

**Krzysztof Tubielewicz
Krzysztof Turczyński**



**FORMOWANIE
POŁĄCZEŃ BLACH
PRASOWANIEM NA ZIMNO**

**Prace Naukowe - Monografie
CMG KOMAG**



Krzysztof TUBIELEWICZ

Krzysztof TURCZYŃSKI

FORMOWANIE POŁĄCZEŃ BLACH PRASOWANIEM NA ZIMNO

Autorzy:

prof.dr hab.inż. Krzysztof Tubielewicz – Politechnika Częstochowska
dr inż. Krzysztof Turczyński – Centrum Mechanizacji Górnictwa
KOMAG

Komitety redakcyjny:

prof.dr hab.inż. Adam Klich
prof.dr hab.inż. Zdzisław Kłeczek
prof.dr inż. Włodzimierz Sikora

Recenzent:

dr hab.inż. Bogusław Kukuryk – prof.nadzw. Politechniki Czę-
stochowskiej

Sekretarz redakcji:

mgr inż. Romana Zając

Copyright by: *Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice*

ISBN 978-83-60708-24-8

Wydawca:

*Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice*

SPIS TREŚCI

	str.
1. Wstęp	1
2. Ogólna charakterystyka połączeń prasowanych na zimno	3
3. Ogólne zasady kształtowania połączeń prasowanych na zimno	12
3.1. Dobór materiałów na narzędzia	15
3.2. Dobór parametrów geometrycznych narzędzi	18
3.3. Określenie siły prasowania i kształtu narzędzi	24
3.4. Wybór elementu konstrukcyjnego do wykonania w nim połączeń prasowanych	27
4. Badania zasadnicze	31
4.1. Siła prasowania	33
4.2. Parametry geometryczne złącz	40
4.3. Mikrotwardość i zmiany struktury w złączach	44
4.4. Badania stanowiskowe złącz	51
4.5. Zastosowanie metody prasowania do łączenia blach podestów	66
5. Badania uzupełniające właściwości złącz	72
5.1. Badania zmodyfikowanych złączy	72
5.2. Analiza trwałości połączeń określona symulacją komputerową	78
5.3. Wytyczne do projektowania połączeń i analiza ekonomiczna procesu	92
6. Podsumowanie	99
Literatura.....	103

Wykaz ważniejszych oznaczeń

A_r	–	wydłużenie względne równomierne
a	–	grubość dna złącza
B	–	wskaźnik sumarycznych grubości łączonych blach
C	–	wskaźnik pocienienia grubości blach
D	–	średnica złącza
d_m	–	średnica matrycy
d_s	–	średnica stempla
F	–	siła kształtująca złącze
g	–	łączna grubość elementów
g_1	–	grubość blachy od strony wgłębienia złącza (stempla)
g_2	–	grubość blachy od strony wypukłości złącza (matrycy)
HV	–	mikrotwardość Vickersa
l_m	–	wysokość matrycy
l_s	–	długość stempla
Ra	–	parametr chropowatości
r_{dm}	–	promień wgłębienia w dnie matrycy
r_m	–	promień matrycy
r_s	–	promień stempla
R_e	–	granica plastyczności
R_m	–	wytrzymałość na rozciąganie
w	–	wartość pocienienia po stronie stempla
V	–	objętość
V_a	–	wartość pogrubienia po stronie stempla

1. Wstęp

Procesy łączenia blach cienkich przez miejscowe prasowanie stanowią metodę stosunkowo mało rozpowszechnioną w budowie maszyn. Połączenia te należą do sposobów nierozłącznych, takich jak łączenie przez spawanie, zgrzewanie, klejenie czy nitowanie. Otrzymane w ten sposób połączenia oparte są przeważnie na zasadach odkształceń plastycznych na zimno [53], w których wykorzystywany jest proces odkształcenia miejscowego dwóch elementów nachodzących na siebie i formujących złącze. Połączenia te powstają w rezultacie miejscowego nacisku stempla na łączone blachy i wtłoczenia ich do nieruchomej matrycy. Uzyskane w ten sposób złącze posiada najczęściej formę okrągłego lub owalnego wgłębienia od strony stempla, a od strony matrycy powstaje podobna wypukłość. Uzyskane w tym procesie odsadzenie profilu materiału nie stanowi reguły, gdyż można otrzymać także połączenia w których od strony matrycy „wypukłość” przyjmuje postać płaskiej powierzchni.

Stosowane dotychczas metody nie zawsze są najkorzystniejsze z punktu widzenia technologii łączenia blach z powodu:

- wielooperacyjności zabiegów technologicznych;
- konieczności stosowania w niektórych przypadkach dodatkowych zabiegów np. spawanie, łączenie śrubami lub nitowanie;
- powstawania w strefie łączenia podwyższonej temperatury, wywołującej zmiany w strukturze materiału;
- występujących (w miejscach łączenia) uszkodzeń warstwy wierzchniej materiału, a zwłaszcza jej powłok ochronnych, zabezpieczających przed korozją miejscową i ogólną (międzykrystaliczną i powierzchniową);
- stworzenia zagrożenia dla bezpieczeństwa i higieny pracy przez powstanie możliwości zatrucia organizmu gazami i toksynami np. w procesie spawania czy zgrzewania.

Zaproponowanie nowoczesnego sposobu łączenia blach za pośrednictwem miejscowego ich prasowania może spowodować zmniejszenie kosztów obróbki, umożliwić zastosowanie prostych narzędzi oraz zapewnić łatwość optymalizowania parametrów kształtowanego złącza, przy porównywalnej wytrzymałości połączenia z dotychczas stosowanymi metodami (spawanie, zgrzewanie), a w niektórych przypadkach uzyskujemy wyższą wytrzymałość połączenia.

Dodatkową zaletą tej metody jest łatwość łączenia blach o różnej grubości i wykonanych z różnych materiałów metalicznych i niemetalicznych, takich jak stale węglowe, stale stopowe, stopy aluminium, metale kolorowe, tworzywa metaliczne, tworzywa sztuczne itp. Stwierdzono, że w praktyce technologia wykonywania złącza kształtowego metodą pra-

sowania tzw. sposobem, „matryca-stempel” zmniejsza koszty materiałowe i obniża pracochłonność, ogranicza procesy miejscowej korozji stykowej, gdyż nie narusza warstw ochronnych, a ponadto jest bezpieczna i ekologiczna.

Właściwie zaprojektowane połączenia kształtowe pozwalają na optymalizację wymiarów geometrycznych złącza, co zapewnia także miniaturyzację wymiarową rozwiązań konstrukcyjnych elementów łączonych.

Rozwój przemysłu, poczynając od motoryzacyjnego, przez oprzyrządowanie remontowo-budowlane, aż do wytwarzania artykułów gospodarstwa domowego i drobnej galanterii metalowej, stawia wyrobom, a głównie połączeniom, nowe, coraz to wyższe wymagania technologiczne. Ze względu na wiele zalet tego rodzaju połączeń oraz prostotę ich wykonania, zwłaszcza pod względem oprzyrządowania narzędziowego, które decyduje o uzyskaniu właściwego złącza, podjęto szersze badania tego problemu. Mają one na celu opracowanie wytycznych konstrukcyjno-technologicznych dla tego rodzaju połączeń, z możliwością wykorzystania praktycznego przy konstrukcji konkretnych wyrobów. Uważając, iż rozwiązanie to stanowi ciekawą alternatywę w porównaniu z dotychczas stosowanymi sposobami łączenia blach, podjęto próbę naukowego i technologicznego opracowania tego problemu. Przedstawiono model fizyczny kształtowanego złącza, założenia techniczne w zakresie doboru parametrów konstrukcyjnych stempla i matrycy (narzędzi) oraz zasadę doboru rodzaju złącza, wskaźników określających jego zależności geometryczne i parametrów narzędzi, które spełniają wymagania teorii odkształceń plastycznych, z zakresu mechaniki tłoczenia i prasowania podczas jego formowania. Przeprowadzone w szerokim zakresie badania dotyczące zarówno konstrukcyjnych charakterystyk złącza, jak i stosowanych materiałów do połączeń, oraz kształtów narzędzi (stempel, matryca) pozwoliły, na rozszerzenie zagadnień naukowych związanych z tworzeniem węzłów nowej generacji, w maszynach i urządzeniach w celu optymalizacji zarówno procesów łączenia, jak i również właściwości wytrzymałościowych połączeń dla różnych materiałów. Zwrócono szczególną uwagę na możliwość praktycznego zastosowania połączeń kształtowych prasowanych na zimno typu „matryca-stempel”, oraz określenia tych czynników, które w istotny sposób wpływają na właściwości połączenia w określonym wyrobie.

Wykazano na przykładzie podestu budowlanego (perforowanego), porównanie wytrzymałości statycznej wyrobu z zastosowaniem połączenia kształtowego, w stosunku do tradycyjnego wykonywanego techniką spawania. Wraz z rozwojem badań i prób prowadzonych w przyszłości

nad tą metodą powinna ona znaleźć szersze zastosowanie praktyczne w różnych gałęziach przemysłu.

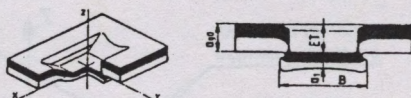
2. Ogólna charakterystyka połączeń prasowanych na zimno

Połączenia uzyskiwane poprzez operację tłoczenia lub miejscowego prasowania są szybkim zabiegiem montażowym w którym wykorzystywane jest miejscowe odkształcenie z naruszeniem, lub bez naruszenia spójności materiału, a otrzymane złącze kształtowe cechuje duża wytrzymałość.

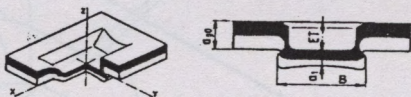
Do najczęściej stosowanych sposobów łączenia można zaliczyć (rys. 2.1):

- łączenie blach przez miejscowe nacięcie, wytłoczenie i prasowanie za pomocą odpowiedniego stempla i uchylnej matrycy (rys. 2.1 a),
- łączenie blach poprzez miejscowe tłoczenie i prasowanie na zimno za pomocą odpowiedniego stempla i matrycy (rys.2.1 b)

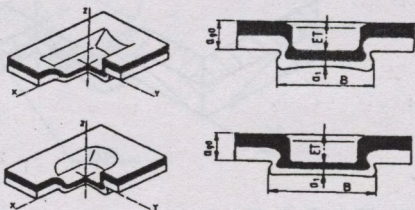
a) łączenie przez miejscowe nacięcie, wytłoczenie, prasowanie



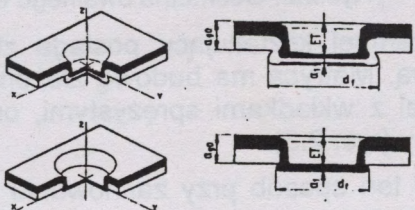
b) łączenie poprzez miejscowe tłoczenie i prasowanie na zimno



owalne wgłębienie →



okrągłe wgłębienie →

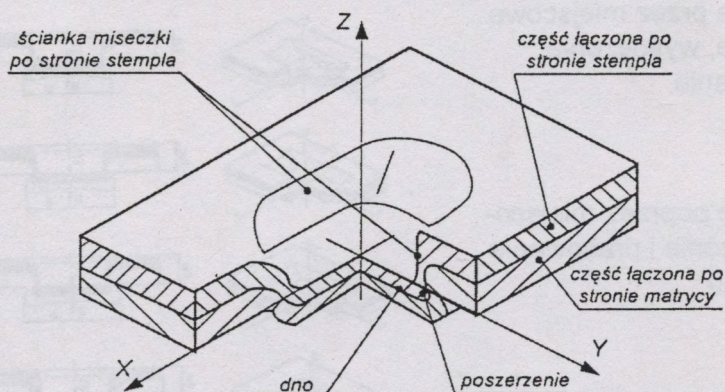


Rys.2.1. Typy połączeń blacha–blacha wykonywane za pomocą miejscowego odkształcenia [32, 35]

ET - wielkość wtłoczenia, *a₉₀* - grubość łączonych blach, *a₁* - grubość dna złącza, *B* - wielkość złącza, *d₁* - średnica złącza

Połączenia pierwszego typu [74÷76] ze względu na sposób powstania oraz stosowane narzędzia charakteryzują się większą lub mniejszą szczelnością, lub nieszczelnością, miejscowym naruszeniem łączonych blach i powłok ochronnych, oraz niejednakową wytrzymałością w różnych kierunkach obciążanego połączenia. Tego typu połączenia mogą być wykonywane w różnych odmianach w zależności od konstrukcji narzędzi. Narzędzia do wykonywania połączeń tego typu są ponadto dość złożone i drogie. Połączenia wykonane drugim sposobem, tzn. przez miejscowe prasowanie i tłoczenie na zimno charakteryzują się pełną szczelnością, zastosowaniem prostych narzędzi oraz łatwą technologią wykonywania połączenia. Wytrzymałość złącza jest duża, dorównująca zgrzewaniu i spawaniu punktowemu. Ten sposób łączenia blach i części z nich o łącznej grubości $0,5 \div 11$ mm stosowany jest dla materiałów stalowych, stopów metali nieżelaznych bez powłok lub z powłokami [37, 70, 77].

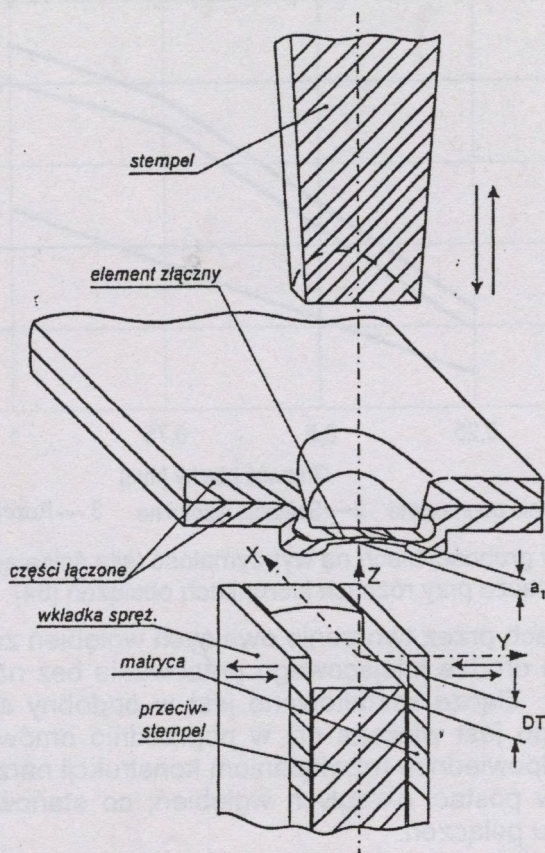
Metoda łączenia elementów z blach przez miejscowe prasowanie i tłoczenie na zimno za pomocą owalnego stempla powstała jako udoskonalenie metody łączenia blach przez miejscowe nacięcie przy zachowaniu tej samej koncepcji narzędzia (rys. 2.2) [37, 64].



Rys.2.2. Geometria owalnego elementu łączącego [37, 64]

Stempel kształtujący posiada zbliżoną do owalnej powierzchnię czołową. Matryca ma budowę złożoną, w której zastosowano przeciwstempel z wkładkami sprężystymi, oraz uchylne boczne powierzchnie matrycy (rys. 2.3).

W ten sposób przy zachowaniu koncepcji konstrukcyjnej narzędzi do łączenia prasowaniem, mogą być wykonane połączenia o prawie owalnym kształcie. Powstałe złącze ma taki charakter, że nie występuje naruszenie spójności materiału, a odkształca się on plastycznie dzięki ruchowi stempla, wciskającego się w blachę pod działaniem przyłożonej siły.

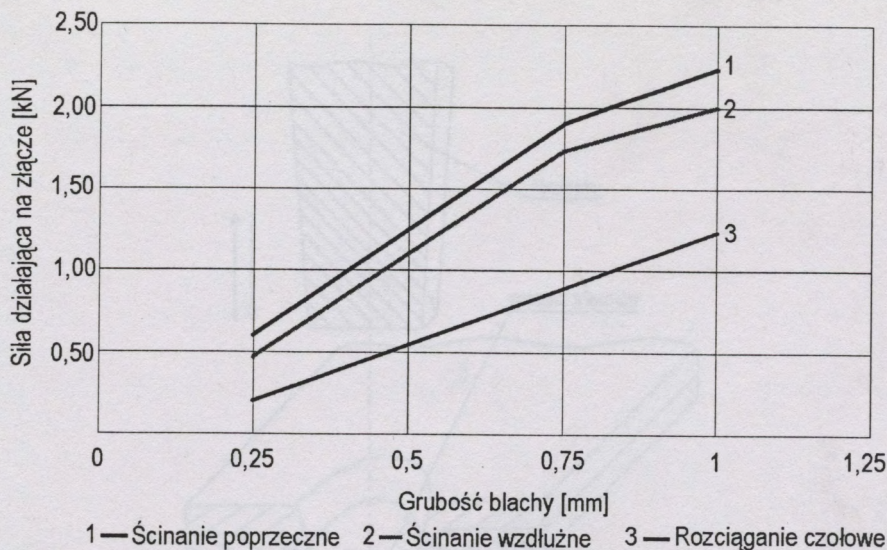


Rys.2.3. Zasada łączenia metodą owalnych wgłębień [35]

Podczas procesu prasowania (tłoczenia) powstaje zamknięta mi-seczka, której dno od strony matrycy dotyka powierzchni czołowej przeciwnstempla i dzięki dalszemu ruchowi stempla zachodzi proces spę-czenia i płynięcia promieniowego materiału, którego końcowym efektem jest powstanie złącza kształowego.

W zależności od całkowitej grubości blach przeznaczonych do łą-czenia, określa się parametry techniczne przy których złącza wykazują optymalną wytrzymałość. Najczęściej próba ścinania jest przeprowa-dzona w dwóch kierunkach, co wynika z geometrii złącza. Wytrzymałość owalnego złącza badana jest w próbie ścinania i rozciągania czołowego [64] przy czym złącze obciążone jest siłą ścinającą w kierunku osi X (ści-nanie wzdłużne) i osi Y (ściananie poprzeczne).

Złącze wykazuje przy próbie ścinania większą zdolność przeno-szenia sił obciążających w kierunku osi Y (rys. 2.4), co jest spowodowane wielkością powierzchni odkształconej podczas łączenia blach.



Rys.2.4. Wpływ grubości blach na wytrzymałość (siła ścinająca) owalnego złącza przy różnych kierunkach obciążeń [64]

Łączenie blach przez tworzenie owalnych wgłębień zapoczątkowało rozwój metod na drodze miejscowego prasowania bez nacinania łączonych elementów. Złącze kształtowane jest w podobny sposób, jednak wytrzymałość jego jest większa niż w poprzednio omówionych sposobach, a dzięki odpowiednim rozwiązaniom konstrukcji narzędzi, uzyskuje się połączenie w postaci okrągłych wgłębień, co stanowi kolejny etap rozwoju tego typu połączeń.

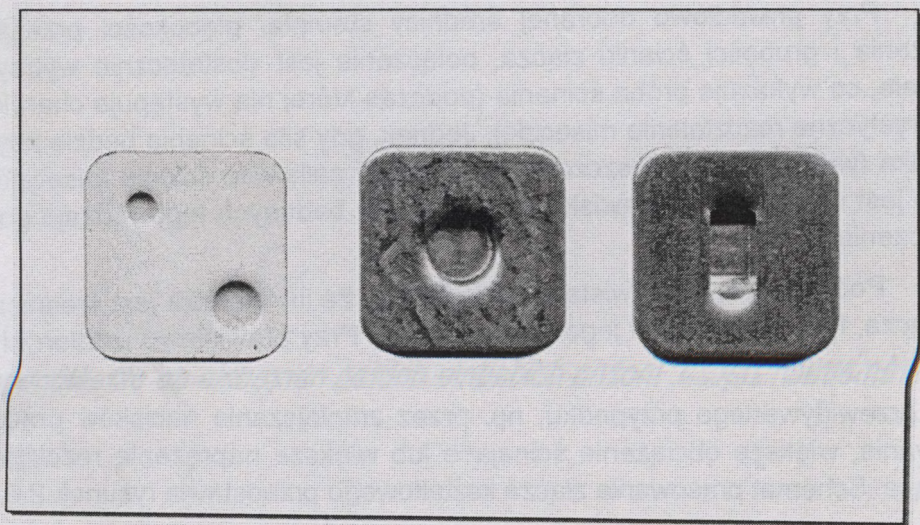
Sposób łączenia przez kształtowanie okrągłych wgłębień umożliwia uzyskanie złącza, na drodze jednostajnego przesuwu stempla względem nieruchomej matrycy. Otrzymane w ten sposób połączenie blach jest nie tylko nierozłączne, ale całkowicie szczelne. Złącze „blach” ma kształt miseczkowego wgłębienia powstałego pod naciskiem stempla oraz wypukłości, która powstaje w wyniku wtlóczenia materiału do odpowiednio zaprofilowanej kształtowej matrycy.

Tym sposobem podczas jednej operacji można wykonać jedno złącze lub ich szereg, na drodze zastosowania odpowiedniej ilości narzędzi (matryc i stempli) połączonych np. w jedną całość, które mogą być dalej doskonalone, głównie w wyniku modernizowania konstrukcji kształtów matrycy.

Złącze o kształcie okrągłym ma przewagę nad owalnym, gdyż umożliwia przenoszenie większych sił ścinających, niezależnie od kierunku ich działania. Dalszy rozwój prac nad tą metodą łączenia spowodował, że zmodyfikowane zostały narzędzia kształtujące złącza, dzięki czemu uzyskano znaczne zmniejszenie kosztów wykonania i uproszczenia technologii obróbki.

Podczas wykonywania złącza stempel powoduje stopniowe przemieszczanie materiału blach przylegających do narzędzia i kształtowanie zagłębienia odwzorowującego kształt matrycy, co powoduje odkształcenie materiału obu łączonych blach. W końcowej fazie kształtowania następuje spęszczanie materiału, który zaczyna płynąć promieniowo w dnie miseczki między powierzchniami stempla i matrycy. Wypełnienie wykroju matrycy następuje kosztem pocienienia ścianek bocznych i dna złącza. Materiał wypełnia szczelinę pierścieniową matrycy, co jest początkiem powstania tzw. „zamka” złącza. Ostatnią fazą tworzenia złącza jest wywołanie spęszczania jego dna, wymuszone promieniowym płynięciem materiału, co powoduje powstanie połączenia nierozłącznego.

Przykłady kształtów połączeń wykonanych przez miejscowe tłoczenie i prasownie przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys.2.5. Przykłady połączeń wykonanych metodą kształtową [76]

Zazwyczaj średnicę złącz w blachach dobiera się w zależności od ich grubości (tabela 2.1). Dobierając parametry złącza dla określonego rodzaju blachy można określić wielkość siły ścinającej, dopuszczalną siłę rozciągającą przypadającą na pojedyncze złącze, wartość niezbędnej siły prasowania itp. Parametry konstrukcyjno-technologiczne stempla i matrycy są zazwyczaj dobierane w zależności od wymogów konstrukcji oraz przeznaczenia danego połączenia.

Należy podkreślić, że stosunkowo duża wytrzymałość tego rodzaju połączeń, mimo miejscowego pocienienia ścianek, spowodowana jest tym, że materiał w miejscu odkształcenia jest umocniony [77].

**Przyjmowane średnice złącza w zależności od grubości
łączyanych blach [66, 77]**

Tabela 2.1

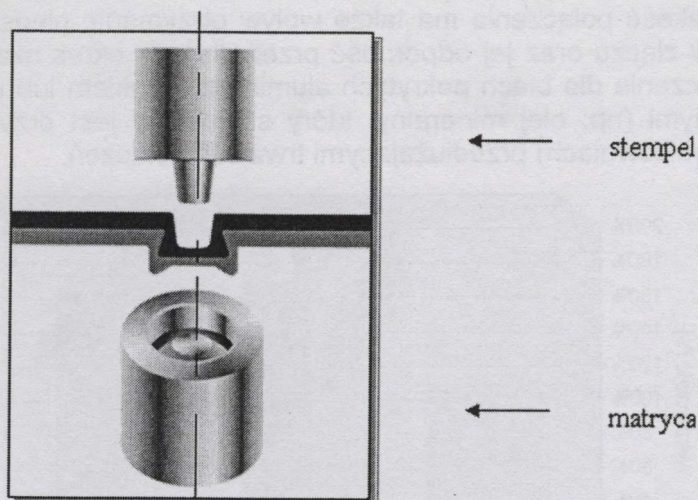
Średnica złącza d [mm]	Łączna grubość blach [mm]
12,0	4,0÷11,0
10,0	1,75÷7,0
8,0	1,6÷6,0
6,0	1,0÷3,0
5,0	0,9÷2,5
4,0	0,6÷2,0
3,0	0,5÷1,5

Przy prawidłowo dobranej średnicy stempla, głębokości przesażenia i grubości ścianki złącza, połączenie jest dostatecznie wytrzymałe, co wykazuje próba ścinania (podczas której nie występuje charakterystyczne rozdzielenie miseczki). Jednak, gdy siła ścinania będzie zbyt duża (większa od dopuszczalnej) to nastąpi całkowite ścięcie miseczki, co jest uznawane za zjawisko prawidłowe w badanych tego rodzaju połączeniach.

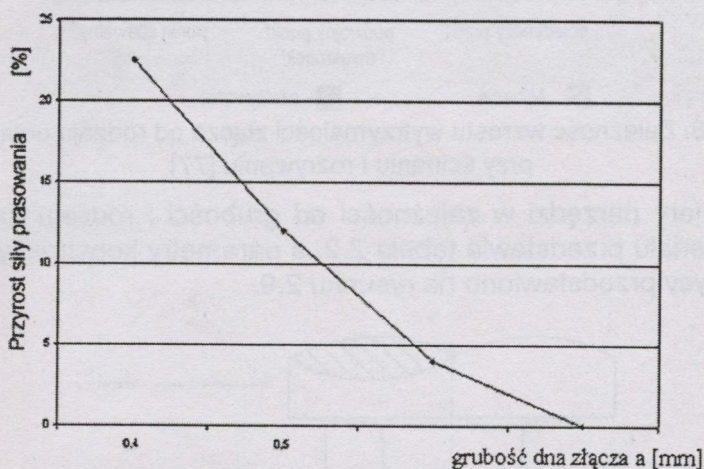
Podstawową i oczywistą zasadą jest to, że im większa jest średnica złącza, tym większa jest jego wytrzymałość. Przy prawidłowo ustalonych parametrach złącza, można dokładnie dobrać narzędzia do określonego i przewidywanego przypadku, np. przez zmniejszanie nacisków prasowania, większe obciążenie ścinające lub większe naprężenie rozciągające. Schemat prasowania złącza kształtowego przedstawia rysunek 2.6.

Prawidłowo wykonane złącze, przy optymalnym ukształtowaniu stempla i matrycy, można ocenić nie niszcząc uzyskanego połączenia, lecz sprawdzając wymiar kontrolny „a”, tj. grubość dna, który może odbiegać od nominalnej wartości w granicach tolerancji $\pm 15\%$.

Stwierdzono doświadczalnie, że im grubość dna złącza jest mniejsza, tym wytrzymałość złącza jest wyższa, przy czym należy pamiętać o pewnych granicach po przekroczeniu których, materiał łączony wskutek zbyt dużej siły prasowania podlega nadmiernemu pocienieniu i wówczas wytrzymałość złącza maleje. W wyniku badań stwierdzono, że właściwie dobrana siła prasowania (tłoczenia) gwarantuje ukształtowanie prawidłowego złącza. Przykładową zależność grubości dna złącza od siły prasowania przedstawiono na rysunku 2.7.



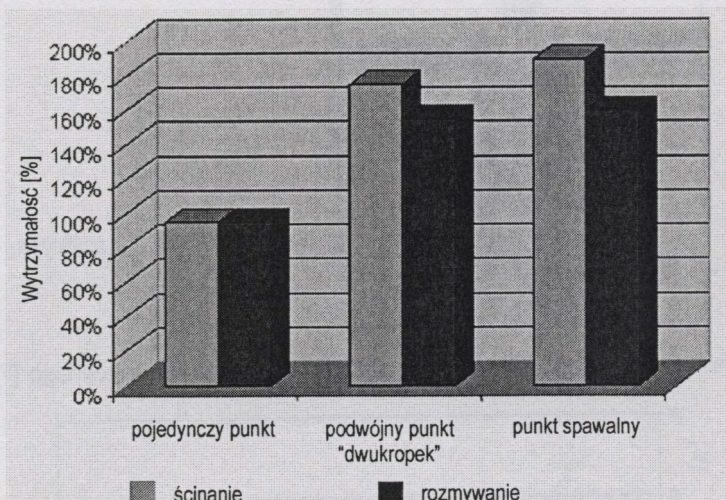
Rys.2.6. Schemat prasowania okrągłego złącza kształtowego [77]

Rys.2.7. Zmienny przyrost siły prasowania w zależności od grubości (a) dna złącza [36].

Zauważono, że grubość dna „ a ” jest w przybliżeniu proporcjonalna do sił ścinających i siły rozrywającej prostopadłej do złącza oraz zależy od grubości łączonych blach, wielkości złącza, rodzaju i stanu materiału.

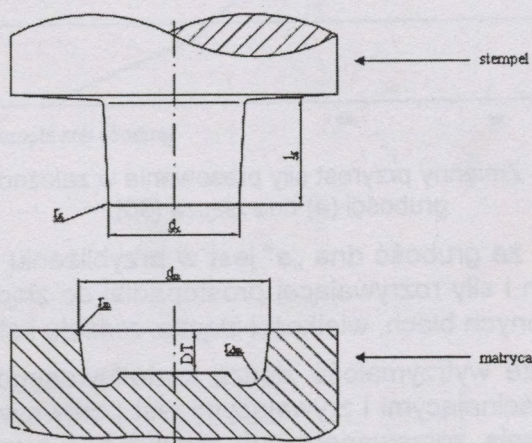
Wykazano, że wytrzymałość złącza kształtowanego prasowaniem określona siłami ścinającymi i zrywającymi jest porównywalna z wytrzymałością połączenia zgrzewanego lub spawanego punktowo. Stwierdzono, że przy porównywaniu tych połączeń wytrzymałość statyczna złącza dochodzi do 70% wartości połączenia spawanego punktowo. Natomiast połączenie dwupunktowe powoduje dalszy wzrost wytrzymałości złącza przypadającą na jeden punkt (rys. 2.8).

Na jakość połączenia ma także wpływ otrzymanie nieuszkodzonej powłoki w złączu oraz jej odporność przez dłuższy okres czasu. Ma to duże znaczenie dla blach pokrytych aluminium, cynkiem lub powłokami organicznymi (np. olej mineralny, który stosowany jest przy produkcji blach w walcowniach) przedłużającymi trwałość połączeń.



Rys.2.8. Zależność wzrostu wytrzymałości złącza od rodzaju połączenia przy ścinaniu i rozrywaniu [77]

Wymiary narzędzi w zależności od grubości i rodzaju zastosowanego materiału przedstawia tabela 2.2, a parametry konstrukcyjne stempla i matrycy przedstawiono na rysunku 2.9.



Rys.2.9. Parametry konstrukcyjne stempla i matrycy [71]

l_s - długość stempla, d_s - średnica stempla, d_m - średnica matrycy, DT - głębokość przesadzenia, r_{dm} - promień wgłębienia w dnie matrycy, r_s - promień stempla, r_m - promień matrycy

**Dobór parametrów narzędzi dla różnych materiałów [71], oznaczenia
według rysunku 2.9**

Tabela 2.2

Materiał łączony	Grubość [mm]	Smarowanie	Narzędzia (wymiary w [mm])						
			Stempel		Matryca		Prom. ciagowe		r_{dm}
			średnica a	długość	średnica a	gł przesadz.	matryca	stempel	
			d_s	l_s	d_m	DT	r_m	r_s	
Al	0,4	ze smarowa- niem i bez	4,91	1,65	6,05	1,0	0,05	0,05	0,6
Al	0,8	ze smarowa- niem i bez	4,91	1,65	6,05	0,85	0,20	0,20	0,6
Cu	0,4	ze smarowa- niem	4,91	1,55	6,05	0,85	0,20	0,20	0,6
Stal	0,6	ze smarowa- niem i bez	4,23	2,45	6,05	1,35	0,15	0,35	0,7
Stal	0,8	ze smarowa- niem i bez	4,23	2,45	6,05	1,35	0,15	0,35	0,7

Dotychczas nie zbadany został problem odpowiedniego doboru parametrów złącza, mający na celu otrzymanie połączenia o trwałym charakterze i maksymalnej wytrzymałości przy blachach z jednakowych lub różnych materiałów, o jednakowej lub różnej grubości. Ponadto złącze powinno umożliwić jego wykonywanie za pośrednictwem urządzeń stacjonarnych lub przenośnych, a narzędzia powinny być stosunkowo proste i tanie.

W celu otrzymania poprawnego złącza przez miejscowe prasowanie na zimno należy zastosować narzędzia o odpowiednich parametrach geometrycznych. Jednoznaczny dobór takich parametrów jest utrudniony, gdyż nieznanym jest wpływ konstrukcji, ani doboru parametrów geometrycznych części roboczych narzędzi na proces płynięcia materiałów w złączu.

3. Ogólne zasady kształtowania połączeń prasowych na zimno

Celem poznawczym procesu łączenia elementów, metodą prasowania na zimno, jest dobranie takich parametrów obróbki jak np. siła nacisku, średnica połączenia, czy głębokości prasowania, które zapewniają maksymalną wartość założonego kryterium-wytrzymałości i trwałości połączenia. Dobór parametrów procesu, czyli w tym przypadku warunków obróbki, zależy od tego jak dalece poznane zostaną zależności fizyczne, techniczne i ekonomiczne danego sposobu formowania połączenia oraz jakimi metodami możemy uzyskać najlepsze rozwiązanie. Przyjęto wstępne dane (parametry techniczne), oraz wyznaczono początkowe wartości warunków procesu prasowania połączeń dla wybranych blach cienkich. Jednak ze względu na możliwości wystąpienia zakłóceń w trakcie procesu produkcyjnego należało sprawdzić doświadczalnie warunki wstępnie przyjętych założeń. Przyjęto kryteria jakości technologicznej i kryteria jakości użytkowej, oraz ekonomicznej biorąc pod uwagę wydajność przy określonym poziomie jakości wyrobów i określonym poziomie kosztów, wyznaczono rodzaj i kolejność zadań technologicznych, które należało wykonać, aby wyeliminować występujące błędy. Przyjęta analiza polegała na możliwościach realizacji badań na specjalnie wykonanych stanowiskach pomiarowych i przy określonej metodyce i środkach badawczych.

W celu potwierdzenia osiągniętych wyników można porównać je drogą symulacji komputerowej w celu sprawdzenia możliwości ograniczenia zakresu badań, które mają na celu:

- przyjęcie rodzaju i wielkości złącza umożliwiającego połączenie elementów z blach, surowych i pokrywanych, dającego odpowiednią wytrzymałość określonej konstrukcji,
- opracowanie konstrukcji złącza i narzędzi dla jego wykonania, pod względem geometrii oraz wytrzymałości,
- wyznaczenie niezbędnych sił prasowania,
- wybór elementu konstrukcyjnego do praktycznego zastosowania połączeń prasowanych na zimno.

Odpowiedni dobór złącza ma na celu otrzymanie połączenia jednorodnego geometrycznie i cechującego się określoną wytrzymałością przy różnego rodzaju obciążeniach zewnętrznych. Należy jednak pamiętać o tym, że wybór danego rodzaju złącza musi uwzględniać stosunkowo proste możliwości jego wykonania, a głównie zastosowanie niezbyt złożonych, ale trwałych narzędzi.

Ponadto muszą być zachowane takie warunki, które zapewnią przy łączeniu blach lub innych elementów dobry dostęp do różnych miejsc łączonych. Odpowiedni rodzaj złącza powinien uwzględniać także łatwe i możliwie proste jego wykonanie, gwarantujące jednak określoną trwałość.

Ważną cechą przy wyborze złącza jest rodzaj łączonych materiałów, ich grubość i gatunek. Przyjęto do analizy łączenie blach stalowych o trzech różnych grubościach i stosunkowo małych gabarytach, których gatunki ujęto w tabeli 3.1.

Gatunki stali i przyjęte grubości blach

Tabela 3.1

Gatunek stali	Grubość od strony stempla [mm]	Grubość od strony matrycy [mm]	Kategoria blachy według PN
St 3	1,5	1,5	plytko tłoczna
08 X ^{*)}	1,5	1,5	bardzo głęboko tłoczna
10 X ^{*)}	1,5	1,5	głęboko tłoczna
10J	1,5	1,5	głęboko tłoczna
St3Sal	1,5	1,5	tłoczna
St 3	1,5	2,0	plytko tłoczna
08 X ^{*)}	1,5	2,0	bardzo głęboko tłoczna
10 X ^{*)}	1,5	2,0	głęboko tłoczna
10J	1,5	2,0	głęboko tłoczna
St3SAL	1,5	2,0	tłoczna
St 3	1,8	2,5	plytko tłoczna
*) zamiast stali St 3			

Rodzaj materiału w tym przypadku jest istotny, gdyż każdy z nich ma inną granicę plastyczności (R_e), wytrzymałość na rozciąganie oraz podatność na umacnianie, które to cechy decydują o ich „kształtowalności plastycznej”. Właściwe dobranie tych wskaźników materiałowych umożliwia wykonywanie zabiegów obróbki plastycznej na zimno zapewniających odpowiednie kształtowanie blach bez obawy naruszenia ich spójności (pęknięcia).

