoretyczny model 3D uwzględnia grubość łączonych warstw i uproszczoną geometrię przetłoczenia ukształtowanego wewnątrz wykroju matrycy. Porównanie powierzchni w postaci kolorowej mapy odchyłek dla trzech wariantów głębokości wtłoczenia przedstawiono na rysunku 4.27.



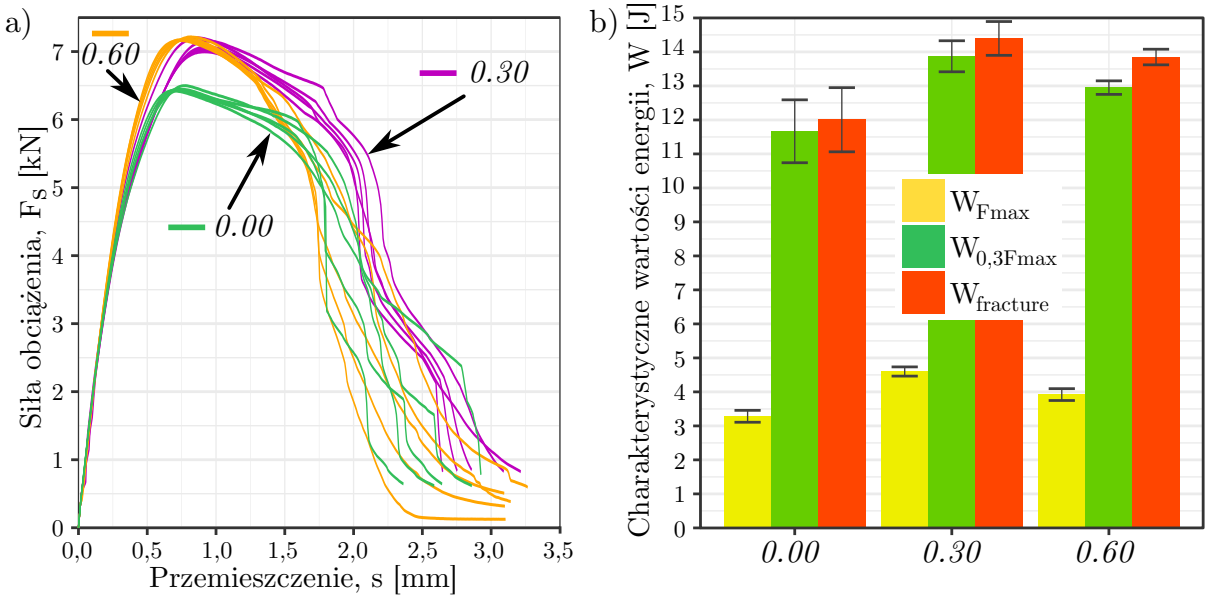
Rys. 4.27. *Charakterystyka deformacji pasm blach w złączu CR dla różnej pozycji położenia czoła stempla wtłaczającego nit względem powierzchni blachy górnej: a) mapy rozkładu odchyłek, b) porównanie zarysów krawędzi zewnętrznych blach*

Wykonanie złącza przetłaczanego wpłynęło z różną intensywnością na kształt blach w obszarze złącza. Największą wartość deformacji zaobserwowano w przypadku wariantu z głębokością wtłaczania zwiększoną o 0,60 mm względem standardowej pozycji. Na zestawieniu przekrojów wykonanych przez złącza wykonano pomiar odległości punktu oddalo-

nego o 10 mm od osi próbki. Wartość deformacji we wspomnianym punkcie dla wariantu z pozycją stempla zwiększoną o 0,30 mm względem wariantu *0.00* była większa o 50%, zaś przy głębokości wtłaczania zwiększonej o 0,60 mm przyrost był większy i wyniósł 135%.

4.5.3 Nośność w próbie ścinania

Na podstawie przeprowadzonej analizy nośności w próbie ścinania złącza zakładkowego zaobserwowano różnicę w maksymalnej wartości siły obciążenia połączenia zależnie od wielkości wtłaczania nita. Na rysunku 4.28a przedstawiono zestawienie krzywych z prób rozciągania. Na podstawie uzyskanych przebiegów dokonano pomiaru energii zniszczenia, a ich wartości przedstawiono w postaci wykresu słupkowego na rysunku 4.28b.

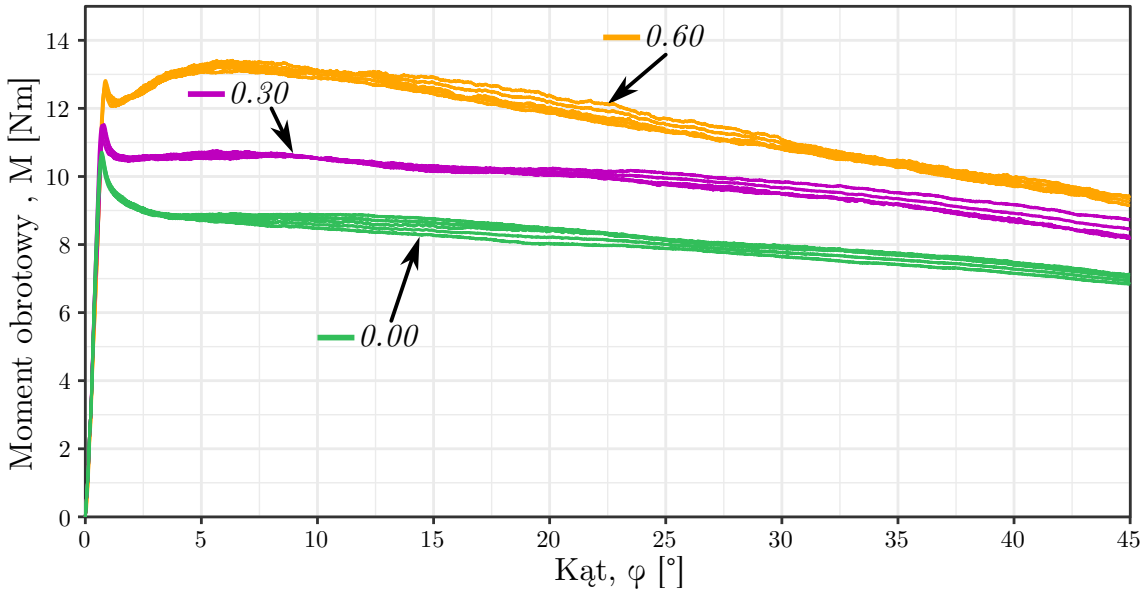


Rys. 4.28. *Zestawienie a) przebiegu krzywych uzyskanych podczas ścinania połączenia CR w próbie rozciągania zakładkowego połączenia blach, dla trzech rożnych pozycji czoła stempla względem powierzchni górnej blachy podczas formowania, b) wartości energii zniszczenia złączy*

Zarówno w przypadku wariantu *0.30* jak i *0.60* zaobserwowano zmianę nośności złącza, których średnia wartość była większa o 9,8% i 11,2% w stosunku do standardowej głębokości wtłaczania nita. Dla każdego z typów energii dla wariantu *0.30* zaobserwowano najwyższe wartości spośród analizowanych złączy. Energia zniszczenia do osiągnięcia maksymalnej wartości W_{Fmax} w przypadku głębokości wtłaczania powiększonej o 0,30 mm wzrosła o 40,2%. Wariant z finalną pozycją stempla zbliżoną o 0,60 mm względem dna matrycy osiągnął energię większą o 19,5% w odniesieniu do aranżacji *0.00*. Średnia wartość energii liczonej do punktu $0{,}3F_{max}$ dla wariantu *0.30* była wyższa o 18,9%, zaś dla aranżacji *0.60* $W_{0,3Fmax}$ zaobserwowano przyrost wynoszący 11%. Wartość $W_{fracture}$ w przypadku *0.30* została zwiększona o 19,9%. Średnia wartość całkowitej energii zniszczenia dla głębokości wtłaczania 0,60 została zwiększona o 15,4%.

4.5.4 Nośność skrętna złączy

Dla złączy wykonanych z różną wartością głębokości wtłoczenia nita wykonano próby badania nośności skrętnej złączy *CR*. Dla porównania zestawiono je z wynikami uzyskanymi dla połączenia o standardowej pozycji stempla. Przebieg krzywych z badań utraty nośności na rysunku 4.29.



Rys. 4.29. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób badania utraty nośności skrętnej złącza przetłaczanego*

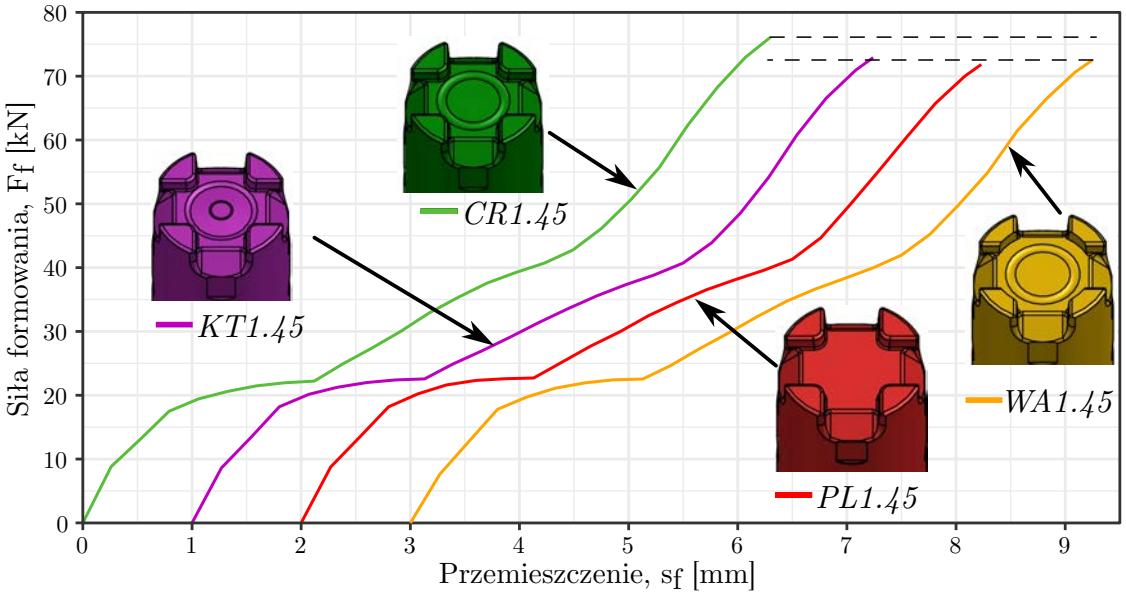
Zaobserwowano różnice w średniej wartości maksymalnego momentu obrotowego w przypadku złączy ukształtowanych z różną pozycją stempla w procesie formowania. W obu niestandardowych wariantach dostrzeżono większą średnią wartość momentu obrotowego w którym nastąpiła utrata nośności skrętnej złącza. W przypadku połączenia z oznaczeniem *0.30* wartość była większa o 7,4%, a z kolei dla wariantu *0.60* zaobserwowano jej wzrost o 20,1% w stosunku do złączy oznaczonych *0.00*. Miało to związek z niesymetrycznym kształtem wewnątrz złącza. Asymetria ta wynika z większego przemieszczenia łączonych warstw w przestrzeń pomiędzy segmentami stałymi.

4.6 Wpływ zmiany geometrii wnęki matrycy na charakterystykę złącza *CR*

4.6.1 Przebieg i efekty formowania złącza

Analiza wpływu zmiany geometrii wnęki matrycy została przeprowadzona z zastosowaniem zaprojektowanego i wyprodukowanego zestawy matrycy. Postanowiono wykonać eksperymentalnie połączenia dwóch warstw materiału DX51D+Z o grubości 1,5mm z nitem bazowym o przyjętym oznaczeniu *X00*. Zestawienie krzywych z procesu formowania

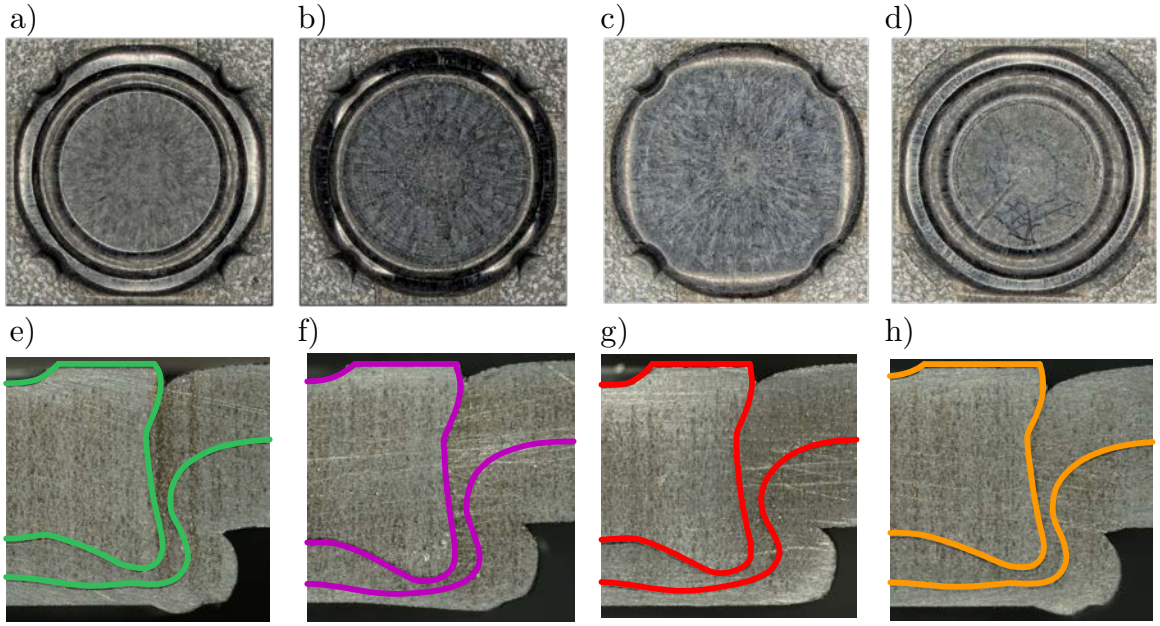
złączy z zastosowaniem czterech trzpieni o zróżnicowanej geometrii lecz zachowaniem stałej wysokości h_d przedstawiono na rysunku 4.30. W ramach analizy oznaczenia poszczególnych złączy przyjęto zgodnie z zastosowanym trzpieniem do ukształtowania połączenia.



Rys. 4.30. *Zestawienie krzywych formowania dla złączy wykonanych z wykorzystaniem wytworzonych trzpieni kształtujących złącze*

Połączenie wykonane z zastosowaniem trzpienia o wysokości segmentów stałych 1,45 mm i charakterystycznym rowkiem na dnie (*CR1.45*) osiągnęło największą maksymalną wartością siły formowania. W przypadku złączy ukształtowanych zestawem matrycy uzbrojonym w trzpień *KT1.45* siła ta była mniejsza o 4,5% w stosunku do wariantu *CR1.45*. Dla złącza z płaską powierzchnią przetłoczenia (*PL1.45*) zaobserwowano mniejszą wartość siły o 6%. Rozwiązanie konstrukcyjne matrycy z uwzględnieniem trzpienia w którym segmenty stałe nie biorą udziału w procesie formowania, zaś pełnią jedynie funkcję podpierającą blachę (*WA1.45*) osiągnęło wartość siły formowania mniejszą o 4,9% w stosunku do rozwiązania *CR1.45*. Wraz ze spadkiem wartości siły potrzebnej do ukształtowania złącza, mniejsza była również energia formowania. Dla złączy opisanych zgodnie z zastosowanym trzpieniem *KT1.45* zaobserwowano spadek o 4,7%. Rozwiązanie z zastosowaniem trzpienia z płaską geometrią dna wnęki matrycy *PL1.45* odnotowało spadek o 4%, zaś w przypadku wariantu *WA1.45* średnia wartość energii potrzebnej do uformowania złącza była mniejsza o 3,6%.

Kształt powierzchni trzpienia formującego zespołu matrycy ma bezpośredni wpływ na powstałe przetłoczenia złączy, których widok przedstawiono na rysunkach 4.31a-d. Na podstawie struktury budowy złączy (rysunek 4.31)e-h wykonano pomiar wybranych cech, których wyniki wraz z oznaczeniem próbek, średnią wartością maksymalnej siły i energochłonności procesu formowania zestawiono w tabeli 4.10



Rys. 4.31. *Zestawienie ukształtowanych przetłoczeń we wnęce matrycy, wykonanych z wykorzystaniem wytworzonych trzpieni: a) CR1.45, b) KT1.45, c) PL1.45, d) WA1.45 oraz struktura budowy na przekroju złącza ukształtowanego trzpieniem: e) CR1.45, f) KT1.45, g) PL1.45, h) WA1.45*

Tabela 4.10. *Zestawienie wartości sił i energii wyznaczonych w procesie formowania i pomiaru geometrii, wykonanych na podstawie przekrojów złączy*

Oznaczenie złącza	**Średnia wartość maksymalnej siły formującej**	**Średnia wartość energochłonności procesu formowania**	**Pomiary geometrii na przekroju złącza zgodnie z oznaczeniami na rysunku 3.6**						
	F_f [kN]	**W_f [J]**	**d_{nit} [mm]**	**d_{wyp} [mm]**	**d_{zew} [mm]**	**h_{nit} [mm]**	**$h_{b\text{-}min}$ [mm]**	**t_n [mm]**	**t_u [mm]**
CR1.45	76,32	221,73	5,87	6,84	8,68	3,83	0,27	0,27	0,32
KT1.45	72,86	211,24	5,55	6,51	8,62	3,96	0,21	0,27	0,3
PL1.45	71,75	212,76	5,79	6,88	8,77	3,86	0,21	0,29	0,35
WA1.45	72,57	213,69	5,65	6,5	8,44	3,84	0,31	0,25	0,28

Wymiar zewnętrzny ukształtowanej geometrii d_{zew} był największy w przypadku zastosowania trzpienia *PL1.45* o płaskiej geometrii dna, a jego wartość była o 1% większa w stosunku do połączeń o oznaczeniu *CR1.45*. W przypadku formowania złącza z wykorzystaniem trzpieni *KT1.45* i *WA1.45* zaobserwowano mniejszą wartość zewnętrznego rozmiaru ukształtowanej geometrii o odpowiednio 0,7% i 2,8% w porównania do próbki *CR1.45*.