Jednym z podstawowych czynników wpływających na przydatność stali do różnych procesów tłoczenia jest zawartość w niej węgla i dodatków stopowych [25,30]. Uwzględniając poza tym strukturę materiałów i stan ich powierzchni, oraz odchyłki wymiarów grubości oraz struktury krystalograficznej, która charakteryzuje się wielkością ziaren, teksturą, uzyskujemy cechy decydujące o własnościach technologicznych, określających przydatność do odkształcenia zwaną tłocznością. Kierując się tymi wymogami według norm można zaliczyć dany gatunek stali do odpowiedniej kategorii blach (tabela 3.1) [25, 30, 84].

Skład chemiczny przyjętych materiałów oraz własności mechaniczne po normalizowaniu przedstawia tabela 3.2 [30, 84]. Właściwości te zostały wyrywkowo sprawdzone, przy selekcji wstępnej materiału próbek.

Skład i własności mechaniczne stali przyjętych do badań

Tabela 3.2

Gatunek stali	Zawartość składników								Właściwości mechaniczne		
	C	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mn	Re [MPa]	Rm [MPa]	A5 %
St3	0,22	0,07	0,05	0,05	0,03	0,30	0,30	-	235,0	375,0 ÷ 460,0	26
08X	0,05 ÷ 0,11	0,04	0,04	0,04	0,25	0,25	0,15	0,25 ÷ 0,5	175,0	295,0	35
10X	0,0 ÷ 0,14	0,04	0,04	0,04	0,20	0,30	0,30	0,25 ÷ 0,5	185,0	315,0	33
10J	0,07 ÷ 0,14	0,17	0,04	0,04	0,20	0,30	0,30	0,35 ÷ 0,65	205,0	335,0	31

Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na tłoczność blach jest grubość łączonych elementów. W praktyce łączone blachy posiadają znaczne zakresy grubości, które znajdują się w granicach 3÷5 mm i dlatego przy wyborze złączy należy brać pod uwagę to, że dobrane złącze powinno posiadać podobne cechy dla różnych grubości blach.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia, do badań przyjęto złącze o kształcie okrągłym z uwypukleniem od strony matrycy. Wybór takiego rodzaju złącza uzasadniony jest tym, iż jego kształt geometryczny gwarantuje w miarę jednakowy rozkład naprężeń w przekroju złącza, jak również jednakową zdolność do przenoszenia różnego rodzaju obciążeń w każdym kierunku. Za wypukłym kształtem dna złącza przemawia to, że złącze uzyskuje się podczas jednej operacji prasowania (tłoczenia), a ponadto prawidłowo dobrany kształt złącza określony orientacyjnie w pracach [71, 77] odpowiada założonym wstępnie parametrom (np. grubość), dla stosowanych materiałów do wykonania określonych elementów (pomostów), których wyrywkową analizę zawierają prace [2, 3, 55, 64-67].

3.1. Dobór materiałów na narzędzia

Ważnym problemem technologicznym jest dobór odpowiedniego materiału na narzędzia, które powinny wytrzymać dostateczną liczbę wykonywanych połączeń, przy stosunkowo dużych naciskach jednostkowych wynoszących w zależności od łączonych materiałów od 600 do 1600 MPa. Biorąc pod uwagę odpowiednie własności wytrzymałościowe materiałów stosowanych na narzędzia, zalecane jest stosowanie stali do przeróbki plastycznej do pracy na zimno lub stali szybkotnących.

W procesie miejscowego prasowania robocze części narzędzi (stempli i matryc) podlegają obciążeniom udarowym z intensywną koncentracją naprężeń występujących na ich krawędziach lub na całych pracujących powierzchniach. Dlatego zaleca się, by materiały na stemple i matryce odpowiadały podwyższonym wymaganiom w zakresie twardości i odporności na zużycie, ale zapewniały jednocześnie dostateczną udarność. Ponadto w przypadku prasowania na zimno, materiały do wykonania stempli i matryc muszą być również odporne na ścieranie w podwyższonych temperaturach. Biorąc powyższe pod uwagę, twardości narzędzi po obróbce cieplnej powinny wynosić 59÷62 HRC [4, 14, 20, 25]. Zalecane własności posiadają takie gatunki stali szybkotnących jak SW9, SW7M, które jednocześnie wykazują dużą odporność na ścinanie, jednak wadą jest ich koszt i bardzo zawężone warunki obróbki cieplnej. Innymi możliwymi do zastosowania są stale narzędziowe stopowe do pracy na zimno, takie jak NC6, NC10, NC11, z podwyższoną zawartością chromu, który zwiększa głębokość hartowania, twardość i odporność na ścieranie.

W celu zmniejszenia siły tarcia i naprężeń między materiałem a narzędziem oraz zmniejszenie naprężeń w metalu i ochrony narzędzi przed powstaniem zadziórów i zadrapań, można w procesie tłoczenia i prasowania używać smarowania. Smar powinien charakteryzować się następującymi własnościami [20, 24, 34]:

- tworzyć wytrzymałą nie zasychającą warstwę, mogącą przenosić znaczne naciski,
- dobrze przylegać i równomiernie rozkładać się na całej powierzchni,
- dawać się łatwo usuwać z powierzchni części,
- nie uszkadzać mechanicznie ani chemicznie powierzchni narzędzi,
- być chemicznie trwałe i nieszkodliwe.

W procesie wykonywania połączeń stosuje się różnego rodzaju smary na bazie grafitu i oleju mineralnego (zmniejszającego współczynnik tarcia), podwyższające trwałość narzędzi 2÷5 razy. Zarówno podczas badań, jak i podczas stosowania przemysłowego procesu wykańczania narzędzia były smarowane olejem mineralnym.

Należy zauważyć, że pewnym ograniczeniem zakresu stosowania powyższych połączeń są warunki technologiczne jakie muszą być spełnione, a mianowicie:

- musi być zapewniony dostęp dla narzędzi gwarantujący dużą sztywność podparcia, jak i możliwość szybkiego wyprowadzenia narzędzi po przeprowadzonej operacji,
- połączenie może być stosowane w elementach o konstrukcji otwartej, trudniejsze będzie wprowadzenie do konstrukcji skrzynkowej zamkniętej,
- materiały łączone muszą się charakteryzować zdolnością do odkształcenia plastycznego dla utworzenia „zamka” gwarantującego odpowiednią nośność połączenia.

Innymi czynnikami decydującymi o znaczeniu zastosowania wyżej wymienionej metody łączenia są: ekologia procesu, która jest przyjazna zarówno dla pracownika jak i środowiska pracy, prostota narzędzi i procesu technologicznego oraz duża powtarzalność wykonanych złączy (wymiarowa i wytrzymałościowa).

Obecnie następuje intensywny rozwój poszukiwań określonych rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających na stosowanie nowych metod łączenia różnych elementów z materiałów utrzymujących własności materiału rodzimego.

Jednak w ostatnim okresie można zauważyć ograniczone badania dotyczące wytrzymałości połączeń z blach ogólnego przeznaczenia oraz doboru parametrów procesu technologicznego, doboru narzędzi i możliwych do łączenia rodzajów konstrukcji. Wszystkie te niewiadome zalecają i wytyczają ogólny kierunek, rozwoju badań tego procesu, do zastosowania zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym i budownictwie.

Dotychczasowa teoria procesów nie daje możliwości dokładnego przewidywania właściwości połączeń w porównaniu z wynikami i doświadczeniami dotyczącymi znanych metod łączenia elementów. Niespójność badań i duża różnorodność analizowanych rozwiązań czyni proces analizy, porównania i interpretacji wyników bardzo trudnym, ze względu na fragmentaryczne określenia wartości parametrów przez różnych badaczy. Z uwagi na dużą różnorodność zastosowanych gatunków materiału, niedostateczny opis teoretycznych zjawisk zachodzących w strefie kontaktu (charakterystyk procesu) przeprowadzono w tym celu badania stanowiskowe określające wytrzymałość złączy, konstrukcję narzędzi, pomiary charakterystycznych parametrów dla konkretnego przypadku praktycznego.

Z przeprowadzonej analizy, przemysłów, obserwacji i badań własnych wynikają następujące wnioski:

- brak jest badań dotyczących modelowania i projektowania tego rodzaju połączeń kształtowych wykonanych z blach cienkich metodą prasowania na zimno, pod kątem uzyskiwania określonych właściwości eksploatacyjnych połączenia z przeznaczeniem do konkretnego celu praktycznego (badania na przypadkowo dobranych próbkach),
- zauważalny jest brak doświadczeń konstrukcyjno-technologicznych związanych z optymalizacją postaci i materiałów połączeń, narzędzi do wykonywania złącza (stemple i matryce), co uniemożliwia szersze zastosowanie prac związanych z tworzeniem węzłów konstrukcyjnych nowej generacji w różnego rodzaju maszynach i urządzeniach,
- analiza dotycząca parametrów geometrycznych i wskaźników dynamicznych złącza wykazuje znaczne rozbieżności, co stwarza konieczność podjęcia badań odnośnie wymaganych trwałości i wytrzymałości połączeń dla różnego rodzaju łączonych materiałów,
- brak jest badań zarówno symulacyjnych, jak i stanowiskowych, tego rodzaju połączeń kształtowych, które mogą w przyszłości stanowić alternatywę dla dotychczas stosowanych rozwiązań, głównie pod kątem ich zastosowania dla konkretnych, praktycznych zastosowań przemysłowych.

Poniżej przedstawiono analizę niektórych wyżej wymienionych problemów, a ponadto przedstawiono charakterystykę przebiegu procesu wykonania złączy (materiały, narzędzia).

Przeprowadzono sposób określenia parametrów konstrukcyjnych, geometrycznych złącza, oraz ich wytrzymałości. Określono siły prasowania wraz z podaniem warunków wykonania połączeń kształtowych tą metodą, w zastosowaniu do konkretnych przykładów praktycznych i przemysłowych (podestów).

Opracowano zagadnienia związane z połączeniami kształtowymi typu „blacha-blacha” techniką prasowania za pomocą narzędzi „matryca-stempel”, które zastępują obecnie szeroko stosowaną technologię spawania i zgrzewania. Na drodze określenia parametrów złącza oraz konstrukcji prostych narzędzi wykonano analizę połączeń pod kątem: z jednej strony zmniejszenia kosztów ich wykonania, a z drugiej strony podniesienia trwałości złącz na drodze wyeliminowania niebezpiecznych, np. w warunkach górniczych, procesów spawalniczych.

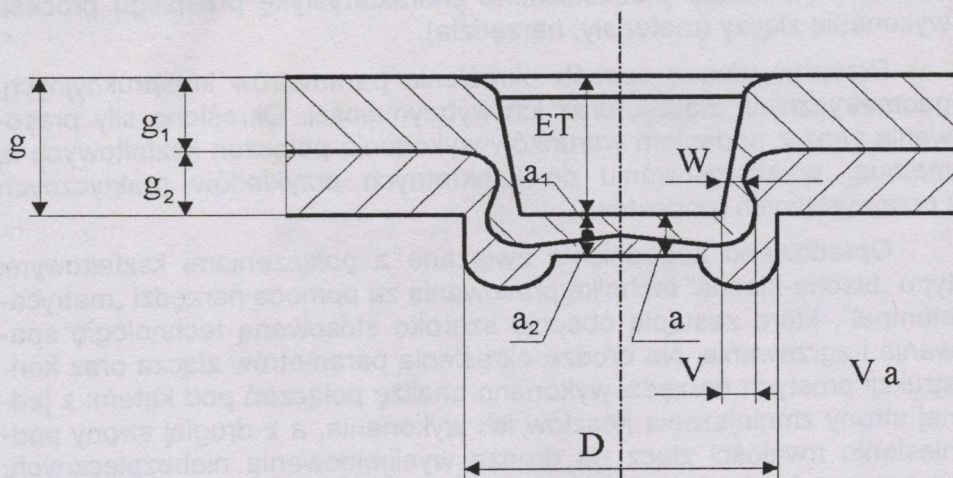
Przedstawiona postać konstrukcyjna połączenia kształtowego oraz analiza porównawcza procesów technologicznych, w stosunku do połączeń tradycyjnych wykonanych techniką spawania lub zgrzewania, a także ocena geometryczna i wytrzymałościowa zarówno samych połączeń kształtowych, jak również wyrobów łączonych tą metodą według założonego programu badań doświadczalno-stanowiskowych.

Przeprowadzone badania stanowiskowe, pomiary geometryczne oraz określenie zmian zachodzących w strukturze materiału połączeń, wykonane zostały w celu uzyskania możliwie prostej metody i oceny prawidłowości ich wykonania, które mogą być praktycznie wykorzystane między innymi przy konstrukcji nowej generacji podestów budowlanych, czy też podobnych urządzeń stosowanych w budowie maszyn.

3.2. Dobór parametrów geometrycznych narzędzi

Na podstawie analizy parametrów konstrukcyjnych, łączonych elementów oraz z przebiegu procesu łączenia należy przyjąć w celu uzyskania wysokich własności eksploatacyjnych połączeń, odpowiednie proporcje parametrów geometrycznych wynikające z ogólnych zasad procesów prasowania i tłoczenia [48, 58]. W celu wyznaczenia parametrów geometrycznych złącza pokazanego na rysunku 3.1, zasadnicze wskaźniki ułatwiające analizę geometryczną przebiegu procesu łączenia, ujęto w tabeli 3.3.

Przyjęte wskaźniki mają decydujący wpływ na przebieg tworzenia złącza i uzyskanie właściwych parametrów geometrycznych. Przeprowadzona analiza tych wskaźników pod kątem mechaniki płynięcia materiału oraz porównanie ich z dostępnymi danymi materiałowymi umożliwi z kolei wyznaczenie odpowiednich parametrów geometrycznych narzędzi kształtujących złącze.



Rys.3.1. Parametry konstrukcyjne łączonych elementów i złącza [71]

g - grubość sumaryczna blach, g_1 - grubość dna po stronie stempla, g_2 - grubość blachy po stronie matrycy, D - średnica złącza, a - grubość całkowita dna, V_a - wartość pogrubienia po stronie stempla, a_1 - grubość dna od strony stempla, a_2 - grubość blachy od strony matrycy, ET - wielkość wytłoczenia, W - wartość pocienienia po stronie stempla

Podstawowe zależności wskaźników geometrycznych złącza i narzędzia

Tabela 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{d_m}{g}$	$\frac{d_m - d_s}{g}$	$\frac{d_s}{g}$	$\frac{l_m}{g}$	$\frac{l_s}{g}$	$\frac{a}{g}$	$\frac{r_m}{d_m}$	$\frac{r_s}{d_s}$

Na podstawie analizy mechaniki tłoczenia, prasowania oraz teorii podstaw odkształceń plastycznych, można określić wymagania, które powinny spełniać przyjęte wskaźniki w celu uzyskania poprawnego złącza [57].

Wskaźnik $\frac{d_m}{g}$ decyduje o maksymalnej wytrzymałości złącza. Im on jest większy, tym uzyskuje się większą wytrzymałość złącza. Jednak zbyt duża jego wartość może pogorszyć tzw. „sztywność” i złącze staje się podatne na rozerwanie, co z kolei powoduje zmniejszenie jego wytrzymałości. Siła niezbędna do ukształtowania złącza jest zależna od jego średnicy (czyli od parametru d_s/g), co przy dużych średnicach prowadzi do wzrostu siły i zbyt dużych obciążeń przypadających na narzędzie. Zatem parametr ten należy przyjmować doświadczalnie w pewnych granicach, których orientacyjne zakresy podano w tabeli 2.1.

Wskaźnik $\frac{d_m - d_s}{g}$ decyduje o grubości ścianek złącza, a tym samym o jego wytrzymałości na ścinanie. Wartość jego powinna być tak dobrana, aby luz między stemplem i matrycą w procesie wytłaczania spowodował jedynie takie pocienienie ścianek połączenia, które wywoła umocnienie materiału, rekompensujące ubytek przekroju. Optymalną wartość tego wskaźnika można wyznaczyć jedynie na drodze doświadczalnej lub poprzez dokładną symulację komputerową wyspecjalizowanymi programami MES. Na podstawie ogólnych zasad mechaniki odkształceń można jedynie przewidywać, że wskaźnik ten powinien zawierać się w granicach 1,0÷2,0 [3, 32, 36, 72].

Wskaźnik $\frac{r_m}{d_m}$ określa wartość promienia zaokrąglenia matrycy i decyduje o przebiegu procesu wytłaczania w jego pierwszym etapie. Stwierdzono doświadczalnie, że przy małych promieniach materiał zbyt mocno będzie się wgniatał w matrycę, co może spowodować znaczne, miejscowe pocienienie ścianek połączenia. Natomiast przy dużych promieniach nie będzie możliwe ukształtowanie właściwego profilu „zamka” na dnie złącza. W obu krańcowych przypadkach wytrzymałość złącza będzie mniejsza niż przy uzyskaniu właściwego promienia.

Wskaźnik $\frac{r_s}{d_s}$ określa wartość promienia zaokrąglenia stempla i ma podobny wpływ, jak omówiony poprzednio wskaźnik określający promień matrycy.

Wskaźnik $\frac{a}{g}$ określający grubość dna złącza „a” (rys. 3.1) i wraz z rowkiem na dnie matrycy ma decydujący wpływ na powstanie optymalnego kształtu połączenia i uzyskanie odpowiedniego pogrubienia ścianki w fazie prasowania (wymiar V_a na rys. 3.1).

Wskaźniki $\frac{l_m}{g}, \frac{l_s}{g}$ decydują o wartości tzw. przetłoczenia (głębokości wgniecenia i wypukłości). Stwierdzono doświadczalnie, że wartość przetłoczenia powinna być jak najmniejsza, ze względu na minimalizację odkształcenia materiału złącza i zachowania nieuszkodzonych powłok na łączonych blachach. Jednak przetłoczenie powinno być na tyle duże, aby mógł powstać prawidłowy kształt połączenia w końcowej fazie prasowania (wymiar V_a na rys. 3.1).

Najbardziej istotnym parametrem technologicznym procesu jest siła prasowania, która decyduje o uzyskaniu odpowiedniego kształtu, a zwłaszcza grubości dna złącza, które wpływa na wytrzymałość połączenia.

Maksymalna siła kształtowania złącza występuje w końcowej fazie jego wykonania, wówczas gdy stempel wykonuje pracę sprasowania dna połączenia. Siłę tą można określić rozpatrując końcową fazę kształtowania połączenia, gdy występuje jednoczesne prasowanie z wyciskaniem materiału o charakterze mieszanym (wyciskanie przeciwbieżne i promieniowe). Można do jej określenia użyć przybliżonego wzoru Schneidera [69]:

$$F = k \frac{\pi d^2}{4} R_m \quad (3.1)$$

gdzie:

k - współczynnik zależny od stosunku d/s , ($k = 4$),

d - średnica stempla,

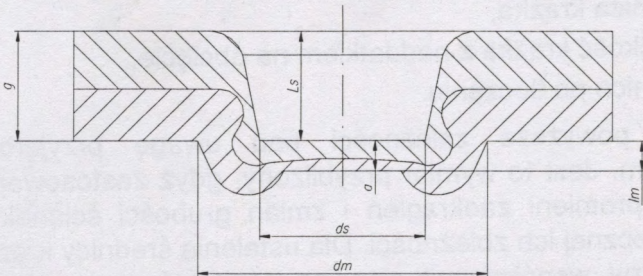
s - grubość ścianki wyciskanego elementu,

R_m - wytrzymałość na rozciąganie.

W celu otrzymania prawidłowego kształtu złącza na drodze prasowania należało zaprojektować i wykonać narzędzie o odpowiednim kształcie. Kształt stempla oraz kształt matrycy przyjęto podobny jak w pracach [71, 74-77]. Istotnym jest zarówno zachowanie proporcji

kształtów, jak również dobranie odpowiednich parametrów konstrukcyjnych, które zapewniają utrzymanie połączenia trwałego o odpowiedniej wytrzymałości. Przy wstępnym doborze parametrów narzędzi posłużono się wskaźnikami zawartymi w tabeli 2.2, która zawiera ogólne proporcje dotyczące doboru parametrów narzędzi dla różnych materiałów i różnych grubości blachy. W celu doboru parametrów złącza (blacha stalowa o grubości 0,8 mm) przeprowadzono analizę zależności geometrycznych złącza, poprzez dobranie odpowiednich wielkości stanowiących charakterystykę podstawową geometrii złącza (rys. 3.2), a wartości wybranych wskaźników ujęto w tabeli 3.4.

Przedstawione wskaźniki zweryfikowane doświadczalnie umożliwiają dobranie odpowiednich parametrów geometrycznych narzędzi dla przyjętych w badaniach grubości blach.



Rys.3.2. Charakterystyczne wielkości geometryczne złącza

Wskaźniki określające charakterystyczne wielkości geometryczne złącza

Tabela 3.4

Wskaźniki złącza							
$\frac{d_m}{g}$	$\frac{d_m - d_s}{g}$	$\frac{d_s}{g}$	$\frac{l_m}{g}$	$\frac{l_s}{g}$	$\frac{a}{g}$	$\frac{r_m}{d_m}$	$\frac{r_s}{d_s}$
3,781	1,13	2,63	0,843	1,531	0,312	0,024	0,082

Wykorzystując otrzymane wielkości określono parametry geometryczne stempła i matrycy dla trzech różnych grubości blach stalowych i przedstawiono w tabeli 3.5.

Wielkości geometryczne narzędzi

Tabela 3.5

Grubość łączonych blach Σg [mm]	Stempel			Matryca			
	d_s	l_s	r_s	d_m	l_m	r_m	r_{dm}
3,0	7,90	4,59	0,64	11,3	2,52	0,27	1,29
3,5	9,25	5,35	0,75	13,23	2,95	0,31	1,52
4,3	11,36	6,58	0,93	16,25	3,6	0,39	1,86

W celu dodatkowego sprawdzenia parametrów geometrycznych narzędzi należało przyjąć dla otrzymanego złącza wykonanego według określonych zasad dla blach o łącznej grubości 3 mm (1,5 + 1,5) tzn. takich, dla których będą wykonywane badania doświadczalne, średnicę krążka taką, aby była spełniona zasada stałej objętości. Przy takiej średnicy zachodzi w miarę prawidłowy proces odkształcenia plastycznego. Dobór tej średnicy przeprowadzić można na podstawie prac [47, 48], stosując wzory i warunki doboru parametrów procesu tłoczenia wytłoczek cylindrycznych bez kołnierza.

I tak do obliczenia średnicy krążka (rys. 3.3) zastosowano następującą zależność [47, 48]:

$$D = \sqrt{d^2 + 4dH} \quad (3.2)$$

gdzie:

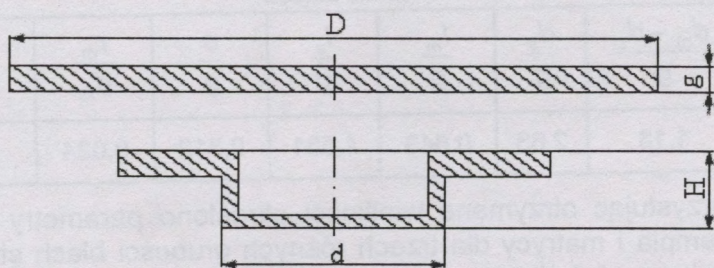
D – średnica krążka,

H – wysokość krążka z naddatkiem na obcięcie,

d – średnica po tłoczeniu.

Biorąc powyższe zależności pod uwagę przyjęto średnicę: $D = 19,08$ mm. Jest to wymiar przybliżony, gdyż zastosowany wzór nie uwzględnia promieni zaokrągleń i zmian grubości ścianek bocznych, a także koniecznej ich zbieżności. Dla ustalenia średnicy krążka określono również tzw. współczynnik ciągnięcia (m), który jest zależnością stosunku średnicy złącza do średnicy krążka wyjściowego.

$$m = \frac{d}{D} \quad (3.3)$$



Rys.3.3. Schemat prasowania wytłoczki o średnicy d z krążka o średnicy D i grubości g

Przyjmując dla stali minimalny współczynnik ciągnięcia (m) w granicach $0,46 \div 0,53$ określono maksymalną średnicę krążka w granicach odchyłek $0,46 \div 0,53$. Zatem dla minimalnej wartości współczynnika ciągnięcia $m = 0,46$ średnica $D = 24,56$ mm. Przyjmując taką średnicę, dla której uzyskujemy największą redukcję średnicy przy tłoczeniu obliczono objętość krążka. Objętość ta wynosi $V = 1420,5 \text{ mm}^3$.

Objętość złącza dla średnicy $d_s = 7,9$ mm i $d_m = 11,3$ mm i długości roboczej stempla $l_s = 4,6$ mm, matrycy $l_m = 2,5$ mm wynosi $V' = 1486,659$ mm³.

Zatem warunek stałej objętości nie jest spełniony w sposób wystarczający, gdyż:

$$V \leq V'$$

gdzie:

V – objętość przed odkształceniem,

V' – objętość po odkształceniu.

Jednakże objętości te nie różnią się w znacznym stopniu, różnica ta wynosi zaledwie około 4,6%. Uwzględniając, że nie można dokładnie określić objętości złącza ponieważ nie znamy rzeczywistego mechanizmu płynięcia, czyli pocienienia blachy w strefie odkształcenia plastycznego, możemy zatem ostatecznie przyjąć, że warunek stałej objętości jest zachowany.

Ponadto dla zmniejszenia różnicy objętości zwiększono przy konstrukcji narzędzi nieznacznie średnicę stempla, głębokość wtłoczenia, a także zmniejszono średnicę matrycy. Ostatecznie przyjęte wielkości stempla zawiera tabela 3.6.

Zmiany niektórych parametrów narzędzia

Tabela 3.6

	Wartość obliczeniowa parametrów [mm]	Wartość parametrów przyjętych [mm]
d_s	7,9	8,0
l_s	4,6	4,7
d_m	11,3	11,0

Wprowadzając takie zmiany uzyskano następujące wartości objętości przed ($V = 1420,52$ mm³) i po odkształceniu: ($V' = 1440,87$ mm³). Przyjmując średnicę $D = 24,56$ mm i $d_m = 11$ mm, względną wysokość wytłoczki można określić za pomocą wzoru zaczerpniętego z pracy [57].

$$\frac{h}{d_m} = \frac{\left(\frac{D}{d_m}\right)^2 - 1}{4} \quad (3.4)$$

stąd: $\frac{h}{d_m} = 0,9$.

Przyjmując zatem $\frac{h}{d_m} = 0,9$, względna wysokość wytłoczki jest równa: $h = 9,9$ mm można przypuszczać, że pozwoli to na uzyskanie poprawnego złącza.

Przeprowadzona wrywkowa weryfikacja doświadczalna procesu pozwoliła przyjąć zaproponowane wielkości geometryczne narzędzi do praktycznego przeprowadzenia prób.

3.3. Określenie siły prasowania i kształtu narzędzi

Przy łączeniu blach przez miejscowe prasowanie, utrudnione jest określenie teoretycznej siły nacisku stempla przy zastosowaniu znanych zależności [71, 77]. Wynika to z faktu, że proces prasowania (tłoczenia) przebiega w kilku fazach w których siła stopniowo wzrasta, od siły minimalnej w początkowej fazie tłoczenia aż do maksymalnej w końcowej fazie, którą można w pewnym stopniu porównać z procesem prasowania przez wyciskanie. Maksymalna siła występuje w końcowej fazie wykonywania złącza wówczas, gdy płynący materiał całkowicie wypełnia pierścieniowe wgłębienie w matrycy i tworzy tzw. zamek. Określając siłę nacisku stempla posłużono się obliczeniami stosowanymi w procesie kucia matrycowego [27, 69]. Związane jest to z tym, iż podczas kucia matrycowego materiał wypełnia w pełni matrycę, często o bardzo skomplikowanych kształtach. Zważywszy jednak na fakt, że maksymalna siła prasowania jest głównie związana z fazą wyciskania, siłę tę można określić jedynie wstępnie ze wzoru Schneidera [69], który ma postać:

$$F = k \frac{\pi d^2}{4} R_{mt}$$

gdzie:

- k – współczynnik w zależny od stosunku $\frac{d}{s}$ ($k \approx 4$) [69],
- d – średnica stempla, wielkości dla podstawowych operacji kucia
- s – grubość ścianki wyciskanego elementu,
- $R_{mt} = R_m$ – wytrzymałość na rozciąganie.

Stosując tą zależność przykładowo dla stali St3 przy średnicy stempla $d_s = 8$ mm otrzymujemy niezbędną siłę nacisku na łączony element: $F = 138,662$ kN

Siłę nacisku w końcowej fazie można również obliczyć w sposób przybliżony:

$$P = p_{sr} \cdot F \quad (3.5)$$

$$p_{sr} = (4 \div 5) T_p$$

gdzie:

T_p – napężenie uplastyczniające odkształconego materiału przyjęto
 $T_p = R_m$ [MPa],

F – pole rzutu powierzchni podziału złącza na płaszczyznę prostopadłą do kierunku kucia, [mm²].

Dla dalszych obliczeń przyjęto: $p_{sr} = 4T_p$

Stosując powyższy tok obliczeń wyznaczono maksymalne siły nacisku stempla dla poszczególnych grubości łączonych elementów i różnych gatunków blach. Wyniki przyjętych sił zestawiono w tabeli 3.7.

Określone wartości maksymalnej siły nacisku na stempel

Tabela 3.7

Gatunek stali	Siła nacisku [kN]		
	Grubość łączonych elementów / średnica złącza		
	3/11	3,5/13	4,3/16
St3	151,9	218,8	321,5
08X	112,0	161,3	237,1
10X	119,6	172,3	253,2
10J	127,0	177,7	269,2

Analizując otrzymane wyniki określające wartości sił nacisku można zauważyć, iż na wielkość siły F mają wpływ takie czynniki, jak średnica złącza oraz wytrzymałość danego gatunku stali na rozciąganie. Wynika więc z tego, że wraz ze zwiększeniem wymiarów części roboczej narzędzi zachodzi konieczność użycia większych sił nacisku stempla. Można zatem wysunąć oczywiste stwierdzenie, iż dla materiałów o większej grubości, gdzie stosuje się większe średnice złącza należy stosować większe siły nacisku. Stosując natomiast materiały o mniejszej granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m można stosować mniejsze siły nacisku na stempel.

Z tym problemem wiąże się dobór odpowiedniego materiału na narzędzia (rozdział 3.1). Biorąc pod uwagę głównie własności wytrzymałościowe przyjęto materiał zgodnie z zaleceniem według PN-89/M-66290, w postaci stali węglowej, narzędziowej N9E według PN-EN ISO 4957:2004.

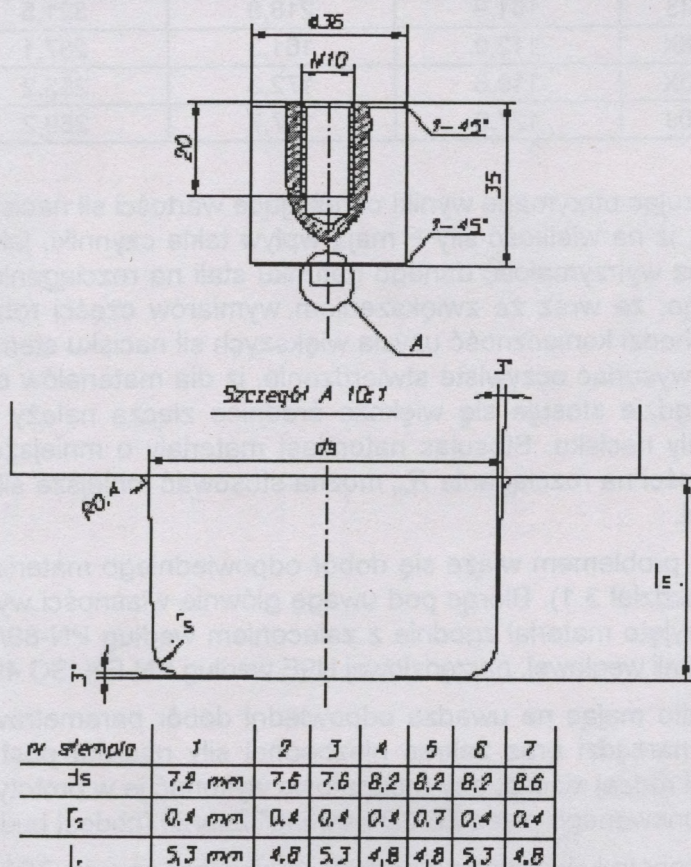
Ponadto mając na uwadze odpowiedni dobór parametrów geometrycznych narzędzi oraz zakres niezbędnej siły nacisku postanowiono dobrać taki rodzaj złącza, aby można było wykonać je w prototypie wyrobu zaproponowanego przez ZBMD „Komag” Zabrze (podest budowlany).

Przy konstrukcji prototypu podestu budowlanego typu ZBMD do połączenia części składowych przyjęto wstępnie złącze o parametrach

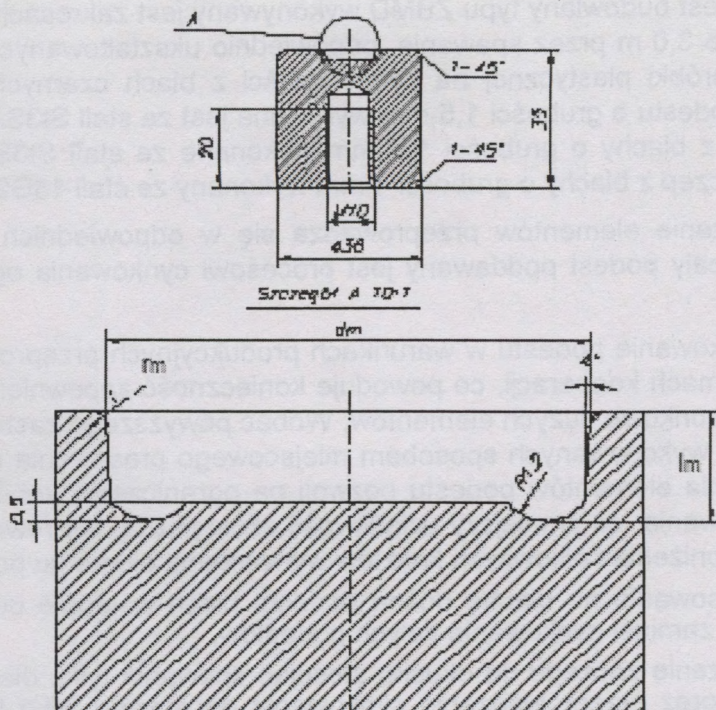
geometrycznych takich, które przypuszczalnie zapewnią największą wytrzymałość dla blach o łącznej grubości wynoszącej 3,5 mm, a jednocześnie będzie ono możliwe do wykonania w określonych miejscach łączenia okucia z blachą nośną podestu.

Z tych względów przyjęto złącze o średnicy 12 mm kształtowane przez zaprojektowane narzędzia w postaci stempla i matrycy o konstrukcji pokazanej na rysunkach 3.4 i 3.5, według różnych wariantów wymiarowych dla części roboczych stempla i matrycy, które zostały określone na podstawie przyjętych wskaźników ujętych w tabeli 3.3, a także ogólnych wytycznych zawartych w rozdziale 2, oraz we wstępnych badaniach sprawdzających.

Na podstawie przedstawionych na rysunkach 3.4 i 3.5 kształtów i ich głównych wielkości zostaną ustalone drogą doświadczalną najkorzystniejsze parametry geometryczne narzędzi, które wykorzystano do wykonania połączeń w przyjętym prototypie podestu budowlanego.



Rys.3.4. Kształt i warianty wymiarowe stempli przyjętych do badań



Rys.3.5. Kształt i warianty wymiarowe matrycy przyjętych do badań

Do wykonania połączeń w prototypie podestu zaprojektowano i wykonano dwa uniwersalne, proste oprzyrządowania w postaci odpowiednich podpór-matryc mocowanych bezpośrednio na prasie warsztatowej hydraulicznej. Pierwsza podpora o wysokości 340 mm i odpowiednim wysięgu 40 mm służyła do wykonania połączeń na bokach blachy nośnej podestu z okuciem, natomiast druga podpora o wysokości 50 mm służyła do wykonania połączeń okucia z górnymi powierzchniami blachy nośnej (rys. 3.6). Podczas badań zastosowano smarowanie w postaci oleju mineralnego, a oprzyrządowanie do prasowania (stempel-matryca) umieszczono w uniwersalnych oprawach prowadzących będących na wyposażeniu prasy.

3.4. Wybór elementu konstrukcyjnego do wykonania w nim połączeń prasowanych

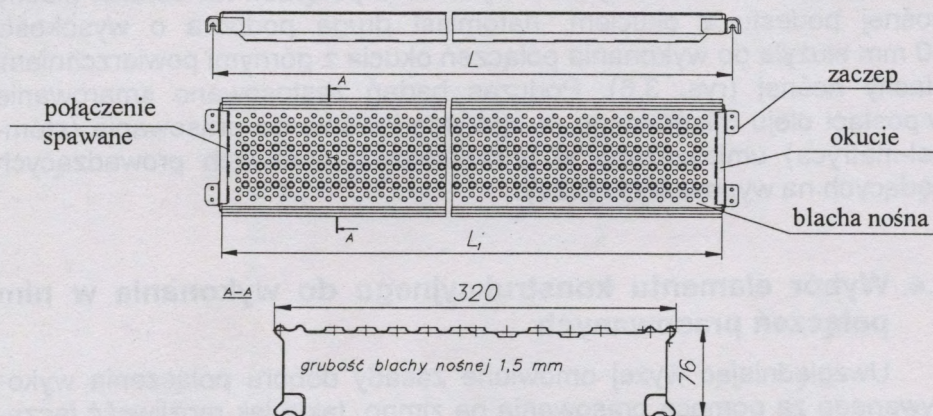
Uwzględniając wyżej omówione zasady doboru połączenia wykonywanego za pomocą prasowania na zimno, takie jak możliwość łączenia blach z powłokami i prosty jednozabiegowy sposób wykonania kilku złącz jednocześnie oraz kierując się możliwością wykonania określonego przedmiotu i wdrożenia go w praktycznym zastosowaniu, do prób przyjęto podest rusztowania budowlanego typu ZBMD (rys. 3.6).