Na podstawie obserwacji struktury budowy na przekroju złącza zauważono, iż dla każ-

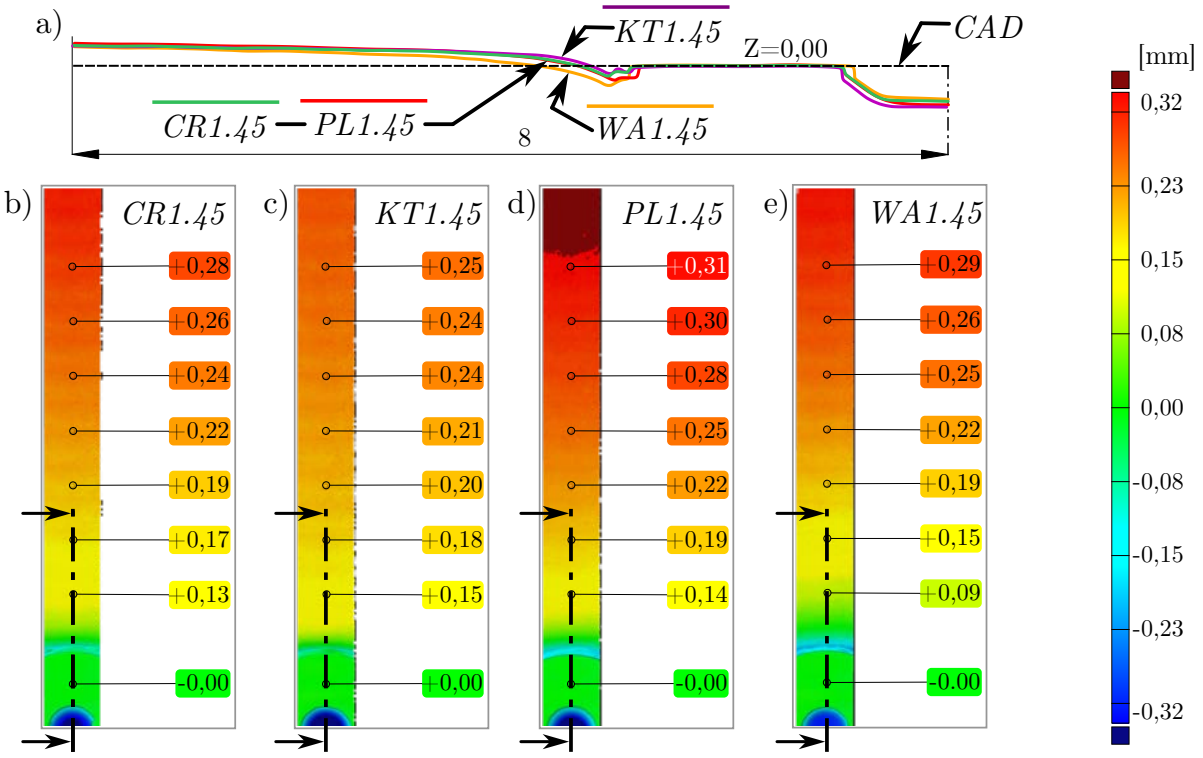
dego z wariantów uzyskano dodatnie wartości parametrów zamka t_n i t_u przy zachowaniu ciągłości łączonych warstw. Zmierzona wartość grubości górnej warstwy w obszarze zamka (t_n) w przypadku połączenia *KT1.45* była taka jak dla złącza wykonanego z zastosowaniem trzpienia *CR1.45*. Dla wariantu *PL1.45* zaobserwowano wartość większą o 7,4%, a z kolei dla aranżacji *WA1.45* odnotowało mniejszą jej wartość w stosunku do *CR1.45* o 7,4%. Wielkość ukształtowanego zamka (t_u) w złączach *KT1.45* była mniejsza o 6,3% niż dla złączy kształtowanych trzpieniem z charakterystycznych rowkiem na dnie(*CR1.45*). Dla połączenia scalonego z zastosowaniem trzpienia o płaskiej geometrii dna ()*PL1.45*) wartość wzajemnego zablokowania warstw była największa i była ona większa o 9,4% niż w przypadku złączy *1.45CR*. Zmierzona wartość t_u wariantu *WA1.45* była mniejsza w stosunku do połączeń utworzonych z zastosowaniem trzpienia *CR1.45* o 12,5%.

Pomiar grubości dolnej blachy h_{b-min} w najbardziej pocienionym miejscu dla połączeń z zastosowaniem trzpieni formujących *KT1.45* i *PL1.45* w stosunku do wartości otrzymanej dla wariantu *CR1.45* był mniejszy o 22,2%. W przypadku zespołu formującego matrycy z trzpieniem *WA1.45* pomiar wykazał większą grubość w stosunku do złącza *CR1.45* o 14,8%.

Pomimo zastosowania tego samego elementu odkształcalnego pomiar geometrii na przekroju złącza wykazał różnice w kształcie nita. Największą różnicę w stosunku do złącza wykonanego z trzpieniem *CR1.45* zaobserwowano w przypadku zespołu matrycy uzbrojonego w trzpień *KT1.45*, gdzie wysokość nita h_{nit} była większa o 3,4%. Różnica wysokości w połączeniach *PL1.45* wyniosła 0,8% zaś w przypadku złączy wykonanych z trzpieniem *WA1.45* przyrost wyniósł jedynie 0,3%. Wartość zmierzona u podstawy nita d_{nit} dla wszystkich trzpieni była mniejsza niż w rozwiązaniu *CR1.45*, a wartość redukcji wyniosła odpowiednio 5,5% dla trzpienia *KT1.45*, 1,4% przy uzbrojeniu matrycy w trzpień *PL1.45* i 3,8% w przypadku wariantu *WA1.45*.

4.6.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza

Do przeprowadzenia analizy wpływu zmiany geometrii wnęki matrycy na deformację w obszarze złącza przetłaczanego z zastosowaniem różnych trzpieni zespołu matrycy dokonano porównania zdigitalizowanych powierzchni z modelem 3D. Kolorową mapę odchyłek dla każdego z wariantów wraz z zestawieniem przekroi w oznaczonym obszarze przedstawiono na rysunku 4.32. Odtworzoną geometrię w postaci modelu powierzchniowego porównano do płaszczyzny

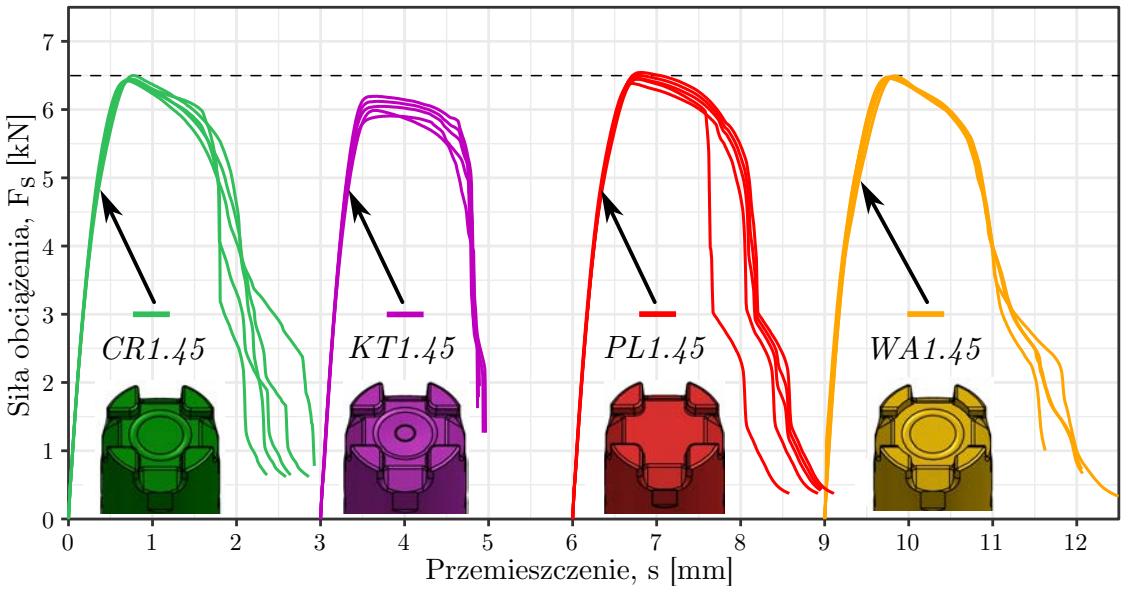


Rys. 4.32. *Deformacja górnej blachy dla złączy wykonanych z wykorzystaniem różnych trzpieni*

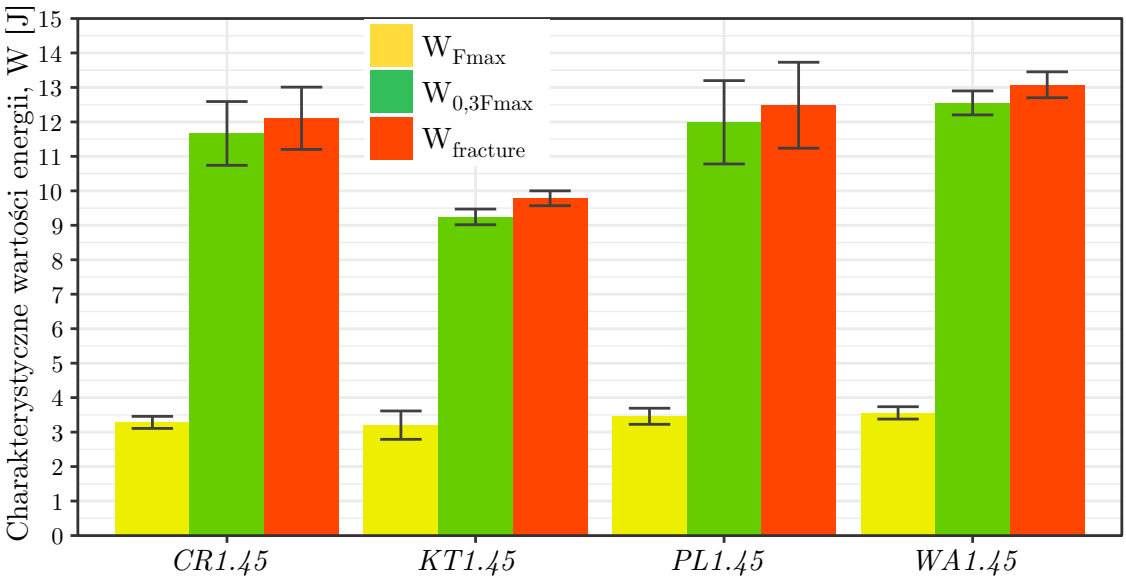
Krzywa przekroju z zastosowaniem trzpienia *PL1.45* niemal pokrywa się z geometrią ukształtowaną z zastosowaniem trzpienia *CR1.45*. Zmniejszona powierzchnia podparcia w przypadku wariantu *WA1.45* spowodowała największe odchylenie w obszarze złącza obserwowanym do 8 mm do osi nita. Na podstawie wartości pomierzonych punktów zlokalizowanych w równych odległościach od osi złącza nie stwierdzono znaczących różnic w dewiacji powierzchni dla zbadanych wariantów.

4.6.3 Nośność w próbie ścinania

Dla wariantów ukształtowanych z zastosowaniem różnej geometrii dna formującego trzpienia, lecz z zachowaniem wysokości h_d = 1,45 mm postanowiono przeanalizować nośność wyznaczoną w próbie ścinania. Na rysunku 4.33 przedstawiono zestawienie zależności siły obciążenia od przemieszczenia z przeprowadzonych badań niszczących. Na podstawie uzyskanych przebiegów dokonano pomiaru energii zniszczenia, a ich wyniki przedstawiono w postaci wykresu słupkowego na rysunku 4.34.



Rys. 4.33. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób wytrzymałości na ścinanie*



Rys. 4.34. *Zestawienie wartości energii, wyznaczonych na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie*

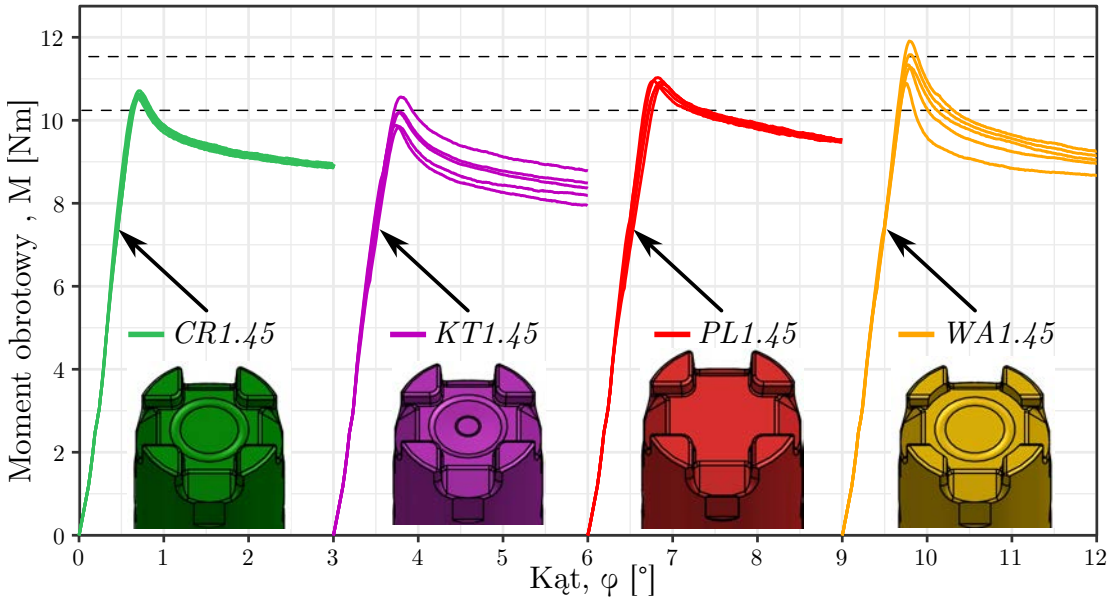
Na podstawie przeprowadzonych prób nośności na ścinanie zaobserwowano, iż średnia wartość maksymalnej siły obciążenia dla wariantów *PL*1.45 i *WA1.45* była zbliżona do wariantu *CR1.45*. Wzrost w aranżacji *PL1.45* wynosił jedynie 0,3%, a w przypadku rozwiązania konstrukcyjnego matrycy z trzpieniem *WA1.45* wartość była większa o 0,4% w odniesieniu do trzpienia *CR1.45*. Połączenia wykonane z wykorzystaniem trzpienia *KT1.45* wykazały najmniejszą nośność, a średnia wartość maksymalnej wartości siły była mniejsza o 6,2% od wariantu *CR1.45*.

Średnia wartość energii W_{Fmax} mierzonej do osiągnięcia największej wartości siły obciążenia z zastosowaniem trzpienia *KT1.45* wyniosła o 2,4% mniej niż w przypadku

uzbrojenia zespołu matrycy w trzpień *CR1.45*. Połączenia wykonane z dwoma pozostałymi trzpieniami uzyskały wyższy wynik o odpowiednio 5,4% dla złączy *PL1.45* i 8,4% dla wariantu z oznaczeniem *WA1.45*. W przypadku wartości energii $W_{0.3Fmax}$ zaobserwowano mniejszą wartość w złączach, gdzie do formowania wykorzystano trzpień *KT1.45*. Dla pozostałych wariantów w odniesieniu do *CR1.45* wartość energii była większa o odpowiednio 2,78% z trzpieniem *PL1.45* i 7,9% w próbkach *WA1.45*. Całkowita energia zniszczenia z trzpieniem *KT1.45* była mniejsza o 19,2% w stosunku do wariantu *CR1.45*. W aranżacjach *PL1.45* średnia wartość energii $W_{fracture}$ była większa o 3,1%. Największą różnicę zaobserwowano dla wariantu *WA1.45*, a jej wartość była większa o 8% w stosunku do złączy wykonanych z trzpieniem *CR1.45*.

4.6.4 Nośność skrętna złączy

Przebieg krzywych uzyskanych w próbie badania utraty nośności skrętnej przedstawiono na rysunku 4.35. W zestawieniu uwzględniono warianty dla czterech wykonanych trzpieni o jednakowej głębokości mierzonej pomiędzy powierzchnią podpierającą dolną warstwę materiału, a dnem wykroju matrycy.



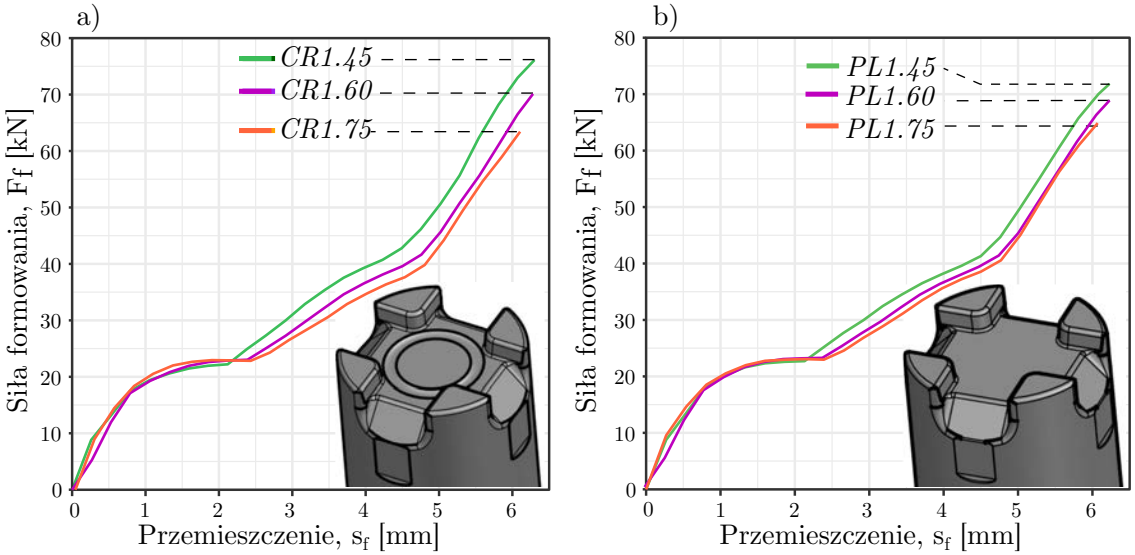
Rys. 4.35. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób badania utraty nośności skrętnej złącza przetłaczanego*

Połączenia wykonane z zastosowaniem trzpienia *KT1.45* osiągnęły najmniejszą wartość w całym zestawieniu, a jej średnia wartość była mniejsza o 4,8% w odniesieniu do złączy z oznaczeniem *CR1.45*. W przypadku połączeń o oznaczeniu PL1.45 i WA1.45 zaobserwowano większą średnią wartość utraty nośności skrętnej z wartością momentu obrotowego większą o odpowiednio 3,3% i 7% w porównaniu z połączeniami opisanymi zgodnie z zastosowanym trzpieniem *CR1.45*.