Podest budowlany typu ZBMD wykonywany jest w zakresach długości od 0,7 do 3,0 m przez spawanie, odpowiednio ukształtowanych na drodze przeróbki plastycznej na zimno części z blach czarnych. Blacha nośna podestu o grubości 1,5 mm wykonana jest ze stali St3SA1, okucie podestu z blachy o grubości 1,5 mm wykonane ze stali St3SA1, natomiast zaczep z blachy o grubości 4 mm wykonany ze stali 18G2A.

Łączenie elementów przeprowadza się w odpowiednich przyrządach, a cały podest poddawany jest procesowi cynkowania ogniowego [56].

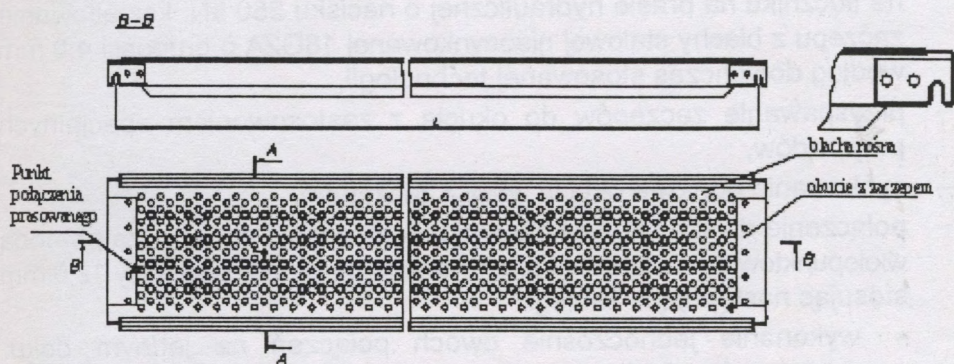
Cynkowanie podestu w warunkach produkcyjnych przeprowadzane jest w ramach kooperacji, co powoduje konieczność zapewnienia transportu stosunkowo dużych elementów. Wobec powyższego zastosowanie połączeń wykonywanych sposobem miejscowego prasowania na zimno do łączenia elementów podestu pozwoli na ograniczenie zabiegów nie tylko spawania, co zmniejszy uciążliwość ekologiczną, jak również pozwoli na obniżenie całkowitych kosztów wytwarzania elementu poprzez:

- zastosowanie na blachę nośną podestu blach wstępnie ocynkowanych, zamiast cynkowania całych podestów,
- połączenie zaczepu do okucia, stosując spawanie tylko dla tej operacji, oraz przeprowadzenie cynkowania ogniowego tylko tego elementu, który jest znacznie mniejszy od całego podestu,
- znaczne obniżenie kosztów transportu międzyoperacyjnego (do cynkowania), a jedynie transportu okuć o znacznie mniejszej masie,
- zastąpienie technologii spawania okucia z pokryciem, tańszym połączeniem za pomocą łączenia wielopunktowym złączem prasowanym na zimno.



Rys.3.6. Podest rusztowania budowlanego typu ZBMD według dotychczasowej konstrukcji

Do wykonania podestów budowlanych według proponowanej nowej technologii i zmienionej konstrukcji (rys. 3.7) wybrano złącze prasowane na zimno o średnicy 12,0 mm. Wybór ten został podyktowany przeprowadzeniem analizy warunków obciążenia podestów, ich wymaganiami wytrzymałościowymi, kształtem i zakresem ich rozpiętości oraz technologicznością wykonania połączeń. Jak już wspomniano, parametry geometryczne złączy i narzędzi do jego wykonania oraz dobór siły kształtowania ustalono wstępnie na podstawie dostępnych danych literaturowych [35-38, 65, 66] oraz przeprowadzonych wyrywkowych, wstępnych badań własnych.



Rys.3.7. Podest rusztowania budowlanego typu ZBMD według nowej konstrukcji

Dla opracowania nowej technologii wykonania podestu budowlanego z zastosowaniem złączy prasowanych na zimno niezbędne było rozpatrzenie następujących problemów:

- przyjęcie rodzaju i wielkości złącza umożliwiającego połączenie elementów z blach ocynkowanych bez naruszenia ich powłoki, zapewniające wytrzymałość i stateczność całej konstrukcji,
- opracowanie konstrukcji złącza i narzędzi do jego wykonania, pod względem cech geometrycznych, zapewniających odpowiednią wytrzymałość złączy, przy kształtowaniu ich przez dobór różnych parametrów,
- opracowanie takiej konstrukcji podestu, która zapewni określone własności wytrzymałościowe i eksploatacyjne zarówno złącz przy różnych obciążeniach, jak i całej konstrukcji. Należy również przy tym uwzględnić to, że złącza powinny być usytuowane wklęsłością od strony grubszej blachy,
- zaprojektowanie oprzyrządowania do wykonania podestów z zastosowaniem połączeń prasowanych na zimno oraz wyznaczenie sił i obciążeń wynikających z wymagań stawianych tego rodzaju urządzeniom.

Modernizacja wykonania podestu budowlanego (wersja przejściowa) z zastosowaniem złączy prasowanych na zimno oraz spawania wymagała przeprowadzenia następujących operacji i zabiegów technologicznych:

- blacha nośna podestu według dotychczasowej konstrukcji i technologii wykonania (blacha stalowa nieocynkowana) została zmieniona na blachę ocynkowaną [85] o grubości 1,5 mm,
- kształtowanie okucia (rys. 3.7) z blachy nieocynkowanej St3SA1 o grubości 2,0 mm według następujących zabiegów: wykrawanie wykrojnikiem na prasie mimośrodowej o nacisku 630 kN, wyginanie na tłoczniku na prasie hydraulicznej o nacisku 250 kN, kształtowanie zaczepu z blachy stalowej nieocynkowanej 18G2A o grubości 4,0 mm według dotychczas stosowanej technologii,
- przyspawanie zaczepów do okucia z zastosowaniem specjalnych przyrządów,
- cynkowanie ogniowe okucia wraz z zaczepem,
- połączenie dwóch okuć z końcami blachy nośnej podestu za pomocą wielopunktowego połączenia prasowanego na zimno o średnicy 12,0 mm stosując następujące zabiegi:
 - wykonanie jednocześnie dwóch połączeń na jednym boku, a następnie na drugim po przeciwnej stronie podestu w specjalnym przyrządzie ustalającym położenie łączonych elementów z zabudowanymi narzędziami w postaci stempli i matryc na prasie warsztatowej hydraulicznej o nastawialnym nacisku,
 - wykonanie jednocześnie dwóch połączeń na pozostałych bokach w specjalnym przyrządzie (zwierciadlane odbicie),
 - wykonanie jednocześnie czterech połączeń na górnej powierzchni na dwóch końcach blachy nośnej (poszycia). Zabiegi przeprowadzono w specjalnym przyrządzie z czterema narzędziami do wykonania złączy na prasie warsztatowej o nastawialnej wartości nacisku,
 - kontrola wykonania połączeń.

W wersji przyszłościowej zrezygnowano całkowicie z procesu spawania i wykonywano wszystkie elementy z blachy ocynkowanej i łączono je prasowaniem na zimno.

W ramach badań wykonano osiem prototypowych podestów według przedstawionej konstrukcji, stosując proces technologiczny z zastosowaniem prostych przyrządów. Takie podejście było podyktowane tym, że wykonane prototypy po przeprowadzeniu prób stanowiskowych muszą uzyskać odpowiedni atest IMBiGS. Dopiero po uzyskaniu atestu i ewen-

tualnych korektach w dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej można zaprojektować i wykonać oprzyrządowanie produkcyjne. Proces technologiczny wykonania podestu zastosowany w niniejszej pracy obejmował:

- wykonanie poszycia podestu (blacha nośna) według technologii docelowej (rys. 3.6),
- wykonanie okucia podestu z blachy nieocynkowanej o grubości 1,5 mm, stosując ręczne wycinanie i wyginanie okucia na prasie krańdziowej (rys. 3.6 i 3.7),
- wykonanie zaczepu według dotychczasowej technologii (rys. 3.7),
- przyspawanie zaczepów do okucia,
- połączenie dwóch okuć z poszyciem za pomocą wielopunktowego połączenia o średnicy 12,0 mm. Połączenia wykonywano pojedynczo przyrządami z użyciem narzędzi uniwersalnych w postaci stempla i matrycy, opisanych w rozdziale 3, zamocowanych na prasie warsztatowej hydraulicznej o nastawionym nacisku 80 kN.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia wykonano serię badań, które wykazały, że zostały uzyskane wymagane właściwości eksploatacyjne, a także zachowana została warstwa wierzchnia z powłoką ochronną.

4. Badania zasadnicze

Połączenia wykonane były na prasie hydraulicznej o maksymalnym nacisku dochodzącym do 250 kN, z zastosowaniem siedmiu stempli i dwóch matryc o wymiarach podanych na rysunkach 3.4 i 3.5, na blachach gatunku St3SAI surowo-czarnych i 10 J ocynkowanych o grubościach $1,5 \pm 0,2$ mm, pociętych na prostokąty o wymiarach 30 x 110 mm, łączonych na zakładkę. W trakcie wykonywania połączeń zarejestrowano parametry występujących sił, a następnie określono wielkości geometryczne połączeń. W ten sposób wykonane połączenia-próbki ze złączem pojedynczym i podwójnym poddano badaniom wytrzymałościowym (próbom na ścinanie i rozciąganie).

Przyjęto następujący sposób oznaczenia próbek: X – nr matrycy, Y – nr stempla, Z – grubość łączonych blach i zastosowany rodzaj powłoki ochronnej według oznaczeń ujętych w tabeli 4.1.

Przykładowe oznaczenia wykonanych połączeń oraz sposoby ich kształtowania

Tabela 4.1

Ozn. pr. X-Y.Z	Numer matrycy	Numer stempla	Rodzaj próbki	Grubość blach od str. stempla [mm]	Grubość blach od str. matrycy [mm]	Gatunek blach	Uwagi dotyczące procesu kształt.
11-2.1	11	2	1	1,5	1,5	St3SAI	próbki pozostawały na stemplu
11-4.1	11	4	1	1,5	1,5	St3SAI	próbki pozostawały w matrycy
11-5.1	11	5	1	1,5	1,5	St3SAI	próbki pozostawały w matrycy i trudno było je wyjąć
11-7.1	11	7	1	1,5	1,5	St3SAI	próbki pozostawały w matrycy, wyginały się (ugięcie 3mm)
12-3.1	12	3	1	1,5	1,5	St3SAI	próbki pozostawały na stemplu
12-6.1	12	6	1	1,5	1,5	St3SAI	próbki pozostawały na stemplu
11-2.4	11	2	4	1,5	1,5	10J	próbki zaciskały się na stemplu
11-4.4	11	4	4	1,5	1,5	10J	próbki pozostawały w matrycy
11-5.4	11	5	4	1,5	1,5	10J	próbki pozostawały w matrycy
11-7.4	11	7	4	1,5	1,5	10J	próbki pozostawały w matrycy lub na stemplu, wyginały się (ugięcie 3mm)
12-3.4	12	3	4	1,5	1,5	10J	próbki pozostawały na stemplu
12-6.4	12	6	4	1,5	1,5	10J	próbki pozostawały na stemplu
11-2.2	11	2	2	1,5	2	St3SAI	próbki pozostawały na stemplu
11-4.2	11	4	2	1,5	2	St3SAI	próbki pozostawały mocno osadzone w matrycy, wyginały się (ugięcie 3 mm)

Przyjęto następujące oznaczenia:

- 1 - blachy o grubości $g_1 = g_2 = 1,5$ mm surowo-czarne,
- 2 - od strony stempla blacha o grubości $g_1 = 1,5$ mm, a od strony matrycy $g_2 = 2$ mm; obydwie surowo-czarne,
- 3 - od strony stempla blacha o grubości $g_1 = 2$ mm, a od strony matrycy $g_2 = 1,5$ mm; blachy surowo-czarne,
- 4 - blachy o grubości $g_1 = g_2 = 1,5$ mm ocynkowane,
- 5 - od strony stempla blacha o grubości $g_1 = 1,5$ mm, a od strony matrycy $g_2 = 2$ mm; blachy ocynkowane,
- 6 - od strony stempla blacha o grubości $g_1 = 2$ mm, a od strony matrycy $g_2 = 1,5$ mm; blachy ocynkowane.

Wykonano po 5 powtórzeń i po odrzuceniu skrajnych wartości wybrano po 3 powtórzenia dla różnych skojarzeń, wytłoczeń o średnicy 12,0 mm w blachach według układu przedstawionego w tabeli 4.1.

4.1. Siła prasowania

Maksymalna siła określona w badaniach wstępnych podczas procesu kształtowania połączeń o średnicy 12,0 mm wynosiła około 80 kN. Przykładowe przebiegi siły kształtowania w funkcji drogi stempla przy wykonywaniu złączy pokazano na wykresach – rysunki 4.1 i 4.2; tabela 4.2. Na przebiegach siły można wyraźnie wyróżnić 3 fazy procesu kształtowania złącza (zaznaczone na wykresach):

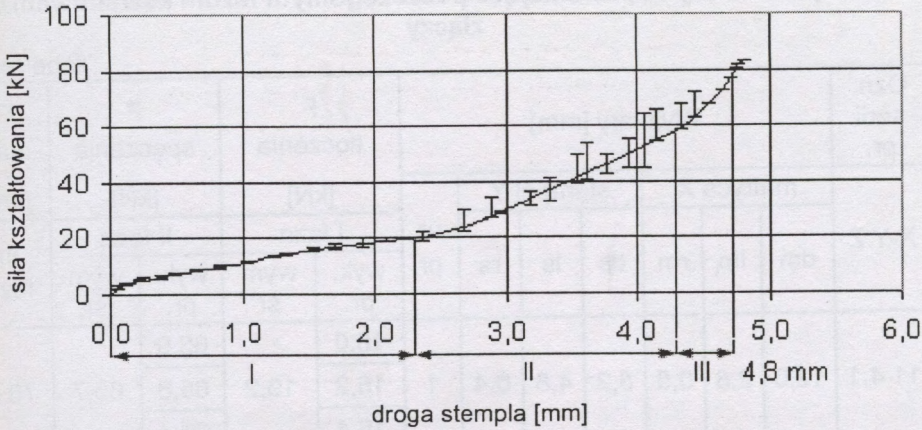
- I. fazę trwającą od momentu zetknięcia się stempla z górną blachą do chwili zetknięcia się dolnej blachy z dnem matrycy (kształtowanie zagłębienia) – faza przypominająca swym charakterem proces tłoczenia,
- II. fazę, w której materiał jest ściskany między stemplem, a dnem matrycy i zaczyna płynąć w kierunku promieniowym (na boki). Wypełnia on wykrój matrycy kosztem pocienienia blach, co wywołuje intensywny wzrost siły kształtowania – podobnie jak w procesie spęczania,
- III. fazę zapewniającą ostateczne ukształtowanie złącza, a zwłaszcza fragmentu profilu powodującego jego nierozłączność (tzw. „zamek”). W okresie tym następuje wzrost siły aż do momentu osiągnięcia maksymalnej wartości.

W tabeli 4.3 zamieszczono odczytane z wykresów uśrednione, maksymalne siły odpowiadające poszczególnym fazom kształtowania złącza dla różnych skojarzeń narzędzi i różnych blach.

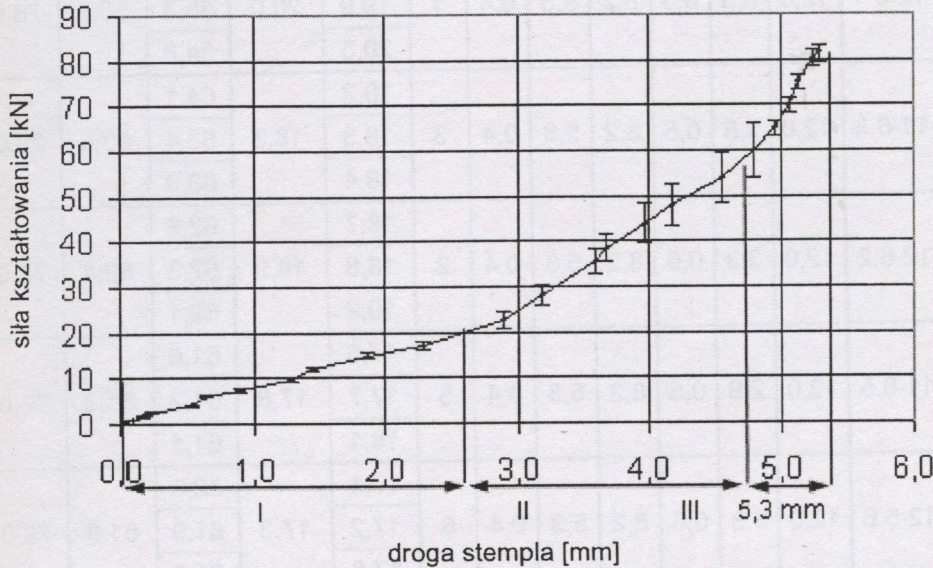
Wyniki pomiarów przebiegu sił funkcji drogi stempla dla próbki 11.5.1

Tabela 4.2

Droga [mm]	Siła [kN]		
	Wartość średnia	Aproksymacja	
		dodatnia	ujemna
0,00	0	0	0
0,04	2	0	1,2
0,10	3,5	0,2	1
0,21	4,8	0,2	0,7
0,24	5,2	0,2	0,8
0,37	6	0,2	0,7
0,47	6,9	0,1	1,1
0,64	8,5	0,2	0,6
0,82	9,5	0,1	1
1,03	11,5	0	0,5
1,24	13,9	0,7	0,1
1,34	14,2	0,4	0,3
1,55	16	0,4	0,5
1,71	17	1	1,5
1,92	18	1	2,4
2,10	18,8	0,2	1,2
2,37	20,5	1,5	2
2,68	24	1,4	6
2,88	27,6	0,1	6,4
2,97	29,1	0,1	0,4
3,19	33,8	2,2	2,7
3,34	37	4	4
3,54	41,5	2	8,4
3,63	43,7	2,8	9,9
3,77	46,5	3,5	3,5
3,93	50	5	5
4,06	52,5	7,5	11,5
4,14	54,5	0,5	11,5
4,33	59	0,45	9
4,43	63	0,44	9



Rys.4.1. Przykładowy przebieg siły kształtowania złącza w funkcji drogi stempla dla próbki 11-5.1 (I, II, III – fazy kształtowania złącza)



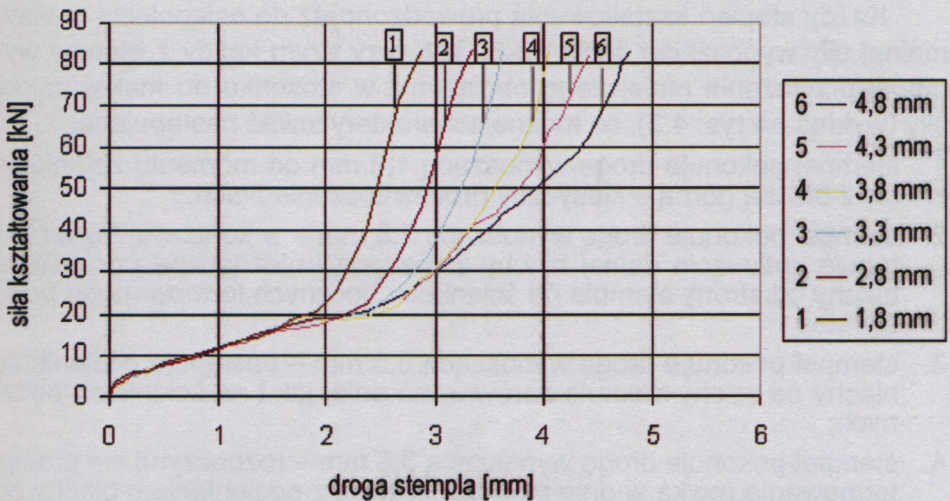
Rys.4.2. Przykładowy przebieg siły kształtowania złącza w funkcji drogi stempla dla próbki 12-6.1 (I, II, III – fazy kształtowania złącza)

Maksymalne siły odpowiadające poszczególnym fazom kształtowania złączy

Tabela 4.3

Ozn. serii pr.	Wymiary [mm]							F tłoczenia		F spęczania		F max
X-Y.Z	matryca X			stempel Y			nr pr	[kN]		[kN]		[kN]
	dm	lm	rm	ds	ls	rs		I faza		II faza		
								wyk. pr.	wym śr	wyk. pr.	wym śr	III faza
11-4.1	12,0	2,8	0,5	8,2	4,8	0,4	1	16,0	16,2	65,9	65,7	78,0
								16,2		65,8		
								16,4		65,4		
11-5.1	12,0	2,8	0,5	8,2	4,8	0,7	1	16,1	16,4	63,6	63,4	78,0
								16,5		63,5		
								16,6		63,1		
12-6.1	12,0	3,3	0,5	8,2	5,3	0,4	1	19,6	20,0	55,5	55,2	78,0
								19,9		55,3		
								20,5		54,8		
11-6.3	12,0	2,8	0,5	8,2	5,3	0,4	3	18,2	18,3	64,1	63,5	78,0
								18,3		63,4		
								18,4		63,0		
12-6.2	12,0	3,3	0,5	8,2	5,3	0,4	2	18,7	18,9	62,8	62,4	78,0
								18,8		62,3		
								19,2		62,1		
11-6.5	12,0	2,8	0,5	8,2	5,3	0,4	5	17,6	17,8	61,6	61,3	78,0
								17,7		61,2		
								18,1		61,1		
12-6.6	12,0	3,3	0,5	8,2	5,3	0,4	6	17,1	17,3	62,0	61,8	78,0
								17,2		61,9		
								17,6		61,5		

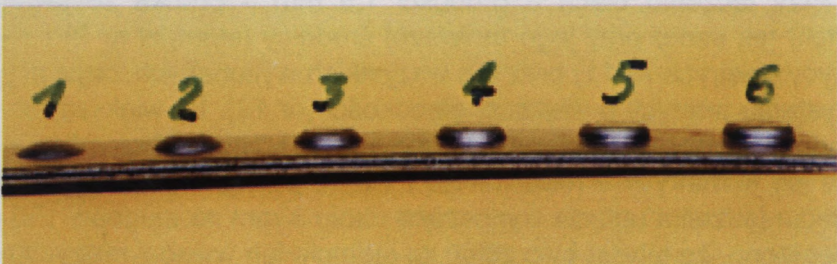
W celu prześledzenia przebiegu i dokładnej analizy procesu łączenia przeprowadzono również kształtowanie i modelowanie poszczególnych etapów złączy w kilku stopniach, zagłębiając stopniowo stempel w matrycę (używano podkładek dystansowych). Na tej podstawie sporządzono wykresy przebiegu siły kształtowania w funkcji drogi stempla, który przedstawiono przykładowo na rysunku 4.3 dla próbki 11-5.1.



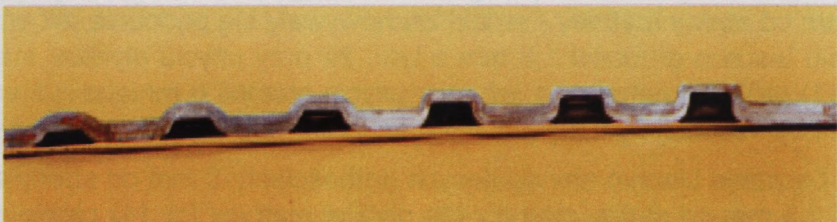
Rys.4.3. Przebieg siły kształtowania w funkcji drogi stempla w poszczególnych etapach (1-6 model z wkładkami) dla próbki 11-5.1

Wymiary podane obok wykresów oznaczają wielkość zagłębienia się stempla w materiał – punkty 1-6 oznaczają koniec danego stopnia kształtowania.

Na rysunkach 4.4 i 4.5 przedstawiono obrazy poszczególnych etapów kształtowania złącza w odniesieniu do przebiegu sił w funkcji drogi stempla.



Rys.4.4. Próbką 11-5.1 w poszczególnych etapach od 1- 6 kształtowania złącza (widok ogólny)



Rys.4.5. Przekroje poprzeczne próbki 11-5.1 w poszczególnych etapach kształtowania złącza (etapy 1 do 6 według oznaczeń na rys. 4.4)

Każdy stopień kształtowania prowadzono aż do osiągnięcia maksymalnej siły wynoszącej około 78-80 kN, przy czym każdy z etapów wymagał przyłożenia mniejszego obciążenia w stosunku do maksymalnej siły (wykres na rys. 4.3), co można scharakteryzować następująco:

1. stempel pokonuje drogę wynoszącą 1,8 mm od momentu zetknięcia się z blachą górną – klasyczny proces tłoczenia blach,
2. stempel pokonuje drogę wynoszącą 2,8 mm – w końcowej fazie następuje zetknięcie dolnej blachy z matrycą i nieznaczne pocienienie blachy od strony stempla na ściankach bocznych formowanego połączenia,
3. stempel pokonuje drogę wynoszącą 3,3 mm – następuje pocienienie blachy od strony stempla zarówno na dnie, jak i na ściankach bocznych,
4. stempel pokonuje drogę wynoszącą 3,8 mm – rozpoczyna się proces formowania rowka w dnie połączenia wraz z pocienieniem blachy od strony matrycy,
5. stempel pokonuje drogę wynoszącą 4,3 mm – rowek w dnie połączenia zostaje całkowicie uformowany,
6. materiał ze względu na wypełnienie rowka płynie tylko na boki, w wyniku czego powstaje tzw. „zamek” decydujący o jakości połączenia.

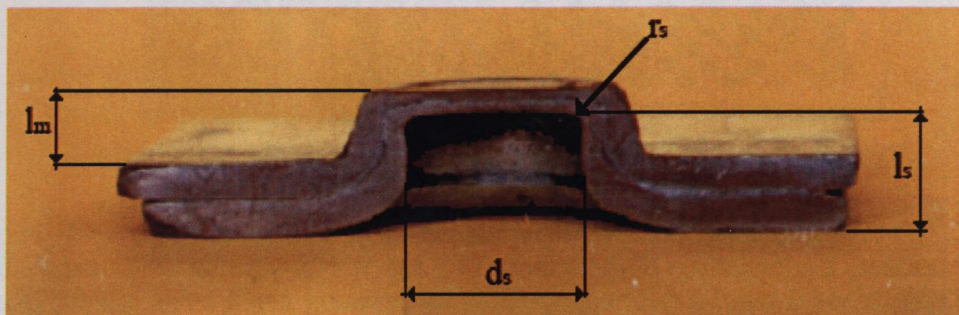
Zauważono, że po osiągnięciu pewnej wartości siły, przesuw stempla wynikał jedynie z nieokreślonych odkształceń sprężystych stołu prasy.

Przy łączeniu blach o grubości 1,5 mm – próbka zostawała na stemplu tak samo przy jego mniejszej średnicy (stempel nr 2) i płytszej matrycy (matryca nr 11) oraz dla wszystkich wykonanych złączy przy wykorzystaniu matrycy o większej głębokości (nr 12). Im większa średnica stempla (dotyczy współpracy z matrycą nr 11), tym próbka mocniej osadzała się w matrycy. Próbki 11-7.1 i 11-7.4 po wykonaniu złączy uległy wygięciu (strzałka ugięcia wynosząca około 3 mm na długości 160 mm). Stwierdzono, że łatwiej było zdjąć ze stempla lub wyjąć z matrycy próbki wykonane z blachy ocynkowanej.

Łączenie blach o różnych grubościach, tj. 1,5 mm od strony stempla i 2 mm od strony matrycy - próbki zachowywały się podobnie jak przy łączeniu blach o grubości 1,5 mm z tym, że przy użyciu płytszej matrycy (nr 11) próbki wyginały się już przy użyciu stempli o mniejszej średnicy (nr 4 i 5). Trudniej było zdjąć z narzędzi próbki z blachy ocynkowanej.

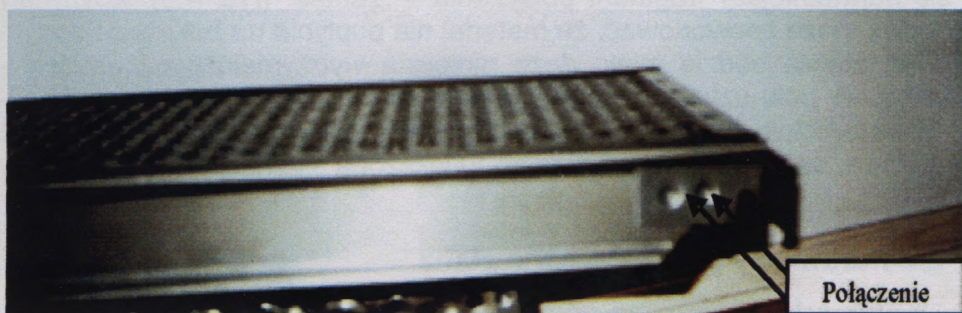
Łączenie blach o następujących grubościach: 2 mm od strony stempla i 1,5 mm od strony matrycy-dla płytkiej matrycy (nr 11) próbki z blachy surowo-czarnej pozostawały w matrycy, a z blachy ocynkowanej – na stemplu.

Na rysunku 4.6 zamieszczono przykładowy przekrój wykonanego złącza. Można na nim zaobserwować wpływ zmian poszczególnych parametrów narzędzi (d_s , r_s , l_s , l_m) na ukształtowanie złącza, co powinno znaleźć odzwierciedlenie w przeprowadzonych próbach wytrzymałościowych. Poza tym na wykonanych przekrojach można było zauważyć, że w przypadku blach pokrytych nie występowało ani ich odwarstwienie, ani zniekształcenie.

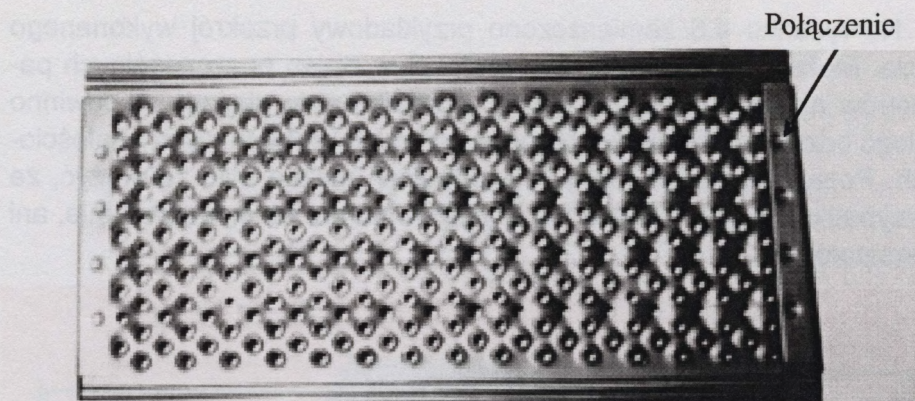


Rys.4.6. Przekrój poprzeczny próbki 11-2.4

Na tej podstawie należy ponadto przypuszczać, że głębokie przetłoczenie blach (rys. 4.6) może tworzyć węzeł konstrukcyjny o sztywności większej od blachy pojedynczej. Ponadto połączenie kształtowe może być stosowane do tworzenia węzłów konstrukcyjnych w których powinna być zapewniona odpowiednia szczelność. Z uwagi na zalety tego rodzaju połączenia postanowiono zastosować je do łączenia okuć i zaczepów z blachą nośną podestów budowlanych (rys. 4.7 i 4.8). Umożliwiło to wyeliminowanie szkodliwego dla zdrowia oraz środowiska procesu spawania i zastąpienia go ekologiczną technologią, a także wykonywanie wyżej wymienionych podestów bezpośrednio z blachy ocynkowanej.



Rys.4.7. Podest wykonany przy użyciu technologii połączeń kształtowych



Rys.4.8. Podest wykonany przy użyciu technologii połączeń kształtowych (widok z góry)

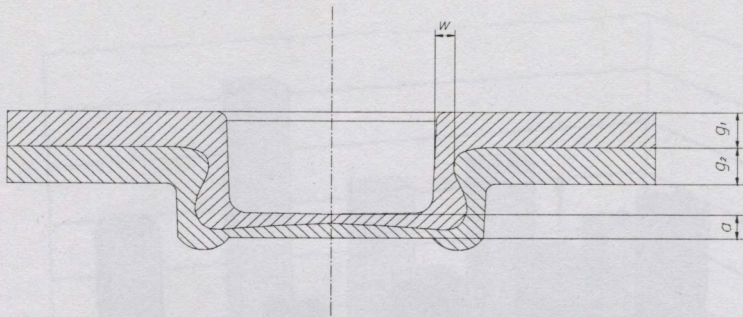
Wykorzystując oprzyrządowanie opisane w rozdziale 3.3, wykonano podesty budowlane o długościach 0,7 i 3,0 m. Na rysunku okucie zostało połączone z blachą nośną podestów za pomocą złącz kształtowych. Na rysunkach 4.7 i 4.8 pokazano już całkowicie zmienioną konstrukcję zaczepów i okucia, wykonanych w postaci jednego elementu łączonego następnie z blachą nośną za pomocą złącz kształtowych.

Wykonany prototyp podestu może stanowić podstawę do dalszych udoskonaleń konstrukcji, wykonania odpowiedniego oprzyrządowania, badań i ich atestacji, aż do wdrożenia tej technologii do produkcji z zastosowaniem blach ocynkowanych.

Warunkiem koniecznym wykonywania złącz z odpowiednim naciskiem jest jednak zastosowanie prasy wyposażonej we wskaźnik umożliwiający dokładny odczyt wartości siły, dający pewność, że złącze jest prawidłowo uformowane. Ważny jest zwłaszcza ostatni etap kształtowania złącza (rys. 4.4), gdzie dopiero w szóstym ostatnim etapie kształtuje się najważniejszy fragment połączenia – „zamek” (rys. 4.6). Zbyt mały docisk może spowodować, że materiał nie popłynie na boki, a co za tym idzie, złącze będzie miało dużo mniejszą wytrzymałość od przewidywanej. W celu uzyskania pewnego połączenia konstrukcja narzędzi powinna być tak opracowana, aby stempel i matryca miały powierzchnie czołowe, oporowe mogące przejąć zwiększoną siłę nacisku.

4.2. Parametry geometryczne złącz

Jak już wspomniano poprzednio dokonano pomiaru grubości dna złącza - wymiar „a” oraz minimalnej grubości blachy od strony stempla w ukształtowanym profilu – wymiar „w” rysunek 4.9. Pomiary zostały wykonane za pośrednictwem maszyny pomiarowej.



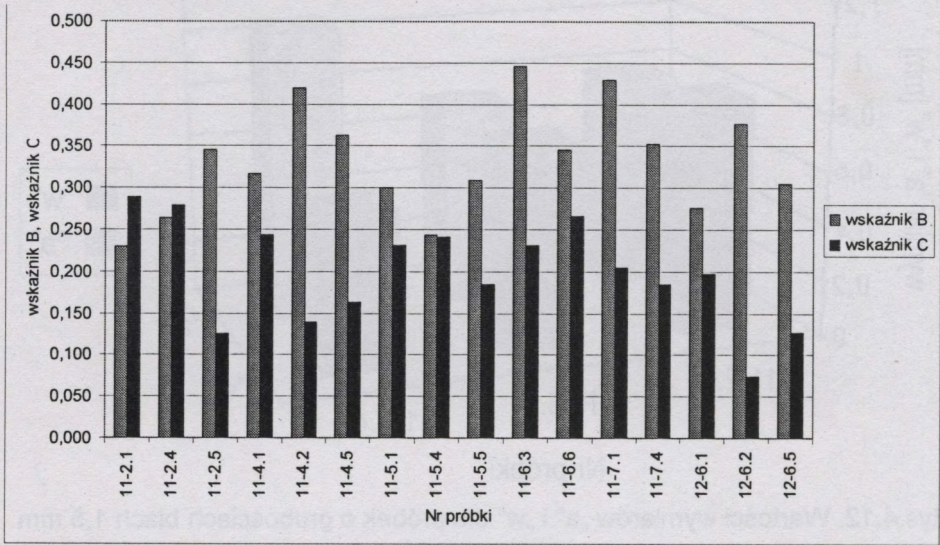
Rys.4.9. Parametry geometryczne złącza

Wyniki badań przedstawiono graficznie na rysunkach 4.10 do 4.14.

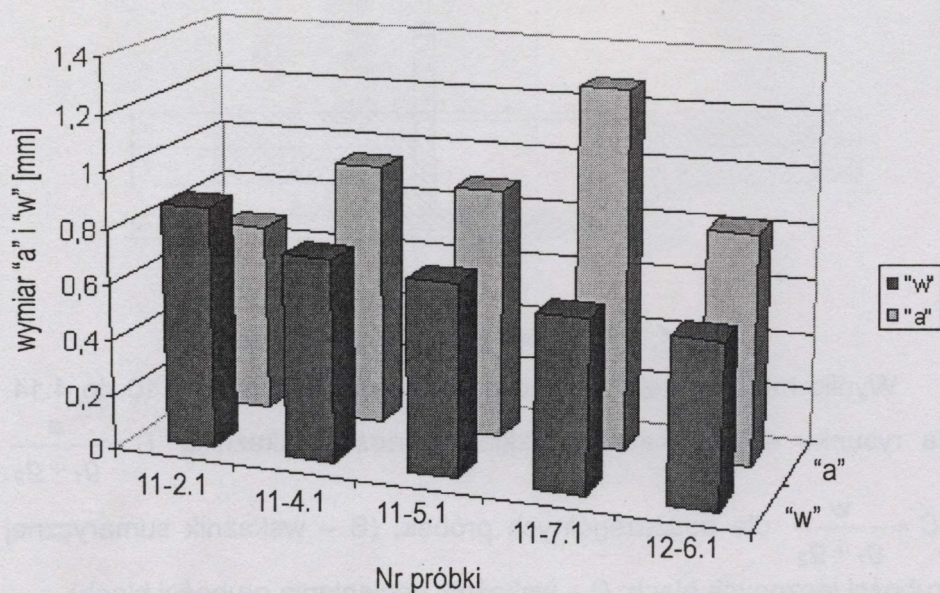
Na rysunku 4.10 pokazano rozkład wartości wskaźnika $B = \frac{a}{g_1 + g_2}$

i $C = \frac{w}{g_1 + g_2}$ dla poszczególnych próbek, (B – wskaźnik sumarycznej grubości łączonych blach; C – wskaźnik pocienienia grubości blach).

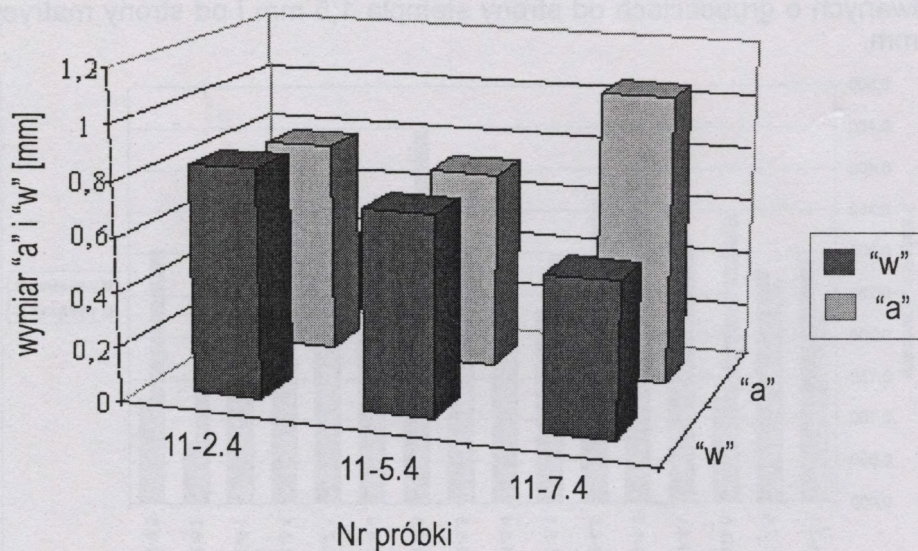
Z kolei na rysunkach 4.11 do 4.14 zaprezentowano rozkład wartości wymiarów „a” i „w” dla próbek o grubościach blach 1,5 mm odpowiednio surowo-czarnych i ocynkowanych oraz blach surowo-czarnych i ocynkowanych o grubościach od strony stempla 1,5 mm i od strony matrycy 2 mm.



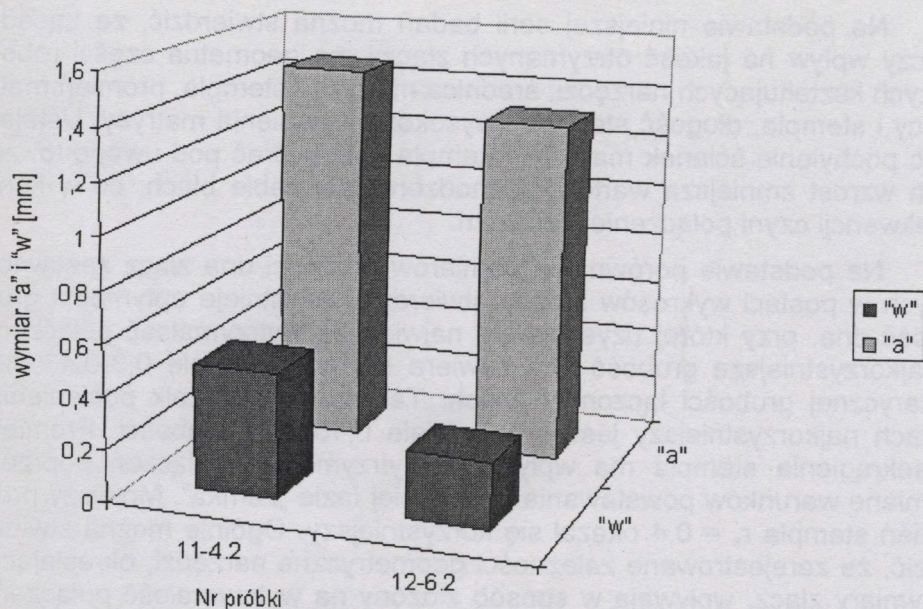
Rys.4.10. Wartości wskaźników $B = \frac{a}{g_1 + g_2}$ i $C = \frac{w}{g_1 + g_2}$ dla poszczególnych próbek złącza $\phi 12$ mm



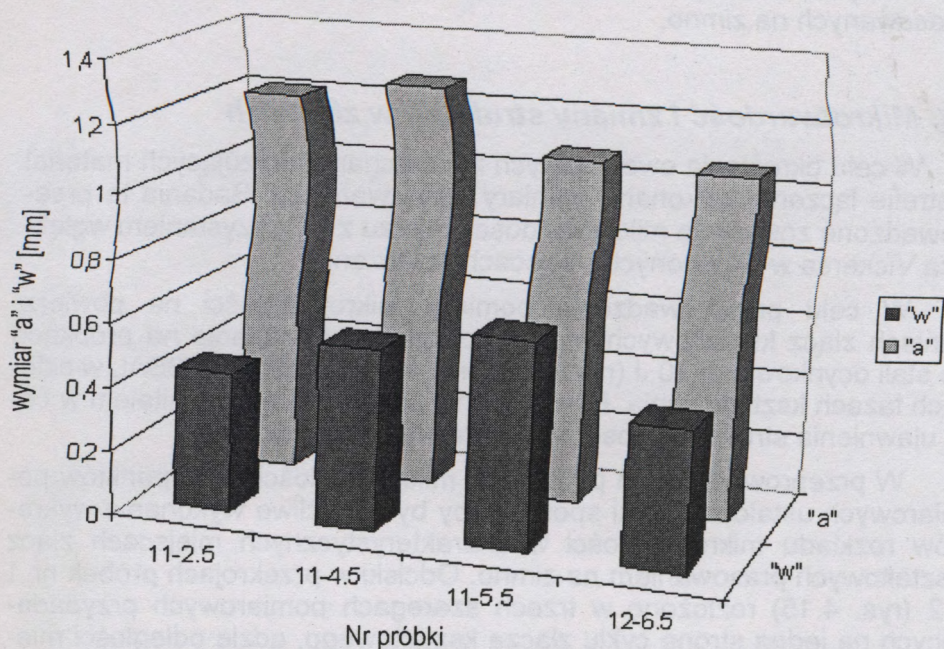
Rys.4.11. Wartości wymiarów „a” i „w” dla próbek o grubościach blach 1,5 mm surowo-czarnych



Rys.4.12. Wartości wymiarów „a” i „w” dla próbek o grubościach blach 1,5 mm ocynkowanych



Rys.4.13. Wartości wymiarów „a” i „w” dla próbek surowo-czarnych o grubościach blach: 1,5 mm od strony stempla i 2 mm od strony matrycy



Rys.4.14. Wartości wymiarów „a” i „w” dla próbek ocynkowanych o grubościach blach: 1,5 mm od strony stempla i 2 mm od strony matrycy

Na podstawie niniejszej serii badań można stwierdzić, że zasadniczy wpływ na jakość otrzymanych złączy ma geometria części roboczych kształtujących narzędzi: średnica matrycy i stempla, promień matrycy i stempla, długość stempla i wysokość wgłębienia matrycy. Ustalając pochylenie ścianek matrycy i stempla należy brać pod uwagę to, że ich wzrost zmniejsza wartość zachodzenia na siebie blach, co w konsekwencji czyni połączenie słabszym.

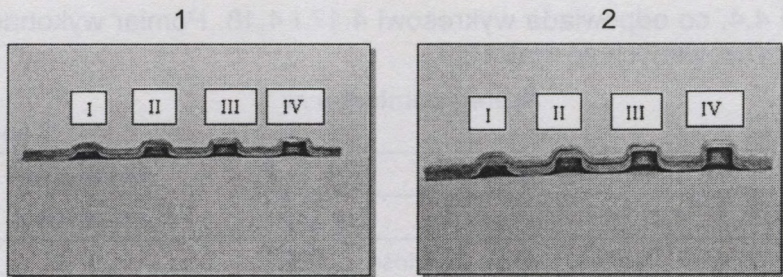
Na podstawie porównania pomiarów grubości dna złączy zestawionych w postaci wykresów można stwierdzić, że istnieje optymalna grubość dna, przy której uzyskuje się największą wytrzymałość połączeń. Najkorzystniejsza grubość dna zawiera się w przedziale 0,3-0,43 sumarycznej grubości łączonych blach. Tak samo wskaźnik pocienienia blach najkorzystniejszy jest w przedziale 0,15-0,25 grubości. Promień zaokrąglenia stempla ma wpływ na wytrzymałość połączeń poprzez zmianę warunków powstawania w ostatniej fazie „zamka”. Mniejszy promień stempla $r_s = 0,4$ okazał się korzystniejszy. Ogólnie można stwierdzić, że zarejestrowane zależności geometryczne narzędzi, określające wymiary złączy, wpływają w sposób złożony na wytrzymałość połączeń. W przyszłości należałoby określić ich optymalne wartości w sposób wskaźnikowy (względny). Uzyskano w badaniach wartości tych wskaźników dla złączy o największej wytrzymałości oraz parametry geometryczne narzędzi, z których można korzystać przy projektowaniu połączeń prasowanych na zimno.

4.3. Mikrotwardość i zmiany struktury w złączach

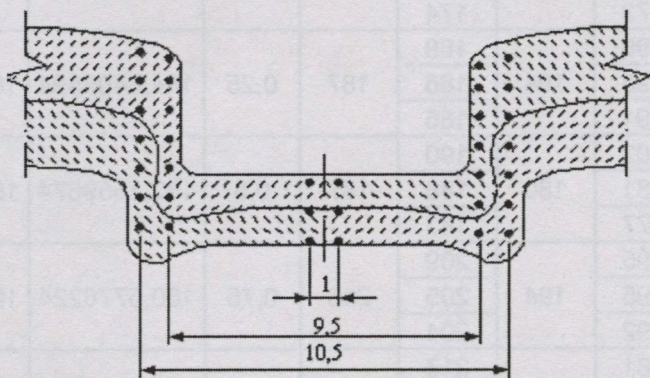
W celu określenia ewentualnych zmian charakteryzujących materiał w strefie łączenia wykonano pomiary mikrotwardości. Badania te przeprowadzone zostały na mikrotwardościomierzu z wykorzystaniem wgłębnika Vickersa w określonych miejscach połączenia.

W celu przeprowadzenia pomiaru mikrotwardości na powierzchniach złączy kształtowych wykonano zglądy prostopadłe na próbkach ze stali ocynkowanej 10 J (rys. 4.15) oraz surowo czarnej St3SAL w czterech fazach kształtowania. Powierzchnię zglądów trawiono nitaliem w celu ujawnienia struktury i obserwacji powłoki cynkowej.

W przeprowadzonych pomiarach mikrotwardości, ilość punktów pomiarowych ustalono w taki sposób, aby było możliwe wykonanie wykresów rozkładu mikrotwardości w charakterystycznych miejscach złączy kształtowych prasowaniem na zimno. Odciski w przekrojach próbek nr 1 i 2 (rys. 4.15) rozłożono w trzech szeregach pomiarowych przypadających na jedną stronę cyklu złącza kształtowego, gdzie odległości między odciskami tychże szeregów wynosiły 0,25 mm (rys. 4.16). Ten właśnie sposób rozkładu odcisków miał przedstawić zmianę mikrotwardości w najbardziej charakterystycznych miejscach połączenia.



Rys.4.15. Próbkę nr 1 (blachy ze stali ocynkowanej 10 J). Próbkę nr 2 (blachy z gatunku St3SAL surowo-czarne)



Rys.4.16. Umieszczenie odcisków do pomiaru mikrotwardości

Wartości mikrotwardości dla wszystkich punktów pomiarowych wyznaczono z zastosowaniem programu „Mikrotwardość” opracowanego w Instytucie TM. i AP., P. Cz. [73], który pozwala na szybki przegląd i edycję wyników uzyskanych przy stosunkowo małej ilości pomiarów. Dodanie nowego pomiaru polega na wprowadzeniu wyników pomiarów odczytanych w trakcie pomiaru z bębna mikrotwardościomierza. Wartości odczytane z bębna mikrotwardościomierza są określone w jednostkach ilości podziałki. Program przelicza ilość podziałek na wymiar odcisku zmierzonego. Dodanie nowego pomiaru jest realizowane poprzez wybranie opcji z menu głównego *Plik/Nowy pomiar*.

Otrzymane wyniki przedstawiono w zestawieniach tabelarycznych i wykresnych. Przykładowy jeden z cykli pomiarowych przedstawiono w tabeli 4.4 i na rysunkach 4.17, 4.18. Pozostałe wyniki dla II, III i IV cyklu rozpatrywano w taki sam sposób. W tabeli podano uśrednione wyniki z trzech powtórzeń pomiarów mikrotwardości.

Próbka nr 1

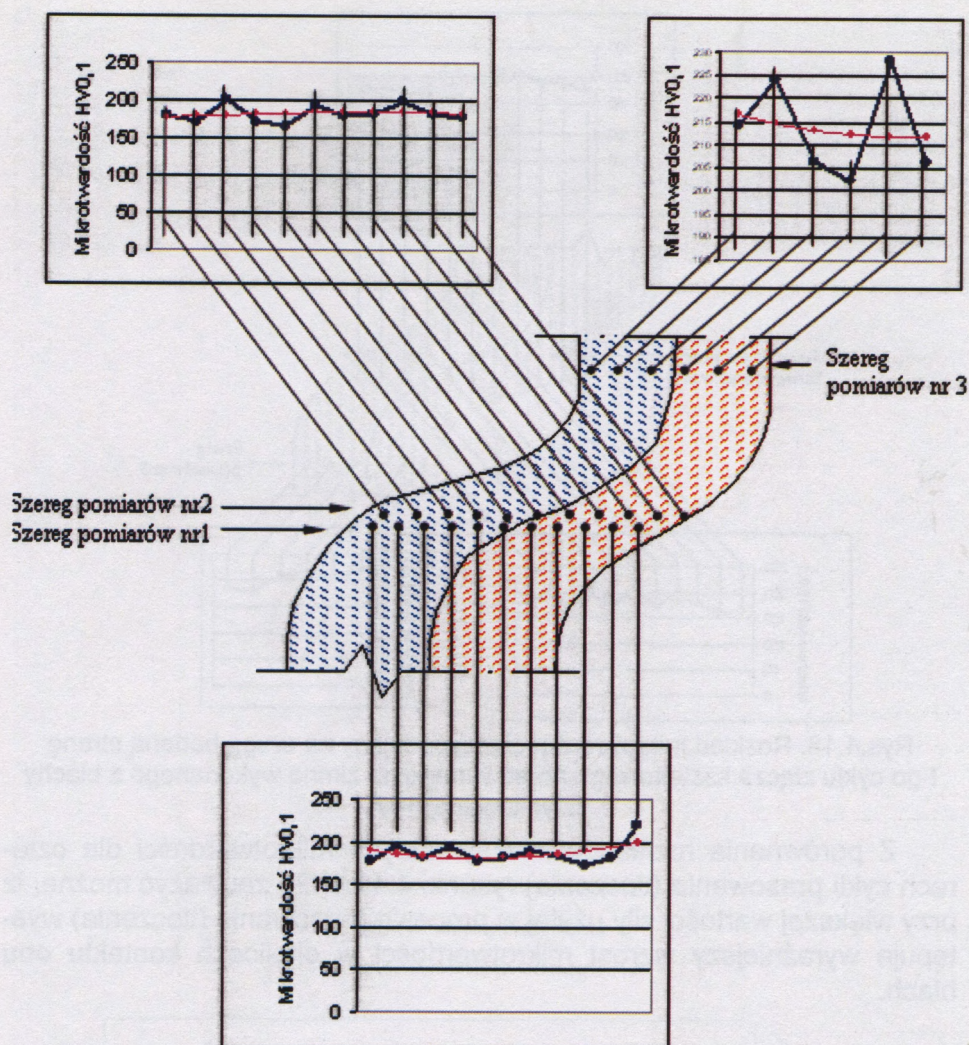
Zestawienie danych do wykonania wykresów mikrotwardości dla I-go cyklu złącza kształtkowego prasowanego na zimno przedstawiono

w tabeli 4.4, co odpowiada wykresowi 4.17 i 4.18. Pomiar wykonano dla blach ocynkowanych ze stali 10 J.

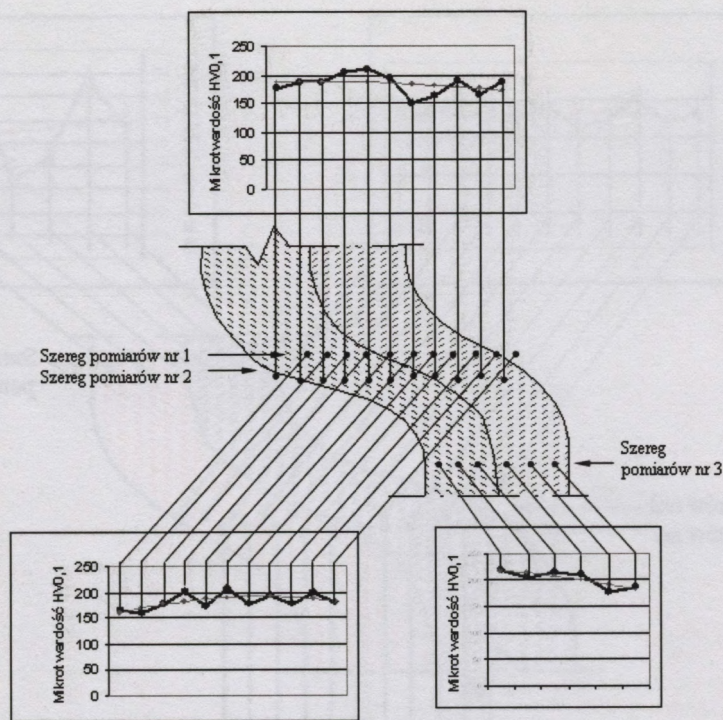
Szereg pomiarów nr 1

Tabela 4.4

Wartość głębokości	Średnia mikrotwardość				Apr. wartość głębokości	Apr. średnia mikrotwardość	
	Str 1		Str2			Str.1	Str.2
	wynik pom.	wartość śr.	wynik pom.	wartość śr.			
0	180	177	179	177	0	188,6013986	187,6713287
	178		178				
	173		174				
0,25	196	194	189	187	0,25	184,8405594	188,1958042
	195		186				
	191		186				
0,5	182	180	190	187	0,5	182,1659674	188,2703963
	181		188				
	177		183				
0,75	195	194	209	206	0,75	180,5776224	187,8951049
	195		205				
	192		204				
1	181	177	213	210	1	180,0755245	187,0699301
	176		209				
	174		208				
1,25	181	180	197	194	1,25	180,6596737	185,7948718
	181		196				
	178		189				
1,5	192	190	153	150	1,5	182,3300699	184,0699301
	191		152				
	187		145				
1,75	185	183	166	164	1,75	185,0867133	181,8951049
	182		165				
	182		161				
2	175	173	195	190	2	188,9296037	179,2703963
	174		189				
	170		186				
2,25	181	180	170	167	2,25	193,8587413	176,1958042
	180		168				
	179		163				
2,5	222	219	168	167	2,5	199,8741259	172,6713287
	218		167				
	217		164				

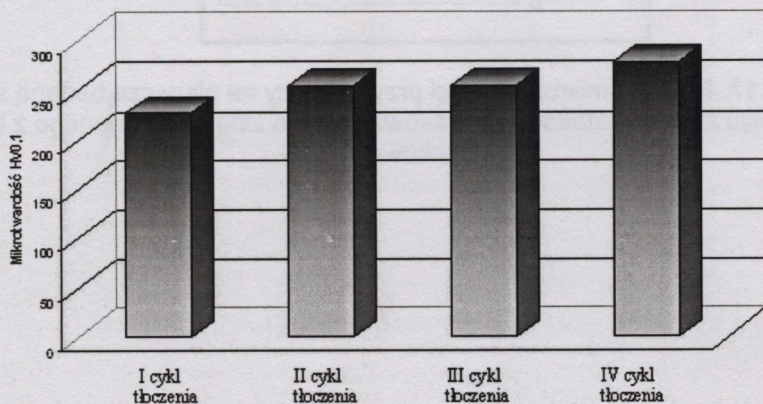


Rys.4.17. Rozkład mikrotwardości przypadający na pierwszą badaną stronę I-go cyklu złącza kształtowego prasowanego na zimno wykonanego z blachy ocynkowanej 10J

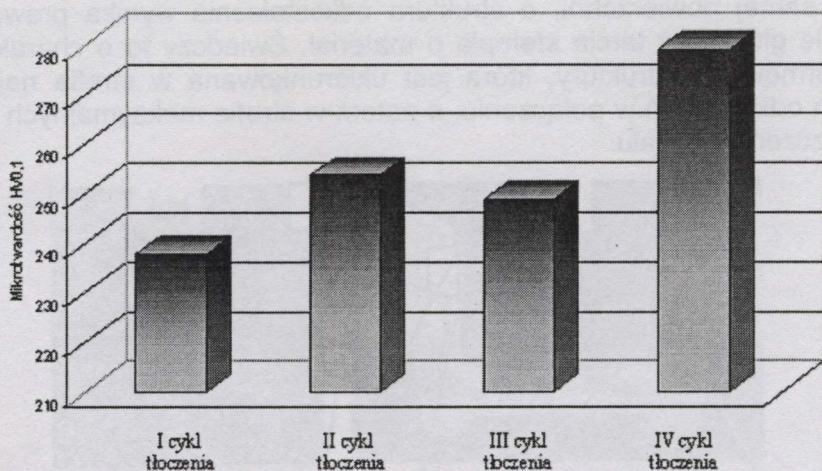


Rys.4.18. Rozkład mikrotwardości przypadający na drugą badaną stronę I-go cyklu złącza kształtowego prasowanego na zimno wykonanego z blachy ocynkowanej 10J

Z porównania rozkładów maksymalnych mikrotwardości dla czterech cykli prasowania (tłoczenia) rysunki 4.19, 4.20 zauważyć można, iż przy większej wartości siły użytej w procesie prasowania (tłoczenia) występuje wyraźniejszy wzrost mikrotwardości w okolicach kontaktu obu blach.



Rys.4.19. Rozkład maksymalnych wartości mikrotwardości dla złącz kształtowych próbki nr 1



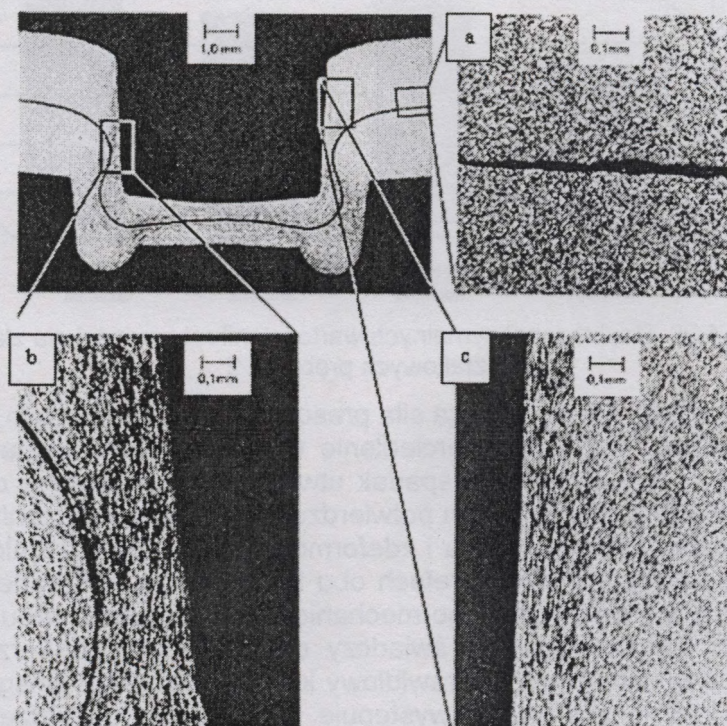
Rys.4.20. Rozkład maksymalnych wartości mikrotwardości dla złącz kształtowych próbki nr 2

Oznacza to, że im większa siła prasowania (tłoczenia), tym większa mikrotwardość. Ma to odzwierciedlenie w prawidłowości kształtowania złącza, gdyż nie występował spadek utwardzenia świadczący o uszkodzeniu materiału. Dodatkowym potwierdzeniem tego stwierdzenia są wyraźnie widoczne zagęszczenia i zdeformowania struktury metalograficznej w charakterystycznych strefach obu blach złącza. W żadnej z prób nie stwierdzono niekorzystnego mechanicznego działania karbu strukturalnego w połączeniach, co świadczy o prawidłowym doborze parametrów formowania złącza. Prawidłowy kształt połączenia osiągany jest przy największej sile, wtedy występuje maksymalne utwardzenie materiału, co ma również odzwierciedlenie w zdeformowaniu (wydłużone ziarna) struktury metalograficznej. Na rysunku 4.21 pokazano przykładowo przekrój strefy połączenia blach o grubości 2,0 mm z charakterystycznymi punktami o zmienionej strukturze. Na rysunku (zgodzie) widoczna jest również linia pokrycia ochronnego blachy, które w miarę formowania złącza równomiernie uległo przemieszczeniu, bez mogącego wystąpić przerwania.

Stwierdzono ponadto, że strefa najbardziej zdeformowana i utwardzona występuje w ostatnim cyklu tłoczenia, co świadczy również o prawidłowo wykonanym połączeniu.

Strefa (a), na rysunku 4.21 obrazuje początkową pierwotną strukturę w bardzo niewielkim stopniu zdeformowaną, bez wyraźnego ukierunkowania ziaren struktury. W strefie (b) widoczny jest fragment połączenia w miejscu gdzie wyraźnie zauważa się odkształcenie struktury w górnej części próbki (blachy). Strefa (c) obrazuje materiał w miejscu styku schodzącego stempla. Ślady deformacji są skoncentrowane w strefie

przy samej powierzchni, a struktura odkształcenia wynika prawdopodobnie głównie z tarcia stempla o materiał. Świadczy to o charakterze zdeformowania struktury, która jest ukierunkowana w strefie największych odkształceń w połączeniu, a zatem w strefie maksymalnych przemieszczeń materiału.



Rys.4.21. Struktura materiału złącza kształtowego z charakterystycznymi strefami obserwacji: a) widok w przekroju całego połączenia, b) obraz na krawędzi prostopadłej w dolnej części, c) obraz na krawędzi prostopadłej w górnej części

Podsumowując uzyskane wyniki można stwierdzić, że proces prasowania (tłoczenia) powoduje wyraźne zmiany utwardzenia w strefie kontaktu obu łączonych blach. Wielkość utwardzenia określono przez rozkład mikrotwardości, głównie zależnej od siły prasowania (tłoczenia) i kierunku jej oddziaływania, jednak rozkłada się równomiernie.

Pomiary mikrotwardości w strefie kontaktu obu blach pozwalają w pewnym stopniu na oszacowanie prawidłowości przyjętych warunków procesu prasowania (tłoczenia - gradient utwardzenia), ponadto obrazują różnice, niezbyt wielkie, między mikrotwardością w różnych fazach i strefach prasowania (tłoczenia). Jednak dokładne prześledzenie warunków płynięcia materiału wymaga dodatkowych badań na specjalnych modelach.

4.4. Badania stanowiskowe złącz

W ramach badań stanowiskowych przeprowadzono próby według następującej metodyki:

- badania wytrzymałościowe blach „czarnych”,
- (surowo-czarnych) i ocynkowanych o grubościach 1,5 i 2,0 mm na rozciąganie,
- badania wytrzymałościowe złączy pojedynczych,
- badania wytrzymałościowe złączy podwójnych,
- badania wytrzymałościowe złączy na wyrwanie.

Wszystkie próby wykonano na maszynie wytrzymałościowej Fritz-Heckert posiadającej zapis przebiegu siły w funkcji odkształcenia według normy PN-EN 10002-1:2004.

Badania wytrzymałościowe złączy blach na rozciąganie zostały przeprowadzone z prędkością 10 mm/min i obejmowały następujące rodzaje blach:

- surowo-czarne o grubości 1,5 mm z gatunku St3SAI – seria nr 1,
- surowo-czarne o grubości 2,0 mm z gatunku St3SAI – seria nr 2,
- ocynkowane o grubości 1,5 mm z gatunku 10 J – seria nr 3,
- ocynkowane o grubości 2,0 mm z gatunku 10 J – seria nr 4.

Próbki do badań zostały przygotowane zgodnie z wymogami normy [82], a każdą z prób wykonano rejestrując przebieg siły. Poniżej przedstawiono przykładowe przebiegi sił rozciągania dla wybranych próbek. W tabeli 4.5 zamieszczono średnie wartości sił odczytane z wykresów odpowiadające górnej i dolnej, lub umownej granicy plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie serii próbek i obliczone na ich podstawie następujące parametry:

- R_m - wytrzymałość na rozciąganie,
- R_{eg} i R_{ed} - górną i dolną granicę plastyczności,
- $R_{0,2}$ – umowną granicę plastyczności,
- A_r - wydłużenie względne równomierne,
- P_m – wartość siły rozciągającej,
- P_{eg} i P_{ed} - wartość siły górnej i dolnej granicy plastyczności.

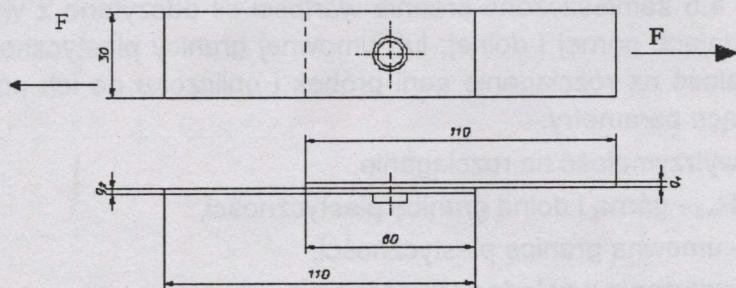
Wyniki badań wytrzymałościowych złączy

Tabela 4.5

Nr serii	P_{eg} [kN]	P_{ed} [kN]	P_m [kN]	F_0 [mm ²]	R_{eg} lub $R_{0,2}$ [MPa]	R_{ed} [MPa]	R_m [MPa]	L_1 [mm]	L_0 [mm]	A_r [%]
1	7,01	-	11,85	29,00	241,7	-	408,6	74,7	62,0	20,52
2	10,22	-	12,34	40,00	255,6	-	308,4	86,4	72,0	20,03
3	10,18	9,64	11,10	28,00	363,4	344,3	396,6	74,1	62,0	19,52
4	11,66	11,12	14,40	38,00	306,9	292,6	378,9	90,3	72,0	25,44

Badania wytrzymałościowe złączy kształtowych pojedynczych na ścinanie przeprowadzono na próbkach pokazanych na rysunku 4.22, wymiary których są dostosowane do normy [82]. Należy przy tym zaznaczyć, że przeprowadzona w ten sposób próba rozciągania połączonych blach pozwoliła badać wytrzymałość złączy na ścinanie. Ze względu na różny charakter zachowania się obciążonego złącza, zależnej od liczby złączy, przeprowadzono próby wytrzymałościowe złączy pojedynczych i podwójnych.

Próby przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej z prędkością 10 mm/min. Dla wszystkich prób zarejestrowano przebieg siły ścinania złączy.



Rys.4.22. Próбка do badań wytrzymałościowych na rozciąganie blach ze złączami pojedynczymi

Z zarejestrowanych wykresów odczytano wartości sił odpowiadających granicy plastyczności i wytrzymałości na ścinanie złączy pojedynczych. Ich średnie wartości z trzech pomiarów dla każdej próbki zamieszczono w tabeli 4.6. Na ich podstawie obliczono wartości przeliczeniowej umownej granicy plastyczności R_{te} i przeliczeniowej wytrzyma-

łości na rozciąganie R_{tm} (zwanych dalej wskaźnikami odniesienia wytrzymałości na ścinanie) według poniższych zależności:

$$R_{te} = \frac{P_{se}}{S_o}$$
$$R_{tm} = \frac{P_{sm}}{S_o}$$

(4.1)

gdzie:

- P_{se} , P_{sm} – siły ścinania odpowiadające umownej granicy plastyczności i maksymalnej wytrzymałości złącza,
- S_o – przekrój początkowy złącza wynoszący:

$$g_{st} \times d$$

(4.2)

gdzie:

- g_{st} – grubość blachy złącza od strony stempla,
- d – średnica złącza

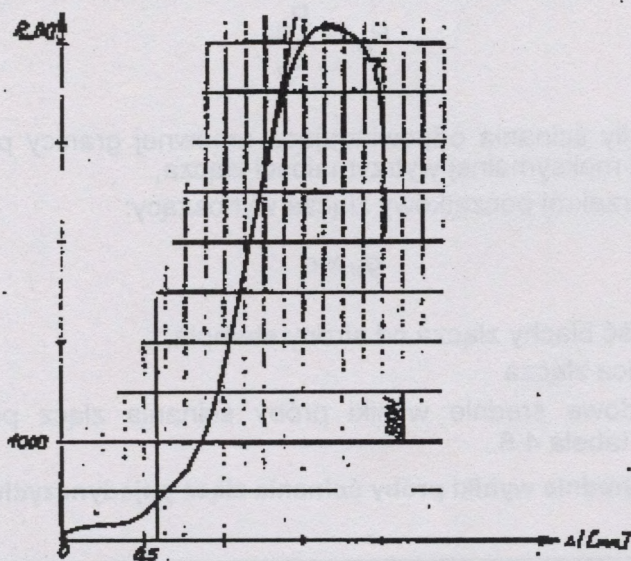
Przykładowe średnie wyniki próby ścinania złącz pojedynczych przedstawia tabela 4.6.

Średnie wyniki próby ścinania złącz pojedynczych

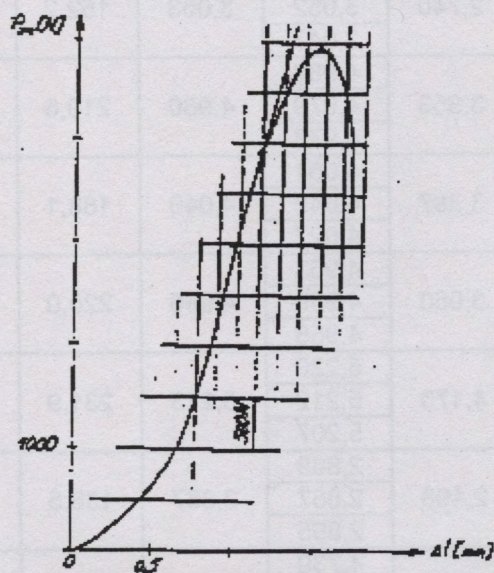
Tabela 4.6

Nr próbki	P _{se} [kN]		P _{sm} [kN]		R _{te} [MPa]	R _{tm} [MPa]	R _{te} \ R _{tm}
	wyn. prób.	wyn. śr.	wyn. prób.	wyn. śr.			
11-2.1	2,745	2,740	3,060	3,053	152,2	169,6	0,90
	2,743		3,052				
	2,732		3,047				
11-4.1	3,960	3,953	4,988	4,980	219,6	276,7	0,79
	3,952		4,979				
	3,947		4,973				
11-5.1	3,395	3,387	4,051	4,040	188,1	224,4	0,84
	3,388		4,042				
	3,378		4,027				
11-7.1	3,965	3,960	4,963	4,960	220,0	275,6	0,80
	3,962		4,959				
	3,953		4,958				
12-6.1	4,179	4,173	5,220	5,213	231,9	289,6	0,80
	4,171		5,212				
	4,168		5,207				
11-2.4	2,498	2,493	2,869	2,867	138,5	159,3	0,87
	2,495		2,867				
	2,486		2,865				
11-4.4	3,739	3,730	4,739	4,730	207,2	262,8	0,79
	3,729		4,729				
	3,722		4,722				

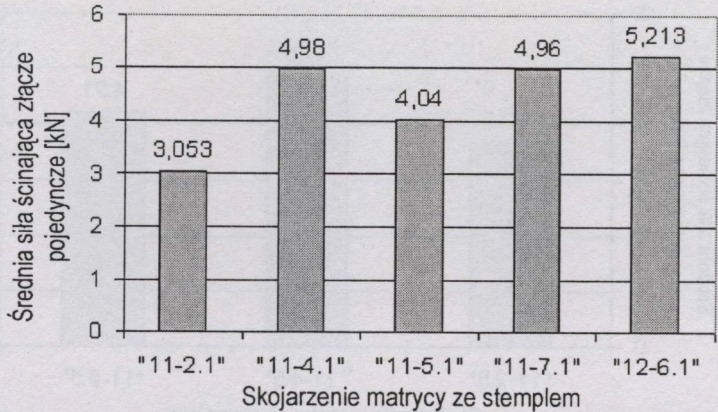
Na rysunkach 4.23 i 4.24 przedstawiono kilka przykładowych wykresów przebiegu siły rozciągania dla blach ze złączami pojedynczymi, a otrzymane wyniki w tej serii badań przedstawiono na rysunkach 4.25 i 4.26, grupując je według rodzaju blach i ich grubości.