4.7 Wpływ zmiany głębokości wnęki matrycy na charakterystykę złącza *CR*

4.7.1 Przebieg i efekty formowania złącza

Analizę wpływu głębokości wnęki matrycy (h_d) na formowanie złącza przetłaczanego w technologii *CR* została przeprowadzona na podstawie wybranych złączy przetłaczanych. Na rysunku 4.36 przedstawiono zestawienie krzywych formowania złączy ukształtowanych z wykorzystaniem trzech wysokości segmentów stałych dla których h_d wyniosło odpowiednio 1,45 mm, 1,60 mm i 1,75 mm. Zastosowano dwa komplety trzpieni o takim samym skoku wysokości - pierwszy z rowkiem na dnie wnęki matrycy (*CR1.45*, *CR1.60* i *CR1.75*), a w przypadku drugiego kompletu trzpienie posiadały płaską powierzchnie dna (*PL1.45*, *PL1.60* i *PL1.75*)



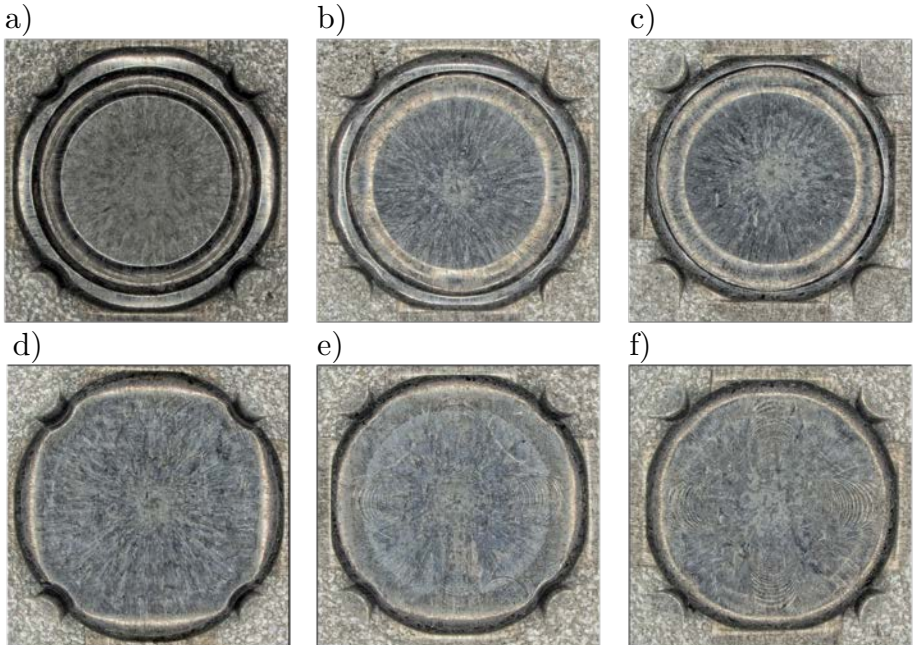
Rys. 4.36. *Zestawienie krzywych z procesu formowania dla trzpieni o różnej wysokości segmentów stałych o geometrii dna: a) CR - z rowkiem, b) PL - bez rowka*

Wraz ze zwiększania odległości h_d zaobserwowano spadek maksymalnej wartości siły koniecznej do ukształtowania połączenia. Średnia jej wartość w przypadku złączy wykonanych trzpieniem *CR1.60* była o 8,2% niższa w stosunku do wariantu *CR1.45*, zaś dla połączeń *CR1.75* zaobserwowano większą różnicę, która wyniosła 15,8%. W związku z redukcją siły formowania zaobserwowano spadek energochłonności procesu scalenia, który wyniósł odpowiednio 8,4% dla trzpienia o wysokości segmentów 1,60 mm i 16,3% w przypadku najwyższego wariantu.

Proces formowania do zrównania stempla wtłaczającego nit z poziomem górnej warstwy złącza przetłaczanego ukształtowanego zespołem matrycy uzbrojonej w trzpień *PL1.60* zakończył się przy średniej wartości siły mniejszej o 4,7% w stosunku do próbek z oznaczeniem *PL1.45*. Większy spadek zaobserwowano w przypadku złączy ukształtowanych matrycą z trzpieniem *PL1.75*. Siła w tym wariancie została mniejsza o 10%. Energia

procesu formowania z trzpieniami o większej wysokości segmentów stałych była mniejsza o odpowiednio 6,2% dla trzpienia *PL1.60* i 11,1% przy wykorzystaniu zespołu z trzpieniem *PL1.75* w stosunku do wariantu *PL1.45*.

Powierzchnia ukształtowana w wykroju matrycy zależy od geometrii trzpienia formującego. Zestawienie charakterystycznego przetłoczenia powstałego w technologii *CR* dla złączy ukształtowanych różnymi wysokościami trzpieni przedstawiono na rysunku 4.37.

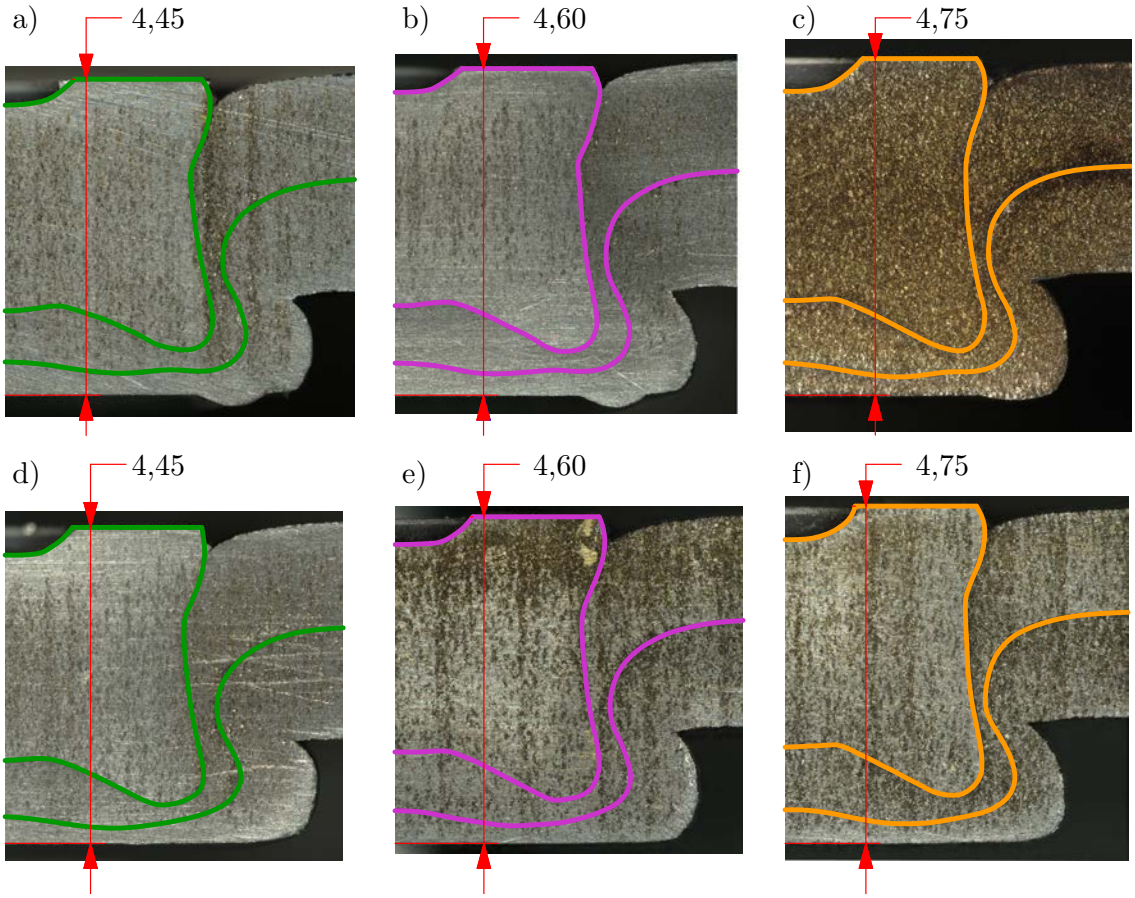


Rys. 4.37. *Zestawienie geometrii ukształtowanej we wnęce matrycy, wykonane z zastosowaniem trzpienia: a) CR1.45, b) CR1.60, c) CR1.75, d) PL1.45, e) PL1.60, f) PL1.75*

Zaobserwowano zmianę wymiaru zewnętrznego na przetłoczeniu (d_{zew}), który wraz ze wzrostem wysokości h_d ulegał pomniejszeniu. W przypadku złączy wykonanych zespołem matrycy z rowkiem wymiar zewnętrzny w połączeniach wykonanych trzpieniem o wysokości 1,60 mm zmniejszył się o 3,5% w stosunku do wariantu najniższego (1,45 mm). Wartość wymiaru zewnętrznego dla złączy ukształtowanych z wykorzystaniem trzpienia *CR1.75* był mniejszy o 8,5% odniesieniu do próbek formowanych matrycą wyposażoną w trzpień *CR1.45*.

W przypadku złączy ukształtowanych z zastosowaniem zespołu matrycy uzbrojonego w trzpienie o płaskiej geometrii dna, również zaobserwowano zmniejszenie wartości d_{zew} lecz ich różnice były mniejsze niż dla zespołu matryc z charakterystycznym pierścieniem. W przypadku zastosowania trzpienia *PL1.60* wartość była mniejsza o 2,9%. z kolei różnica pomiędzy trzpieniami *PL1.45* i *PL1.75* wyniosła 7,2%.

Struktura budowy przekroju złączy próbek formowanych z wykorzystaniem trzpieni o różnej wysokości segmentów stałych przedstawiono na rysunku 4.38. Dokonano pomiaru wybranych cech, których wyniki wraz z oznaczeniem złączy, średnią wartością maksymalnej siły i energochłonności procesu formowania zestawiono w tabeli 4.11.



Rys. 4.38. *Struktura budowy złącza przetłaczanego z zastosowaniem trzpienia: a) CR1.45, b) CR1.60, c) CR1.75, d) PL1.45, e) PL1.60, f) PL1.75*

Tabela 4.11. *Zestawienie wartości sił i energii wyznaczonych w procesie formowania i pomiaru geometrii, wykonanych na podstawie przekrojów złączy*

Oznaczenie złącza	**Średnia wartość maksymalnej siły formującej**	**Średnia wartość energochłonności procesu formowania**	**Pomiary geometrii na przekroju złącza zgodnie z oznaczeniami na rysunku 3.6**						
	F_f [kN]	**W_f [J]**	**d_{nit} [mm]**	**d_{wyp} [mm]**	**d_{zew} [mm]**	**h_{nit} [mm]**	**$h_{b\text{-}min}$ [mm]**	**t_n [mm]**	**t_u [mm]**
CR1.45	76,32	221,73	5,87	6,84	8,68	3,83	0,27	0,27	0,32
CR1.60	70,04	203,17	5,72	6,74	8,38	4,02	0,27	0,23	0,41
CR1.75	64,28	185,49	5,65	6,50	7,94	4,17	0,25	0,17	0,40
PL1.45	71,75	212,76	5,79	6,88	8,77	3,86	0,21	0,29	0,35
PL1.60	68,36	199,49	5,7	6,66	8,52	4,01	0,25	0,22	0,41
PL1.75	64,53	189,13	5,61	6,47	8,14	4,15	0,25	0,17	0,43

Wartość pocienienia górnej warstwy materiału t_n w przypadku złącza wykonanego z zastosowaniem trzpienia *CR1.60* była mniejsza o 14,8% w stosunku do wariantu *CR1.45*.

Na podstawie wykonanego pomiaru geometrii na przekroju złączy wykonanych z zastosowaniem zespołu matrycy uzbrojonego w trzpień *CR1.75* zaobserwowano jeszcze większą różnicę pocienienia górnej warstwy materiału, która wyniosła 37% w stosunku do najniższego wariantu. Zgodnie z kierunkiem zmiany wymiaru zewnętrznego zaobserwowano przesunięcie najbardziej wysuniętego punktu wybrzuszenia na linii zarysu d_{wyp}. Zmiana trzpienia w zespole matrycy formującej o wysokości h_d 1,45 mm na 1,60 mm wpłynęła na wartość d_{wyp} o 1,5% i 5% w przypadku wariantu *CR1.75*.

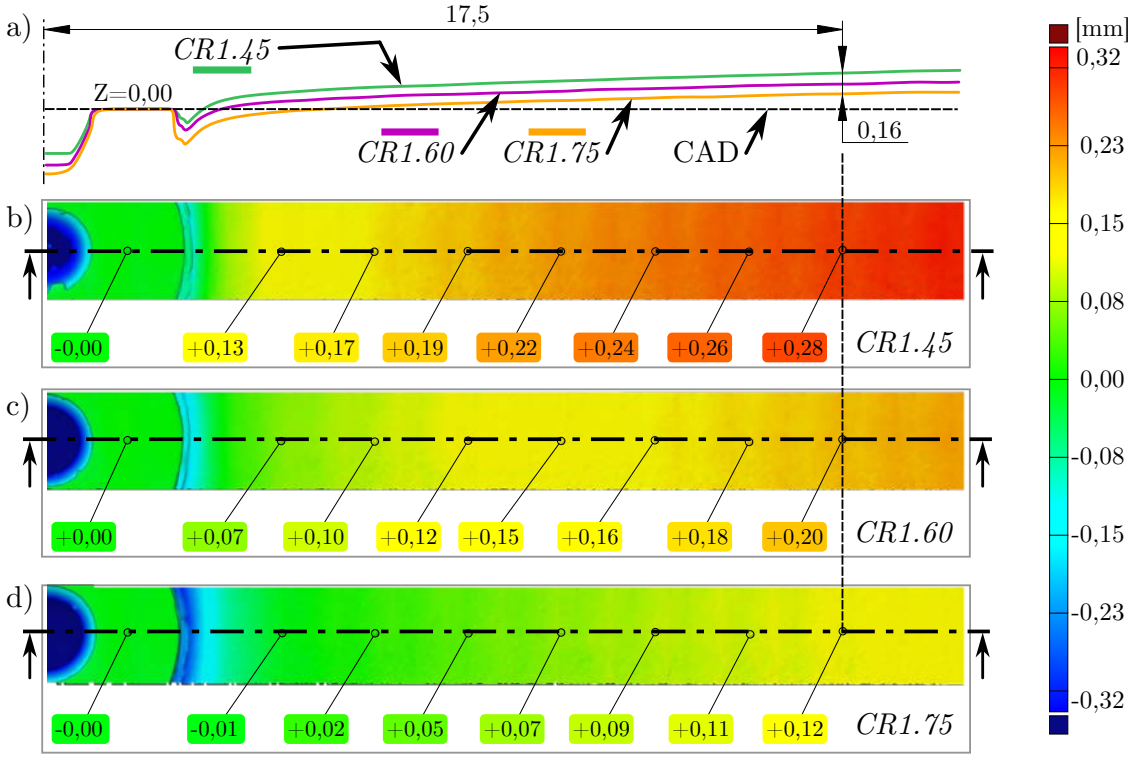
Zaobserwowano różnice w strukturze budowy ukształtowanego nita wewnątrz złącza. Wraz ze zmianą głębokości wnęki matrycy, wysokość h_{nit} uległa zwiększeniu. Przyrost w przypadku zastosowania trzpienia *CR1.60* wyniósł 5% i odpowiednio 8,8% dla wariantu *CR1.75*. Im wyższy trzpień zastosowano do procesu scalenia tym wymiar szerokości u podstawy nita d_{nit} był mniejszy. Wartość ta w wariantach *CR1.60* została zredukowana o 2,6% i 3,8% dla złączy wykonanych trzpieniem *CR1.75*.

Obserwacja geometrii na przekroju złączy wykonanych z zastosowaniem trzpieni o płaskiej powierzchni dna również wykazała zmiany w ukształtowaniu warstw. Wartość pocienienia górnej warstwy materiału t_n była mniejsza dla wariantu *PL1.60* o 24,1% i 41,4% w przypadku złączy scalonych trzpieniem *PL1.75* w odniesieniu do wariantu *PL1.45*. Podobnie jak w przypadku geometrii formowanej z pierścieniem, z zastosowaniem wyższych trzpieni wartość zamka była większa. Przyrost wyniósł odpowiednio 17,1% i 22,9% dla złączy wykonanych trzpieniami *PL1.60* i *PL1.75* w odniesieniu do wariantu o najmniejszej wysokości (*PL1.45*). Wartość d_{wyp} została zredukowana o 3,2% w złączach *PL1.60* i 6% w przypadku wariantu *PL1.75*.

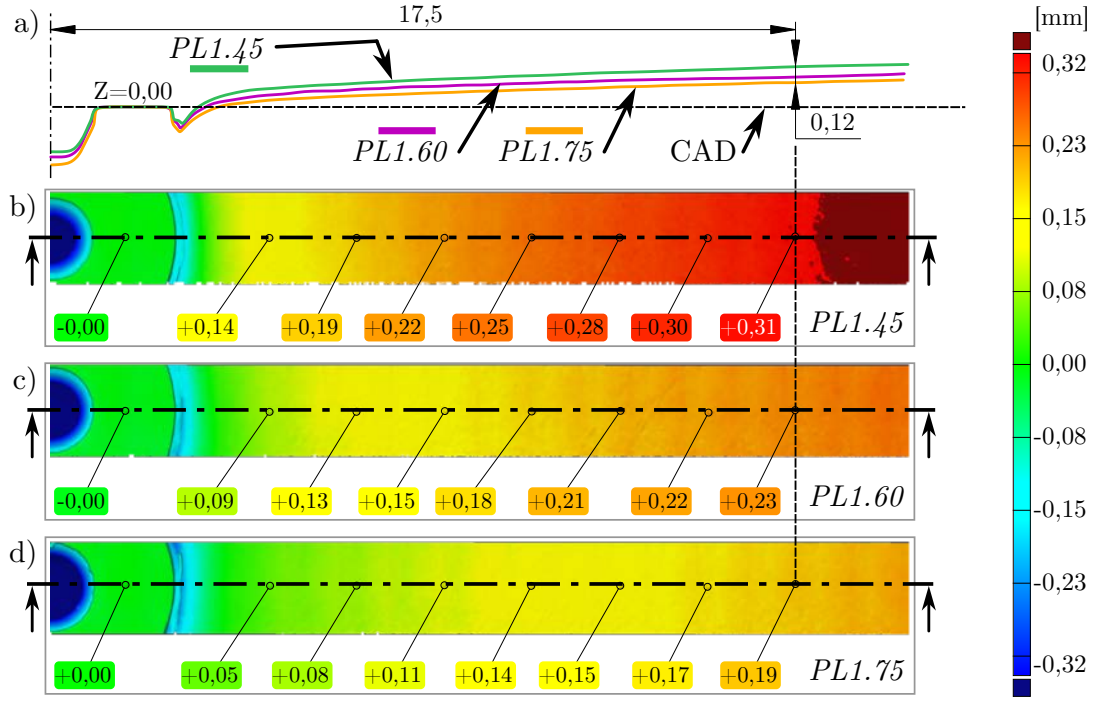
Wysokość dodatkowego elementu odkształcalnego w ukształtowanym złączu (h_{nit}) zwiększała się wraz ze wzrostem segmentów stałych trzpienia formującego. Zmierzono przyrost który wyniósł 3,9% dla złączy formowanych trzpieniem *PL1.60* i 7,5% przy zastosowaniu elementu formującego *PL1.75* w odniesieniu do wartości zmierzonych na połączeniach *PL1.45*. Szerokość nita u jego podstawy d_{nit} malała wraz ze wzrostem wysokości h_d o odpowiednio 1,6% i 3,1% dla trzpieni *PL1.60* i *PL1.75*.

4.7.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza

Do przeprowadzenia analizy wpływu głębokości wykroju matrycy wykonano pomiar dewiacji górnej warstwy w obszarze wykonanych złączy. Porównanie powierzchni przedstawione w postaci kolorowej mapy odchyłek wraz z zestawieniem przekrojów w osi połączeń wykonano dla obu zestawów trzpieni i przedstawiono na rysunkach 4.39 i 4.40.



Rys. 4.39. *Odchyłki położenia punktów pomiarowych na powierzchni zewnętrznej górnej blachy złączy uformowanych z zastosowaniem rożnych zestawów trzpienia w matrycy: a) zestawienie krawędzi zarysu w przekroju próbki złącza, b-d) mapy odchyłek*



Rys. 4.40. *Odchyłki położenia punktów pomiarowych na powierzchni zewnętrznej górnej blachy złączy uformowanych z zastosowaniem rożnych zestawów trzpienia w matrycy: a) zestawienie krawędzi zarysu w przekroju próbki złącza, b-d) mapy odchyłek*

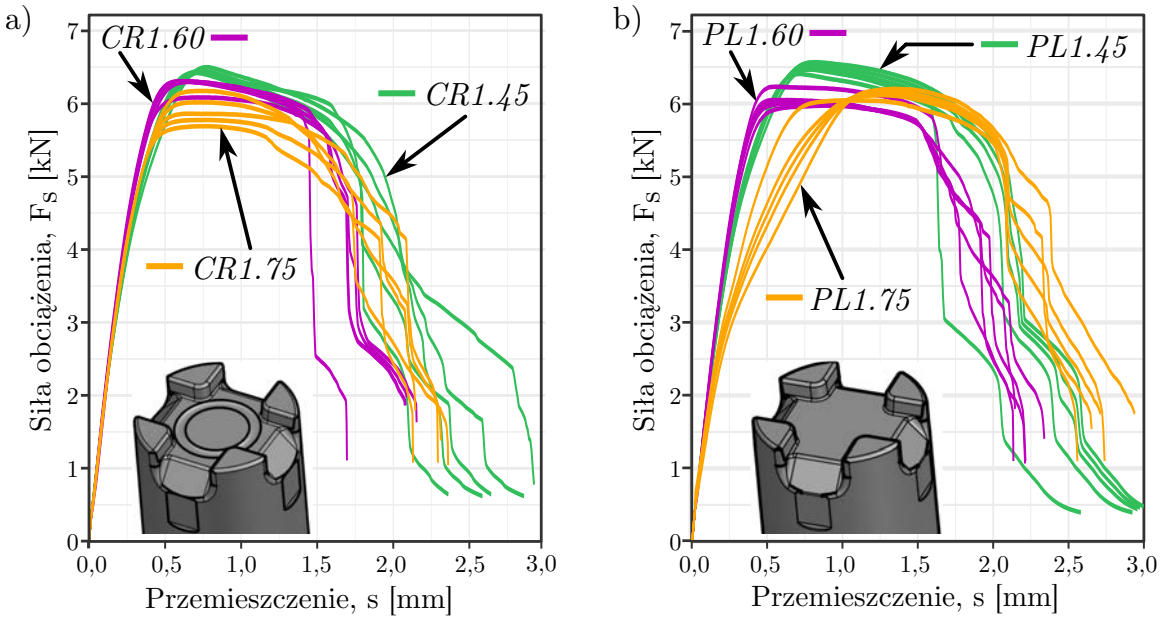
Największe odchylenie mierzone względem płaskiej powierzchni przy założeniu, że pokrywa on się z płaszczyzną wtłoczonego nita zaobserwowano w przypadku wariantów o najmniejszego wartości h_d, która wynosiła 1,45 mm. Dokonując porównania odchylenia w punkcie oddalonym od osi złącza o 17,5 mm zaobserwowano, że jego odległość względem płaszczyzny modelu 3D była mniejsza dla złączy ukształtowanych wyższymi trzpieniami o odpowiednio 28,6% i 57,1% dla trzpieni *CR1.60* i *CR1.75*. Różnica pomiędzy próbkami o oznaczeniach *CR1.45* i *CR1.75* wyniosła 0,16 mm.

Podobny schemat odkształcenia zaobserwowano w przypadku złączy ukształtowanych z zastosowaniem trzpieni o płaskiej geometrii dna. Porównując punkt oddalony od osi złącza w tej samej odległości co w poprzednim zestawieniu (17,5 mm) zaobserwowano, że jego odległość względem płaszczyzny modelu 3D była mniejsza dla złączy ukształtowanych wyższymi trzpieniami o odpowiednio 25,8% i 38,7% dla trzpieni *PL1.60* i *PL1.75*. Różnica pomiędzy próbkami o oznaczeniach *PL1.45* i *PL1.75* wyniosła 0,12 mm.

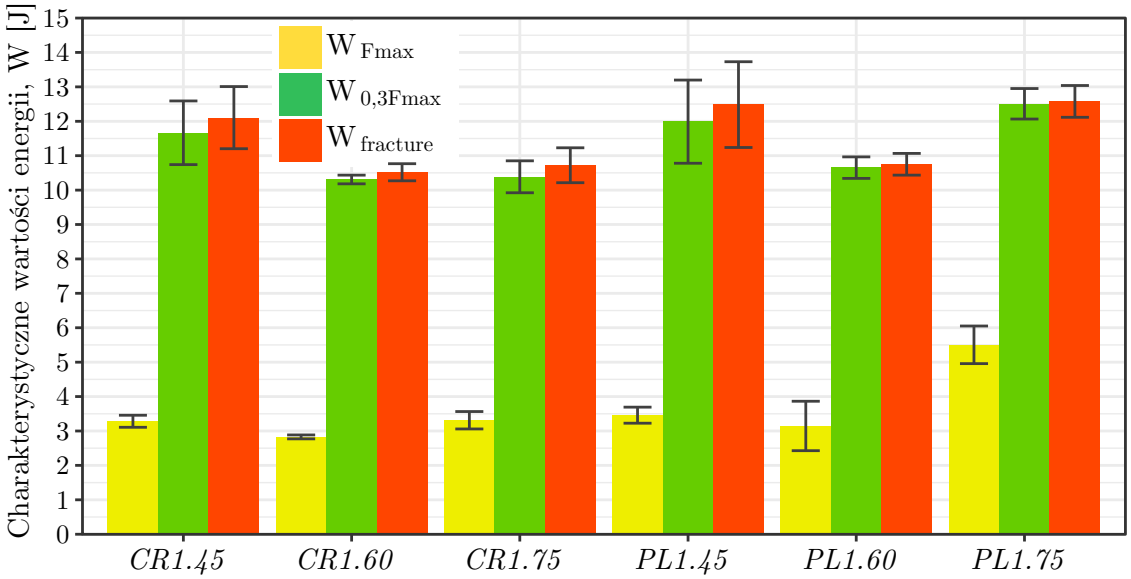
Wraz ze wzrostem wysokości trzpieni formujących, niezależnie od geometrii ich dna zaobserwowano mniejszy wpływ wykonanego złącza na dewiację powierzchni w miejscu scalenia.

4.7.3 Nośność w próbie ścinania

Przeprowadzono badania nośności w próbie ścinania złączy wykonanych trzpieniami o różnej wysokości h_d. Krzywe zależności siły obciążenia od przemieszczenia zestawiono na dwóch wykresach w zależności od geometrii dna formującego zastosowanego trzpienia w zespole matrycy. Na rysunku 4.41a przedstawiono dane zarejestrowane dla złączy *CR1.45*, *CR1.60* i *CR1.75* z kolei próbki ukształtowane trzpieniami z płaską geometrią dna (*PL1.45*, *PL1.60* i *PL1.75*) przedstawiono na rysunku 4.41b. Na podstawie danych uzyskanych w badaniach nośności złączy pomierzono wartości energii zniszczenia, których zestawienie dla analizowanego zestawu złączy umieszczono na rysunku 4.42.



Rys. 4.41. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób nośności połączenia zakładkowego dla złączy wykonanych z zastosowaniem trzech rożnych głębokości wykroju trzpienia i geometrią dna: a) z rowkiem b) płaską*



Rys. 4.42. *Zestawienie wartości energii, wyznaczonych na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie*

Średnia wartość maksymalnej siły obciążenia w przypadku złączy wykonanych trzpieniem *CR1.60* była o 3,6% mniejsza w odniesieniu do złączy *CR1.45*. W przypadku zastosowania najwyższego z trzpieni zaobserwowano spadek średniej wartości maksymalnej siły obciążenia o 8,5%.

Dla zestawu zestaw o płaskiej geometrii dna tak, jak w przypadku złączy formowanych trzpieniami z pierścieniem w wykroju matrycy zaobserwowano spadek średniej wartości

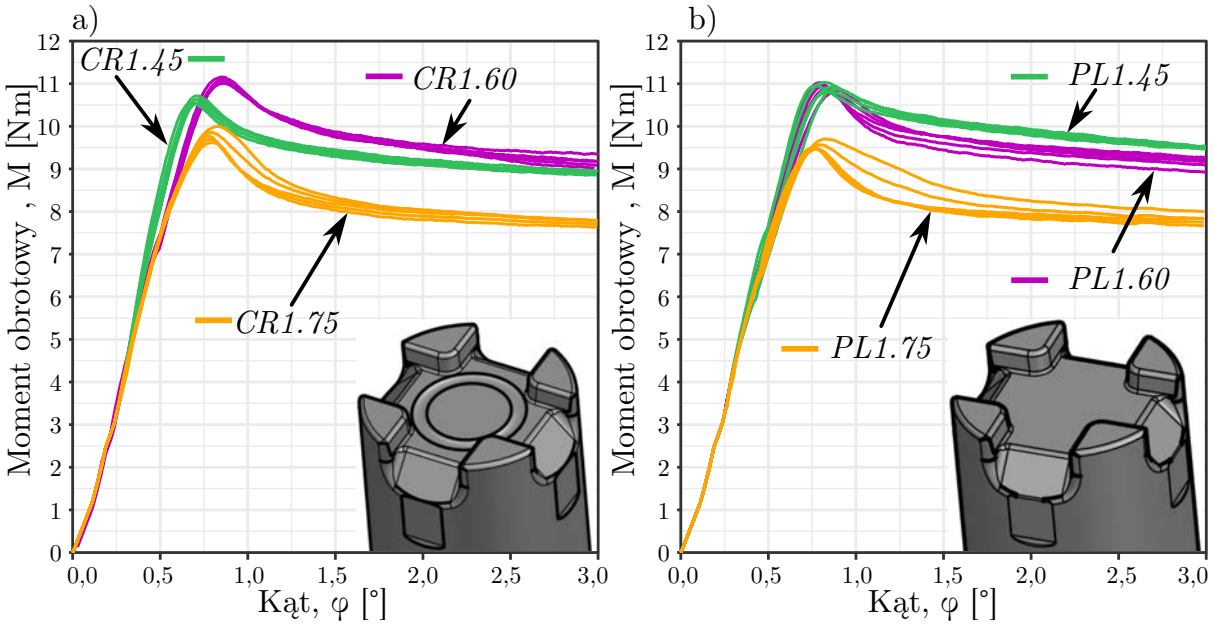
maksymalnej siły obciążenia. Wartość ta dla złączy ukształtowanych trzpieniem *PL1.60* była niższa o 6,2% z kolei różnica pomiędzy trzpieniami *PL1.75* i *PL1.45* wyniosła 5,6%.

Energia mierzona do osiągnięcia maksymalnej wartości siły obciążenia W_{Fmax} dla złączy wykonanych z zastosowaniem trzpienia *CR1.60* była mniejsza o 13,8% w stosunku wariantu *CR1.45*. Z kolei dla próbek wykonanych matrycą wyposażoną w element formujący *CR1.75* zaobserwowano przyrost energii W_{Fmax} o 0,9%. Zauważono spadek energochłonności $W_{0.3Fmax}$ przy zastosowaniu trzpieni o większej wysokości segmentów stałych odpowiednio o 11,6% i 11% dla próbek wykonanych trzpieniami *CR1.60* i *CR1.75* w odniesieniu do *CR1.45*. Spadek całkowitej energii zniszczenia $W_{fracture}$ wyniósł 11,6% dla wariantów *CR1.60* i 10,69% w przypadku zastosowania trzpieni *CR1.75*.

Maksymalna wartość siły obciążenia w przypadku scalenia warstw z zastosowaniem trzpienia *PL1.75* została osiągnięta przy większym przemieszczeniu niż w przypadku pozostałych złączy. Spowodowało to znaczący wzrost energii W_{Fmax}, której wartość była najwyższa spośród analizowanych próbek i wyniosła aż o 59,1% więcej w stosunku do wariantu *PL1.45*. Energia W_{Fmax} próbek wykonanych trzpieniem *PL1.60* była mniejsza o 9,1% w odniesieniu do najniższego wariantu. Energochłonność $W_{0.3Fmax}$ dla złączy *PL1.60* była niższa o 11,2% niż w przypadku zastosowania trzpienia *PL1.45*. Z kolei średnia wartość $W_{0.3Fmax}$ dla połączeń *PL1.75* była wyższa o 4,3%. Całkowita energia zniszczenia $W_{fracture}$ obliczona dla złączy *PL1.60* wyniosła mniej o 13,9% z kolei złącza ukształtowane matrycą uzbrojoną w trzpień *PL1.75* w odniesieniu do *PL1.45* wykazały przyrost wartości o 0,8%.

4.7.4 Nośność skrętna złączy

Przebieg krzywych zarejestrowanych w trakcie badań utraty nośności skrętnej dla złączy wykonanych trzpieniami *CR1.45*, *CR1.60* i *CR1.75* przedstawiono na rysunku 4.43a. Badania wpływu zmiany głębokości wnęki matrycy na nośność skrętną przeprowadzono również na połączeniach, które zostały scalone zestawem trzpieni z płaską geometrią dna, a uzyskane dane zestawiono na rysunku 4.43b.



Rys. 4.43. *Zestawienie przebiegu krzywych z prób badania utraty nośności skrętnej złącza przetłaczanego wykonanych z zastosowaniem trzpieni o różnej wysokości segmentów stałych i: a) rowkiem na dnie trzpienia formującego, b) płaską geometrią dna*

.

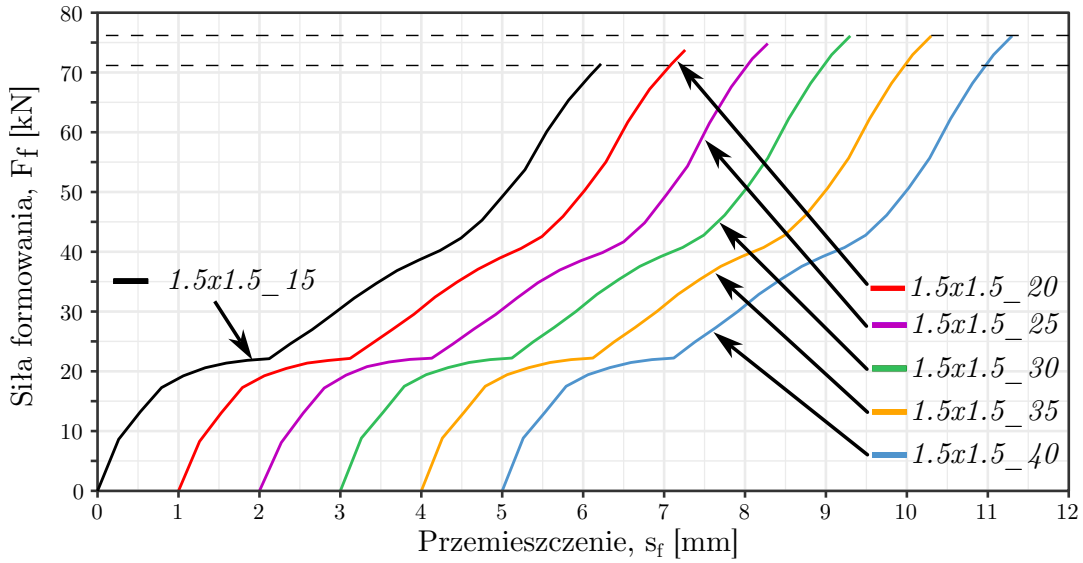
Średnia wartość momentu w którym doszło do utraty nośności skrętnej uzyskanego dla złączy ukształtowanych trzpieniem *CR1.60* była o 4,4% większa w odniesieniu do połączeń wykonanych z zastosowaniem zespołu matrycy wyposażonego w element formujący *CR1.45*. Zaobserwowano spadek maksymalnej wartości momentu w przypadku złączy, które ukształtowano trzpieniem o wysokości segmentów stałych 1,75 mm i pierścieniem na jego dnie powierzchni formujących (*CR1.75*), który wyniósł 7,7%.