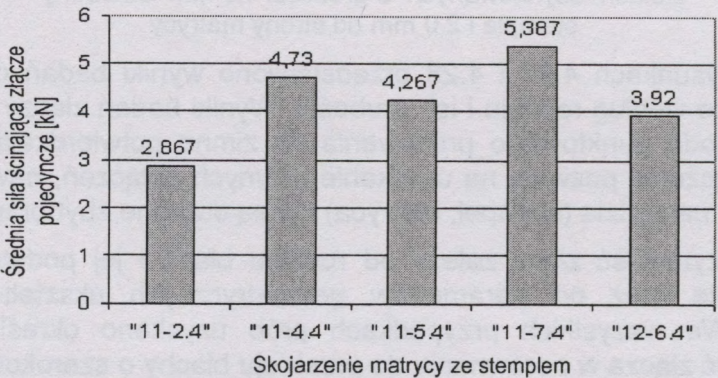
Rys.4.23. Przebieg zmian siły rozciągania dla złącza pojedynczego (próbka nr 12-6.1)



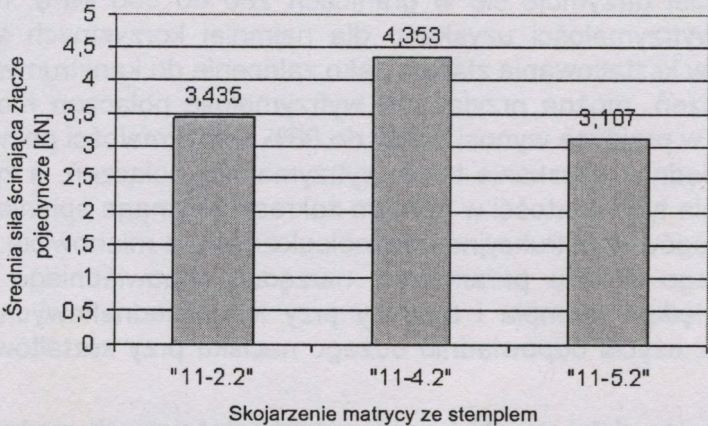
Rys.4.24. Przebieg zmian siły rozciągania dla złącza pojedynczego (próbka nr 11-4.4)



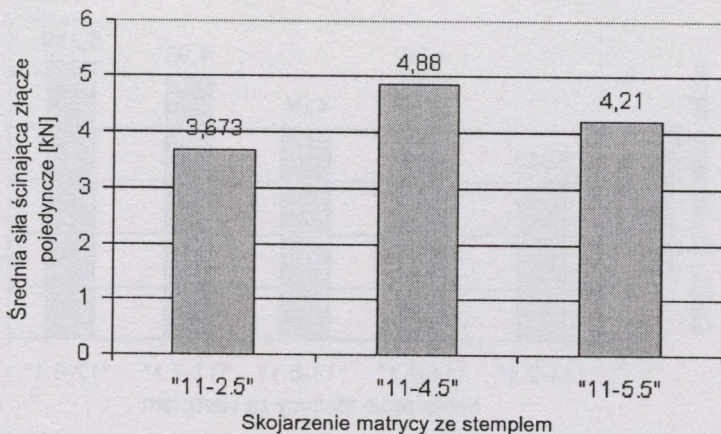
Rys.4.25. Siły ścinające złącze pojedyncze wykonane z blach surowo-czarnych o grubości 1,5 mm



Rys.4.26. Siły ścinające złącze pojedyncze wykonane z blach ocynkowanych o grubości 1,5 mm



Rys.4.27. Siły ścinające złącze pojedyncze wykonane z blach surowo-czarnych o grubości 1,5 mm od strony stempla i 2,0 mm od strony matrycy



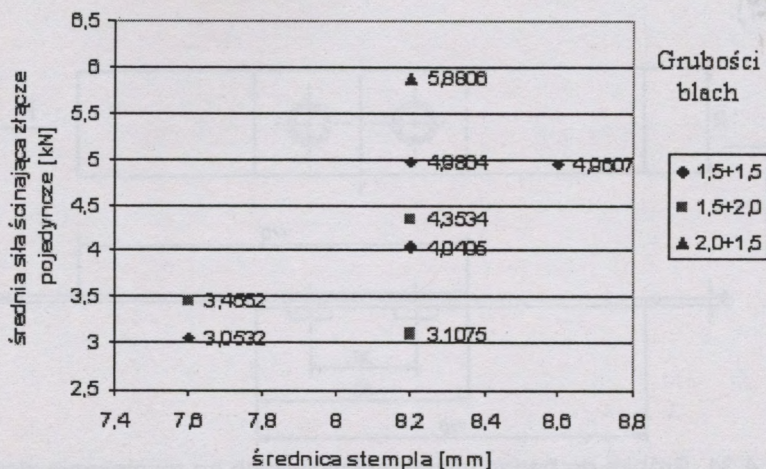
Rys.4.28. Siły ścinające złącze pojedyncze wykonane z blach ocynkowanych o grubości 1,5 mm od strony stempla i 2,0 mm od strony matrycy

Na rysunkach 4.27 i 4.28 przedstawiono wyniki badań dla blach grupując je według rodzaju i ich grubości. Wyniki badań złączy wykonanych metodą punktowego prasowania na zimno potwierdzają, że ten sposób łączenia pozwala na uzyskanie pewnych połączeń, nawet wówczas, gdy narzędzia (stempel, matryca) nie są dobrane zbyt prawidłowo.

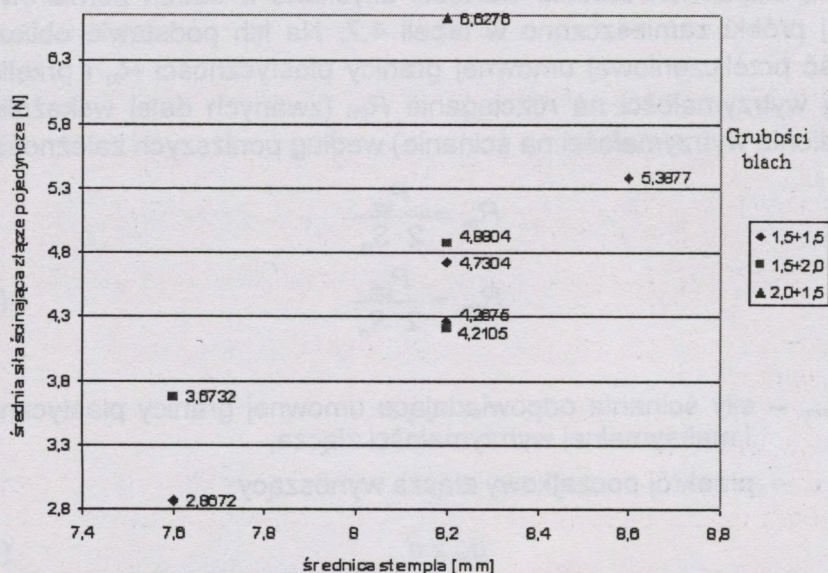
Wytrzymałość złączy zależy od rodzaju blach i jej podatności na umocnienie oraz od parametrów geometrycznych ukształtowanego złącza. We wszystkich przypadkach prób uzyskano określoną wytrzymałość złącza w porównaniu do przekroju blachy o szerokości odpowiadającej średnicy wypukłości złącza i grubości blachy występującej po stronie stempla (od strony wgłębienia), która wynosi od 63 do 343 MPa, a najczęściej utrzymuje się w granicach 280 do 300 MPa. Najniższe wartości wytrzymałości uzyskano dla najmniej korzystnych skojarzeń parametrów kształtowania złącza. Jako zalecenie do konstruowania tego typu połączeń, można przyjąć, że wytrzymałość połączeń możliwa do uzyskania w praktyce wynosi od 60 do 88% wytrzymałości pełnej blachy stalowej. Jednak uzyskanie takiej wytrzymałości połączeń, a zwłaszcza usytuowania tych wartości w górnym zakresie, wymaga spełnienia pewnych wymogów konstrukcyjno-technologicznych, a mianowicie: w miarę prawidłowego doboru parametrów narzędzi, odpowiedniego ułożenia blach względem stempla i matrycy przy ich niejednakowych grubościach, oraz użycia odpowiednio dużego nacisku przy kształtowaniu połączeń.

Analizując dalej wyniki badań wytrzymałościowych można stwierdzić, że złącza wskazują bardzo wyraźną zależność wytrzymałości od kształtu utworzonego połączenia, uzależnionego od parametrów geo-

metrycznych stempla i matrycy. Z danych przedstawionych na rysunkach 4.29 i 4.30 wynika, że dla łączonych blach o grubości 1,5 + 1,5 mm ze zwiększeniem średnicy stempla (czyli zwiększeniem się odkształcenia) w badanym zakresie i przy płytszych otworach w matrycy wzrasta wytrzymałość połączeń.

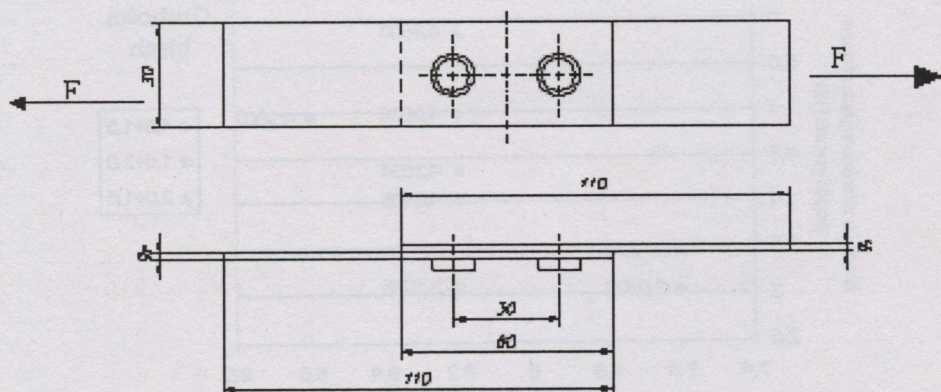


Rys. 4.29. Zmiana sił ścinających dla złącza pojedynczego (próbka 11-Y, blacha surowo-czarna) w zależności od średnicy stempla (obok znacznika naniesiono wartość siły i średnicę stempla)



Rys. 4.30. Zmiana sił ścinających dla złącza pojedynczego (próbka 11-Y, blacha ocynkowana) w zależności od średnicy stempla (obok znacznika naniesiono wartość siły i średnicę stempla)

Dla pozostałych wykonanych skojarzeń (matryca – stempel) obserwuje się podobne zmiany, tzn. wzrost wytrzymałości dla matryc głębszych i dla grubszej blachy. Takie właściwości połączeń spowodowane są prawdopodobnie umacnianiem się materiału. Przeprowadzono również dla porównania próby rozciągania blach ze złączami podwójnymi (rys. 4.31).



Rys.4.31. Próbką do badań wytrzymałościowych na rozciąganie złącz

Podobnie jak poprzednio z zarejestrowanych wykresów odczytano wartości sił odpowiadające granicy plastyczności i wytrzymałości na ścinanie złącz. Ich średnie wartości uzyskane z trzech pomiarów dla każdej próbki zamieszczono w tabeli 4.7. Na ich podstawie obliczono wartość przeliczeniowej umownej granicy plastyczności R_{te} i przeliczeniowej wytrzymałości na rozciąganie R_{tm} (zwanych dalej wskaźnikami odniesienia wytrzymałości na ścinanie) według poniższych zależności:

$$R_{te} = \frac{P_{se}}{2 \cdot S_o}$$

$$R_{tm} = \frac{P_{sm}}{2 \cdot S_o} \quad (4.3)$$

gdzie:

P_{se}, P_{sm} – siły ścinania odpowiadające umownej granicy plastyczności i maksymalnej wytrzymałości złącza,

S_o – przekrój początkowy złącza wynoszący:

$$g_{st} \times d \quad (4.4)$$

gdzie:

g_{st} – grubość blachy złącza od strony stempla,

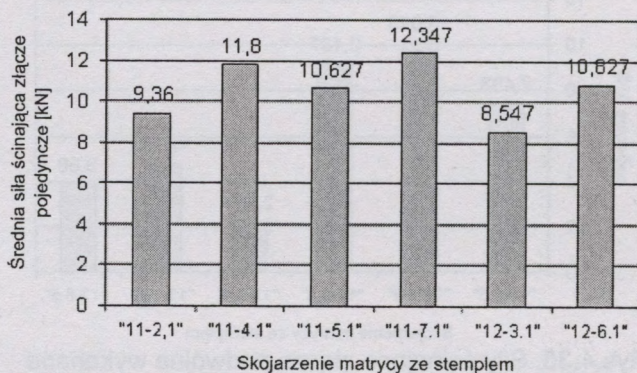
d – średnica złącza.

Wyniki próby ścinania złączy podwójnych

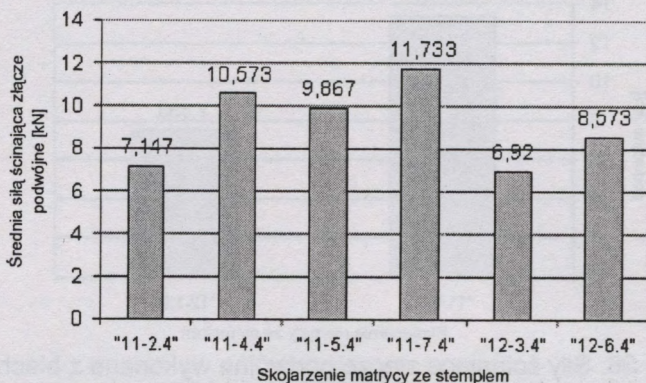
Tabela 4.7

Nr próbki	P _{se} [kN]		P _{sm} [kN]		R _{te} [MPa]	R _{tm} [MPa]	R _{te} \ R _{tm}
	wyn. prób.	wyn. śr.	wyn. prób.	wyn. śr.			
11-2.1	7,188	7,180	9,369	9,360	199,4	260,0	0,77
	7,182		9,359				
	7,170		9,352				
11-4.1	7,669	7,667	11,807	11,800	213,0	327,8	0,65
	7,668		11,801				
	7,664		11,792				
11-5.1	7,660	7,653	10,631	10,627	212,6	295,2	0,72
	7,655		10,628				
	7,644		10,622				
11-7.1	8,568	8,560	12,352	12,347	237,8	343,0	0,69
	8,559		12,350				
	8,553		12,339				

Zbiornicze wyniki obrazują wykresy przedstawione na rysunkach 4.32 i 4.33, pogrupowane według rodzaju blach i ich grubości.

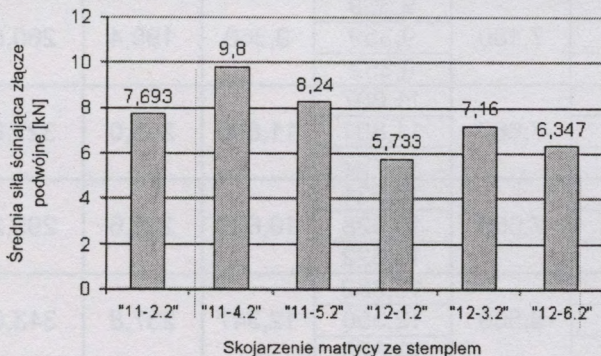


Rys.4.32. Siły ścinające złącze podwójne wykonane z blach surowo-czarnych o grubości 1,5 mm

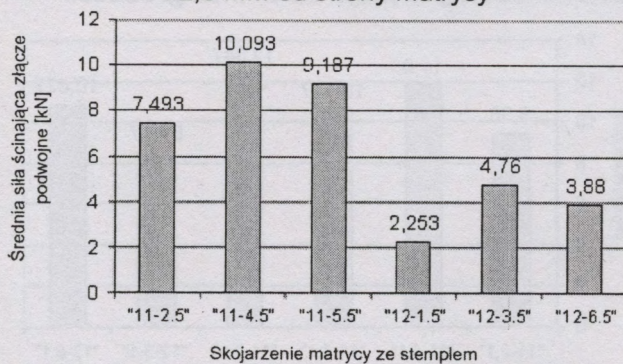


Rys.4.33. Siły ścinające złącze podwójne wykonane z blach ocynkowanych o grubości 1,5 mm

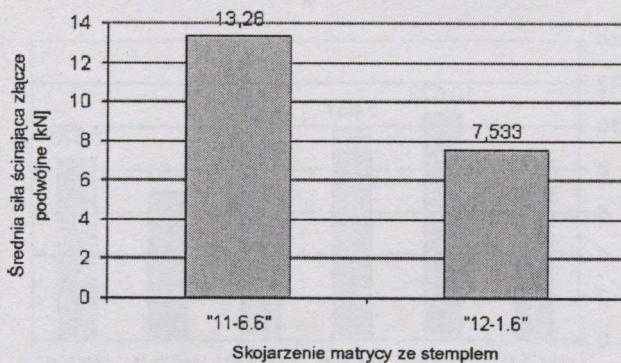
Na rysunkach 4.34 i 4.35 przedstawiono wyniki badań blach surowo-czarnych i ocynkowanych, grupując je według rodzaju i grubości. Na rysunkach 4.36 i 4.37 przedstawiono wyniki badań blach surowo-czarnych i ocynkowanych, grupując je według rodzaju i ich grubości.



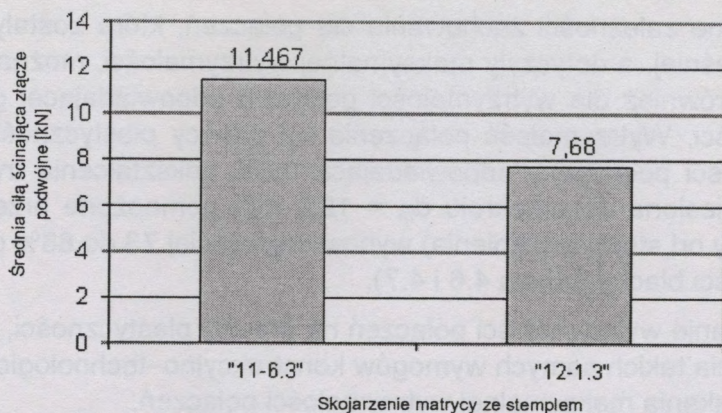
Rys.4.34. Siły ścinające złącze podwójne wykonane z blach surowo-czarnych o grubości 1,5 mm od strony stępła i 2,0 mm od strony matrycy



Rys.4.35. Siły ścinające złącze podwójne wykonane z blach ocynkowanych o grubości 1,5 mm od strony stępła i 2,0 mm od strony matrycy



Rys.4.36. Siły ścinające złącze podwójne wykonane z blach surowo-czarnych o grubości 2,0 mm od strony stępła i 1,5 mm od strony matrycy



Rys.4.37. Siły ścinające złącze podwójne wykonane z blach ocynkowanych o grubości 2,0 mm od strony stempla i 1,5 mm od strony matrycy

We wszystkich przeprowadzonych próbach (poza jednym przypadkiem) uzyskano wytrzymałość połączeń dwupunktowych (po przeliczeniu na jeden punkt) od kilku do 24% większą od wytrzymałości połączeń jednopunktowych. Jest to spowodowane tym, że próbki ze złączem jednopunktowym w miejscu połączenia wyginały się (pod wpływem występującego momentu gnącego wywołanego nałożeniem na siebie dwóch blach), powodując wcześniejsze zerwanie połączenia. Wynika z tego fakt, że wytrzymałość takiego połączenia jest zależna od wytrzymałości na ścinanie ścianki wgłębienia oraz w pewnym stopniu zależy od sił tarcia między blachami wywołanymi naciskiem pochodzącym od wyraźnie ukształtowanego „zamka” w złączu.

To spostrzeżenie potwierdzają mniejsze różnice (od kilku do 9%) w wytrzymałości jednopunktowych (rys. 4.29 i 4.30) i dwupunktowych (rys. 4.38 i 4.39) złącz blach ocynkowanych, dla których współczynnik tarcia jest niższy (rys. 4.23 i 4.26). Jednak można stwierdzić, że łączenie tym sposobem blach z powłokami nie wpływa w znaczący sposób na względną wytrzymałość połączeń, co podkreślają również firmy zagraniczne oferujące gotowe technologie [74-78].

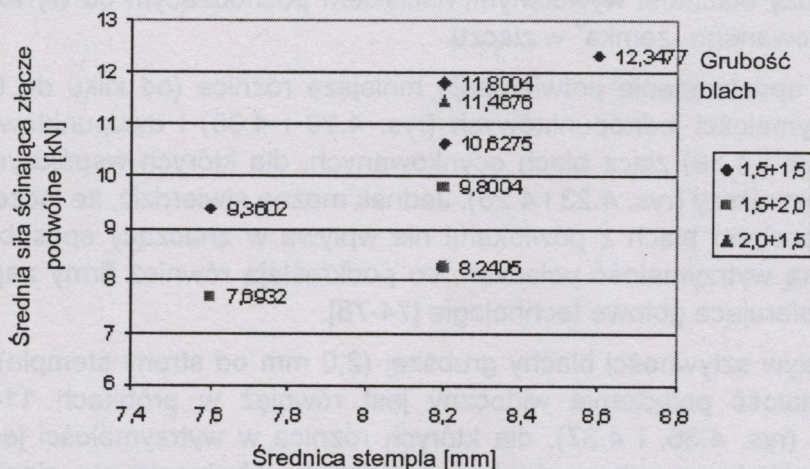
Wpływ sztywności blachy grubszej (2,0 mm od strony stempla) na wytrzymałość połączenia widoczny jest również w próbkach 11-6.3 i 11-6.6 (rys. 4.36. i 4.37), dla których różnica w wytrzymałości jedno i dwupunktowego połączenia jest minimalna. Wyginanie się cienkich blach i korzystniejsze zachowanie się grubszych blach położonych od strony stempla należy uwzględniać przy projektowaniu połączeń w różnych konstrukcjach.

Podobne zależności zachowania się połączeń, które zostały omówione wcześniej, a dotyczyły maksymalnej wytrzymałości, można zaobserwować również dla wytrzymałości połączeń odpowiadającej granicy plastyczności. Wytrzymałość połączenia na granicy plastyczności (siła wytrzymałości połączenia odpowiadająca 0,2% odkształcenia trwałego złącza odniesiona do przekroju $d_m = 12,0$ mm pomnożone przez grubość blachy od strony wgłębienia) wynosi najczęściej 73 do 88% granicy plastyczności blachy (tabela 4.6 i 4.7).

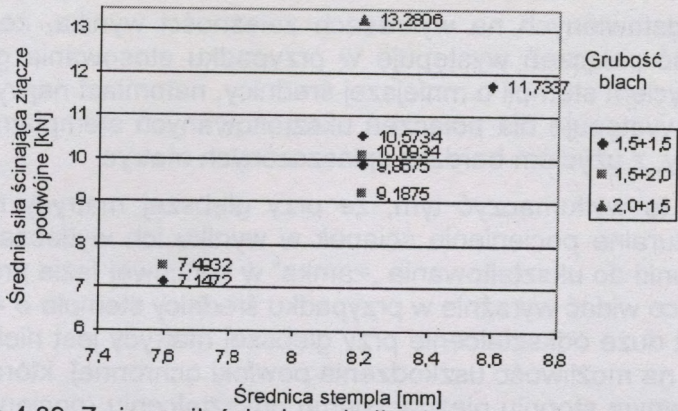
Uzyskanie wytrzymałości połączeń na granicy plastyczności, wymaga spełnienia takich samych wymogów konstrukcyjno-technologicznych, jak dla uzyskania maksymalnej wytrzymałości połączeń.

Ważnym parametrem przy projektowaniu połączeń jest również zachowanie minimalnej odległości osi punktowego złącza od krawędzi blachy. Na podstawie badań ustalono, że nawet 8 milimetrowa odległość osi złącza o średnicy 12 mm od krawędzi 1,5 mm blachy daje pewne połączenie o wytrzymałości około 30% mniejszej od wytrzymałości połączenia wykonanego na blachach o odpowiedniej szerokości. Jednak w celu uzyskania pełnej wytrzymałości złącze musi być oddalone co najmniej o wartość średnicy od krawędzi blachy.

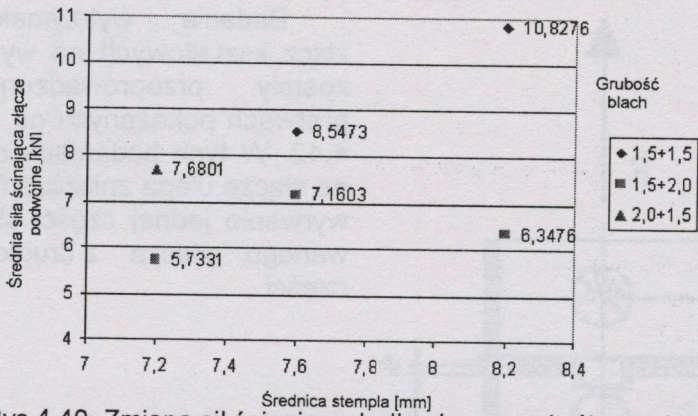
Wpływ średnicy stempla (rys. 3.4) na wytrzymałość połączeń można zaobserwować porównując dane z rysunków 4.38 i 4.40 oraz rysunków 4.39 i 4.41.



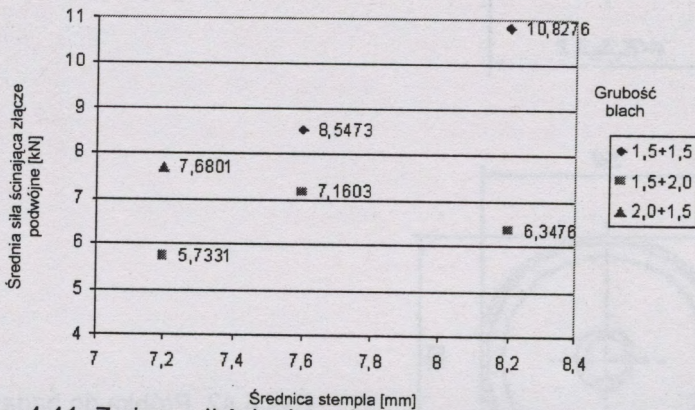
Rys. 4.38. Zmiana sił ścinających dla złącza podwójnego (próbka 11-Y, blacha surowo-czarna) w zależności od średnicy stempla (obok znacznika naniesiono wartość siły i średnicę stempla)



Rys.4.39. Zmiana sił ścinających dla złącza podwójnego (próbka 11-Y, blacha ocynkowana) w zależności od średnicy stempla (obok znacznika naniesiono wartość siły i średnicę stempla)



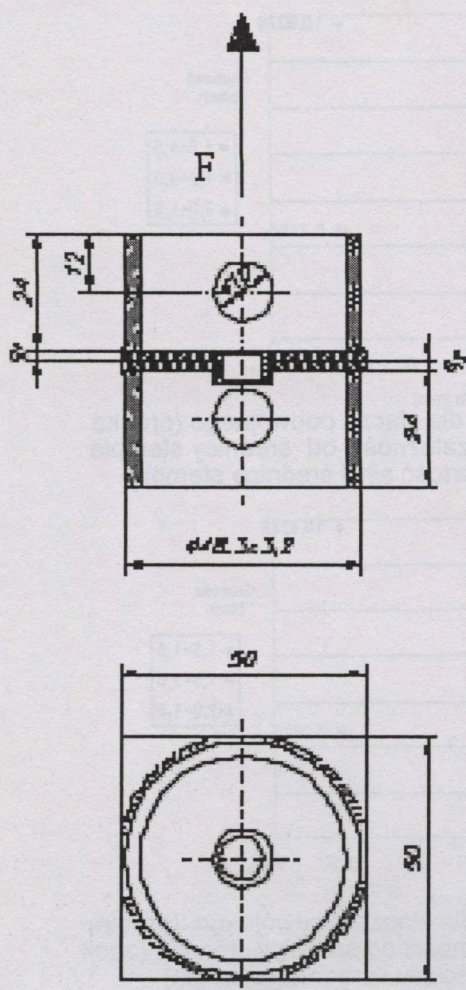
Rys.4.40. Zmiana sił ścinających dla złącza podwójnego (próbka 12-Y, blacha surowo-czarna) w zależności od średnicy stempla (obok znacznika naniesiono wartość siły i średnicę stempla)



Rys.4.41. Zmiana sił ścinających dla złącza podwójnego (próbka 12-Y, blacha ocynkowana) w zależności od średnicy stempla (obok znacznika naniesiono wartość siły i średnicę stempla)

Z przedstawionych na wykresach zależności wynika, że większa wytrzymałość połączeń występuje w przypadku stosowania głębszych matryc z użyciem stempli o mniejszej średnicy, natomiast najwyższa wytrzymałość występuje dla połączeń ukształtowanych stemplami o większej średnicy, z użyciem bardziej spłaszczonych matryc.

Można to wytłumaczyć tym, że przy głębszej matrycy następuje większe naturalne pocienienie ścianek w wyniku ich wytłaczania. Daje gorsze warunki do ukształtowania „zamka” w końcowej fazie prasowania dna złącza, co widać wyraźnie w przypadku średnicy stempla $\varnothing = 8,2$ mm. Jednak zbyt duże odkształcenie przy głębszej matrycy jest niekorzystne ze względu na możliwość uszkodzenia powłoki ochronnej, która również ulega w pewnym stopniu nieznacznemu odkształceniu (pocienieniu), co może być powodem mniejszej odporności na oddziaływanie czynników korozyjnych.



Badania wytrzymałościowe złącz kształtowych na wrywanie zostały przeprowadzone na próbkach pokazanych na rysunku 4.42. W tych badaniach obciążone złącze ulega zniszczeniu przez wrywanie jednej części ukształtowanego złącza z drugiej jego części.

Rys.4.42. Próbką do badań wytrzymałościowych na wrywanie złącz pojedynczych

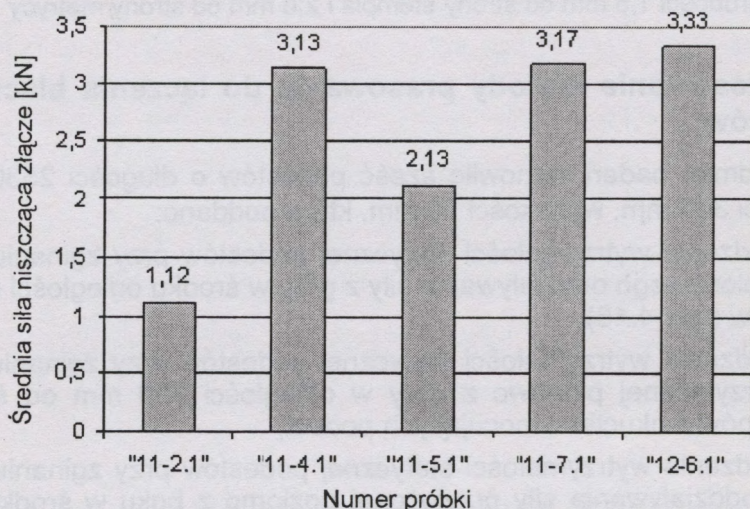
W tabeli 4.8 zestawiono jedynie otrzymane średnie wyniki z badań.

Wyniki próby wyrywania złączy pojedynczych

Tabela 4.8

Nr próbki	P_e [kN]	P_m [kN]
11-2.1	0,480	1,120
11-4.1	1,850	3,130
11-5.1	1,640	2,130
11-7.1	1,840	3,170
12-6.1	1,980	3,330
11-2.2	2,080	3,140
11-4.2	2,460	4,420
11-5.2	2,040	3,280
11-6.3	0,840	1,260

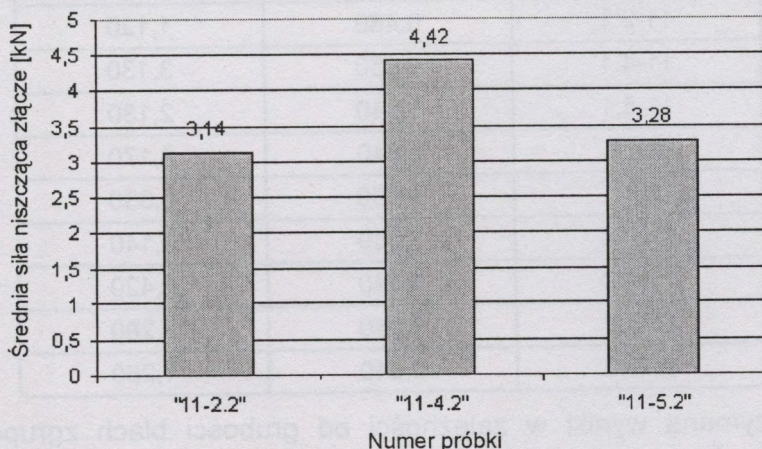
Otrzymane wyniki w zależności od grubości blach zgrupowano i przedstawiono na rysunkach 4.43 i 4.44.



Rys.4.43. Siły wyrywające złącze pojedyncze z blach surowo-czarnych o grubości 1,5 mm

Badania przeprowadzone w tej serii wykazały, że wymagane jest właściwe dopasowanie parametrów łączenia, a głównie średnicy matrycy i stempla oraz głębokości prasowania (właczania). Właściwego doboru dla danej konstrukcji połączenia można dokonać częściowo na podstawie analizy wartości otrzymanych z badań wytrzymałości na ścinanie i wyrywanie. Ze względu na możliwość pewnej tolerancji w geo-

metrii wykonania elementu spowodowanej odchyłkami w urządzeniu łączącym i w grubości łączonych blach, należy dla uzyskania niezawodnego połączenia ustalić optymalne parametry narzędzi łączących, co wynika z rysunków 4.43, 4.44.



Rys.4.44. Siły wrywające złącze pojedyncze z blach surowo-czarnych o grubości 1,5 mm od strony stempla i 2,0 mm od strony matrycy

4.5. Zastosowanie metody prasowania do łączenia blach podestów

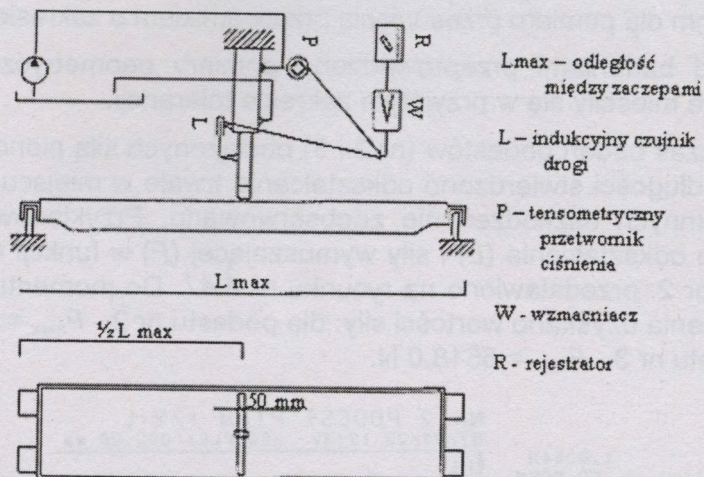
Przedmiot badań stanowiło sześć podestów o długości 2530 mm, szerokości 320 mm, wysokości 76 mm, które poddano:

- sprawdzeniu wytrzymałości statycznej podestów przy zginaniu podczas pionowego oddziaływania siły z góry w środku odległości od zaczepów (rys. 4.45),
- sprawdzenie wytrzymałości statycznej podestów przy zginaniu przy sile przyłożonej pionowo z góry w odległości 300 mm od środka zaczepów z okuciami mocujących podest,
- sprawdzenie wytrzymałości statycznej podestów przy zginaniu podczas oddziaływania siły przyłożonej poziomo z boku w środku długości podestu.

Podesty oznaczono dla potrzeb badawczych numerami identyfikacyjnymi od 1 do 6. Głównym celem badań było sprawdzenie podestów w celu wyeliminowania połączeń spawanych i zastąpienie ich połączeniami kształtowymi prasowanymi na zimno.

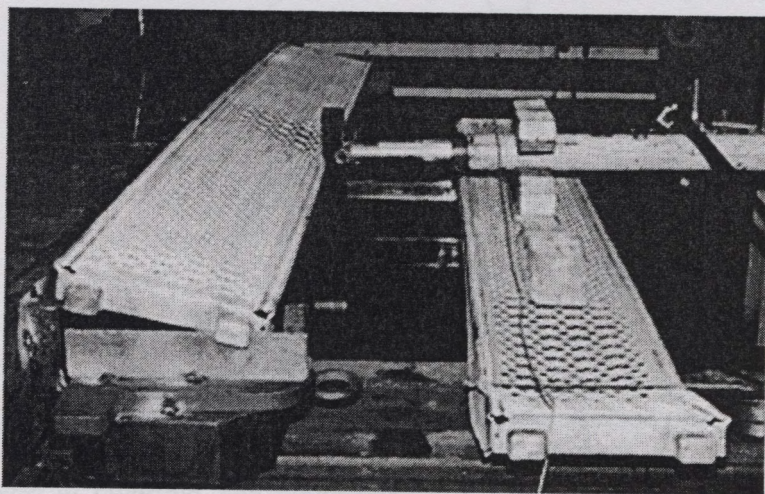
Na stanowisku którego schemat przedstawiono na rysunku 4.45 zamocowano podesty obciążone od góry lub z boku siłą pionową lub poziomą za pośrednictwem siłownika.

W trakcie prób rejestrowano ciśnienie w siłowniku wymuszającym oraz przesunięcie tłoka względem rury cylindra siłownika, co odpowiadało strzałce ugięcia w badanym podeście.