Różnica pomiędzy uśrednionymi wartościami momentu przy którym doszło do utraty nośności skrętnej w przypadku złączy ukształtowanych z zastosowaniem trzpieni *PL1.45* i *PL1.60* była niewielka i wyniosła 0,03 Nm. Znacznie większa rozbieżność wystąpiła pomiędzy wartością utraty nośności skrętnej pomiędzy złączami, które wykonano z zastosowaniem trzpieni o wysokości h_d 1,45 mm i 1,75 mm. Podobnie jak w przypadku zestawu z pierścieniem na dnie we wnęce matrycy zarejestrowano mniejszą wartość dla złączy większą wysokością h_d, która w przypadku zestawu o płaskiej geometrii wyniosła 12,8%.

4.8 Analiza wpływu odległości miejsca scalenia od krawędzi blach na charakterystykę złącza *CR*

4.8.1 Przebieg i efekty formowania złącza

Analizę wpływu położenia złącza przetłaczanego wykonanego z zastosowaniem dodatkowego elementu odkształcalnego względem jego krawędzi przeprowadzono na próbkach o szerokości 15, 20, 25, 30, 35 i 40 mm. Zestawienie krzywych formowania w zależności od szerokości łączonych pasm materiału przedstawiono na rysunku 4.44.



Rys. 4.44. *Przebieg krzywej formowania w zależności od odległości miejsca scalenia od krawędzi połączonych blach*

Wartość siły formowania w procesie scalania próbki o szerokości (B) wynoszącej 15 mm była najmniejsza w całym zestawieniu. W przypadku wariantu *1.5x1.5_20* odnotowano jej przyrost w stosunku do złączy o najmniejszym gabarycie (1.5x1.5_15) wynoszący 2,9% z kolei dla wariantu *1.5x1.5_25* zaobserwowano zwiększenie średniej wartości siły, które wyniosło 5%. Próbki o szerokościach 30, 35 i 40 mm osiągnęły zbliżoną wartość siły formowania. Średnia maksymalna wartość dla złącza *1.5x1.5_30* była większa od najmniejszego wariantu o odpowiednio 6,9% z kolei dla próbek o większej szerokości pasm *1.5x1.5_35* i *1.5x1.5_40* różnica wyniosła 6,8%. W związku z najmniejszą wartością siły formowania dla złącza o szerokości 15 mm łączonym warstw zaobserwowano najniższą wartość energii procesu formowania. Energochłonność scalania próbek dla wariantów o szerokości 20 i 25 była większa o odpowiednio 1,7% i 2,5%. W przypadku pozostałych wariantów, gdzie maksymalna siła formowania miała zbliżoną wartość, przyrost energii obliczonej na podstawie krzywych z procesu formowania mieścił się w zakresie 5,2 5,3%.

Dokonano obserwacji struktury budowy na przekroju ukształtowanego złącza dla aranżacji o zmiennej szerokości łączonych pasm. Wyniki pomiarów wraz z średnimi wartościami maksymalnej siły i energochłonności procesu formowania zawarto w tabeli 4.12

Tabela 4.12. *Zestawienie wartości maksymalnej siły i energii formowania, oraz charakterystycznych cech geometrii złącza CR dwóch blach o grubości 1,5 mm z materiału DX51D+Z*

Oznaczenie złącza	Średnia wartość maksymalnej siły formującej	Średnia wartość energochłonności procesu formowania	Pomiary geometrii na przekroju złącza zgodnie z oznaczeniami na rysunku 3.6						
	F_f [kN]	W_f [J]	d_{nit} [mm]	d_{wyp} [mm]	d_{zew} [mm]	h_{nit} [mm]	$h_{b\text{-}min}$ [mm]	t_n [mm]	t_u [mm]
1.5x1.5_15	71,45	210,63	5,67	6,51	8,54	3,85	0,27	0,27	0,20
1.5x1.5_20	73,49	214,14	5,80	6,71	8,61	3,84	0,27	0,27	0,29
1.5x1.5_25	75,01	215,97	5,81	6,75	8,68	3,85	0,27	0,27	0,31
1.5x1.5_30	76,39	221,75	5,81	6,75	8,70	3,85	0,27	0,27	0,32
1.5x1.5_35	76,33	221,66	5,88	6,83	8,70	3,84	0,27	0,27	0,33
1.5x1.5_40	76,32	221,73	5,87	6,84	8,69	3,83	0,27	0,27	0,32

Zaobserwowano, iż dla wariantu o oznaczeniu *1.5x1.5_15* wymiar mierzony po zewnątrz na powstałym przetłoczeniu (d_{zew}) był wyraźnie mniejszy niż dla pozostałych szerokości próbek. Większą wartość zaobserwowano w przypadku złączy o oznaczeniu *1.5x1.5_20*, która wyniosła 0,8% w stosunku do pierwszego wariantu. Dla 4 pozostałych rodzajów próbek o zmiennej szerokości pomiar wykazał zbliżone wartości, które mieściły się w przedziale 1.6 1.9%.

Wartość z pomiaru najbardziej wysuniętego punktu na zamku wykonanych złączy (d_{wyp}) był najmniejszy dla próbek o szerokości 15 mm. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem gabarytu próbki punkt się oddalał od osi połączenia, a jego wartość była większa o 3,1%, 3,7%, 3,7%, 4,9% i 5,1% dla próbek o szerokości 20, 25, 30, 35 i 40.

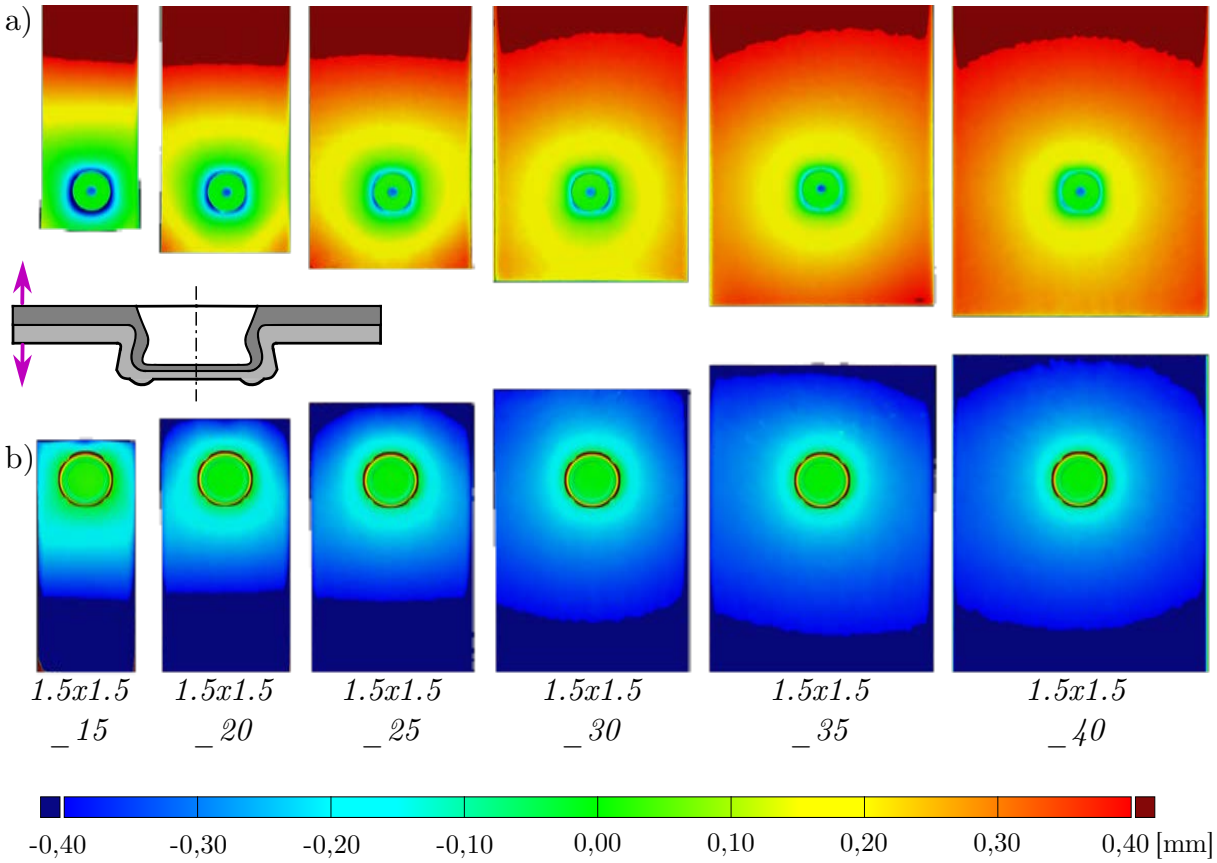
Dla każdego z wariantów uzyskano dodatnie parametry zamka przy zachowaniu ciągłości warstw materiału. Średnia wartość pocienienia t_n dla każdego z wariantów wyniosła 0,27 mm. W przypadku złączy *1.5x1.5_15* zaobserwowano najmniejszą wartość wzajemnego zablokowania warstw (t_u), która wyniosła 0,2 mm. Pozostałe warianty osiągnęły zauważalnie większe wartości zamka. Dla złączy *1.5x1.5_20* średnia jej wartość (t_u) była większa o 45% w stosunku do najmniejszego wariantu. Dla próbek o pozostałych szerokościach tj 25, 30, 35 i 40 mm zaobserwowano przyrost o odpowiednio 55%, 60%, 65% i 60%. Pocienienie dolnej warstwy materiału h_{b-min} dla każdego z wariantów wyniosło 0,27 mm.

Na podstawie uzyskanego wynik pomiaru wysokości ukształtowanego nita wewnątrz złącza h_{nit} nie zaobserwowano znaczących zmian ponieważ różnica pomiędzy najwyższym, a najniższym nitem nie przekraczała 0,02 mm. Pomimo zbliżonej wysokości ukształtowanego łącznika zauważono wpływ położenia złącza względem krawędzi blachy szerokości nita, mierzoną u jego podstawy (d_{nit}). Podobnie jak dla pozostałych parametrów, najmniejsza wartość wystąpiła w przypadku złączy o oznaczeniu *1.5x1.5_15.* w przypadku połączeń o szerokości 20 mm, zmierzona wartość była większa o 2,3% z kolei dla pró-

bek *1.5x1.5_25* i *1.5x1.5_30* różnica wyniosła 2,5%. Największa zmiana wystąpiła dla wariantów o szerokości blach 35 i 40, której wartość względem próbki o najmniejszym gabarycie wyniosła odpowiednio 3,7% i 3,5%.

4.8.2 Deformacja powierzchni w obszarze złącza

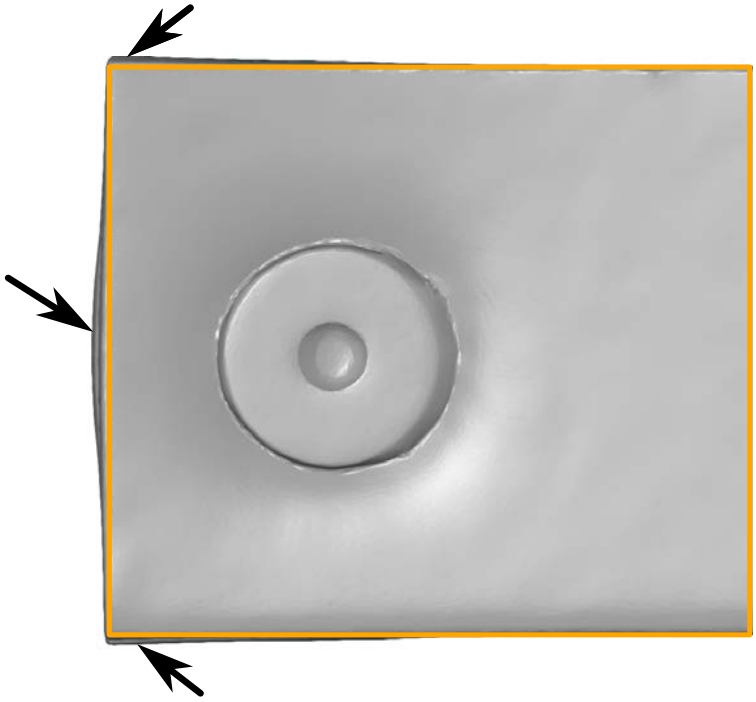
Porównanie powierzchni przedstawione w postaci kolorowej mapy odchyłek dla każdego z wariantów względem modelu CAD przedstawiono na rysunku 4.45. Dokonano zestawienia widoków zarówno od strony stemplowej (4.45a) jak i matrycowej (4.45b).



Rys. 4.45. *Zestawienie porównania powierzchni w formie kolorowej mapy odchyłek wykonane dla złączy o różnej odległości miejsca scalenia od brzegu blachy. Widok od strony: a) stempla, b) matrycy*

Zaobserwowano różnice w ukształtowaniu powierzchni w pobliżu wykonanego złącza przetłaczanego. Wraz ze wzrostem szerokości łączonych blach zielony obszar, dla którego odchyłki mieszą się w zakresie od około -0,1 mm do 0,1 mm ulegał pomniejszeniu. Dla wariantów o oznaczeniach *1.5x1.5_15* i *1.5x1.5_20* na rysunku 4.45a widoczny jest niebieski kolor w pobliżu nita, który świadczy o położeniu punktów do wewnątrz bryły modelu CAD. Wraz ze wzrostem szerokości próbek, blachy w pobliżu złącza były bardziej dociśnięte do samego ukształtowanego nita. Oznacza to, że dla dwóch wariantów o najmniejszej szerokości sam docisk narzędzi nie był wystarczający do zablokowania płynięcia materiału łączonych warstw. Dyslokację materiału dla najmniejszego wariantu pokazano

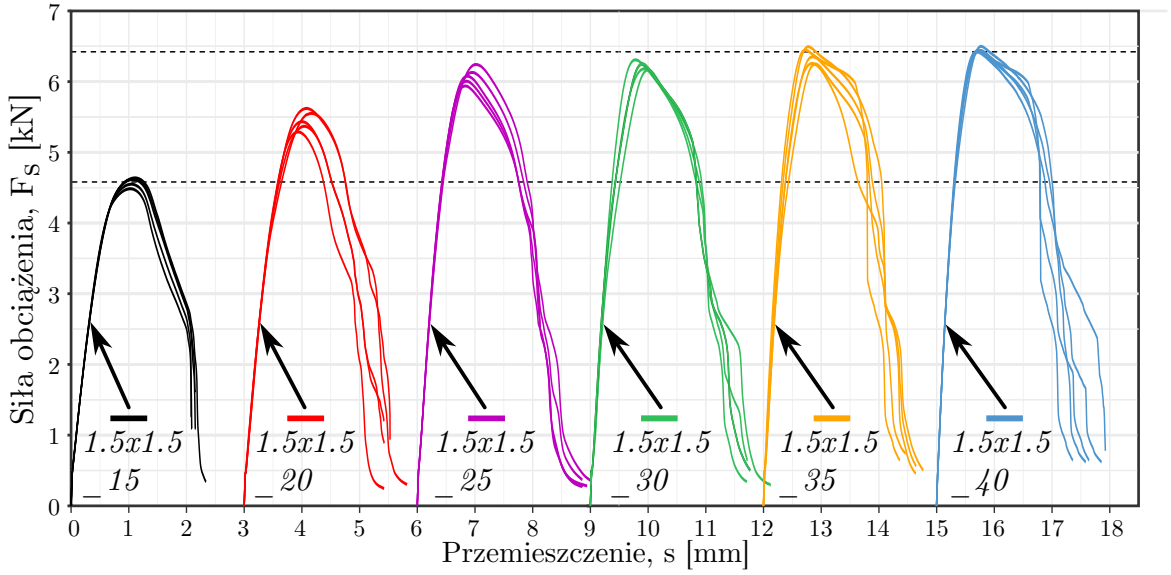
na rysunku 4.46 z oznaczeniem obszaru wystąpienia przemieszczonego materiał.Podobny efekt zaobserwowano dla wariantu o szerokości 20 mm, lecz był on widoczny w znacznie mniejszym stopniu. Przy pozostałych wariantach defektu nie zaobserwowano.



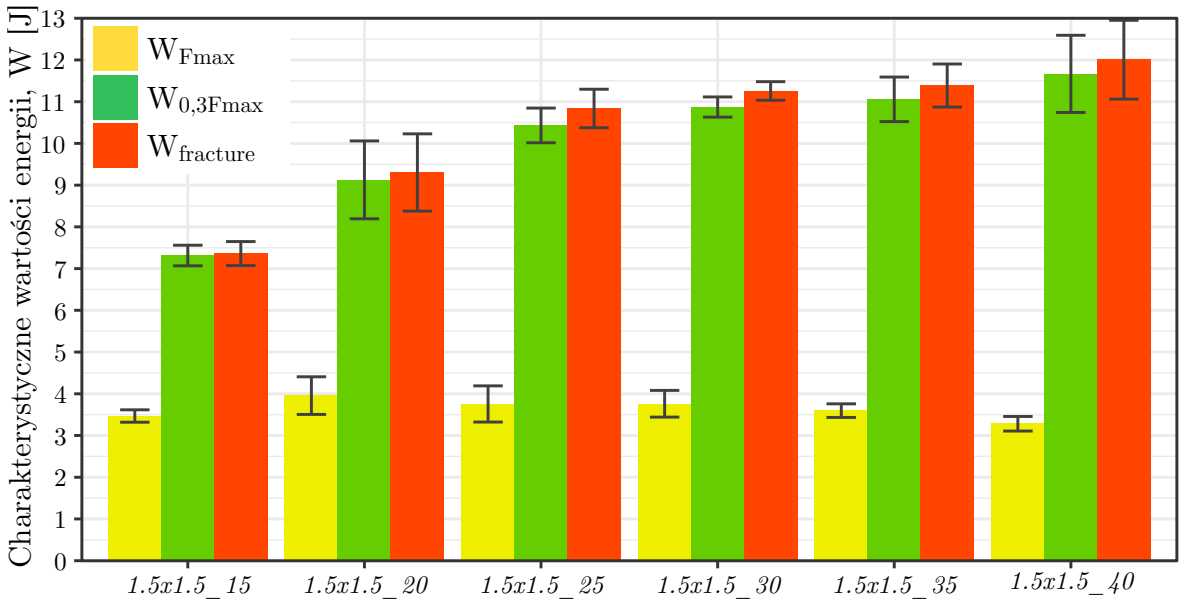
Rys. 4.46. *Przy krawędziowe defekty połączonych blach w przypadku zbyt małej odległości miejsca scalenia względem brzegów elementów łączonych*

4.8.3 Nośność w próbie ścinania

Zestawienie zależności siły obciążenia od przemieszczenia w postaci krzywych przedstawiono na rysunku 4.47. Na ich podstawie wykonano pomiar energii zniszczenia, którego zestawienie wartości przedstawiono na rysunku. 4.48.



Rys. 4.47. *Przemieszczenie uzyskane z próby ścinania zakładkowego połączenia dla rożnej odległości scalenia od krawędzi połączonych blach o grubości 1,5 mm z materiału DX51D+Z*



Rys. 4.48. *Zestawienie wartości energii, wyznaczonych na podstawie badań wytrzymałości na ścinanie*

Średnia wartość maksymalnej siły obciążenia dla aranżacji *1.5x1.5_ 15* osiągnęła najmniejszą wartość. Dla wariantu *1.5x1.5_ 20* zaobserwowano większą wartość , która była większa o 19,9%. W przypadku złączy o szerokości 25 mm (*1.5x1.5_ 25*) osiągnięto średnią

wartość siły obciążenia większą o 34,2% w stosunku do wariantu *1.5x1.5_15*. Maksymalna wartość siły obciążenia w przypadku szerokości 30 była większa w odniesieniu do aranżacji *1.5x1.5_15* o 37.1%. Również próbki o szerokości 35 i 40 odnotowały znaczną różnicę w nośności, których wartości były większe o odpowiednio 37,7 i 41,1%.

Wariant *1.5x1.5_15* osiągnął najmniejsze wartości energii $W_{0.3Fmax}$.Dla złączy o szerokości 20 mm odnotowano jej przyrost, który wyniósł 24,8%. Z kolei próbki *1.5x1.5_25* osiągnęły energię większą o 42,6%. Znaczny wzrost energii $W_{0.3Fmax}$ zaobserwowano w przypadku wariantu *1.5x1.5_30*, którego przyrost wynosił 48,7%. Złącza wykonane na blachach o szerokościach 35 i 40 odnotowały większą wartość energii o odpowiednio 51,2% i 59,5% w stosunku do złączy 1.5x1.5_15.

Energia całkowitego zniszczenia $W_{fracture}$ dla wariantu *1.5x1.5_15* osiągnęła najmniejszą wartość. Jej przyrost przy złączach o szerokości 20 mm wyniósł 26,4%. Złącza *1.5x1.5_25* i *1.5x1.5_30* uzyskały wartość energii $W_{fracture}$ większą o odpowiednio 47,3% i 53%. Połączenia o szerokości 35 i 40 w odniesieniu do wariantu *1.5x1.5_15* miały wartość większą o 54,7% i 63,1%.

5 Analiza numeryczna procesu formowania złącza w technologii *CR*

5.1 Założenie modelu numerycznego

Proces formowania złączy przetłaczanych jest bardzo często wykonywany za pomocą symulacji komputerowych. Takie podejście pozwala na zmniejszenie ilości badań eksperymentalnych podczas projektowania połączeń. Dostarczyć może również wyniki, których nie da się zmierzyć lub zaobserwować podczas wykonywania eksperymentu bądź bez zniszczenia złącza w celu obserwacji parametrów zamka. Model numeryczny procesu formowania uwzględniać powinien [101–104]:

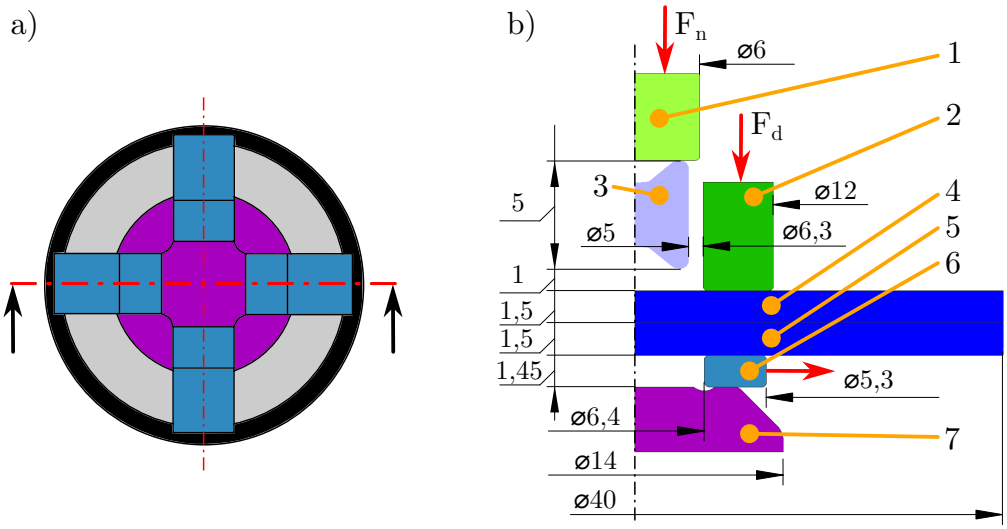
- nieliniowe zachowanie materiałów - proces przetłaczania charakteryzuje się bardzo dużymi odkształceniami, co wymaga zastosowania nieliniowych modeli geometrycznych, które uwzględniają zmiany kształtu i położenia elementów,
- nieliniowość materiału: łączone materiały ulegają plastycznemu płynięciu opisanemu nieliniową krzywą naprężenie
- odkształcenie oraz zjawiska umocnienia materiału,
- nieliniowość kontaktu - w trakcie procesu dochodzi do kontaktu i tarcia między narzędziem i materiałem, a także między dwiema łączonymi blachami.

Głównymi wynikami analiz numerycznych procesu formowania złączy przetłaczanych są: kształt i parametry zamka, siła formowania, rozkład naprężeń i odkształceń, a także wytrzymałość złączy. W pracy opracowano i poddano walidacji dwuwymiarowy model numeryczny (MES) połączenia przetłaczanego z zastosowaniem matrycy z ruchomymi segmentami. Podczas opracowywania modelu numerycznego w programie Simufact Forming przyjęto następujące założenia:

- zastosowano osiowosymetryczny model 2D, wygenerowany na podstawie modelu 3D. W ten sposób miejsce występowania elementów stałych matrycy nie zostało uwzględnione,
- narzędzia formujące (stempel, matryca, segmenty ruchome, dociskacz) zostały zamodelowane jako ciała nieodkształcalne. Jedynie blachy oraz dodatkowy nit były elementami odkształcalnymi,
- rodzaj elementów skończonych dla blach i nita to izoparametryczny czworobok o maksymalnym rozmiarze 0,15 mm dla obszaru przetłoczenia. Zastosowano zagęszczenie siatki 2 poziomu,
- zastosowano sprężysto-plastyczny materiał łączonych blach i nita z izotropowymi własnościami materiału w stanie sprężystym i plastycznym,
- krzywa umocnienia materiału blach $\sigma = 657\,\varepsilon^{0,24}$, krzywa umocnienia materiału nita według producenta *Henrob*,
- prędkość formowania wynosiła 20 mm/s
- nie uwzględniano efektów inercyjnych,
- docisk dociskacza ($F_d = F_1 + k_1 z_s$) ze stałą sprężystości ($k_1 = 2,4$ kN/mm) uzależniony od przemieszczenia stempla (z_s) oraz dociskiem wstępnym równym

$F_1 = 1$ kN (rys.5.1),

- ruch promieniowy segmentów realizowany z określoną wartością współczynnika sztywności k_2=0,000001 N/mm, siłą wstępnego docisku (F_2=0 kN) oraz ograniczeniem maksymalnego przesunięcia 3 mm (rys. 5.1),
- temperatura procesu stała i wynosząca 20^{o}C,
- uproszczona geometria narzędzi formujących na podstawie rzeczywistych elementów wykorzystanych w eksperymencie,
- model tarcia Coulomba dla wszystkich par kontaktowych (współczynnik tarcia μ=0,23),
- pominięto efekt zużywania się narzędzi,
- naprężenie uwolnienia węzłów z powierzchni kontaktu ustawiono na 1 MPa,
- dla każdego rodzaju symulacji ustawiono kryteria wymuszające przebudowanie siatki.



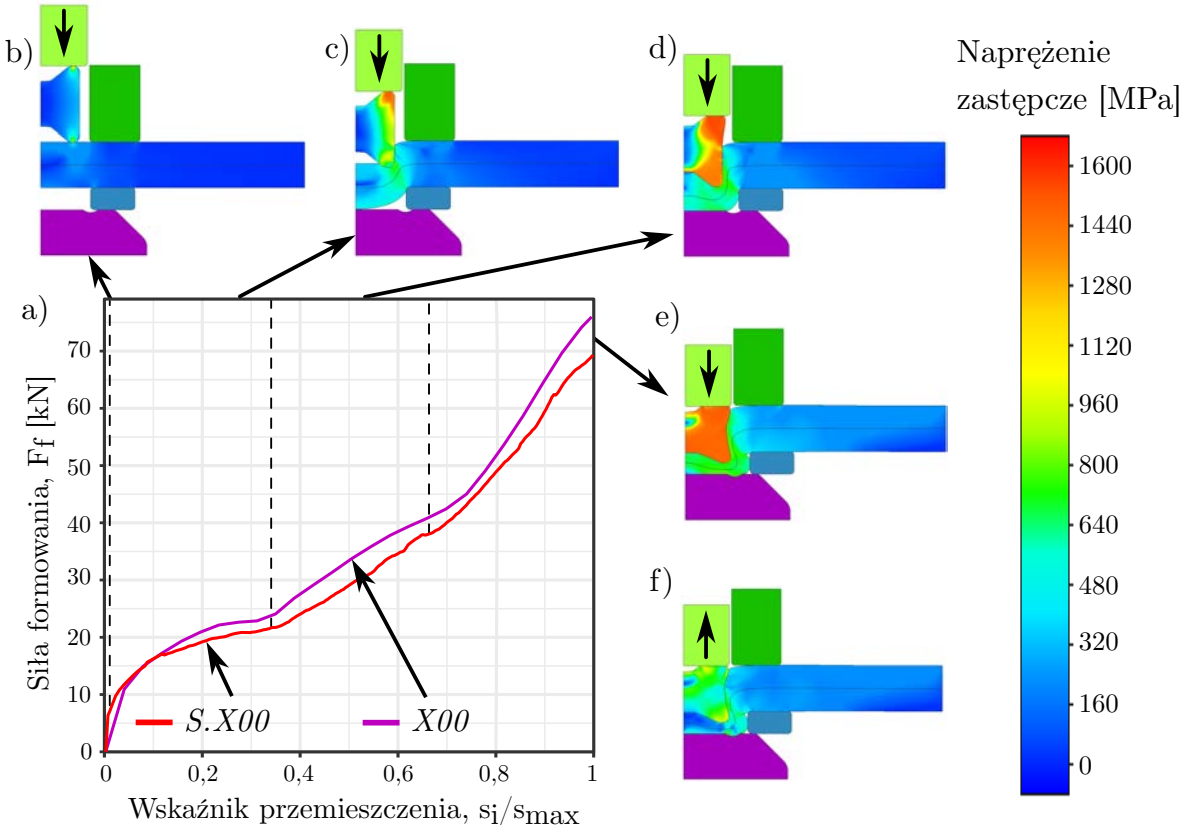
Rys. 5.1. *Model przyjęty do analizy numerycznej: a) przekrój na podstawie którego przyjęto uproszczenie geometrii, b) opis modelu numerycznego wraz z wymiarami i elementami składowymi: 1- uproszczony trzpień formujący, 2- uproszczony dociskacz, 3- nit, 4- górna z łączonych warstw, 5-dolna z łączonych warstw, 6- uproszczony segment ruchomy, 7- uproszczony trzpień matrycy*

W badaniach dokonano walidacji modelu numerycznego z wynikami uzyskanymi w części eksperymentalnej na podstawie wartości siły formowania oraz parametrów geometrycznych zamka. Otrzymany model może stanowić skuteczne narzędzie do projektowania i optymalizacji procesu łączenia przez przetłaczanie z dodatkowym odkształcalnym nitem.

5.2 Opis uzyskanych wyników

Badania przeprowadzone z wykorzystaniem metody elementów skończonych polegały na opracowaniu i poddaniu walidacji modelu numerycznego procesu kształtowania połączeń przetłaczanych z dodatkowym deformowanym nitem. Założenia wynikały z przeglądu literatury. W pierwszym etapie opracowano model numeryczny dla połączeń formowanych z nitem pełnym. Warianty wraz z ich wynikami uzyskane w symulacji numerycznej ozna-

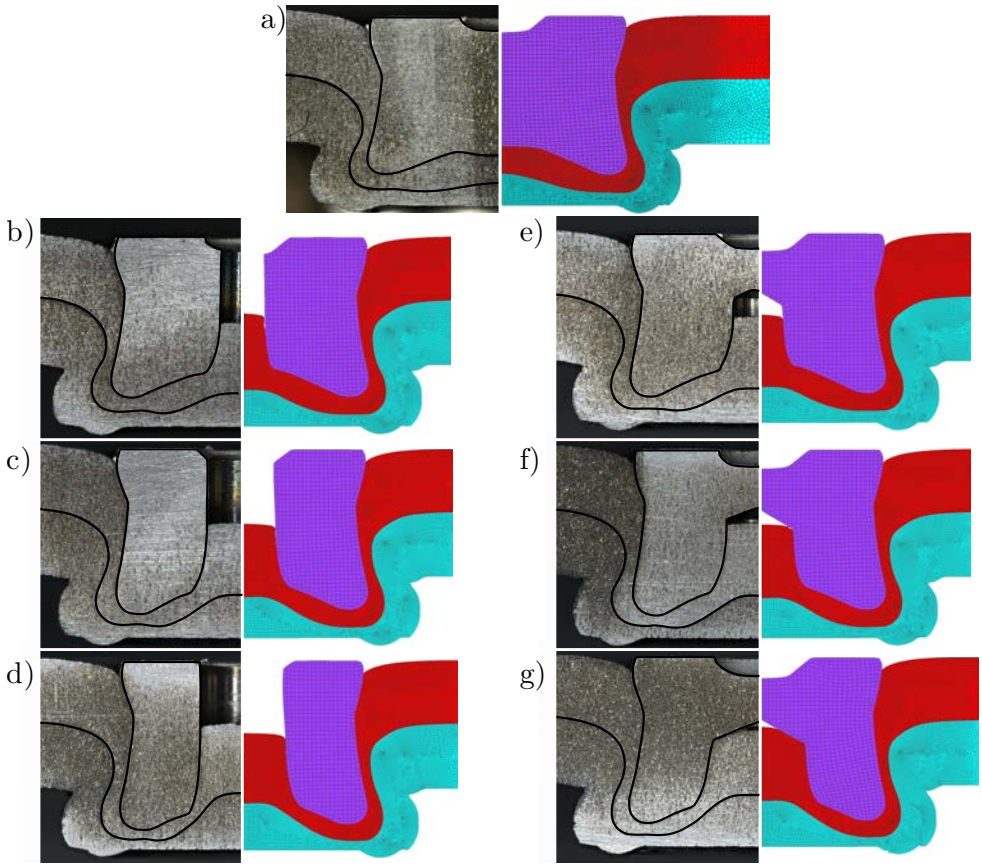
czono z przedrostkiem *S.*. Podczas symulacji MES procesu formowania istnieje możliwość zaobserwowania między innymi rozkłady naprężeń w poszczególnych etapach, których charakterystyczne punktu przedstawiono wraz z krzywą formowania na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. *Porównanie krzywych formowaniach uzyskanych w eksperymencie i symulacji komputerowej, oraz przedstawienie naprężeń zastępczych dla poszczególnych etapów formowania złącza przetłaczanego*

Na podstawie wyników uzyskanych w ramach przeprowadzonej symulacji numerycznej procesu formowania zaobserwowano mniejszą wartość siły niż w przypadku badań eksperymentalnych, której różnica wyniosła 9,1%. Otrzymane wyniki mieszczą się w zakresie akceptowalnej technologicznie tolerancji 15% [105]. Zaobserwowano zmianę rozkładu naprężeń wynikającą ze zwolnienia narzędzi formujących (wycofanie stempla, dociskacza, segmentu ruchomego), która została przedstawiona na rysunku 5.2f.

Kolejnym etapem było wykonanie analiz dla nitów zmodyfikowanych w celu sprawdzenia utworzonego modelu obliczeniowego. Na rysunku 5.3 przedstawiono makrostruktury wykonanych złączy, gdzie odpowiednio dla każdego z rysunków po lewej stronie pokazano strukturę budowy uzyskaną w eksperymencie, zaś po prawej widoczna zawarto geometrię uzyskaną w symulacji MES. Na podstawie uzyskanych modeli wykonano pomiary charakterystycznych parametrów złącza przetłaczanego, których wyniki umieszczono w tabeli 5.1. W zestawieniu zawarto również wartość siły formowania.



Rys. 5.3. *Zestawienie geometrii na przekroju złącza uzyskanych z badań eksperymentalnych i symulacji komputerowej procesu formowania dla złączy z nitem: a) pełnym oraz modyfikacjami w postaci nita przelotowego: b-d, oraz z otworem na określoną głębokość e-f*

Tabela 5.1. *Zestawienie wartości sił i energii wyznaczonych w procesie formowania i pomiaru geometrii, wykonanych na podstawie przekrojów złączy*

Oznaczenie złącza	**Wartość maksymalnej siły formującej**	**Pomiary geometrii na przekroju złącza zgodnie z oznaczeniami na rysunku 3.6**						
	$\mathbf{F_f}$ **[kN]**	$\mathbf{d_{nit}}$ **[mm]**	$\mathbf{d_{wyp}}$ **[mm]**	$\mathbf{d_{zew}}$ **[mm]**	$\mathbf{h_{nit}}$ **[mm]**	$\mathbf{h_{b\text{-}min}}$ **[mm]**	$\mathbf{t_n}$ **[mm]**	$\mathbf{t_u}$ **[mm]**
S.X00	68,92	5,92	6,76	8,42	3,74	0,3	0,25	0,33
S.X10	67,41	5,90	6,71	8,40	3,77	0,29	0,24	0,31
S.X15	64,16	5,88	6,65	8,32	3,80	0,27	0,24	0,30
S.X20	60,35	5,86	6,59	8,25	3,86	0,24	0,24	0,29
S.X11	67,13	5,89	6,70	8,38	3,76	0,30	0,24	0,31
S.X16	65,33	5,88	6,66	8,31	3,79	0,28	0,24	0,30
S.X21	66,29	5,87	6,60	8,25	3,85	0,25	0,24	0,29

Dane uzyskane w symulacji numerycznej potwierdziły, iż wprowadzenie modyfikacji kształtu w postaci otworu przelotowego miało wpływ na maksymalną wartość siły potrzebnej do uformowania połączenia przetłaczanego w technologii *CR*. Różnica jej wartości w przypadku złącza *S.X10* wyniosła 2,2% w stosunku do wariantu *S.X00*. Symulacja procesu łączenia łącznikiem z wielkością otworu 1,5 mm (*S.X15*) i 2 mm *S.X20* wykazała dalszy spadek maksymalnej wartości siły formowania o 6,9% i 12,4% w stosunku do zastosowania nita bez otworu(*S.X00*). Trend, który wystąpił wraz ze zmianą geometrii zastosowanego łącznika był zbieżny z danymi uzyskanymi w eksperymencie. W obu przypadkach wraz ze wzrostem otworu przelotowego wartość siły formowania była mniejsza w stosunku do złączy wykonanych z nitem pełnym.