Rys.4.45. Schemat układu pomiarowego do badania podeście z obciążeniem pionowym w środku długości

Przykładowy widok stanowiska z badanymi podeściami przedstawia rysunek 4.46.



Rys.4.46. Widok stanowiska po badaniach wytrzymałości statycznej przy obciążeniu poziomym podeście

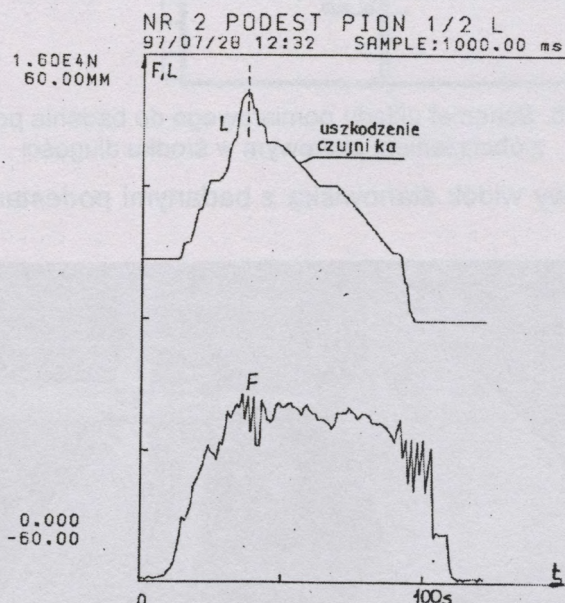
Do pomiaru ciśnienia użyto tensometrycznego przetwornika o zakresie do 100 MPa. Do pomiaru przemieszczenia użyto czujnika indukcyjnego o zakresie ± 50 mm. Do wzmacniania sygnałów pomiarowych użyto wzmacniaczy firmy Hottinger. Rejestracje sygnałów pomiarowych

przeprowadzono wielokanałowym rejestratorem XY firmy Yokogawa model 3655E. Maksymalny błąd pomiarowy oszacowano na:

- $\pm 0,6$ MPa dla pomiaru ciśnienia przetwornikiem o zakresie 100 MPa,
- $\pm 0,4$ mm dla pomiaru przesunięcia przetwornikiem o zakresie 50 mm.

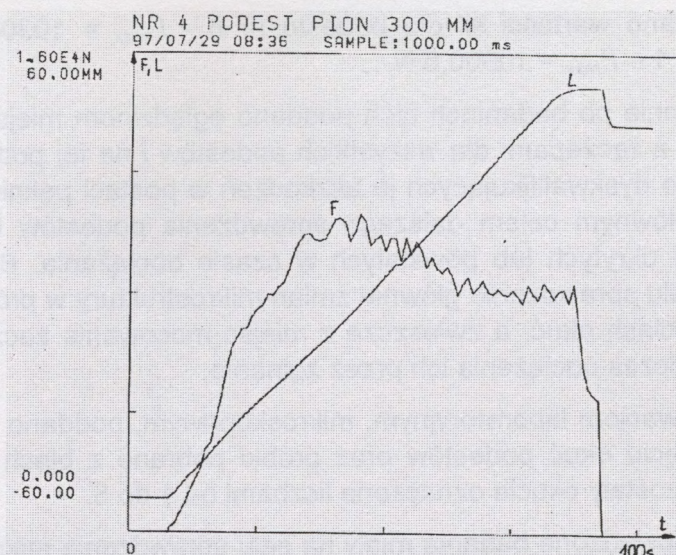
Przed badaniami przeprowadzono pomiary geometryczne podestów, które mieściły się w przyjętym zakresie tolerancji.

Podczas badań podestów (nr 2 i 3) obciążonych siłą pionową w połowie ich długości stwierdzono odkształcenia trwałe w miejscu przyłożenia siły. Innych uszkodzeń nie zaobserwowano. Przykładowy wykres przebiegu odkształcenia (L) i siły wymuszającej (F) w funkcji czasu, dla podestu nr 2, przedstawiono na rysunku nr 4.47. Do momentu trwałego odkształcenia uzyskano wartości siły: dla podestu nr 2 - $F_{max} = 5721,0$ N, dla podestu nr 3 - $F_{max} = 5518,0$ N.



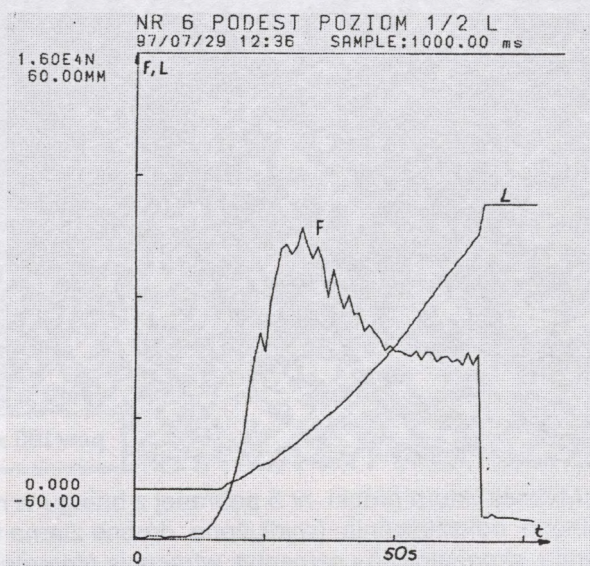
Rys.4.47. Przebieg siły (F) i odkształcenia (L) w funkcji czasu podczas obciążenia podestu siłą pionową w środku długości (podest nr 2)

Podczas badań podestów obciążonych siłą pionową w odległości 300 mm od osi zaczepów (nr 4 i 5) stwierdzono jedynie odkształcenia trwałe podestów w miejscu przyłożenia siły. Innych uszkodzeń (a zwłaszcza uszkodzeń zaczepów) nie zaobserwowano. Wykresy odkształcenia (L) i siły (F) w funkcji czasu dla podestu nr 4 przedstawiono na rysunku 4.48. Uzyskano wartości siły dla podestu nr 4 - $F_{max} = 10700,0$ N, dla podestu nr 5 - $F_{max} = 10300,0$ N.



Rys.4.48. Przebieg siły (F) i odkształcenia (L) w funkcji czasu podczas próby obciążenia podestu siłą pionową w odległości 300 mm od środka zaczepu (podest nr 4)

Podczas badań podestów obciążonych siłą poziomą, przyłożoną z boku, w połowie ich długości stwierdzono również odkształcenia trwałe w miejscu przyłożenia siły. Innych uszkodzeń nie zaobserwowano. Wykresy odkształcenia (L) i siły (F) w funkcji czasu dla podestu nr 6 przedstawiono na rysunku 4.49.



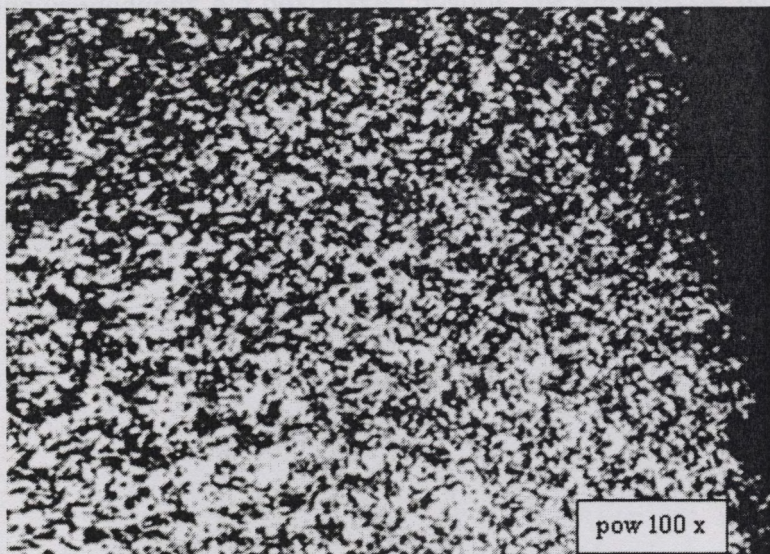
Rys.4.49. Przebieg siły (F) i odkształcenia (L) w funkcji czasu podczas próby obciążenia podestu siłą poziomą w środku długości (podest nr 6)

Uzyskano wartości sił dla podestu nr 6 - $F_{max} = 10300,0$ N, dla podestu nr 1 - $F_{max} = 10900,0$ N.

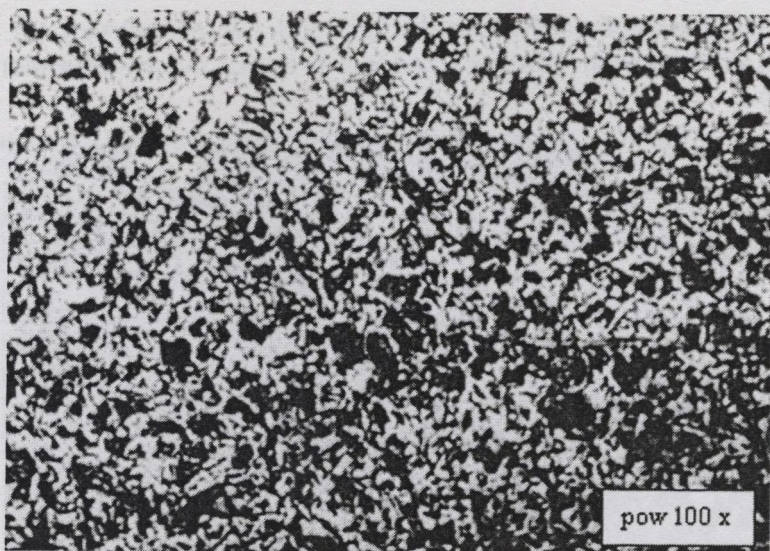
Następnie po badaniach tych poddano oględzinom miejsce w okolicy okucia z zaczepami dla wszystkich podestów i na tej podstawie nie stwierdzono dyskwalifikujących je uszkodzeń w postaci pęknięć czy naderwań. Głównym celem dalszego sprawdzenia podestów było ujawnienie wad ukrytych lub powstałych w czasie obciążania. Badania te, miały na celu sprawdzenie głównie zmian mikrostruktury w próbkach pobranych z blach okuć, a zwłaszcza z miejsc mocowania zaczepów podestów podczas obciążenia ich przez zginanie.

Obserwacjom laboratoryjnym, mikroskopowym, poddano próbki pobrane z pięciu okuć podestów oraz próbki pobrane z blach z których wykonane zostały okucia oznaczone liczbami od 1 do 5.

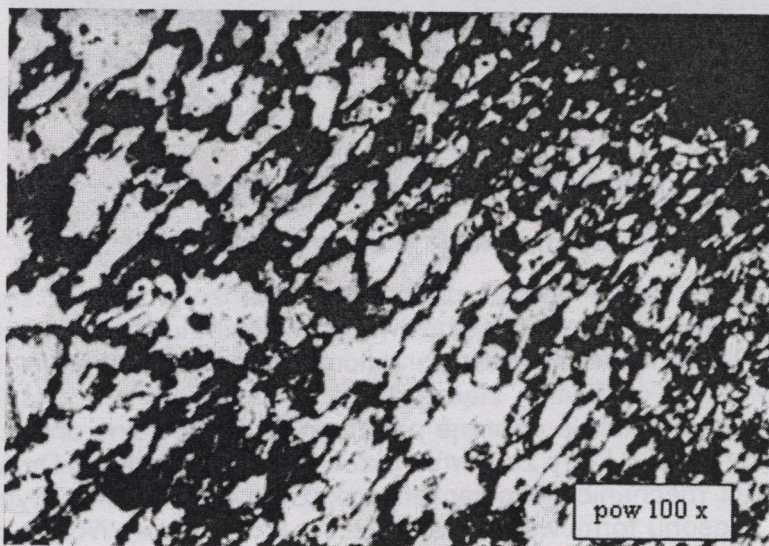
Przeprowadzone badania miały na celu sprawdzenie mikrostruktury w pobranych próbkach dla określenia i ujawnienia powstałych lub ukrytych ewentualnych wad. Obserwacje przeprowadzono przy użyciu mikroskopu optycznego typu Reichert-Yung MeF 3. Zgłady próbek poddano polerowaniu mechanicznemu i trawieniu nitałem. Przykładowe wyniki przeprowadzonych obserwacji przedstawiono na rysunkach 4.50-4.53.



Rys.4.50. Mikrostruktura próbki nr 5 pobranej z brzegu w miejscu maksymalnego odkształcenia (wydłużone drobne ziarna ferrytu, resztki perlitu, skoagulowany cementyt, wtrącenia niemetaliczne)



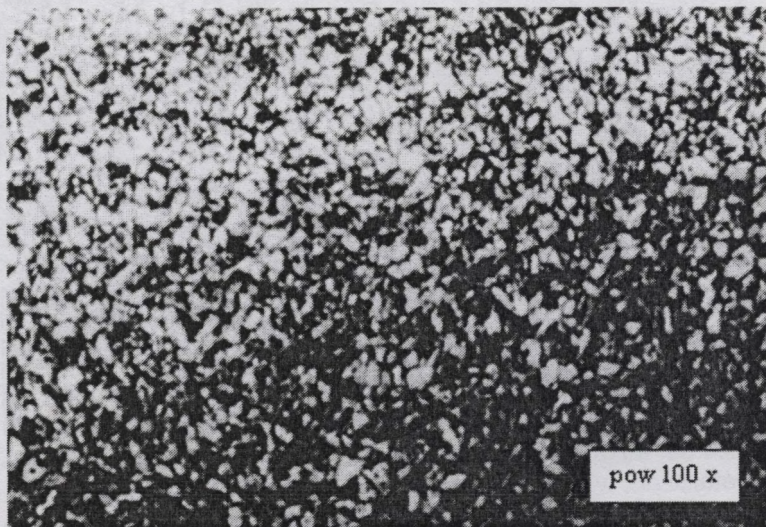
Rys.4.51. Mikrostruktura próbki nr 5. (ferryt, perlit, wtrącenia niemetaliczne, wielkość ziaren 7 do 8 według PN-84/H-04507/01)



Rys.4.52. Mikrostruktura próbki nr 1 pobrana z brzegu w miejscu maksymalnego odkształcenia (wydłużone duże ziarna ferrytu, cementyt skoagulowany, miejscami pokruszony oraz resztki perlitu, wtrącenia niemetaliczne)

Zaobserwowano, że w strukturze wszystkich próbek pobranych z części gdzie wystąpiło maksymalne odkształcenie, lecz poza strefą brzegową, wystąpiły silne wydłużenie i rozdrobnienie ziarna, co przy tak przeprowadzonych warunkach obróbki jest zjawiskiem prawidłowym. Nie zaobserwowano występowania naderwań w makrostrukturze, ani pow-

stania mikropęknięć zarówno w ziarnach, jak i w mikrostrukturze. Świadczy to o prawidłowym przeprowadzeniu procesu mocowania elementów podestów.



Rys.4.53. Mikrostruktura próbki nr 1 (feryt z małą ilością perlitu, wtrącenia niemetaliczne, wielkość ziarna 8 według PN-84/H-04507/01)

5. Badania uzupełniające właściwości złączy

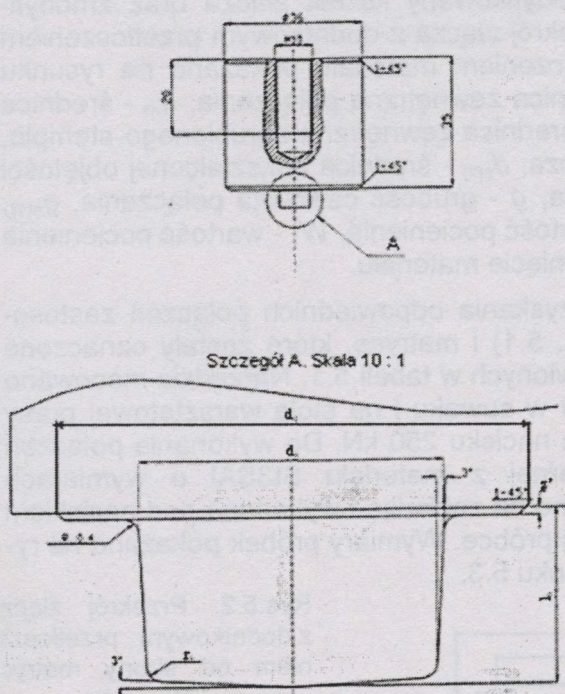
5.1. Badania zmodyfikowanych złączy

Chcąc rozszerzyć zakres pracy przeprowadzono również serie badań zmodyfikowanego złącza prasowanego na zimno. Modyfikacja polegała na wykonaniu dodatkowego przetłoczenia od strony matrycy i stempla. Prawidłowo uzyskane, złącza drogą miejscowego prasowania (tłoczenia) posiadają ściśle dobrane parametry geometryczne oraz charakterystyczny kształt, który zapewnia określoną wytrzymałość. Omawiając właściwości mechaniczne połączeń wykazano uzależnienie wytrzymałości od sposobu formowania (prasowania) tzw. zamka. Wobec powyższego podjęto próbę modyfikacji narzędzi i postaci geometrycznej jednego ze złączy, w celu uzyskania większej wytrzymałości.

Zmiana kształtu ścianki bocznej powinna spowodować zwiększenie wytrzymałości całego złącza. Najprostszym sposobem na zrealizowanie takiego założenia jest zwiększenie grubości ścianki bocznej złącza przez „dostarczenie” w procesie jego kształtowania dodatkowego materiału, który powodowałby jej pogrubienie. Dodatkowy materiał może być „dostarczany” z okolic przylegających do złącza, dzięki odkształceniu plastycznemu części blachy znajdującej się w obrębie złącza.

Jednak wstępnie pocieniony materiał wokół złącza posiada mniejszą grubość, co powoduje, że należy tak dobrać parametry obróbki, aby w miejscu pocienionym materiał podlegał znacznemu umocnieniu, dzięki odkształceniom plastycznym. Wykonanie złącza z dodatkowym odkształceniem plastycznym jest możliwe na kilka sposobów. Najprostszym sposobem jest zastosowanie dodatkowego przetłoczenia w złączu od strony stempla lub matrycy, lub też uformowanie takich samych kształtów z obu stron połączenia.

Na podstawie serii badań i obliczeń zaprojektowano narzędzia o geometrii odpowiedniej (niezbędnej) do uzyskania tego rodzaju, nowego kształtu złącza z dodatkowym przetłoczeniem, dla którego wymiary przedstawiono na rysunku 5.1, a oznaczenia literowe i wymiary zestawiono w tabeli 5.1.



Rys.5.1. Kształt zmodyfikowanego stempla do wykonania złącza z dodatkowym przetłoczeniem

d_q – średnica zewnętrzna zgrubionego stempla, d_s – średnica stempla (średnica wewnętrzna złącza), l_s – długość stempla, z' – wysokość pierścienia, r_s – promień stempla

W rezultacie przeprowadzonej analizy geometrycznej, jak i wyników badań prowadzonych wyrywkowo na tego typu złączach [65] dobrano odpowiednie parametry geometryczne narzędzi do ich wykonania. Geometrię tych narzędzi dobrano tak, aby wykonane nimi złącza charakteryzowały się większą wytrzymałością, a zastosowane siły nacisku stempla F_{max} nie przekraczały realnych wartości możliwych do uzyskania na posiadanej prasie hydraulicznej.

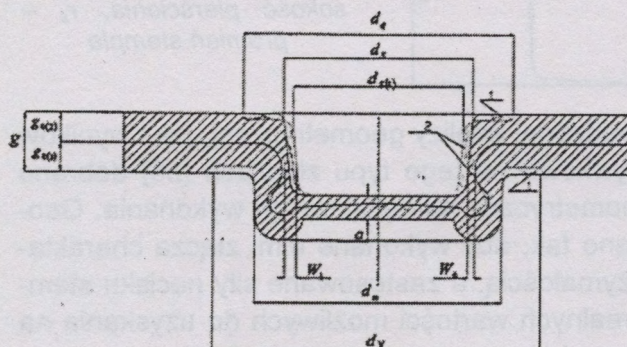
Parametry geometryczne stempla i matrycy do wykonania złącza z dodatkowym przetłoczeniem

Tabela 5.1

Numer stempla	2z	3z	4z	5z	Numer matrycy	1z
d_s [mm]	7,6	7,4	8,2	7,6	d_m [mm]	12,0
d_q [mm]	13,2	12,2	12,6	13,2	d_y [mm]	15,0
r_s [mm]	0,4	0,4	0,4	0,4	r_m [mm]	0,5
l_s [mm]	4,8	4,8	4,8	4,8	l_m [mm]	2,8
z' [mm]	0,2	0,35	0,2	0,4	z' [mm]	0,2

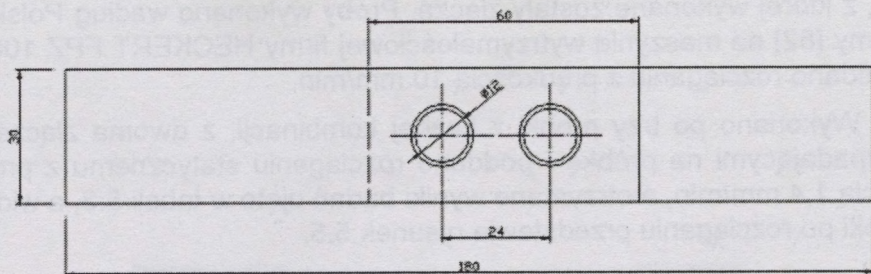
Podstawą do wyznaczania geometrii narzędzi kształtujących zmodyfikowane złącze była przeprowadzona analiza przemieszczenia materiału blachy w przewidywane miejsca w złączu. Należało przy tym uwzględnić odpowiednio zmodyfikowany kształt złącza oraz zmodyfikowany kształt narzędzi. Przekrój złącza z dodatkowym przetłoczeniem i przypuszczalnym przemieszczeniem materiału pokazano na rysunku 5.2, gdzie d_y - całkowita średnica zewnętrzna połączenia, d_m - średnica zewnętrzna połączenia, d_q - średnica zewnętrzna zgrubionego stempla, d_s - średnica wewnętrzna złącza, $d_{s(1)}$ - średnica odkształconej objętości blachy w wyniku przetłoczenia, g - grubość całkowita połączenia, $g_{o(1)}$, $g_{o(2)}$ - grubości blach, W_0 - wartość pocienienia, W_1 - wartość pocienienia powiększona o dodatkowe płynięcie materiału.

Do wykonania złączy i uzyskania odpowiednich połączeń zastosowano narzędzia - stempel (rys. 5.1) i matrycę, które zostały oznaczone według parametrów przedstawionych w tabeli 5.1. Narzędzia mocowano za pomocą specjalnej oprawy w suwaku i na stole warsztatowej prasy hydraulicznej o maksymalnym nacisku 250 kN. Do wykonania połączeń użyto próbek z blachy czarnej z materiału St3SAI o wymiarach 30x120x1,5 mm. Próbki łączono na zakładkę i wykonano pod naciskiem prasy po dwa złącza na jednej próbce. Wymiary próbek pokazano na rysunku 5.2, a ich widok na rysunku 5.3.

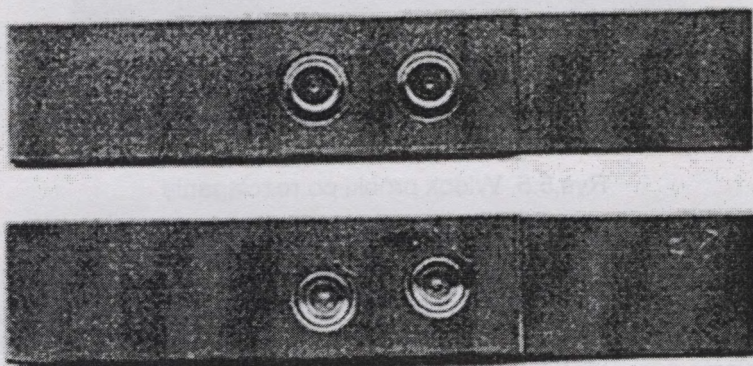


Rys.5.2. Przekrój złącza z dodatkowym przetłoczeniem od strony matrycy i stempla

1 - obszar odkształcony przez wprowadzenie zgrubienia pierścieniowego w matrycy i stemple, 2 - przypuszczalny obszar płynięcia materiału dzięki zastosowaniu przetłoczenia w złączu



Rys.5.3. Próbkki połączeń dla rozciągania złącz



Rys.5.4. Widok badanych próbek.

W próbach doświadczalnych wykonania połączeń zastosowano różną kombinację kształtu narzędzi przedstawioną w tabeli 5.2. W tabeli tej przedstawiono również przyjęte wartości siły użytej do wykonania określonego złącza.

Zastawienie zastosowanych narzędzi i wartości sił nacisku stempla F_{max}

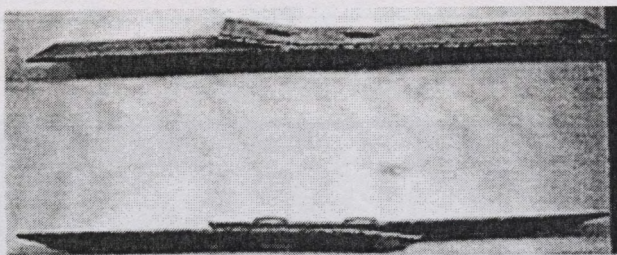
Tabela 5.2

Nr matrycy-stempla	d_s [mm]	d_m [mm]	l_s [mm]	l_m [mm]	F_{max} [kN]
1z-2z	7,6	12,0	4,8	2,8	170,0
1z-4z	8,2	12,0	4,8	2,8	170,0
1z-3z	7,4	12,0	4,8	2,8	170,0
1z-5z	7,6	12,0	4,8	2,8	180,0

Przed przystąpieniem do wyznaczenia wytrzymałości uzyskanych złącz, podobnie jak poprzednio, poddano badaniom na rozciąganie bla-

chy, z której wykonane zostały złącza. Próby wykonano według Polskiej Normy [82] na maszynie wytrzymałościowej firmy HECKERT FPZ 100/1 i poddano rozciąganiu z prędkością 10 mm/min.

Wykonano po trzy próbki z każdej kombinacji, z dwoma złączami przypadającymi na próbkę i poddano rozciąganiu statycznemu z prędkością 1,4 mm/min, a otrzymane wyniki badań ujęto w tabeli 5.3, a widok próbki po rozciąganiu przedstawia rysunek 5.5.



Rys.5.5. Widok próbki po rozciąganiu

Na podstawie wyników doświadczalnych można zauważyć, że wytrzymałość złącz zależy od geometrii i wymiarów zastosowanych narzędzi. W zależności od zastosowanych matryc, złącza wykazywały różną wytrzymałość (tabela 5.3). Można zauważyć, że wzrost wytrzymałości jest mniejszy przy większych średnicach stempli, a większy przy mniejszych średnicach stempli z zastosowaniem matryc z dodatkowym przetłoczeniem. Analizując wyniki zestawione w tabeli 5.3, można przyjąć, że złącza o większej średnicy stempla, niezależnie od zastosowania dodatkowego przetłoczenia w złączu, wykazują większą wytrzymałość w próbie rozciągania. Złącze o najwyższej wytrzymałości wykonane stemplem o średnicy 8,2 mm, ma wytrzymałość wyższą o 10,7% od złącza o najwyższej wytrzymałości wykonanego stemplem o średnicy 7,6 mm i 20,8% od złącza wykonanego stemplem o średnicy 7,4 mm.

Na podstawie wyników próby rozciągania można zauważyć, że złącza z dodatkowym przetłoczeniem zastosowanym po obu stronach (od strony matrycy i stempla) mają większą wytrzymałość od poprzednich, jednak jest to wynik niepewny, ponieważ złącza te przy największych średnicach stempli nie poprawiły swej wytrzymałości w porównaniu do złączy bez dodatkowego przetłoczenia. Natomiast w złączach z dodatkowym przetłoczeniem zauważalny jest wzrost wytrzymałości, przy zastosowaniu mniejszej średnicy stempla. Przez zastosowanie przetłoczenia o większej wysokości od strony stempla możliwe jest zwiększenie wytrzymałości, czego dowodem jest np. złącze 1z-5z, które przy zachowaniu tych samych wymiarów geometrycznych co wyżej wymienione złącza i przy zastosowaniu wyższej wartości przetłoczenia

zwiększyło swą wytrzymałość w stosunku do złącza 1z-2z o 9,6%, a od złącza tradycyjnego o 27%. Zakładano poprzednio, że wraz ze wzrostem średnicy stempla rośnie wytrzymałość takiego złącza, lecz przy zastosowaniu dodatkowego przetłoczenia w stemple wytrzymałość ta rośnie tylko do określonej granicy. Można przypuszczać, że zastosowanie stempla o średnicy 8,2 mm nie pozwala na „napłynięcie” dodatkowej ilości materiału odkształconego w kierunku do ścianek bocznych złącza pomimo zastosowaniu dodatkowego przetłoczenia, co nie powoduje wyraźnego wzrostu wytrzymałości.

Przykładowe wyniki prób złączy zmodyfikowanych na rozciąganie

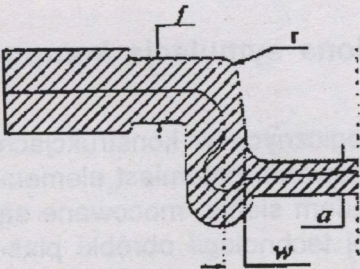
Tabela 5.3

Numer próby	Numer matrycy-stempla	Liczba złączy	Grubość blach złącza [mm]	Siła odp. granicy plastyczności F_{ze} [kN]	F_{ze} śr. [kN]	Maksymalna siła zrywająca F_{zm} [kN]	F_{zm} [kN]	Uwagi
2.1.1	1z-2z	2	1,5+1,5	10,64	10,64	11,20	11,25	trudno wyjąć próbkę z matrycy
2.1.2				10,69		11,36		
2.1.3				10,60		11,20		
2.2.1	1z-4z	2	1,5+1,5	11,12	10,77	11,84	11,49	-
2.2.2				10,64		11,44		
2.2.3				10,56		11,20		

Dodatkowo dla kilku wybranych złączy wykonano przekroje, które pokazano na rysunku 5.6, a formę geometryczną złącza pokazano na rysunku 5.7. W tabeli 5.4. zestawiono wybrane wymiary geometryczne.



Rys.5.6. Przekroje badanych próbek



Rys.5.7. Główne parametry geometryczne przekroju złącza

a – grubość całkowita dna, w – wartość pocienienia po stronie stempla, r – promień zaokrąglenia, f – grubość złącza z dodatkowym przetłoczeniem

Wymiary geometryczne złącz

Tabela 5.4

Numer próbki	Nr matrycy - stempla	w [mm]	a [mm]	f [mm]	r [mm]
1.1	11-4.1	0,64	0,88	2,89	1,8
5.1	1z-4.1	0,61	0,77	2,77	1,0
6.1	1z-5z	0,71	0,84	2,36	1,6
7.1	11-5z	0,72	0,88	2,60	2,0
3.2	11-4z	0,68	0,79	2,78	1,4

Wprowadzenie dodatkowej operacji przetłoczenia w stemplach o średnicy 7,4 i 7,6 mm zwiększyło znacznie wytrzymałość tych złączy dzięki napływowi dodatkowego materiału w kierunku do ścianek złącza i zmianę jego geometrii (tabela 5.4), lecz ich wytrzymałość była nadal mniejsza niż złączy o większej średnicy stempla bez zastosowania dodatkowego przetłoczenia. Należy przypuszczać, że optymalną średnicą stempla z dodatkowym przetłoczeniem jest średnica zawarta w przedziale 7,6–8,2 mm.

Z przeprowadzonych badań wynika, że dodatkowe przetłoczenie w narzędziu, szczególnie w stemplu, zwiększa wytrzymałość złącz. Jednak przetłoczenie to w przeprowadzonych badaniach nie wszędzie spełnia swoją rolę. W analizie teoretycznej założono, że promień r (rys. 5.7.) jest mały i można go pominąć przy obliczaniu przemieszczanej objętości materiału. W rzeczywistości promień ten jest na tyle duży (tabela 5.4), że przetłoczenie w niektórych złączach (o małych rozmiarach karbu) przypuszczalnie hamuje dodatkowe płynięcie materiału w kierunku do ścianek złącza. Należałoby zatem przy projektowaniu narzędzi z dodatkowym przetłoczeniem uwzględnić promień r w obliczeniach.

Okrągłe przetłoczenia na powierzchni łączonych elementów (pierzścieniowe karby) pozwalają na wizualną ocenę prawidłowości wykonanego połączenia, to znaczy użycia dostatecznej siły prasowania. Stanowi to dość prostą i praktyczną metodę oceny prawidłowości przeprowadzenia procesu prasowania, a tym samym jakości złącza.

5.2. Analiza trwałości połączeń określona symulacją komputerową

W stosowanych rozwiązaniach technologicznych w konstrukcjach maszyn dominują połączenia nierozłączne spawane, natomiast elementy korpusowe nieprzemieszczające się względem siebie, mocowane są najczęściej połączeniami śrubowymi. Rozwój technologii obróbki plastycznej daje nowe możliwości wykorzystania tworzywa konstrukcyjnego.

W tym przypadku założeniem jest możliwość uzyskania połączenia z materiału rodzimego bez oddziaływania procesów cieplnych.

Proponowane rozwiązanie ma spowodować powstanie pola naprężenia w złączu i najbliższym jego otoczeniu. Pole to ma być zbliżone do pól powstających w połączeniu nitowanym czy też śrubowym. Tego rodzaju połączenia powodują dociskanie blach do siebie, a tarcie pomiędzy blachami i elementami łączonymi uniemożliwia ich wzajemne przemieszczanie. W rozwiązaniach konstrukcyjnych łatwiejsze jest stosowanie blach cienkich w miejscach, gdzie przenoszą one naprężenia rozciągające, gdyż w przypadku naprężeń ściskających możliwa jest utrata stateczności konstrukcji, co wymaga przemyślanego wprowadzania różnego rodzaju usztywnień. Głębokie przetłoczenie blach może tworzyć węzeł konstrukcyjny o sztywności większej od blachy pojedynczej, a jednocześnie nie dochodzi tu do wzajemnego przenikania się materiałów.

Połączenie kształtowe może być stosowane do tworzenia węzłów konstrukcyjnych, w których nie jest wymagane uzyskiwanie szczelnego połączenia blach. Jednak samo połączenie prasowane przy poprawnym przebiegu procesu przetłaczania zapewnia nie tylko szczelność, ale i odpowiednią wytrzymałość złącza i sztywność całej konstrukcji.

Połączenie to stanowi również obszar zastosowania dla budowy elementów poddanych procesom korozyjnym, gdyż istnieje możliwość stosowania materiałów pokrywanych powłokami antykorozyjnymi, jak np. cynkowanie i prowadzenie na tych blachach wyżej opisanych procesów technologicznych, bez ich uszkodzenia, umożliwiającego powstawanie ognisk korozji.

Ograniczeniem zakresu stosowania tego procesu są jedynie warunki technologiczne, jakie muszą być spełnione, dla uzyskania poprawności pracy matrycy i stempla. Ponadto musi być zapewniony dostęp dla narzędzi gwarantujący dużą pewność podparcia, jak i możliwość szybkiego wyprowadzenia ich po przeprowadzonej operacji. Połączenia tego typu mogą być stosowane głównie w elementach o konstrukcji otwartej.

Innym ograniczeniem okazuje się grubość łączonych blach, a kojarzone pary powinny posiadać zbliżoną grubość, a ich łączna grubość powinna być zawarta w granicach 1,0 do 12,0 mm. Materiały łączone muszą charakteryzować się znaczną plastycznością i zdolnością do tworzenia wyoblen gwarantujących odpowiednią nośność połączenia i całej konstrukcji.

Powyższe uwagi odnoszą się do złącz punktowych kołowych. W przypadku połączeń kształtowych brak jest dotychczas informacji

o sposobie ich pracy i trwałości w trakcie oddziaływania obciążeń poszczególnych ich elementów, co ma szczególnie wpływ na nośność konstrukcji.

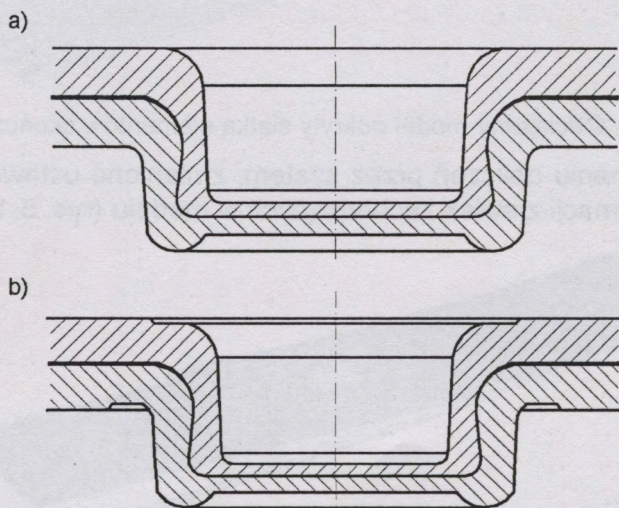
Jak już opisano połączenia prasowane powstają w wyniku działania sił, powodujących wystąpienie pól naprężeń o wartości przekraczającej granicę plastyczności, czego skutkiem jest powstanie pól odkształceń trwałych. Cechą szczególną tego procesu jest tworzenie się ścianki o zmiennej grubości, o takim ukształtowaniu, że przetłoczenia utrudniają przemieszczanie się blach względem siebie. W stosunku do złącz dotychczas stosowanych jest to rozwiązanie najbardziej technologicznie zbliżone do np. rozwałcowywania zakończeń rur w wymiennikach ciepła [68]. W technologii tej nie stosowano jednak złożonego przetłoczenia kształtowego, gdyż sposób jego pracy ma za zadanie utrzymać jedynie szczelność.