Dla połączeń z symulacji numerycznej z zastosowaniem nitów z otworami wykonanymi nieprzelotowo również zaobserwowano spadek wartości siły wymaganej do formowania połączenia w stosunku do złączy z nitem pełnym($S.X00$). Różnica w przypadku wariantu *S.X11*wyniosła 1,1%. Dla pozostałych symulacji wartość w odniesieniu do połączenia z nitem bez otworu spadła o 5,2% i 3,8% dla rozwiązań *S.X16* i *S.X21*. Kierunek zmian wartości był zbieżny z danymi uzyskanymi w eksperymencie. Redukcja materiału łącznika wpłynęła na proces formowania złącza przetłaczanego w technologii CR. Kontakt materiału z powierzchnią pozostałą po czole wiertła wpłynął na wartość siły formowania.

Zaobserwowano zmianę wysokości dodatkowego elementu odkształcalnego, uzyskanego w symulacji numerycznej (h_{nit}) w przypadku połączeń z nitami z otworami. Dla wersji *S.X10* przyrost tej wartości wyniósł 0,8%. W pozostałych wariantach z otworami przelotowymi wysokość nita była większa o odpowiednio 1,6% i 3,2% dla wariantów *S.X15* i *S.X20*. Na podstawie obserwacji geometrii na przekroju złącza w przypadku wirtualnego połączenia *S.X11* zaobserwowano przyrost wysokości nita (h_{nit}), który wyniósł 0,5% w stosunku do modelu bez modyfikacji. W przypadku dwóch pozostałych łączników wartość była większa o 1,3% i 2,9% w przypadku symulacji *S.X16* i *S.X21*. Szerokość nita u podstawy d_{nit} w symulacji wykazała tendencje spadkowe. Dla wariantu *S.X10* szerokość została zredukowana o 0,3%. Przy złączu *S.X15* spadek wyniósł 0,7% zaś dla *S.20* zaobserwowano redukcję o 1%. Obliczenia komputerowe z zastosowaniem nitów z otworem nieprzelotowym cechowały się spadkiem wartości o 0,5% w rozwiązaniu *S.X11*. Dla dwóch pozostałych wariantów zaobserwowano spadek o 0,7% dla *S.X16* i 0,8% w przypadku *S.X21*.

Na podstawie wykonanych pomiarów zaobserwowano spadek wartości parametru t_n dla wszystkich symulowanych wariantów o 0,01 mm w stosunku do modelu numerycznego z pełnym nitem. Wielkość otworu wpłynęła w takim samym stopniu w przypadku obu modyfikacji kształtu. Zauważono, że wartość wzajemnego zablokowania materiału t_u była mniejsza wraz ze wzrostem wielkości otworu w nicie. Dla wariantów z zastosowaniem łączników z otworem ϕ1,0 mm parametr t_u osiągnął mniejszą wartość o 0,02 mm. Jej spadek, który zaobserwowano dla złączy z otworami ϕ1,5 mm i ϕ2,0 mm wyniósł odpowiednio 0,03 i 0,04 mm w stosunku do symulacji z nitem pełnym.

6 Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych badań

W niniejszej dysertacji przedstawiono i omówiono wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych, a także symulacji numerycznej procesu formowania. Plan badań został w całości zrealizowany.

Na podstawie wykonanych analiz dotyczących wpływu dodatkowego elementu odkształcalnego tj. nita na formowanie złącza przetłaczanego dla dwóch i trzech warstw materiału rozszerzono stan wiedzy w ramach zastosowania technologii *CR*. Zaobserwowano, że złącza wykonane z dodatkowym nitem wymagają większej maksymalnej siły formowania w stosunku do połączeń ukształtowanych samym stemplem, przy zastosowaniu tej samej matrycy. Największe różnice w wartości maksymalnej siły formowania zaobserwowano w przypadku wariantów, gdzie przynajmniej jako jedną z warstw zastosowano stop aluminium EN AW-5754. Zarówno w przypadku łączeniu dwóch jak i trzech warstw materiału wartość wzajemnego zakotwiczenia (t_u) w połączeniach z udziałem nita była większa niż w złączach ukształtowanym samym dedykowanym stemplem (*CL*).

W ramach analizy wpływu zastosowania komercyjnego nita na wybrane cechy konstrukcyjne i mechaniczne połączenia *CR* rozszerzono stan wiedzy o analizę dotyczącą ich nośności skrętnej. W eksperymencie zastosowano dwie warstwy blachy DX51D+Z o grubości 1,5 mm. Podobnie jak w przypadku próby ścinania, połączenia z zastosowaniem obu komercyjnych nitów osiągnęły większą wartości w stosunku do złączy wykonanych dedykowanym samym stemplem. Wartość nośności dla złączy o oznaczeniu *CR/CR-Y00* była wyższa o 77,3% i 69% uzyskanych odpowiednio w próbach ścinania i skręcania. Zastosowanie nita o większej twardości (41 HRC) w połączeniach *CR/CR-X00* charakteryzowało się wyższymi wartościami w stosunku do połączeń bez nita, które były większe o 88,1% i 79,8% odpowiednio dla próbek rozciąganych i skręcanych.

Ponieważ producent zastosowanych komercyjnych nitów nie podaje pełnej specyfikacji produkowanych łączników, przeprowadzono analizę wpływu zmiany twardości dodatkowego elementu odkształcalnego stosowanego w złączu *CR*. Wykonane analizy potwierdziły wpływ twardości nita na wybrane cechy konstrukcyjne i mechaniczne złącza. Siła formowania mierzona do osiągnięcia zrównania czoła stempla z poziomem górnej z łączonych warstw rosła wraz ze zmianą twardości nita. Im twardszy nit, tym wartość siły formowania była większa. Wpływ zmiany łącznika zaobserwowano również w charakterystyce ukształtowanej geometrii. Złącza z nitem o najmniejszej twardości opisane jako *NA* w niniejszej dysertacji osiągnęły najmniejszą wartość wzajemnego zablokowania materiału t_u. zaobserwowano również znaczące różnice w nośności złącza wyznaczonej w próbie ścinania. Wraz ze wzrostem twardości zaobserwowano większą wartość maksymalnej siły obciążenia, które były większe o 31,4% i 65,7% dla złączy o oznaczeniu *NB* (37 HRC) i *NC* (42 HRC) w stosunku do *NA* (32 HRC). Moment w którym nastąpiła utrata nośności skrętnej również był większy dla nitów o wyższej twardości, lecz różnica była dużo mniejsza w stosunku do wartości uzyskanych w próbie ścinania i wyniosła odpowiednio 5,8% i 7,2% odpowiednio dla połączeń *NB* i *NC*

Maksymalna wartość siły w procesie formowania złącza przetłaczanego może zostać obniżona poprzez modyfikacje geometrii dodatkowego elementu odkształcalnego. W ra-

mach przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazano, iż wprowadzenie modyfikacji w postaci otworu zarówno w wersji przelotowej jak i na określona głębokość poskutkowało mniejszą wartością wymaganej siły formowania w porównaniu z połączeniami, w których zastosowano pełny nit (*X00*). Na podstawie analizy wartości nośności w próbie ścinania nie dostrzeżono znaczących różnic dla złączy wykonanych z nitami zmodyfikowanymi, a średnia wartość maksymalnej siły obciążenia mieściła się w zakresie ±2%.

Istnieje możliwość zwiększenia nośności złącza wykonanego w technologii *CR* również poprzez zmianę pozycji czoła stempla wtłaczającego nit w łączone warstwy materiałów. Taki proces kształtowania spowodował zwiększenie maksymalnej siły formowania. Ponadto doszło do istotnych zmian w zewnętrznej i wewnętrznej budowie geometrycznej połączenia. Wraz z zmniejszaniem odległości czoła stempla od dna matrycy zaobserwowano większą dewiację powierzchni w obszarze wykonanego złącza. W ramach przeprowadzonej analizy wykazano, że w przypadku złączy wykonanych z większą głębokością wtłoczenia wystąpił wzrost nośności zarówno w próbie ścinania jak i skręcania próbek.

Konstrukcja dna matrycy wpływa na wartość siły formowania. W ramach badań eksperymentalnych wykonano nowe rozwiązanie konstrukcyjne matrycy, które pozwoliło na wymianę trzpienia z dnem o różnym kształcie. Dla złączy ukształtowanych z zastosowaniem zróżnicowanej geometrii uzyskano redukcję siły formowania w zakresie od 3,6% do 6%. Najmniejszą wartość siły formowania uzyskano w przypadku połączeń z zastosowaniem trzpienia o płaskiej geometrii wewnątrz wykroju matrycy (PL1.45). Na podstawie badań nośności w próbie ścinania największą różnicę w stosunku do połączeń o oznaczeniu *CR1.45* zaobserwowano dla próbek ukształtowanych z zastosowaniem trzpienia *KT1.45*, która była mniejsza o 6,2%. Na podstawie przeprowadzonych badań mających na celu sprawdzenie utraty nośności skrętnej zaobserwowano najwyższą nośność dla złączy *WA1.45*, która była większa o 7% w stosunku do połączeń ukształtowanych trzpieniem *CR1.45*. Podobnie jak w przypadku nośności w próbie ścinania, połączenia opisane zgodnie z zastosowanym trzpieniem *KT1.45* osiągnęły najmniejszą wartość. Tak, więc można podsumować, że kształt dna matrycy i jego warianty jakie zostały przebadane nieistotnie zmieniają siłę formowania.

Zgodnie z planem badań wykonano analizę wpływu zmiany wysokości wykroju matrycy h_d na wybrane cechy konstrukcyjne i nośne złącza *CR*. W badaniach eksperymentalnych połączenia wykonano z zastosowaniem trzpieni z pierścieniem na dnie, a także bez niego. Wraz ze wzrostem głębokości matrycy zaobserwowano spadek wartości maksymalnej siły formowania. Największa różnica wystąpiła w przypadku zestawu z pierścieniem pomiędzy złączamy ukształtowanymi trzpieniami *CR1.45* i *CR1.75* i wyniosła 15,8%. Na podstawie zestawienia porównania powierzchni blach względem płaskiej geometrii CAD zauważono, iż obszar w pobliżu złącza ulega mniejszej deformacji wraz ze wzrostem głębokości wnęki (h_d).

Złącza przetłaczane nie powinny być zlokalizowane zbyt blisko krawędzi warstw scalanych. Odległość umiejscowienia względem granicy łączonych arkuszy ma wpływ na nośność złącza. Określone zmiany w budowie i nośności złącza zaobserwowano na przykładzie łączenia dwóch warstw DX51D+Z o grubości 1,5 mm. Wpływ zmiany odległości został

zaobserwowany gdy ta wartość była mniejsza niż 30 mm. Z uwagi na brak wystarczającej blokady materiału wystąpiły zmiany geometrii zarówno wewnątrz jak i zewnątrz wykonanego złącza. Różnica nośności złączy w próbie ścinania była znacząca i w ramach tego eksperymentu osiągnęła zbliżone wartości powyżej szerokości próbek 30 mm. W przypadku łączenia dwóch warstw materiału DX51D+Z o grubości 1,5 mm w celu zachowania większej nośności złącza w technologii *CR*, powinny zostać zlokalizowane w odległości nie mniejszej niż 15 mm od krawędzi łączonych elementów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej procesu formowania złącza *CR*, zaobserwowano zbieżną tendencję z danymi uzyskanymi w eksperymencie. Przygotowany model może być efektywnie wykorzystany do poszukiwania kolejnych eksperymentalnych odmian geometrycznych, mających na celu redukcję siły formowania.

Kierunki dalszych badań

W ramach przeprowadzonych analiz formowania zaobserwowano, iż w niektórych aranżacjach osiągnięto bardzo małe wartości wzajemnego zablokowania materiału górnej warstwy w dolnej. W innej części badań eksperymentalnych wysunięto wniosek, że poprzez zmianę odległości stempla wtłaczającego nit w technologii *CR* istnieje możliwość zwiększenia parametru wzajemnego zablokowania materiałów. Na podstawie uzyskanych wyników wysunięto podejrzenie, iż istnieje możliwość poprawy wartości wzajemnego zablokowania warstw materiału i postanowiono to poddać analizie.

Zaobserwowano możliwość zmniejszenia energochłonności procesu formowania złącza przetłaczanego zarówno poprzez modyfikację nita jak i przez zmianę wysokości wnęki matrycy. Jednym z kierunków dalszych badań jest plan połączenia dwóch powyższych metod. Dalsze obniżenie wartości siły formowania może mieć znaczący wpływ na czas eksploatacji narzędzi formujących.

Krzywa formowania, a także geometria na przekroju złącza uzyskana w symulacji numerycznej była bardzo zbliżona do wyników uzyskanych w danych eksperymentalnych. Na jego podstawie postanowiono utworzyć nowe wirtualne warianty zarówno dla dodatkowego elementu odkształcalnego jak i kształtu narzędzi formujących w celu uzyskania zbliżonej wartości zamka przy jednoczesnym zmniejszeniu energochłonności procesu scalenia.

Bibliografia

[1] Kaščák Ľ., Mucha J., Slota J., Spišák E. *Application of modern joining methods in car production.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, ISBN:978-83-7199-903-8, 2013.

[2] Groche P., Wohletz S., Brenneis M., Pabst C., Resch F. *Joining by forming—a review on joint mechanisms, applications and future trends.* Journal of Materials Processing Technology, 214(10):1972–1994, 2014.

[3] Mori K., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A. E. *Joining by plastic deformation.* CIRP Annals, 62(2):673–694, 2013.

[4] Buffa G., Fratini L., La Commare U., Römisch D., Wiesenmayer S., Wituschek S., Merklein M. *Joining by forming technologies: Current solutions and future trends.* International Journal of Material Forming, 15(3):27, 2022.

[5] Eshtayeh M. M., Hrairi M., Mohiuddin A. K. M. *Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82:179–195, 2015.

[6] Peng H., Chen C., Ren X., Wu J. *Development of clinching process for various materials.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119(1):99–117, 2022.

[7] Schramm B., Friedlein J., Gröger B., Bielak C., Bobbert M., Gude M., Meschut G., Wallmersperger T., Mergheim J. *A review on the modeling of the clinching process chain—part II: joining process.* Journal of Advanced Joining Processes, 6:100134, 2022.

[8] Mucha J. *Analiza wybranych cech użytkowych połączeń nitowanych bezotworowo.* Technologia i Automatyzacja Montażu, (1):10–12, 2008.

[9] Honczarenko J., Berliński A. *„harmonogramowanie zabiegów montażowych korpusu przewodu wentylacyjnego".* Technologia i Automatyzacja Montażu, 1:6–9, 2010.

[10] Meschut G., Janzen V., Olfermann T. *Innovative and highly productive joining technologies for multi-material lightweight car body structures.* Journal of Materials Engineering and Performance, 23:1515–1523, 2014.

[11] Hörhold R., Müller M., Merklein M., Meschut G. *Mechanical properties of an innovative shear-clinching technology for ultra-high-strength steel and aluminium in lightweight car body structures.* Welding in the World, 60(3):613–620, 2016.

[12] Han D., Hörhold R., Wiesenmayer S., Merklein M., Meschut G. *Investigation of the influence of tool-sided parameters on deformation and occurring tool loads in shear-clinching processes.* Procedia Manufacturing, 15:1346–1353, 2018.

[13] Tisza M., Czinege I. *Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts.* International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 1(4):229–238, 2018.

[14] Zvorykina A., Sherepenko O., Jüttner S. *Novel projection welding technology for joining of steel-aluminum hybrid components—part 1: technology and its potential for industrial use.* Welding in the World, 64(2):317–326, 2020.

[15] ISO12996. *Mechanical joining — destructive testing of joints — Specimen dimensions and test procedure for tensile shear testing of single joints*, 2013.

[16] Deutsches Reichspatent. DRP-Nr. 97517, 1897.

[17] Mucha J. *Technologia połączeń przetłaczanych w przemyśle motoryzacyjnym.* The Archives of Automotive Engineering–Archiwum Motoryzacji, 76(4), 2017.

[18] Steinfelder C., Kalich J., Brosius A., Füssel U. *Numerical and experimental investigation of the transmission moment of clinching points.* In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 1157, page 012003. IOP Publishing, 2021.

[19] W. Witkowski. *Clinching joint forming speed impact on the joint strength.* Mechanika, 86(4), 2014.

[20] Mucha J., Witkowski W. *The clinching joints strength analysis in the aspects of changes in the forming technology and load conditions.* Thin-Walled Structures, 82:55–66, 2014.

[21] Mucha J. *Wpływ kierunku obciążenia prostokątnego złącza przetłoczeniowego na jego wytrzymałość w próbie ścinania.* Acta Mechanica et Automatica, 5(3):108–112, 2011.

[22] Lei L., He X., Yu T., Xing B. *Failure modes of mechanical clinching in metal sheet materials.* Thin-Walled Structures, 144:106281, 2019.

[23] Witkowski W. *Wpływ parametrów technologicznych na nośność połączeń przetłaczanych.* PhD thesis, Swinburne University of Technology, 2014.

[24] Źródło internetowe. *https://cnc-projekt.pl/bllhoff-rivclinch,193,pl*, dostęp: 01.05.2025.

[25] Źródło internetowe. *http://www.tox-pl.com*, dostęp: 01.05.2025.

[26] Źródło internetowe. *https://www.btm-europe.de/en/products/multi-loc-clinching-joint-die-side/*, dostęp: 01.05.2025.

[27] Heyser P., Wiesenmayer S., Frey P., Nehls T., Scharr C., Flügge W., Merklein M., Meschut G. *Consideration of the manufacturing history of sheet metal components for the adaptation of a clinching process.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 236(6):1203–1215, 2022.