O skuteczności stosowanego połączenia decyduje poprawność wykonania, jak i korzystne charakterystyki wytrzymałościowe. Dla oszacowania parametrów połączenia prowadzone są stale badania doświadczalne, jak też podejmowane są próby zbudowania teoretycznych modeli obliczeniowych przy założeniu, że połączenie to przyjmuje w swojej konstrukcji cechy połączeń kształtowych i skurczowych. Proces prasowania (tłoczenia) powoduje powstanie pól naprężeń, które utrzymują trwałe stałe pole, dzięki powstającym pogrubieniom i pocienieniom miejscowym blach utrudniającym zmianę ich położenia (rys. 5.8 - zamek).

Spośród systemów do wirtualnego projektowania szczególnie korzystnie wyróżnia się program „I- DEAS- Master Series™”, który jest pakietem w pełni zintegrowanym, obejmuje zakresem działania poszczególne fazy pracy nad opracowaniem nowego wyrobu od modelu, aż do zaprojektowania narzędzi niezbędnych do produkcji tego wyrobu z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Jedną z wielu zalet systemu jest pełna integracja (jedna wspólna baza danych dla wszystkich użytkowników) oraz możliwość wprowadzania zmian i ich jednocześniej aktualizacji na każdym etapie procesu projektowania; symulowanie użytkowania projektowanej (obciążonej) części. Konstrukcja obiektu może być analizowana pod względem wytrzymałościowym, technologicznym i materiałowym. Program pozwala na obserwacje całego obiektu lub jego dowolnie wybranego fragmentu przy dowolnym ustawieniu układów współrzędnych X, Y, Z. Ponadto istnieje możliwość obserwacji wszelkich zjawisk zachodzących w modelu w dowolnym przekroju. W czasie modelowania można modyfikować zarówno stworzoną geometrię, jak i założone warunki brzegowe. Wyniki modelowania przedstawione są w postaci map i pól przemieszczeń oraz naprężeń.

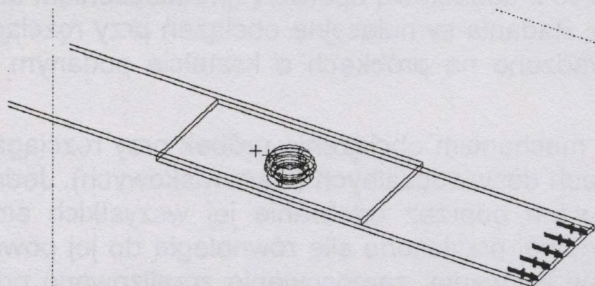
Symulacji obciążeń poddano omówione poprzednio dwie odmiany połączeń (rys. 5.8), mianowicie: połączenie prasowane na zimno (zwykłe) i połączenie z dodatkową operacją (przetłoczeniem od strony matrycy i stempla). Badania symulacyjne obciążeń przy rozciąganiu i wyrwaniu przeprowadzono na próbkach o kształcie podanym w rozdziale 4 i 5.1.

Przyjęto mechanizm obciążenia próbek przy rozciąganiu, podobnie jak w badaniach doświadczalnych (stanowiskowych). Jedna blacha została zamocowana poprzez odebranie jej wszystkich stopni swobody, a do drugiej dolnej przyłożono siłę równoległą do jej powierzchni. Natomiast w próbie wyrwania, zamocowanie zrealizowano poprzez odebranie wszystkich stopni swobody dzięki wprowadzeniu dodatkowego sworznia osadzonego w tulei dolnej, a do drugiej części przyłożono siłę prostopadłą do powierzchni blachy. W ten sposób przedstawione złącza poddano symulacji obciążeniu przez rozciąganie, jak i wyrwanie. Tok postępowania dla drugiej odmiany złączy (z dodatkowym przetłoczeniem) przyjęto, podobnie jak w przypadku pierwszej symulacji z pewnymi jednak modyfikacjami. Efektami przeprowadzonej symulacji metodą elementów skończonych były uzyskane mapy przemieszczeń i naprężeń. W pierwszej kolejności przeprowadzono symulacje złączy pojedynczych zgodnie z rysunkiem 4.22 i podwójnych rysunek 4.31. Poszczególne modele przedstawiono w układzie współrzędnych X, Y, Z utwierdzone i obciążone. Poddano wizualizacji zjawiska zachodzące w złączu, rozkład pól naprężeń i odkształceń w najbliższym otoczeniu oraz zachowanie się konstrukcji złącza.



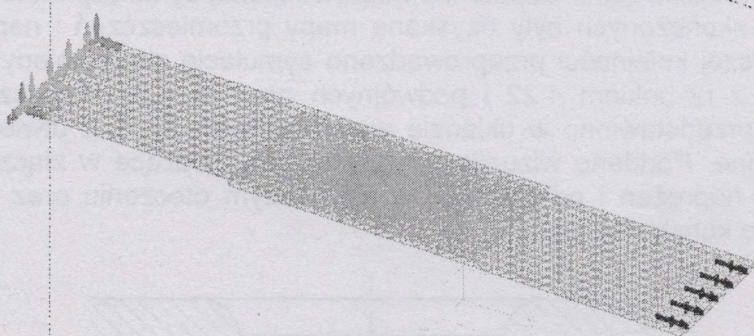
Rys.5.8. Kształty połączeń uwzględnione w symulacjach:
a) połączenie prasowane, b) połączenie prasowane z dodatkowym przetłoczeniem od strony matrycy i stempla

Na rysunku 5.9 przedstawiono izometryczny widok modelu obciążonego pojedynczego złącza.



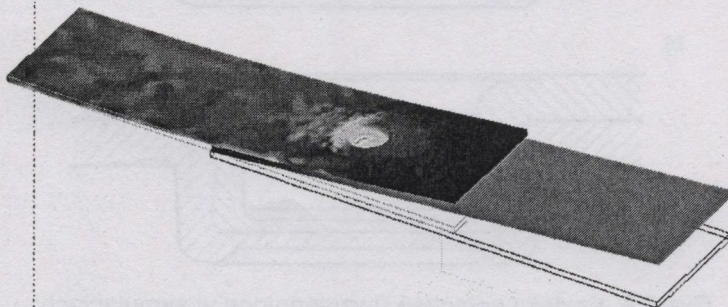
Rys.5.9. Model symulacyjny, widok izometryczny obciążonego modelu z zaznaczonymi krawędziami

Na tak przyjęty model naniesiono siatkę elementów skończonych częściowo zagęszczoną w miejscach gdzie ścianki modelu mają mniejszą grubość lub występują małe promienie zaokrągłeń lub przejść (podobnie jak to występuje w rzeczywistości – rys. 5.10).

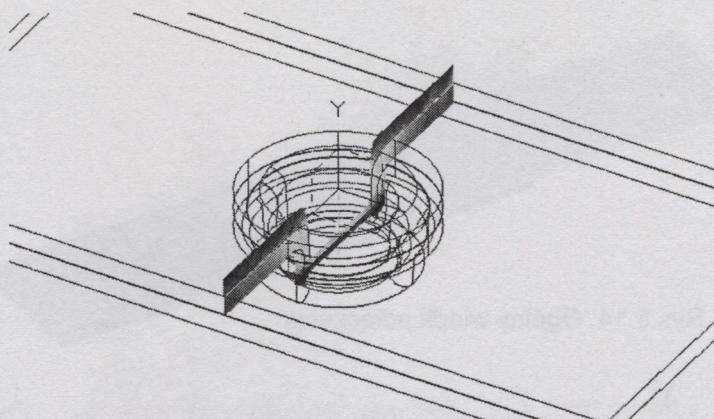


Rys.5.10. Obciążony model pokryty siatką elementów skończonych

Po wykonaniu obliczeń przez system, zmieniono ustawienie w celu pokazania animacji zjawisk zachodzących w modelu (rys. 5.11 i 5.12).

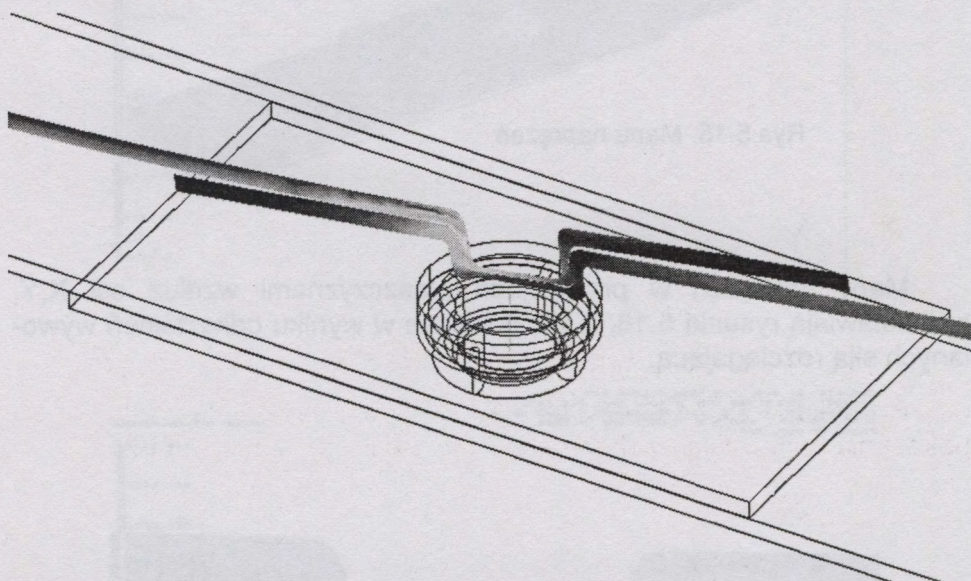


Rys.5.11. Widok naprężeń powstałych w obciążonym złączu (pojedynczym)



Rys.5.12. Wizualizacja naprężeń w przekroju poprzecznym pojedynczego złącza

Tak umieszczony układ pozwoli wykonać przekrój w dwóch płaszczyznach. Jeżeli osie muszą mieć inny kierunek i zwrot, obraz można skorygować. Prawidłowo centralne umieszczenie układu współrzędnych przedstawiają rysunki 5.13 i 5.14.

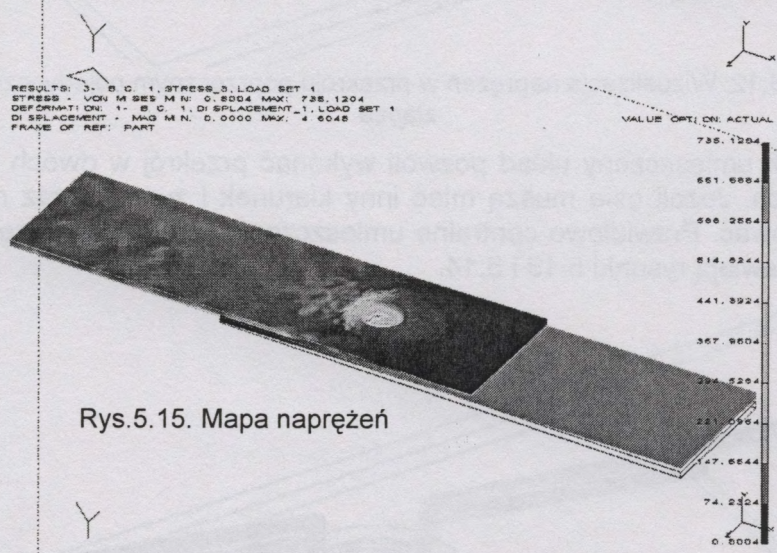


Rys.5.13. Wizualizacja naprężeń w przekroju wzdłużnym złącza pojedynczego

Efekty symulacji przedstawione są jako mapy naprężeń (w widoku - przekroju wzdłużnym i poprzecznym) oraz przemieszczeń występujących podczas próby rozciągania. Ogólny widok złącza zadaną siłą obciążającą wynoszącą 3953 N przedstawia rysunek 5.14, a mapę naprężeń wynikowych rysunek 5.15.

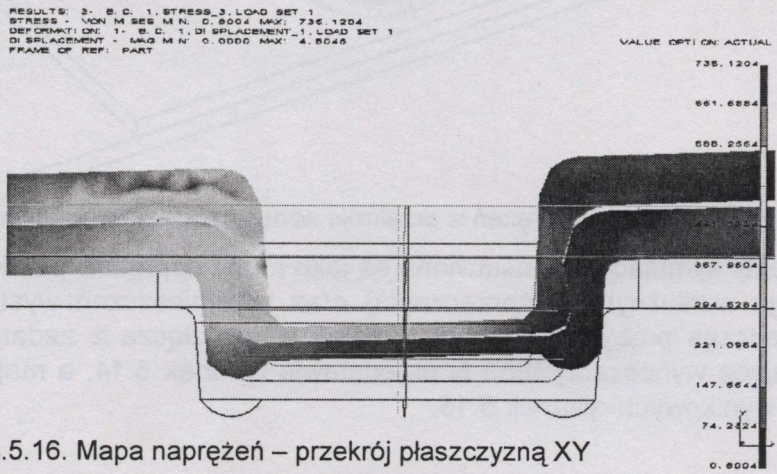


Rys.5.14. Ogólny widok połączenia



Rys.5.15. Mapa naprężeń

Mapy naprężeń w przekrojach płaszczyznami wzdłuż osi X,Y, przedstawiają rysunki 5.16, 5.17, powstałe w wyniku odkształceń wywołanych siłą rozciągającą.



Rys.5.16. Mapa naprężeń – przekrój płaszczyzną XY

Mapę odkształceń oraz pola odkształceń wzdłuż osi X,Y,Z przedstawia rysunek 5.17 i 5.18.



Rys.5.17. Pole odkształceń wzdłuż osi X

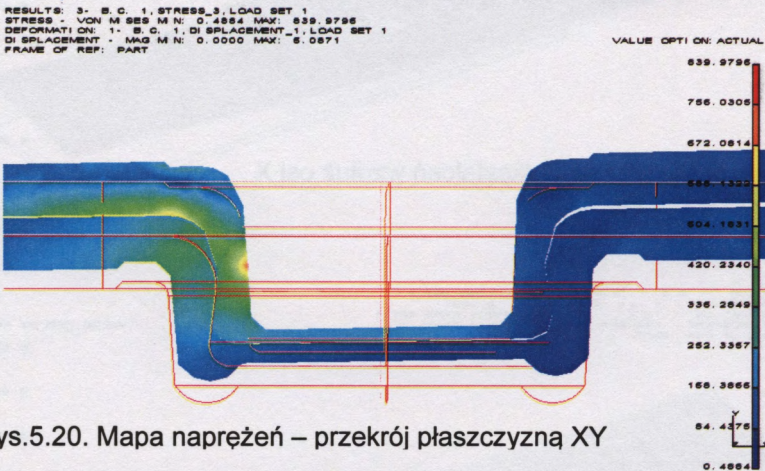


Rys.5.18. Pole odkształceń wzdłuż osi Z

Przypadek symulacji drugiego modelu złącza z dodatkowym przetłoczeniem (zgodnie z rys. 5.3) od strony matrycy i stempla, wywołującym nieznaczne zwiększenie grubości ścianek „miseczek”, obrazują mapy naprężeń w widoku przekroju wzdłużnego. Ze względu na stosunkowo niewielkie wartości naprężeń osiąganych w przekroju poprzecznym (widoczne w pierwszej symulacji) ich wizualizację pominięto. Odkształcenia są zbliżone do odkształceń poprzedniego modelu, więc je także pominięto. Siłę obciążającą złącze przyjęto bez zmian, równą 3953 N. Ogólny widok złącza przedstawia rysunek 5.19, a na rysunku 5.20 przedstawiono mapę naprężeń rozciągających w przekroju płaszczyzny X,Y.

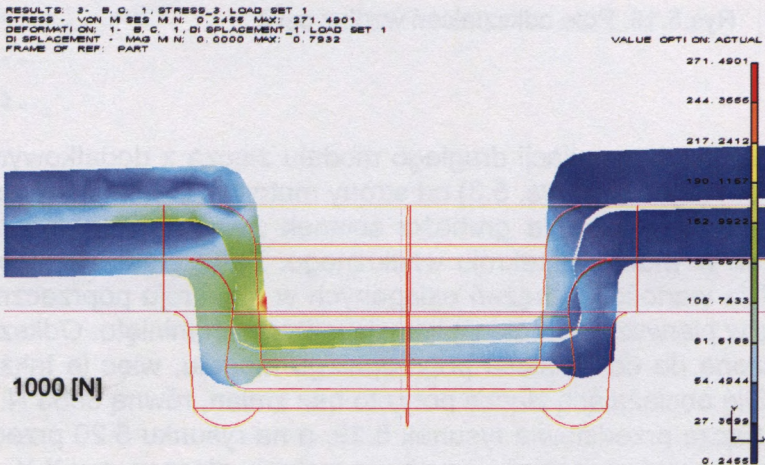


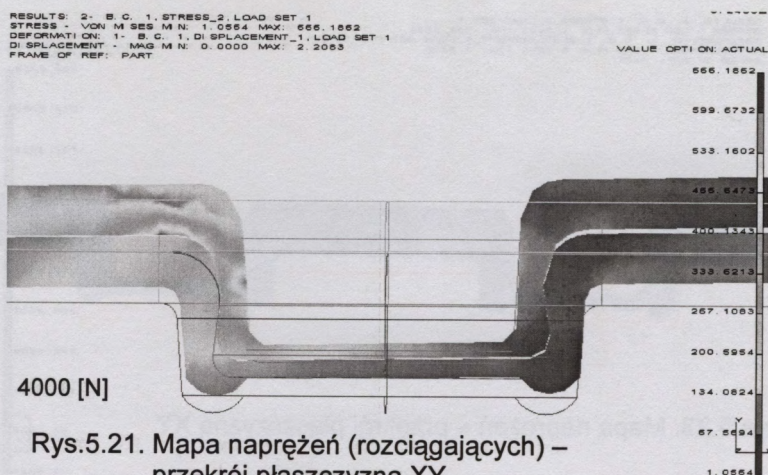
Rys.5.19. Ogólny widok połączenia



Rys.5.20. Mapa naprężeń – przekrój płaszczyzn XY

Dla dokładnego zobrazowania „mechaniki pracy” połączenia przeprowadzono symulacje obciążenia złącza prasowanego na zimno (według rys. 5.22.) siłą stopniowaną co 1000 N. Wizualizację przeprowadzono jedynie dla naprężeń. Na rysunku 5.21 przedstawiono zmianę mapy naprężeń wynikowych w zależności od narastania siły odkształcającej w przekrojach płaszczyzn wzdłuż osi X,Y.





Rys.5.21. Mapa naprężeń (rozciągających) –
przekrój płaszczyzną XY

Celem bardziej wyraźnego zobrazowania procesu postanowiono poddać analizie komputerowej również złącze podwójne według rysunku 4.31. Złącze takie przenosi prawie dwukrotnie większą siłę obciążenia od pojedynczego. Szczególną uwagę zwrócono na rozkład naprężeń wynikowych oraz naprężeń osiowych w przekroju wzdłużnym wynikającym z przemieszczenia elementów.

Siłę obciążającą złącze przyjęto równą 7667 N. Na rysunku 5.22 przedstawiono ogólny widok analizowanego złącza.

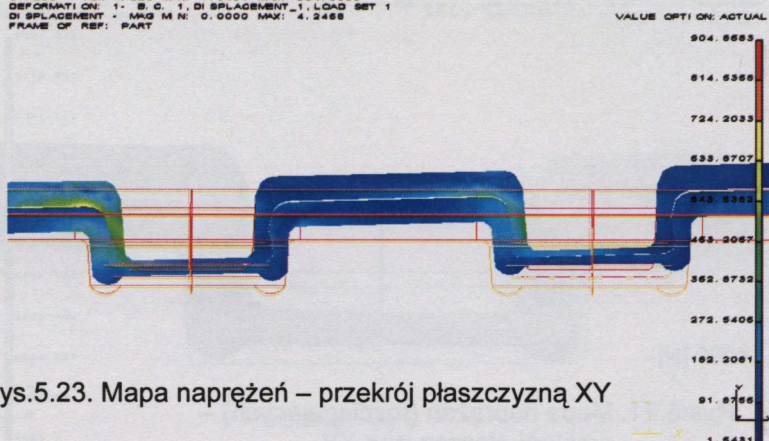


Rys.5.22. Ogólny widok złącza

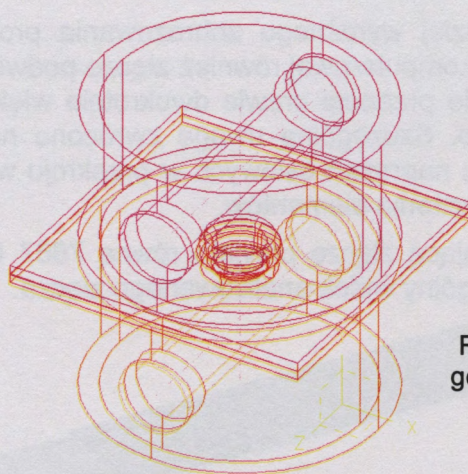
Mapę naprężeń w tym naprężeń przekrojonych płaszczyzną X-Y przedstawia rysunek 5.23.

W celu sprawdzenia wytrzymałości połączenia na wrywanie, podobnie jak w badaniach doświadczalnych, postanowiono dokonać wizualizacji zaprojektowanego modelowego złącza zgodnie z rysunkiem 4.42. W tym przypadku należy narysować model złącza zgodnie z poprzednią instrukcją (różnicę między tym a poprzednim złączem stanowi inny wymiar blach zależny od rodzaju przeprowadzanej próby w tym przypadku jest to próba wrywania). Rysunek 5.24 przedstawia model próbki poddawanej wrywaniu, a powtarzając wszystkie czynności zgodnie z poprzednimi krokami otrzymujemy model połączenia.

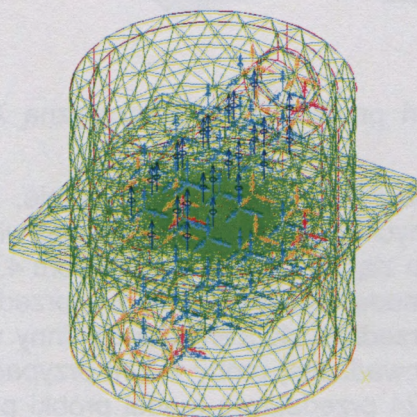
RESULTS: 3- S.C. 1, STRESS, 3, LOAD SET 1
 STRESS - VON MISES M N: 1.5431 MAX: 904.6663
 DEFORMATION: 1- S.C. 1, DI SPLACEMENT, 1, LOAD SET 1
 DI SPLACEMENT - MAX M N: 0.0000 MAX: 4.2468
 FRAME OF REF: PART



Rys.5.23. Mapa naprężeń – przekrój płaszczyzną XY



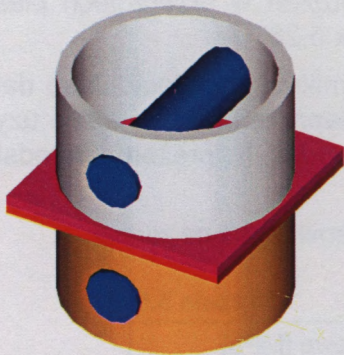
Rys.5.24. Widok gotowego modelu



Rys.5.25. Model złącza poddanego wyrwaniu (pokryty siatką)

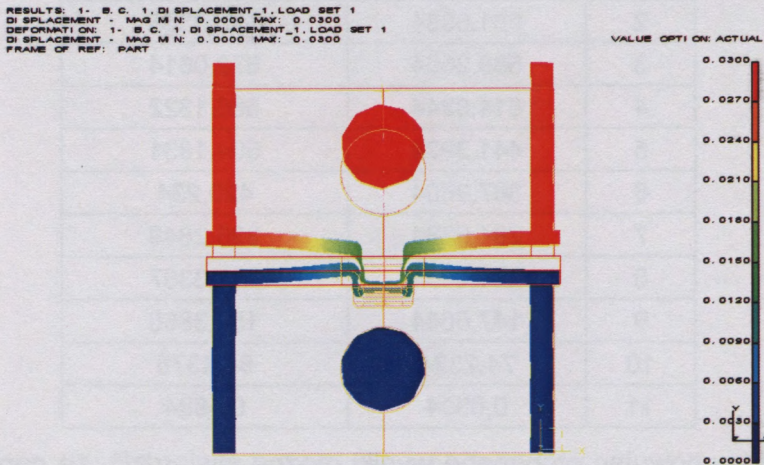
Zaznaczając płaszczyznę górnego sworznia, a następnie przykładając do niej siłę odpowiednio ukiepunkowaną – system pokaże model utwierdzony i obciążony. Następnie na model nałożono siatkę tak jak w modelu poprzednim, pamiętając o jego podziale na partycje, co umożliwia miejscowe zagęszczenie siatki.

Model gotowy do obliczeń z naniesioną nań siatką przedstawia rysunek 5.25.

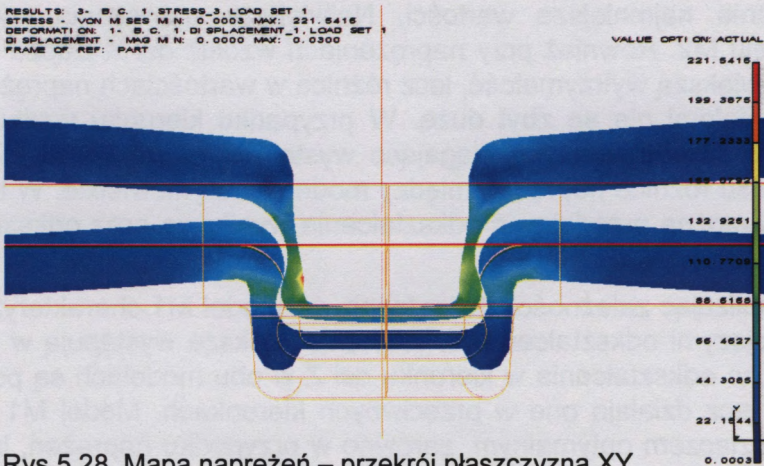


Rys.5.26. Ogólny widok połączenia

Dalszy tok postępowania (ustalenie kontaktu oraz rozpoczęcie obliczeń) przeprowadzony został dokładnie tak samo, jak i poprzednio. Również sposób wizualizacji zjawisk, które zaszły w modelu złącza nie odbiega od poprzednio omówionego. Poniżej przedstawione zostały mapy odkształceń oraz naprężeń złącza poddanego próbie wrywania. Rysunek 5.26 przedstawia widok ogólny złącza, który obciążono siłą 500 N, a pole odkształceń przedstawia rysunek 5.27.



Rys.5.27. Pole odkształceń



Rys.5.28. Mapa naprężeń – przekrój płaszczyzną XY

Mapę naprężeń wynikowych oraz naprężeń w przekrojach płaszczyzn wzdłuż osi X,Y,Z, przedstawia rysunek 5.28.

Poniżej przedstawiono interpretację wyników symulacji. Jako dane do wykonania wykresów przyjęto wartości naprężeń i odkształceń uzyskanych na skalach wynikowych każdego z modeli. Naprężenia przedstawiono w tabeli 5.5.

**Naprężenia wynikowe dla złączy prasowanych na zimno
M1 i M2**

Tabela 5.5

Lp.	Naprężenia wynikowe [MPa]	
	Model M1	Model M2
1	736,1204	839,9796
2	661,6884	756,0306
3	588,2664	672,0614
4	514,8244	588,1322
5	441,3924	504,1831
6	367,9604	420,234
7	294,5284	336,2849
8	221,0954	252,3367
9	147,6644	156,3866
10	74,2324	84,4376
11	0,8004	0,4884

Podsumowując otrzymane wyniki można stwierdzić, że naprężenia wynikowe i naprężenia wzdłuż osi Y w modelu złącza M1 osiągają zdecydowanie najmniejsze wartości. Największe naprężenia występują w modelu M2. Również przy naprężeniach wzdłuż osi X złącze M1 wykazuje większą wytrzymałość, lecz różnice w wartościach naprężeń między modelami nie są zbyt duże. W przypadku kierunku wzdłuż osi Z największe naprężenia rozciągające występują w modelu M2 i w tym przypadku różnice naprężeń między modelami są niewielkie. W ten sam sposób można przedstawić odkształcenia wynikowe oraz odkształcenia wzdłuż osi X,Y,Z.

Analizując zależności stwierdzono, że model M1 charakteryzuje się najmniejszymi odkształceniami. Znacznie większe występują w modelu M2. Tylko odkształcenia w kierunku osi Z w obu modelach są porównywalne, lecz działają one w przeciwnych kierunkach. Model M1 wydaje się być złączem optymalnym, zarówno w przypadku naprężeń, jak i odkształceń. Wobec powyższego można przyjąć, że wyniki symulacji kom-

puterowych potwierdziły słuszność przyjętych założeń i wyników badań zasadniczych – stanowiskowych. Model złącza M1 obciążany został kolejno siłami 1000, 2000, 3000, 4000 N. Bazę do wykonania wykresów mogą stanowić skale odkształceń i naprężeń uzyskane w symulacjach (tabela 5.6).

Odształcenia wynikowe dla siły stopniowanej

Tabela 5.6

Odształcenia wynikowe [mm]				
Lp.	Siła obciążająca złącze [N]			
	1000	2000	3000	4000
1	0,7932	1,6158	1,6649	2,2083
2	0,7139	1,4542	1,3994	1,9875
3	0,6346	1,2927	1,2439	1,7667
4	0,5552	1,1311	1,0885	1,5458
5	0,4769	0,9695	0,933	1,325
6	0,3966	0,8079	0,7775	1,1042
7	0,3173	0,6463	0,622	0,8833
8	0,238	0,4847	0,4665	0,6625
9	0,1586	0,3232	0,311	0,4417
10	0,0793	0,1616	0,1555	0,2208
11	0,0	0,0	0,0	0,0

Z wyżej przedstawionych zależności wynika w jaki sposób odkształca się złącze i jak ulegają zmianie wartości naprężeń przy obciążaniu go coraz większą siłą, aż do maksymalnej wartości, którą może przenieść. Zauważyć można, że w trakcie zwiększania siły, naprężenia też rosną, lecz po przekroczeniu granicznej wartości siły, która odpowiada wartości rzeczywistej niszczenia złącza, następuje znaczna deformacja modelu, co imituje proces jego zniszczenia. Biorąc powyższe pod uwagę, przy przyjętych warunkach obciążeń, w opracowanych przypadkach można zastąpić uciążliwe i kosztowne badania stanowiskowe symulacją komputerową.

Zrealizowany program badań stanowiskowych i symulacyjnych metodą elementów skończonych pozwolił na osiągnięcie zamierzonego celu, którym było poznanie i przedstawienie niektórych zachodzących zjawisk fizycznych w nowej generacji połączeniach kształtowych wykonywanych metodą punktowego prasowania na zimno. Z przeprowadzonej symulacji wynikają właściwości wytrzymałościowe strefy przetłoczeń (na podstawie uzyskanych map), które uzależnione są nie tylko od użytej siły prasowania, ale również od geometrii narzędzi determinujących kształt złącza.

5.3. Wytyczne do projektowania połączeń i analiza ekonomiczna procesu

W celu wyznaczenia najkorzystniejszych parametrów narzędzi stwarzających warunki do powstania dostatecznie wytrzymałego złącza w tabeli 5.7 zestawiono wyniki badań wytrzymałościowych, o najkorzystniejszych wartościach, dla poszczególnych skojarzeń rodzajów blach i kształtów narzędzi, jak również podano najbardziej istotne wskaźniki określające parametry geometryczne narzędzi.

Jak wykazano poprzednio, dzięki prawidłowo dobranym parametrom geometrycznym stempla i matrycy uzyskuje się odpowiednie warunki, aby pod wpływem określonego nacisku stempla na materiał (blacha) stworzyć korzystne warunki dla wykonania wgłębień w kolejnych fazach ich kształtowania, powodujących wielokierunkowe płynięcie materiału, doprowadzających do powstania połączenia kształtowego o dużej wytrzymałości.

Narzędzia w postaci stempla i matrycy niezbędne do uzyskania połączenia o dużej wytrzymałości, które zaplanowano zastosować do połączenia części prototypowego podestu rusztowania budowlanego typu ZBMD, powinny charakteryzować się następującymi parametrami geometrycznymi:

- średnica otworu matrycy: $d_m = 12$ mm,
- głębokość otworu matrycy: $l_m = 2,8$ mm,
- promień zaokrąglenia części ciągowej matrycy $r_m = 0,5$ mm,
- rowek w dnie matrycy o głębokości 0,5 mm i szerokości 2,0-2,2 mm,
- pochylenie ścianek matrycy $4-6^\circ$ uzależnione od rodzaju skojarzonych blach, ich grubości i rodzaju zastosowanych powłok ochronnych,
- średnica stempla $d_s = 8,4$ lub $8,6$ mm w zależności od grubości łączonych blach w zakresie $g = 1,5-2,0$ mm,
- wysokość części roboczej stempla powinna być dostosowana do grubości łączonych blach w ten sposób, aby w złączu powstało dno o grubości w zakresie 0,3–0,4 łącznej grubości blach,
- promień zaokrąglenia stempla $r_s = 0,4$ mm,
- pochylenie powierzchni bocznej stempla 3° ,
- chropowatość powierzchni roboczej narzędzi powinna znajdować się w granicach $R_a = 0,8$ μm ,
- stempel i matryca mogą być wykonane ze stali narzędziowej do pracy na zimno np.: NC6, NC11 lub ze stali szybko tnącej SW7M obrobionych cieplnie do twardości 60-62 HRC.

Zestawienie najkorzystniejszych wartości wytrzymałościowych połączeń kształtowych prasowanych na zimno i głównych wskaźników narzędzi

Tabela 5.7

Nr serii i próbek	Materiał	F_{mp} blachy [kN]	F_{mz} poj. złącze [kN]	F_{mc} dla podw. złącza [kN]	F_{mwy} wyrwanie [kN]	F_{mz}/F_{mp} poj. złącze	F_{mc}/F_{mp} podw. złącze	g_1+g_2 [mm]	ds [mm]	dm/g	(dm-ds)/g	a/g	lm/g	w/g
11-4.1	Si3SAI czarna	7,11 14,22	4,98 -	- 11,80	3,13 -	0,700 -	- 0,830	1,5+1,5	8,2	4,0	1,267	0,317	0,933	0,243
11-7.1	Si3SAI czarna	7,11 14,22	4,96 -	- 12,35	3,17 -	0,698 -	- 0,868	1,5+1,5	8,6	4,0	1,133	0,430	0,933	0,207
11-4.2	Si3SAI czarna	7,11 14,22	4,35 -	- 9,98	4,42 -	0,612 -	- 0,702	1,5+2	8,2	3,429	1,086	0,420	0,933	0,163
11-6.3	Si3SAI czarna	7,40 14,80	5,88 -	- 11,47	1,26 -	0,794 -	- 0,775	2+1,5	8,2	3,429	1,086	0,446	0,933	0,231
11-7.4	10J ocynk	6,66 13,32	5,39 -	- 11,73	- -	0,809 -	- 0,881	1,5+1,5	8,6	4,0	1,133	0,333	0,933	0,207
11-4.5	10J ocynk	6,66 13,32	4,88 -	- 10,09	- -	0,733 -	- 0,757	1,5+2	8,2	3,429	1,086	0,363	0,933	0,163
11-6.6	10J ocynk	8,64 17,28	6,63 -	- 13,28	- -	0,767 -	- 0,769	2+1,5	8,2	3,429	1,086	0,346	0,933	0,266
12-6.1	Si3SAI czarna	7,11 14,22	5,21 -	- 10,83	3,33 -	0,733 -	- 0,762	1,5+1,5	8,2	4,0	1,267	0,277	1,10	0,197
12-6.4	10J ocynk	6,66 13,32	3,92 -	- 8,573	- -	0,589 -	- 0,644	1,5+1,5	8,2	4,0	1,267	-	1,10	-

F_{mp} – siła zrywająca blachę o szerokości odpowiednio pojedynczego lub podwójnego złącza ($b = 12$ mm lub 24 mm) i grubości blachy od strony wgłębienia g_1 ,

F_{mz} – siła zrywająca złącze pojedyncze lub podwójne,

F_{mwy} – siła wyrwywania złącza, prostopadła do połączonych blach,

g_1 – grubość blachy od strony stempla,

g_2 – grubość blachy od strony matrycy.