[28] Long J., Lan F., Chen J. *Experimental investigation of the joints of mechanical clinching in the steed aluminum hybrid structure car body [J].* Journal of Plasticity Engineering, 16(1):88–94, 2009.

[29] Kaščák Ľ., Spišák E., Spišáková E., Gajdoš I. *Clinching-An Innovative Trend in Joining of Combined Materials in Car Body Production.* In *Materials Science Forum*, volume 818, pages 217–220. Trans Tech Publ, 2015.

[30] Spišák E., Kaščák Ľ. *Alternative joining methods in car body production.* International Journal of Engineering Sciences, 5(11):42–46, 2016.

[31] Gerstmann T., Awiszus B. *Recent developments in flat-clinching.* Computational Materials Science, 81:39–44, 2014.

[32] Chen C., Zhang H., Qin D., Li H. *Joining different aluminum alloy sheets by flat clinching process.* 116(3):1071–1079, 2021.

[33] Chen C., Zhang H., Ren X., Wu J. *Investigation of flat-clinching process using various thicknesses aluminum alloy sheets.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 114:2075–2084, 2021.

[34] Atia M. K. S., Jain M. K. *Die-less clinching process and joint strength of AA7075 aluminum joints.* Thin-Walled Structures, 120:421–431, 2017.

[35] Lee C.-J., Lee S.-H., Lee J.-M., Kim B.-H., Kim B.-M., Ko D.-C. *Design of hole-clinching process for joining CFRP and aluminum alloy sheet.* International journal of precision engineering and manufacturing, 15:1151–1157, 2014.

[36] Wen T., Huang Q., Liu Q., Ou W.-X., Zhang S. *Joining different metallic sheets without protrusion by flat hole clinching process.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 85:217–225, 2016.

[37] Lambiase F., Paoletti A. *Friction-assisted clinching of Aluminum and CFRP sheets.* Journal of Manufacturing Processes, 31:812–822, 2018.

[38] Lin P.-C., Lo S.-M. *Friction stir clinching of alclad AA2024-T3 sheets.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92:2425–2437, 2017.

[39] Lin P.-C., Lo S.-M., Wu S.-P. *Fatigue life estimations of alclad AA2024-T3 friction stir clinch joints.* International Journal of Fatigue, 107:13–26, 2018.

[40] Li Z., Wang Z., Li Y., Han S. *Interaction between forming and joint quality of the friction-assisted clinching.* In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 967, page 012082. IOP Publishing, 2020.

[41] Wen T., Wang H., Yang C., Liu L. *On a reshaping method of clinched joints to reduce the protrusion height.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(9):1709–1715, 2014.

[42] Chen C., Zhao S., Cui M., Han X., Fan S., Ishida T. *An experimental study on the compressing process for joining Al6061 sheets.* Thin-Walled Structures, 108:56–63, 2016.

[43] Chen C., Li Y. X., Zhai Z. Y., Zhao S. D., Zhang P., Huang M. H., Li Y. B. *Comparative investigation of three different reforming processes for clinched joint to increase joining strength.* Journal of Manufacturing Processes, 45:83–91, 2019.

[44] Witkowski W. *The shear strength of the round clinching joints formed by using extensible dies.* Advances in Science and Technology. Research Journal, 9(26):72–76, 2015.

[45] Lee C.-J., Kim B.-M., Kang B.-S., Song W.-J., Ko D.-C. *Improvement of joinability in a hole clinching process with aluminum alloy and carbon fiber reinforced plastic using a spring die.* Composite Structures, 173:58–69, 2017.

[46] Džupon M., Kaščák Ľ., Cmorej D., Čiripová L., Mucha J., Spišák E. *Clinching of high-strength steel sheets with local preheating.* Applied Sciences, 13(13):7790, 2023.

[47] Neugebauer R., Mauermann R., Grützner R. *Combination of hydroforming and joining.* Steel research international, 76(12):939–944, 2005.

[48] Neugebauer R., Mauermann R., Grützner R. *Hydrojoining.* International Journal of Material Forming, 1:1303–1306, 2008.

[49] Pan Y., Wen T., Zhou Y., You J., Tang H., Chen X. *Deformation analysis and processing parameter optimization of roller clinching.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116(5):1621–1631, 2021.

[50] Zajkani A., Salamati M. *Numerical and experimental investigation of joining aluminium and carbon fiber reinforced composites by electromagnetic forming process.* In *Proceedings of 7th international conference on high speed forming—ICHSF*, pages 59–68, 2016.

[51] Mucha J., Kaščák Ľ., Spišák E. *Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements.* Archives of civil and mechanical engineering, 11(1):135–148, 2011.

[52] Kneć M., Sadowski T., Balawender T. *Technological problems and experimental investigation of hybrid: clinched-adhesively bonded joint.* Archives of Metallurgy and Materials, (2), 2011.

[53] Chen C., Zhang H., Peng H., Ran X., Pan Q. *Investigation of the restored joint for aluminum alloy.* Metals, 10(1):97, 2020.

[54] Israel M., Mauermann R., Schellnock J. *Thick sheet clinching–joining up to 20 mm total thickness.* Advanced Shipping and Ocean Engineering, 2(1):1–10, 2013.

[55] Abe Y., Mori K., Kato T. *Joining of high strength steel and aluminium alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow.* Journal of materials processing technology, 212(4):884–889, 2012.

[56] Mucha J. *The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint.* Materials & design, 32(10):4943–4954, 2011.

[57] Mucha J. *The analysis of rectangular clinching joint in the shearing test.* Maintenance and Reliability, (3):145–150, 2011.

[58] Źródło internetowe. *https://www.juradotools.com*, dostęp: 01.05.2025.

[59] Źródło internetowe. *https://www.eckold.de*, dostęp: 01.05.2025.

[60] Źródło internetowe. *https://btmcomp.com*, dostęp: 01.05.2025.

[61] Źródło internetowe. *https://www.assemblymag.com*, dostęp: 01.05.2025.

[62] Zhang X., Chen C., Peng H. *Recent development of clinching tools and machines.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121(5):2867–2899, 2022.

[63] Mucha J., Kaščák Ľ., Spišák E. *The experimental analysis of forming and strength of clinch riveting sheet metal joint made of different materials.* Advances in Mechanical Engineering, 5:848973, 2013.

[64] Wu J., Chen C. *Comparative study of the clinching process and clinch-riveting process.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 44(8):336, 2022.

[65] Wu J., Chen C. *Influence of thickness combinations on mechanical properties of joints produced by clinch riveting with rigid rivet.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121(11):7907–7921, 2022.

[66] Chen C., Zhao S., Cui M., Han X., Fan S. *Mechanical properties of the two-steps clinched joint with a clinch-rivet.* Journal of Materials Processing Technology, 237:361–370, 2016.

[67] Chen C., Wu J., Li H. *Optimization design of cylindrical rivet in flat bottom riveting.* Thin-Walled Structures, 168:108292, 2021.

[68] Shi C., Li H., Chen C., Ouyang Y., Qin D. *Experimental investigation of the flat clinch–rivet process.* Thin-Walled Structures, 171:108612, 2022.

[69] Chen C., Zhang X., Wen C., Yin Y. *Effect of blank holder force on joining quality of the flat clinch-rivet process.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121(9):6315–6323, 2022.

[70] Li D., Chrysanthou A., Patel I., Williams G. *Self-piercing riveting-a review.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92:1777–1824, 2017.

[71] Haque R. *Quality of self-piercing riveting (SPR) joints from cross-sectional perspective: A review.* Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18(1):83–93, 2018.

[72] Du Z., Duan L., Jing L., Cheng A., He Z. *Numerical simulation and parametric study on self-piercing riveting process of aluminium–steel hybrid sheets.* Thin-Walled Structures, 164:107872, 2021.

[73] Abe Y., Maeda T., Yoshioka D., Mori K. *Mechanical clinching and self-pierce riveting of thin three sheets of 5000 series aluminium alloy and 980 MPa grade cold rolled ultra-high strength steel.* Materials, 13(21):4741, 2020.

[74] Źródło internetowe. *https://www.boellhoff.com*, dostęp: 01.05.2025.

[75] Di Franco G., Fratini L., Pasta A., Ruisi V. F. *On the self-piercing riveting of aluminium blanks and carbon fibre composite panels.* International journal of material forming, 6:137–144, 2013.

[76] Zhang X., He X., Xing B., Zhao L., Lu Y., Gu F., Ball A. *Influence of heat treatment on fatigue performances for self-piercing riveting similar and dissimilar titanium, aluminium and copper alloys.* Materials & Design, 97:108–117, 2016.

[77] He X., Zhao L., Deng C., Xing B., Gu F., Ball A. *Self-piercing riveting of similar and dissimilar metal sheets of aluminum alloy and copper alloy.* Materials & Design (1980-2015), 65:923–933, 2015.

[78] Haque R. *Residual stress and deformation in SPR joints of high strength materials.* PhD thesis, Swinburne University of Technology, 2014.

[79] Zhao L., He X., Xing B., Lu Y., Gu F., Ball A. *Influence of sheet thickness on fatigue behavior and fretting of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 5052.* Materials & Design, 87:1010–1017, 2015.

[80] Mucha J. *A study of quality parameters and behaviour of self-piercing riveted aluminium sheets with different joining conditions.* Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 57(4):323–333, 2011.

[81] He X., Deng C., Zhang X. *Fretting behavior of SPR joining dissimilar sheets of titanium and copper alloys.* Metals, 6(12):312, 2016.

[82] Li Y., Wei Z., Wang Z., Li Y. *Friction self-piercing riveting of aluminum alloy AA6061-T6 to magnesium alloy AZ31B.* Journal of manufacturing science and engineering, 135(6):061007, 2013.

[83] Liu X., Lim Y. C., Li Y., Tang W., Feng Z. Ma Y., Ni J. *Effects of process parameters on friction self-piercing riveting of dissimilar materials.* Journal of Materials Processing Technology, 237:19–30, 2016.

[84] Yang B., Shan H., Liang Y., Ma Y., Niu S., Zhu X., Li Y. *Effect of adhesive application on friction self-piercing riveting (F-SPR) process of AA7075-T6 aluminum alloy.* Journal of Materials Processing Technology, 299:117336, 2022.

[85] Yang B., Ma Y., Shan H., Niu S., Li Y. *Friction self-piercing riveting (F-SPR) of aluminum alloy to magnesium alloy using a flat die.* Journal of Magnesium and Alloys, 10(5):1207–1219, 2022.

[86] Kato K., Okamoto M., Yasuhara T. *Method of joining sheets by using new type rivets.* Journal of Materials Processing Technology, 111(1-3):198–203, 2001.

[87] Alves L., Afonso R., Pereira P., Martins P. A. F. *Double-sided self-pierce riveting with flat-bottom holes: a feasibility study.* Production Engineering, pages 1–9, 2021.

[88] Holleitner F., Nowak K., Nehls T., Fuchs N., Reich M., Henkel K.-M. *Design of aluminium solid self-piercing rivets for joining aluminium sheets by material and geometric modification.* Journal of Advanced Joining Processes, 8:100161, 2023.

[89] Hahn O., Schulte A. *Eignung des Durchsetzfügens und des Stanznietens zum Fügen höherfester Stahlbleche.* Verlag und Vertriebsgesellschaft, 1995. Forschungsbericht, Projekt 283 Studie.

[90] Mucha J. *The effect of material properties and joining process parameters on behavior of self-pierce riveting joints made with the solid rivet.* Materials & Design (1980-2015), 52:932–946, 2013.

[91] Mucha J., Witkowski W. *Load of the selected solutions of riveted joints in shear and tension tests.* Scientific Bulletin Rzeszow University of Technology: Mechanika, 4:33–42, 2011.

[92] Han D., Yang K., Meschut G. *Mechanical joining of glass fibre reinforced polymer (GFRP) through an innovative solid self-piercing rivet.* Journal of Materials Processing Technology, 296:117182, 2021.

[93] Grimm T., Drossel W.-G. *Process development for self-pierce riveting with solid formable rivet of boron steel in multi-material design.* Procedia Manufacturing, 29:271–279, 2019.

[94] DIN-EN-10346. *Continuously hot-dip coated steel flat products for cold forming – Technical delivery conditions*, 2009.

[95] Weman K., Linden G. *Mig welding guide*. Woodhead Publishing, ISBN:978-1-85573-947-5, 2006.

[96] Źródło internetowe. *https://www.proal.cz*, dostęp: 01.05.2025.

[97] Krajewski S., Nowacki J. *Mikrostruktura i właściwości stali o wysokiej wytrzymałości AHSS*. Welding Technology Review, 83(7), 2011.

[98] Źródło internetowe. *https://www.thyssenkrupp-materials-processing-europe.com*, dostęp: 01.05.2025.

[99] Mucha J., Boda Ł., Witkowski W. *Geometrical parameters and strength of clinching joint formed with the use of an additional rivet*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 23(2):114, 2023.

[100] VDI/VDE 2634-3. *Optical 3d-measuring systems - Multiple view systems based on area scanning*, 2008.

[101] Coppieters S., Cooreman S., Van Hecke R., Lava P., Debruyne D. *Inverse identification of flow curves and interface friction for FE simulations of clinch forming*. In *Soc Exp Mech-SEM Annu Conf Expos Exp Appl Mech*, volume 3, pages 2052–2057, 2009.

[102] Shi B., Wang Y., Liu S., Tian H. *Design method of the parameters of tools for clinching technology*. Advanced Materials Research, 455:1491–1496, 2012.

[103] Mucha J., Witkowski W. *Model MES procesu formowania oraz próby wytrzymałości na rozrywanie połączeń clinching*. Przegląd Mechaniczny, 2016.

[104] Zhao S., Xu F., Guo J., Han X. *Experimental and numerical research for the failure behavior of the clinched joint using modified Rousselier model*. Journal of Materials Processing Technology, 214(10):2134–2145, 2014.

[105] Varis J., Lepistö J. *A simple testing-based procedure and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching parameters*. Thin-Walled Structures, 41(8):691–709, 2003.

Politechnika Rzeszowska
Im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Konstrukcji Maszyn

Rzeszów, 2026 r.

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Analiza wpływu zastosowania dodatkowego elementu odkształcalnego na formowanie i nośność połączenia przetłaczanego

Autor: **mgr inż. Łukasz Boda**
Promotor: **dr hab. inż. Jacek Mucha, prof. PRz**
Promotor pomocniczy: **dr inż. Waldemar Witkowski**
Słowa kluczowe: **połączenia przetłaczane, ClinchRivet, formowanie złącza, deformacje, nośność skrętna**
Streszczenie:

W rozprawie doktorskiej zawarto rozważania dotyczące procesu formowania, określenia nośności połączenia wyznaczonej w próbie rozciągania, deformacji obszaru wtłoczenia nita, a także wartości momentu utraty nośności skrętnej dla złączy wykonanych w technologii *CR* (ang.: *ClinchRivet*).

Dla połączeń przetłaczanych wykonanych w technologii *CL* (ang.: *Clinching*) oraz *CR* (ang.: *ClinchRivet*), przeprowadzono obserwację możliwości kształtowania złączy. Badania wykonano dla dwóch i trzech warstw materiału przy wykorzystaniu różnych aranżacji, zarówno gatunku, jak i grubości łączonych warstw. W dalszej kolejności przeanalizowano wpływ głębokości wtłaczania nita na wybrane właściwości złącza. Wykazano, iż położenie miejsca scalenia mierzone względem krawędzi próbki może wpłynąć na nośność złącza.

W pracy analizowano wpływ właściwości nita na możliwość utworzenia poprawnego połączenia. W celu przeprowadzenia badań wykonane zostały nowe nity o różnym stopniu twardości. Dodatkowym zakresem rozszerzającym studium było dokonanie modyfikacji kształtu komercyjnych nitów. Poprzez wykonanie nowego zespołu matrycy, wykazano wpływ zmiany określonych cech geometrycznych wykroju na wybrane właściwości złącza. W celu przeprowadzenia dokładnej analizy dokonano modyfikacji geometrii dna matrycy oraz, dla wybranego przypadku, wykonano trzpienie matrycy o różnej wysokości. Podczas dalszych badań przeprowadzono analizy wytrzymałości na ścinanie wybranych połączeń przetłaczanych oraz wyznaczono charakterystyczne parametry zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie ISO 12996.

Kolejnym, jednym z głównych, punktem studium badań było wykonanie analizy nośności skrętnej dla złączy w technologii *CR*. W celu przeprowadzenia eksperymentu opracowano i wykonano stanowisko do badań. Następnie wyznaczono wartości momentu obrotowego, dla których zaobserwowano utratę nośności skrętnej. Ostatnim etapem niniejszej dysertacji, było przeprowadzenie walidacji modelu numerycznego formowania złącza.

Rzeszow University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics
Departament of Mechanical Engineering

Rzeszow, 2026

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Analysis of the influence of using an additional deformable element on the formation and load capacity of a clinched joint

Author: **Łukasz Boda M.Sc., Eng.**
Supervisor: **Jacek Mucha,DSc, PhD, Eng. Associate Professor**
Co-supervisor: **Waldemar Witkowski, PhD, Eng**
Key words: **sheet metal clinching, ClinchRivet, forming of connection joint, material deformations, torsional strength**
Abstract:

This diploma thesis contain issues related to the forming process, tensile strength, deformation of the connection area, and the moment of loss of torsional load capacity for joints made by the *CR* (*ClinchRivet*) technology.

For connection joints constructed with *CL* (*clinching*) and *CR* (*ClinchRivet*) technology the formability of joints was observed. Research were made for two and three layers of material with different arrangements, both type of material and thickness of the joined layers. Next, the effect of rivet insertion depth on selected joint properties, was analyzed. It was also demonstrated that the position of the joint, measured relative to the edge, can affect the joint's load capacity.

The work analyzed the influence of the rivet properties for the ability to making the connection. In order to conduct the research, the new rivets with varying degrees of hardness were manufactured. Additionally the study included modifications of the shape of commercial rivets. The effect of changing certain geometric features of the die on selected joint properties was demonstrated by creating a new die assembly. With the aim of conduct the precise analysis the modification of die bottom geometry were made. Moreover for selected case the investigation contain samples with different value of die height. Subsequent phase of research comprise shear strength analysis of selected connections according to ISO 12996.

The one of the most important part of this thesis was carrying out an analysis of torsional strength of joints made with *CR* technology. Especially for this study, the testing station for measuring the torque were designed and manufactured. During the tests there were observed the moment of loss of torsional load capacity and the critical values of torque were determined. The final stage of this dissertation was the validation of the numerical model of forming process.