Prawidłowe projektowanie technologii połączeń mających zastosowanie dla wykonania elementów składowych dowolnego zespołu, a w tym przypadku w celu wykonania podestu rusztowania budowlanego typu ZBMD powinno obejmować następujące etapy i prace:

- Przeprowadzenie analizy celowości zastosowania połączeń prasowanych na zimno, pod względem technicznym i ekonomicznym, przystosowanej dla rozpatrywanego zespołu lub elementu konstrukcyjnego.
- Przeprowadzenie analizy możliwości zastosowania połączenia bez zmian konstrukcyjnych rozpatrywanego elementu czy zespołu, lub określenie niezbędnych i celowych zmian w konstrukcji umożliwiających wykonanie odpowiedniej liczby złącz prasowanych na zimno nie wpływających na wytrzymałość elementu.
- Określenie średnicy złączy w zależności od obciążenia, wielkości i miejsca ich wykonania, oraz liczby złącz punktowych, które należy zastosować, ze względu na niezbędną wytrzymałość łączonych elementów. Przy wyborze odpowiedniej średnicy złącza w zależności od grubości łączonych blach należy korzystać z tabeli. 2.1 (rozdział 2). Natomiast w celu określenia liczby złącz i wyznaczenia ich obciążenia należy skorzystać z tabeli 5.7 - w przypadku stosowania złącza o średnicy 12 mm dla stali St3SA1 lub 10 J. Możliwe również jest wyznaczenie liczby złącz z innych stali z przybliżoną dokładnością, na podstawie uogólnionego wskaźnika względnej wytrzymałości złącz w stosunku do wytrzymałości blachy F_{mz}/F_{mp} (tabela 5.7, kolumna 7 i 8) według następujących zasad:
 - dla części i blach łączonych więcej niż jednym złączem lub wykazujących w zastosowanej konstrukcji odpowiednią sztywność (niepodatność na wyginanie jednej z blach lub wrywanie złącza) należy przyjąć wartość wskaźnika F_{mz}/F_{mp} równą:
 - 75-83% dla blach o jednakowej grubości,
 - 75-77% dla blach o grubości różniącej się nie więcej niż 33% wówczas gdy grubsza blacha znajduje się po stronie wgłębienia,
 - 70-75% dla blach o grubości różniącej się nie więcej niż 33% wówczas, gdy cieńsza blacha znajduje się po stronie wgłębienia.
 - dla części i blach łączonych jednym złączem lub więcej niż jednym złączem, ale wykazujących w zastosowanej konstrukcji małą sztywność (podatność na wyginanie jednej z blach lub wrywanie złącza) należy przyjąć wartość ww. wskaźnika:
 - 70-80% dla blachy o jednakowej grubości,
 - 70-77% dla blach o grubości różniącej się nie więcej niż 33% wówczas, gdy grubsza blacha znajduje po stronie wgłębienia,
 - 60-70% dla blach o grubości różniącej się nie więcej niż 33% wówczas gdy cieńsza blacha znajduje się po stronie wgłębienia. W celu zweryfikowania przyjętych parametrów złącz należy jednak przeprowadzić sprawdzające próby wytrzymałości. Podobne

postępowanie można przeprowadzić dla innych średnic złączy, zwłaszcza jeżeli to dotyczy bardziej odpowiedzialnych konstrukcji.

- Przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych dla całej konstrukcji dobranych złączy z uwzględnieniem odpowiedniego współczynnika pewności konstrukcji i odporności powłok ochronnych.
- Projektowanie narzędzi do wykonania połączeń należy przeprowadzić według wytycznych zamieszczonych w rozdziale 5 lub dla innych wymiarów złącza na podstawie odpowiednich obliczeń, wzorując się na wyżej wymienionym.
- Zaplanowanie kolejności i miejsc wykonania złączy dla określonego elementu konstrukcyjnego.
- Zaprojektowanie rozmieszczenia złączy punktowych w pasie – analogicznie do zasad przyjętych przy projektowaniu połączeń nitowych.
- Zaprojektowanie odpowiednich przyrządów stacjonarnych lub przenośnych, umożliwiających wykonanie połączeń w odpowiednich miejscach łączonego elementu.
- Wyznaczenie niezbędnej siły do wykonania jednego lub kilku złączy równocześnie według przybliżonej zależności $F = n \cdot R_m \cdot \pi \cdot d_s^2$, gdzie n – liczba równocześnie wykonanych złączy, R_m – wytrzymałość blach, d_s – średnica stempla.
- Dobranie odpowiedniej prasy hydraulicznej z możliwością nastawiania wymaganej siły prasowania lub zaprojektowanie specjalnego urządzenia sterowanego, np. robotem.

Po opracowaniu procesu technologicznego wskazane jest wykonanie serii prototypowej z zastosowaniem uproszczonych przyrządów, zwłaszcza przy produkcji seryjnej danego elementu, a następnie poddanie jej w całości odpowiednim próbom wytrzymałościowym. W przypadku stosowania blach z powłokami należy poddać prototypy badaniom odporności na warunki zewnętrzne (korozyjne). Po analizie wyników prób należy zweryfikować konstrukcję i opracować produkcyjny proces wytwarzania.

Należy również opracować system kontroli pomiarów parametrów geometrycznych gotowego wyrobu oraz utrzymanie stałych warunków wykonania połączeń. Kontrola złączy powinna być przeprowadzana co pewien czas i opierać się o pomiar grubości dna złącza oraz o wyrywkowe próby wytrzymałościowe lub symulacje komputerowe.

Połączenia kształtowe wykonywane techniką prasowania na zimno z użyciem narzędzi opisanych w rozdziale 3, mogą znaleźć zastosowanie do łączenia następujących elementów z blach o łącznej grubości do około 10 mm:

- osłon i obudów maszyn technologicznych,
- części tłoczonych w przemyśle samochodowym,
- poszczególnych elementów podestów budowlanych,
- sprzętu AGD.

Na dokładność wykonania połączeń mają wpływ następujące czynniki:

- stopień zużycia narzędzi (stempla i matrycy),
- tolerancja grubości wyrobów hutniczych w postaci blach,
- cechy stanowiska, na którym będzie prowadzony proces technologiczny prasowania na zimno.

W związku z powyższym, należy przeprowadzać okresowe kontrole zużycia stempli i matryc, zamawiać blachy o ściśle określonej tolerancji grubości, oraz przeprowadzać proces technologiczny na stanowisku, które będzie charakteryzowało się dużą sztywnością, a co za tym idzie, będzie gwarantować prawidłowe ukształtowanie złącza. Oprzązowanie powinno zapewniać głównie współosiowość współpracujących ze sobą stempli i matryc. Niedostateczna sztywność układu w stanowisku, na którym będzie przeprowadzony proces prasowania wraz z utratą osiowości matrycy względem stempla staje się główną przyczyną nierównomiernej grubości ścianek złącza.

Bardzo istotnym aspektem techniczno-ekonomicznym stosowania połączeń kształtowych nowej generacji jest możliwość łączenia elementów wykonanych z blach pokrytych powłokami ochronnymi, gdyż jak stwierdzono proces ten nie powoduje uszkodzenia warstw ochronnych, które pozostają na blachach ukształtowanych w prasowanym złączu.

Przy wykonaniu prawidłowego oprzązowania można uzyskać dużą powtarzalność geometryczną złącz, jak również ich wytrzymałość, co w przypadku alternatywnego procesu spawania punktowego nie jest możliwe do uzyskania.

Ponadto w przypadku złącz spawanych istnieje także konieczność stosowania dodatkowego łącznika, którym jest drut spawalniczy (lub elektroda), co dodatkowo podwyższa koszt wykonania np. elementu w postaci podestu budowlanego.

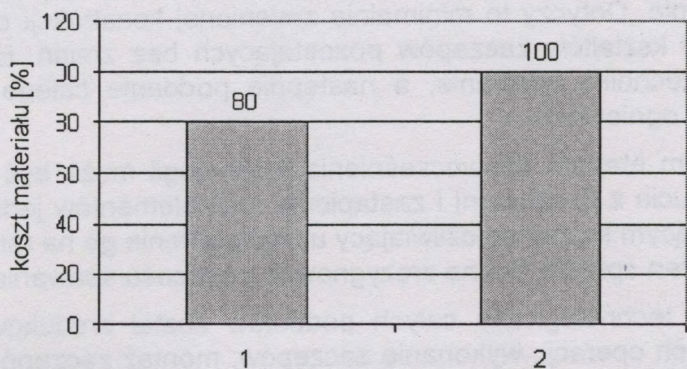
Pewnym ograniczeniem stosowalności połączeń wykonywanych techniką prasowania na zimno jest problem zapewnienia dostępu matrycy i stempla do miejsc, w których elementy mają być połączone. Elementy powinny być tak zaprojektowane, aby nie miały charakteru konstrukcji zamkniętej (skrzynkowej), lecz były otwarte w miejscach umożliwiających szybkie doprowadzenie i odprowadzenie narzędzi do miejsc łączenia.

Konieczne jest zastosowanie prasy z nastawialnym obciążeniem, wyposażonej we wskaźnik umożliwiający dokładny odczyt wartości siły dla serii, dający pewność, że złącze jest wykonane przy odpowiednim nacisku bez uszkodzenia. Narzędzia powinny posiadać powierzchnie

oporowe w celu możliwości przyłożenia siły większej od wymaganej o około 50%, zapewniając pewne i prawidłowe ukształtowanie złącza przy jednoczesnym zapobieganiu jego sprasowania. Na podstawie przeprowadzonych prób można stwierdzić, że wymiary gabarytowe powierzchni oporowej narzędzi powinny wynosić co najmniej 100% wymiarów złącza (w omawianym przypadku minimalna średnica powierzchni oporowej stempla i matrycy powinna wynosić 24 mm, przy średnicy złącza 12 mm).

Zastosowanie połączeń prasowanych na zimno może wyeliminować częściowo lub całkowicie proces spawania stosowany dotychczas do łączenia poszczególnych elementów podestu tj., blachy nośnej, okuć i zaczepów. Wobec powyższego, technologia wykonania podestów stanie się przez to ekologiczna i bardziej ekonomiczna.

Podesty wykonywane zgodnie z aktualną technologią wykorzystującą spawanie do łączenia poszczególnych ich części były wykonywane z blach surowo-czarnych, a następnie poddawane operacji cynkowania ogniowego w celu ochrony przed korozją. Obecnie przy zastosowaniu procesu łączenia okucia z blachą nośną, techniką prasowania na zimno możliwe będzie kształtowanie blachy nośnej z półfabrykatu już ocynkowanego, co przynosi wymierne efekty ekonomiczne (rys. 5.29).



Rys.5.29. Koszty materiałowe użytych do produkcji podestów

1 - wyrób z blachy ocynkowanej, 2 - wyrób z blachy surowo-czarnej następnie poddany cynkowaniu

Optymalnym wariantem byłoby wykonywanie wszystkich operacji łączenia elementów za pomocą techniki prasowania na zimno, lecz przeprowadzone próby technologiczne pokazały, że wymagałoby to odpowiedniego przekonstruowania poszczególnych elementów podestu oraz wykonania odpowiedniego oprzyrządowania. W tabeli 5.8 zestawiono te etapy procesu technologicznego wykonania podestów, które w znacznym stopniu przyczyniły się do zmniejszenia pracochłonności i związku

z tym obniżyły koszty ich wykonania (czasy operacji odnoszą się do wykonania elementów dla całego podestu), a dotyczą one wykonania podestu według trzech technologii:

Porównanie pracochłonności wykonania podestów według poszczególnych technologii

Tabela 5.8

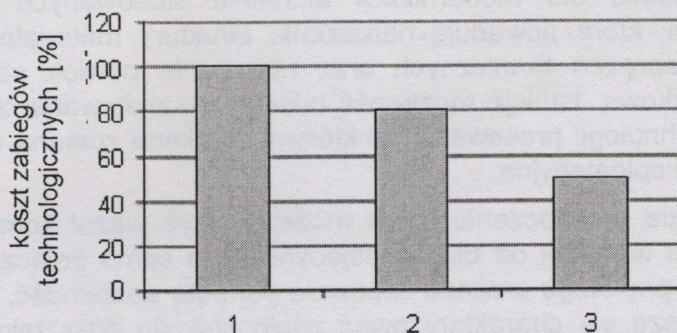
Kolejność czynności	Rodzaj zabiegu	Czas [godz.]	Rodzaj zabiegu	Czas [godz.]	Rodzaj zabiegu	Czas [godz.]
Wykonanie zaczepów	Gięcie	0,13	gięcie	0,13	-	-
Łączenie zaczepów z okuciem	spawanie	0,07	spawanie	0,07	-	-
Łączenie okucia z blachą nośną	spawanie	0,16	złącza kształtowe	0,08	złącza kształtowe	0,08
Suma czasów	-	0,36	-	0,28	-	0,08

Czas przeznaczony na operację spawania okucia z blachą nośną podestu wynosi aktualnie 0,16 godz. Przewidywany czas łączenia tych elementów za pomocą złączy kształtowych powinien zawierać się w granicach 0,08 godz. Jak więc z tego wynika, czas tej operacji można skrócić dwukrotnie. Dotyczy to minimalnie zmienionej konstrukcji obecnego okucia oraz kształtów zaczepów pozostających bez zmian, łączonych z okuciem techniką spawania, a następnie poddanie całego zespołu cynkowaniu ogniowemu.

Kolejnym etapem unowocześnienia technologii może być wyeliminowanie okucia z zaczepami i zastąpienie tych elementów jednym monolitem mającym kształt umożliwiający umiejscowienie go na ramie rusztowania. W ten sposób można zrezygnować z procesu spawania.

Proces technologiczny całych podestów został zredukowany do następujących operacji: wykonanie zaczepów, montaż zaczepów z okuciem. Łączny czas wykonania podestów skróciłby się wtedy o około 0,2 godz., uwzględniając przy tym łączenie okucia z blachą nośną złączami kształtowymi oraz wykonanie nowego typu okucia, którego czas wykonania powinien mieścić się w granicach czasu przeznaczonego na wykonanie okucia według istniejącej koncepcji. Rezygnując z dotychczasowych zaczepów unika się także konieczności przeprowadzenia operacji wyżarzania odprężającego miejsca ich spawania.

Analizując słuszność zastosowania połączeń kształtowych do łączenia elementów podestu budowlanego należy na jednym z pierwszych miejsc wymienić czynnik ekonomiczny (rys. 5.30).



Rys.5.30. Koszt wykonania podestów z wykorzystaniem poszczególnych technologii

1 - technologia spawania, 2 - technologia spawania i prasowania na zimno, 3 - technologia wyłącznie prasowania na zimno

Dokonana analiza kosztów materiałowych oraz pracochłonności wykonania podestu o długości 3,0 m wykazała, że należy dążyć do całkowitego wyeliminowania procesu spawania i zastąpienia go technologią prasowania na zimno. Umożliwi to wykonywanie wszystkich elementów z blachy ocynkowanej i zlikwiduje konieczność ich transportu do i z miejsca cynkowania. Inne czynniki, nie mniej ważne, decydujące o stosowaniu procesu prasowania na zimno to: ekologia procesu, który jest przyjazny dla pracownika i środowiska pracy, prostota narzędzi i procesu technologicznego oraz duża powtarzalność wykonanych złączy. Istotne znaczenie dla możliwości stosowania połączeń kształtowych stanowi wysoka jakość złączy, oraz ich wytrzymałość.

6. Podsumowanie

Ze zrealizowanych badań wynikają wnioski ogólne i szczegółowe potwierdzone przeprowadzonymi badaniami oraz wskazania odnośnie możliwości wdrożenia tych procesów w warunkach przemysłowych, np. w przypadku zakazu stosowania niektórych technik łączenia w kopalniach oraz połączeń o niekorzystnych parametrach techniczno-ekonomicznych w wybranych gałęziach produkcji.

Zrealizowany program badań pozwolił na poznanie i przedstawienie zachodzących zjawisk fizycznych w trakcie formowania nowej generacji połączeń kształtowych wykonywanych metodą „punktowego” prasowania na zimno.

Podjęte zadanie opracowania nowej generacji połączeń kształtowych techniką miejscowego (punktowego) prasowania na zimno ma

duże znaczenie dla modernizacji aktualnie stosowanych połączeń tradycyjnych, które powodują naruszenie struktury materiałów i powstawanie naprężeń termicznych oraz niszczenie powłok ochronnych i korozję stykową. Istnieje możliwość takiego ukształtowania złącza, za pomocą technologii prasowania, w którym uzyskane zostaną określone własności eksploatacyjne.

Głębokie przetłoczenie blach może tworzyć węzeł konstrukcyjny o sztywności większej od blachy pojedynczej, a samo połączenie przy poprawnym przebiegu procesu zapewnia ponadto szczelność. Materiały łączone muszą się charakteryzować zdolnością do odkształcenia plastycznego, dla utworzenia wyoblenń gwarantujących właściwą nośność połączenia. Połączenie prasowane powstaje w wyniku działania sił, które wywołują określone pola naprężeń o wartości przekraczającej granicę plastyczności, skutkiem czego jest powstanie pól odkształceń trwałych. Cechą szczególną tego procesu jest to, że tworzą się ścianki o zmiennej grubości i o takim ukształtowaniu, że przetłoczenia utrudniają przemieszczanie się blach względem siebie. Proces prasowania (tłoczenia) powoduje powstanie pól odkształceń, które formują trwałe pole naprężeń. W strefie kontaktujących się blach ich forma geometryczna umożliwia przeniesienie obciążeń przez boki i dno przetłoczenia, co wywołuje między innymi wzrost sztywności elementu blaszanego.

Przeprowadzona analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych i wskaźników trwałości elementów prasowanego złącza kształtowego stwarza możliwość ich zastosowania zgodnie z wymogami eksploatacyjnymi i wytrzymałościowymi tego połączenia dla różnych rodzajów łączonych materiałów metalicznych. Łączenie za pomocą techniki prasowania na zimno okazało się metodą ekonomiczną, powodującą oszczędności energii i materiałów pomocniczych. Otrzymane połączenia pod względem sztywności, wytrzymałości, odporności na korozję, zachowania się pod wpływem obciążeń statycznych i dynamicznych, mają przewagę nad dotychczas stosowanymi połączeniami tradycyjnymi. Ponadto istotną zaletą proponowanej metody jest możliwość łączenia elementów o różnej grubości wykonanych z różnych materiałów bez występowania uszkodzeń zarówno ich powierzchni, jak i powłok je pokrywających.

Uzyskane doświadczenia konstrukcyjno-technologiczne, z zastosowaniem odpowiedniej postaci i formy narzędzi oraz różnorodności materiału do prasowania złączy (stemple i matryce), pozwalają na praktyczne wykorzystanie prac, związanych z tworzeniem węzłów konstrukcyjnych nowej generacji w projektowaniu maszyn i urządzeń, które powinny spełniać wysokie wymagania odnośnie trwałości i jakości. Zasadniczy wpływ na jakość otrzymanych złączy ma geometria części roboczych kształtu-

jących narzędzi: średnica matrycy i stempla, promień matrycy i stempla, długość stempla i wysokość wgłębienia matrycy. Ustalając pochylenie ścianek matrycy i stempla należy brać pod uwagę to, że ich wzrost powoduje zmniejszenie wartości nachodzenia na siebie blach, co w konsekwencji czyni połączenie znacznie słabszym. Na podstawie przeprowadzonych badań określających zależności geometryczne złącza można przyjąć wstępne zalecenia i wskaźniki prawidłowo formowanych połączeń:

- grubość łączonych blach powinna wynosić od 2x0,25 do 2x5,5 mm; przy łączeniu blach o różnej grubości powinny one mieć łączną grubość w granicach od 0,6 do 11 mm, przy zachowaniu stosunku grubości około 1:1,6,
- wielkość złącza określona średnicą wypukłości powinna być stopniowana np. 3, 4, 6, 8, 10, 12 mm, nie powinna być większa niż 12 mm dla złącza wykonywanego narzędziami przenośnymi; średnicę powinno się dobierać w zależności od sumy grubości łączonych blach w zakresie (2÷6) g,
- wartość wypukłości powinna być równa $I_m = (0,7 \div 0,9) g$,
- wymiar grubości dna połączenia powinien być podstawą do oceny prawidłowości wykonania złącza i powinien mieć wartość $a = (0,3 \div 0,5) g$.

Pozostałe parametry narzędzi, takie jak np.: promień zaokrąglenia matrycy, promień rowka dna matrycy, promień zaokrąglenia stempla, pochylenie ściany bocznej matrycy i stempla, kąt stożka dna stempla, powinny być określone przy projektowaniu narzędzi roboczych, z uwzględnieniem wpływu tych parametrów na mechanikę powstania złącza. Można je skorygować np. przez pomiar mikrotwardości w strefie kontaktu obu blach, co potwierdzi wpływ dobranych wskaźników na stopień kształtowania (utwardzenia) złącza.

Technologia łączenia za pomocą złączy kształtowych typu „blacha–blacha” wykonana prasowaniem na zimno jest ekonomiczna i ekologiczna, co potwierdziły badania wybranego wyrobu (podestu). Porównanie wyników z analizy kosztów pracochłonności aktualnie wytwarzanych podestów rusztowań budowlanych wykonanych według technologii spawania elementów (zaczep, okucie, blacha nośna podestu), oraz wyniki badań wytrzymałościowych wykazują możliwość stosowania nowej generacji połączeń kształtowych według zaproponowanego rozwiązania, które ponadto charakteryzuje się następującymi zaletami:

- możliwością miniaturyzacji złączy i obniżeniem pracochłonności ich wykonania w stosunku do połączeń spawanych, z zachowaniem własności fizykomechanicznych blach, w tym także warstw wierzchnich,
- stosowaniem techniki „mechanicznej” połączeń, która eliminuje połączenia spawane i inne stanowiące zagrożenia BHP, oraz utratę

własności fizykomechanicznych elementów, w wyniku zmian strukturalnych łączonych materiałów (wytrzymałości, korozja i erozja),

- możliwością stosowania operacji prasowania połączeń kształtowych w rusztowaniach budowlanych techniką prasowania na zimno, która eliminuje koszty pośrednie, związane z ekologią procesu technologicznego, transportem elementów do kooperanta itp.
- możliwością łatwej automatyzacji zarówno przeprowadzenia procesu, jak i jego kontroli pod względem uzyskanych parametrów techniczno–eksploatacyjnych w procesie wytwórczym.

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano połączenia kształtowe-punktowe materiałów typu „blacha–blacha” wykonane techniką prasowania z rodzimego materiału bez wprowadzania dodatkowych procesów (np. cieplnych). Porównując nowy typ złącza z połączeniami tradycyjnymi, proponowane rozwiązanie opiera się na wytworzeniu w złączu naprężeń rozchodzących się również w strefie najbliższego otoczenia na skutek kontrolowanego procesu dociskania blach do siebie. Tarcie pomiędzy blachami, jak również elementami łączonymi punktowo, uniemożliwia ich wzajemne przemieszczanie, co ma istotny wpływ na proces odkształcenia, a głównie formowanie, zarówno jego ścianek jak i tzw. „zamka” złącza. W rozwiązaniu konstrukcyjnym elementów wykorzystujących tego rodzaju połączenia wykonane za pomocą narzędzi typu „matryca–stempel” wskazane jest stosowanie blach cienkich ($g = 1,5 \text{ mm}$) w miejscach gdzie przenoszone są naprężenia rozciągające. Natomiast w przypadku występowania w konstrukcji naprężeń ściskających możliwa jest utrata jej stateczności, co wymaga wprowadzenia różnego rodzaju usztywnień.

Symulacje komputerowe procesu przeprowadzone metodą elementów skończonych, pozwoliły na prześledzenie zmian rozkładu naprężeń w złączu obciążanym siłą stopniowaną oraz przedstawienie rozkładu naprężeń i przemieszczeń przy różnych odmianach połączenia. Na podstawie przeprowadzonej symulacji i analizy naprężeń oraz odkształceń, wnioskować można, że głębokość ich zalegania zależy nie tylko od siły prasowania (tłoczenia), ale również od doboru parametrów geometrycznych stempla i matrycy oraz rodzaju złącza. Badania symulacyjne pokazały, że uproszczony model komputerowy pozwala na wystarczająco dokładne prześledzenie skutków działania siły na złącze, co w pewnym stopniu może zastąpić pracochłonne badania doświadczalne. Reasumując, można powiedzieć, iż sprostanie wymaganiom dotyczącym minimalizacji kosztów produkcji wyrobu, połączone z koniecznością uzyskania elementów o wysokiej jakości użytkowej, nie może obejść się bez komputerowych metod wspomagania opracowania procesu produkcyjnego.

Wykonane badania wymagają prowadzenia dalszych prac w zakresie zastosowania tego rodzaju połączeń w przemyśle. O skuteczności stosowanego połączenia decyduje poprawność jego wykonania, jak i jego charakterystyka wytrzymałościowa (dochodząca do 80% wytrzymałości materiału rodzimego – dla optymalnych warunków kształtowania i parametrów narzędzi) z zachowaniem nieuszkodzonych warstw ochronnych łączonych elementów.

Zrealizowany program badań oraz przyjęte kryterium doboru parametrów połączeń znalazły praktyczne zastosowanie w wyrobie, którym jest podest budowlany ZBMD, a wysoka innowacyjność rozwiązań – połączeń kształtowych znajduje coraz to szersze zastosowanie również w innych gałęziach przemysłu.

Przyszłe badania powinny zmierzać w kierunku:

- optymalizacji parametrów geometrycznych złączy dla różnych materiałów i przy różnych obciążeniach,
- modelowania zjawisk płynięcia materiału w strefie łączenia (badania modelowe i symulacyjne),
- zbadania możliwości nanoszenia różnych rodzajów pokryć ochronnych i stwierdzenia ich zachowania się w całej strefie złącza oraz po długim okresie eksploatacji,
- dokładnego przebadania zmian metalograficznych w strefie odkształcenia złącza pod kątem możliwości prawidłowego sterowania procesem płynięcia materiału bez wystąpienia uszkodzeń w jego strukturze metalograficznej,
- przeanalizowania wpływu rozkładu i ilości złączy na wzrost ogólnie przyjętej wytrzymałości i określonej sztywności konstrukcyjnej.

Przyszłe prace powinny również przedstawiać propozycje automatyzacji zarówno samego procesu wytwarzania (np. przemysł samochodowy), jak i jego kontroli czynnej bez prowadzenia produkcyjnych wskaźników połączeń i jakości warstw wierzchnich.

Literatura

- [1] Beenken H.: Mechanische Fugeverfahren fur Stahlfeinbleche. Bänder bleche rohre 9/1995.
- [2] Beenken H.: Perspektiven des umformtechnischen Fugens von kaltgewalzten und ober klachenveredelten Stahlblechen. Stahl 2/1994.
- [3] Bober J., Wieck R., Liebig H.P.: Druckfugungen unter schwingender Beanspruchung. Blech Rohle Profile 5/1989.

- [4] Błaszowski K., Dembczyński R., Feld M., Galinowski J.: Zasady projektowania oprzyrządowania technologicznego. PWN, Warszawa 1981.
- [5] Bojarski Z., Habla H., Surowiec M.: Materiały do nauki krystalografii. PWN, Warszawa 1986.
- [6] Bomersbach G., Grzywocz W.: Badania podestów budowlanych. Sprawozdanie CMG KOMAG, Gliwice/Zabrze 1997.
- [7] Breckweg A.: Zrobotyzowana technika łączenia blach cienkich za pomocą zgmiotów punktowych i nitów wciskowych. MM Magazyn Przemysłowy nr 3, 2005.
- [8] Dobrócki W.: Zarys obróbki plastycznej metali. Wydanie „Śląsk”, Katowice 1975.
- [9] Dobrzański T.: Mały poradnik mechanika. Tom II. WNT, Warszawa 1994.
- [10] Drewes, E-J., B. Engl und F.-Lenze: Anwendung von hoherfesten Feinblechstahlsorten für die automobilkarosserie. Internationale VDI/VDEh – Konferenz „Stahl im Kraftfahrzeugbau“ Würzburg, 9/1990.
- [11] Drewes, E-J., B. Engl und F.-Lenze und V. Steininger: Anwendungsentwicklung hoherfester Stähle zur Gewichtsoptimierung der Automobilkarosserie. Technische Mitteilungen Krupp 51/1993.
- [12] Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z.: Obróbka plastyczna. PWN, Warszawa 1981.
- [13] Erbel S. i inni: Encyklopedia technik wytwarzania stosowanych w przemyśle maszynowym. Tom I i II. Wydawnictwo PW, Warszawa 1974.
- [14] Famuła J., Merawiec S., Szumański T.: Tablice stali jakościowej. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1974.
- [15] Feld M.: Projektowanie procesów technologicznych typowych części maszyn. WNT, Warszawa 1983.
- [16] Feld M.: Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn. WNT, Warszawa 2003.
- [17] Golański T.: Optymalizacja procesów tłoczenia. INOP, Poznań 1974.
- [18] Golański T.: Mechanizacja i automatyzacja w tłocznictwie. WNT, Warszawa 1978.
- [19] Golański T., Leśniak R.: Mechanizacja i automatyzacja tłocznictwa. Album – informator WEMA 1972.
- [20] Górski E.: Poradnik narzędziowca. WNT, Warszawa 1989.

- [21] Grasshoff H.W., und U. Tenhaven: Oberflächenveredelte Feinbleche – Stahl mit Zukunft, Stahl und Eisen 110/1990.
- [22] Grundler E.: Prozessüberwachung sichert Qualität beim Rundpunkt – Verbindungsverfahren, Maschinenmarkt 101/1995.
- [23] Grzyb R.: Badania złącz. Katedra Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej, Praca nie publikowana, Gliwice 1999.
- [24] Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
- [25] Charakterystyki stali. Instytut Metalurgii Żelaza im. S.Staszica w Gliwicach, Wydanie „Śląsk”, Katowice 1976.
- [26] Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych. WNT, Warszawa 2004.
- [27] Jarocki J., Wasiunyk P.: Kuźnictwo i prasownictwo. Cz.1, Cz. 2. PWT, Warszawa 1960.
- [28] Jodełko Z.: Ocena ekonomiczna mechanizacji i automatyzacji w przemyśle maszynowym. WNT, Warszawa 1965.
- [29] Kowalczyk L.: Łączenie metali w stanie stałym w procesach obróbki plastycznej. WNT, Warszawa 1988.
- [30] Kubac R., Pilarczyk Sz., Pronobis A.: Tablice stali zwykłej jakości. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1997.
- [31] Kukielka L.: Podstawy badań inżynierskich. WNT, Warszawa 2002.
- [32] Kwaśniewska E.: Łączenie cienkich blach tworzeniem owalnych wgłębień. Obróbka Plastyczna Metali 1/1995.
- [33] Lappe W., und L. Budde: *Möglichkeiten der Prozessüberwachung und Prozessregelung beim mechanischen Blehfugen*. VDI – Berichte Bd 1072 Dosseldorf, VDI– Verlag 1993.
- [34] Lawrowski Z.: Technika smarowania. PWN, Warszawa 1996.
- [35] Liebig H.P., Bober J., Gopfert D.: Qualitätssicherung durch rechnergestützte Überwachung des betrieblichen Durchfugeprozesses. Blech Rohle Profile 39, 6, 1992.
- [36] Liebig H.P., Bober J., Jacobsen J.: Eine neu Entwicklung im Bereich des umformtechnischen Fugens. Blech Rohle Profile 42, 2, 1995
- [37] Liebig H.P., Gopfert D., O – Dirckfugen verbindet auch Bauteile aus dünnen Blachen. Blech Rohre Profile 1994.
- [38] Liebig H.P., Mutschler J.: Die Durchsetzfugetechnik in der Sicht ihres Tribosystems. Blech Rohle Profile 41, 4, 1994
- [39] Łunarski J., Łabęda M.: Przetłoczno-radialne bezodpadowe łączenie cienkościennych elementów. Technologia i automatyzacja montażu 2/2003.

- [40] Marciniak Z.: Mechanika procesów tłoczenia blach. WNT, Warszawa 1961.
- [41] Malina V.: Łączenie pod naciskiem. MM Magazyn przemysłowy 1 (6) 1995, Katowice.
- [42] Mazanek E.: Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn. WNT, Warszawa 2005.
- [43] Mechanische Fugetechnik – Verbindungstechnologie im Aufbruch, Kolloquium der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V und des Arbeitskreises Clinchen, Fellbach 2/1995.
- [44] Mensing B., Entwicklung einer Steuerung und Masswerterfassung an einer Zugprüfmaschine. Diplomarbeit, Universität – GH – Paderborn, 1994.
- [45] Ministerstwo Przemysłu Maszynowego, Tłocznictwo, Katalog wytłóczek, 1971.
- [46] Ministerstwo Przemysłu Maszynowego, Tłocznictwo, Informator techniczno-handlowy, Wydawnictwo przemysłu maszynowego WEMA, 1970.
- [47] Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E.: Teoretyczne podstawy technologicznych procesów przeróbki plastycznej. Wydanie „Śląsk”, Katowice 1977.
- [48] Pawłowski J., Zgorzelski S.: Tłocznictwo. WNT, Warszawa 1961.
- [49] Pełczyński T.: O krzywych umocnienia. Obróbka plastyczna. Tom 14, zeszyt 1, 1975.
- [50] Płonka S., Ogiński L.: Podstawy eksperymentalnej optymalizacji parametrycznej operacji wytwórczych. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej, 2004.
- [51] Polański Z.: Metody optymalizacyjne w technologii maszyn. PWN, Warszawa 1977.
- [52] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
- [53] Porębska M., Skorupa A.: Połączenia spójnościowe. PWN, Warszawa 1997.
- [54] Puff T., Sołtys W.: Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń. WNT, Warszawa 1980.
- [55] Reich K.F., Turczyński K.: Modelowanie i projektowanie nowej generacji połączeń kształtowych elementów i zespołów konstrukcyjnych z blach cienkich techniką prasowania na zimno. Sprawozdanie KOMAG, Gliwice/Zabrze 1999.

- [56] Reich K.F., Zacharski M., Turczyński K., Orlew J.: Uniwersalne wysokie rusztowania nowej generacji dla budownictwa przemysłowego i ogólnego. Sprawozdanie CMG KOMAG, Gliwice/Zabrze 1997.
- [57] Romanowski W.P.: Poradnik obróbki plastycznej na zimno. WNT, Warszawa 1976
- [58] Romanowski W. P.: Tłoczenie na zimno. WNT, Warszawa 1962.
- [59] Schmid G., und S. Sing: Dunnblechkonstruktionen und ihre Eigenschaften – Prüfverfahren und ihre Aussagekraft, SLV – Tagung „Vugen von Aluminium im Dunnbechbereich“, Ingolstadt, 11–12. 11.1993.
- [60] Singh S., G. Schmid und S. Gao: Leichtbaudurch optimierte Fugetechnik, Deutscher Verband für Materialforschung und – prüfung. DVM – Tag 1991, Bauteil '91.
- [61] Skalmierski B.: Mechanika z wytrzymałością materiałów. PWN, Warszawa 1983.
- [62] Szachraj M. Ł.: Przewodzące procesy technologiczne w przemyśle budowy maszyn. PWT, Warszawa 1953.
- [63] Szewczyk K., Witkowski J.: Podstawy Konstrukcji Maszyn. Tom II WNT, Warszawa 1995.
- [64] Szymańska E.: Nowe rozwiązanie w zakresie łączenia metodami obróbki plastycznej. Obróbka Plastyczna Metali nr 5, 1995.
- [65] Tubielewicz K., Turczyński K.: Analiza parametrów geometrycznych połączeń blach kształtowanych na zimno. IX Konferencja Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, Tom 2.
- [66] Tubielewicz K., Turczyński K.: Kształtowanie połączeń blach metodą prasowania na zimno. Technologia i Automatyzacja Montażu nr 2, 2001.
- [67] Tubielewicz K., Turczyński K., Tubielewicz M.: Wskaźniki wytrzymałościowe połączeń kształtowych prasowanych na zimno. Technologia i Automatyzacja Montażu nr 3 i 4, 2004.
- [68] Tubielewicz K., Melchow R., Tubielewicz M.: Specyfika łączenia trwałego (spawanie) elementów ze stopów cynku. Technologia i Automatyzacja Montażu nr 3, 2006.
- [69] Tymowski J.: Automatyzacja procesów technologicznych w przemyśle maszynowym. WNT, Warszawa 1975.
- [70] Wasiunyk P.: Kucie matrycowe. WNT, Warszawa 1987.
- [71] Weisel D.: Innovative Technologie Der runde Punkt. Metal bau Technik 11/1995.

- [72] Weroński W.S., Łukasik K.: Niektóre aspekty mechanicznego łączenia blach pod naciskiem. Obróbka plastyczna metali nr 5, 1997.
- [73] Wojtaszewska K.: Badania metalograficzne. Sprawozdanie CMG KOMAG, Mikołów/Zabrze 1997.
- [74] Program „Mikrotwardość” opracowany w Instytucie TM i AP Politechniki Częstochowskiej.
- [75] Prospekt firmy BOLLHOFF: RIUSET TRUMPF, 1998.
- [76] Prospekt firmy BOLLHOFF: SPOT CLINCH, 1998.
- [77] Prospekty firmy BTM: Tog-L-Loc, 1997.
- [78] Prospekty firmy PRESSOTECHNIK: TOX – Verbindungssysteme, 1996.
- [79] Prospekty firmy PRESSOTECHNIK: TOX – Die Kraftpaket – Pressen, 1996.
- [80] Verfahren und Vorrichtung zum Verbinden dunner Platten, Europäische Patentschrift, No. 0215449B1, 22.05.91
- [81] DIN EN 10130 Kaltgewaltze Flacherze ugnisse ause waichen Stählen zum Kaltumformen.
- [82] PN-EN 74-1:2006U: Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach. Cz 1: Złącza do rur – Wymagania i metody badań.
- [83] PN-EN 10002-1:2004 Metale-próba rozciągania. Cz 1: Metody badań w temperaturze otoczenia.
- [84] PN-EN 10083-1+A1:1999 Stale do ulepszania cieplnego.
- [85] PN-EN 10111:2001 Stal niskowęglowa. Blachy i taśmy walcowane na gorąco w sposób ciągły przeznaczone do obróbki plastycznej na zimno.
- [86] PN-EN 10142:2003 Taśmy i blachy ze stali niskowęglowej, ocynkowane ogniowo w sposób ciągły do obróbki plastycznej na zimno.
- [87] PN-EN 12810-2:2004U Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych. Cz 1: Specyfikacje techniczne wyrobów, Cz 2: Szczegółowe metody projektowania konstrukcji.
- [88] PN-EN 23876:1996 Węglik spiekane-Pomiar twardości sposobem VICKERSA.
- [89] PN-EN ISO 4957:2004 Stale narzędziowe.
- [90] PN-EN ISO 6507-3:1999 Pomiar twardości sposobem Vickersa - kalibracja wzorców twardości.

- [91] PN-ISO 2859-01:2003 Procedury kontroli wrywkowej metodą alternatywną. Schematy kontroli indeksowane na podstawie granicy akceptowalnej jakości (AQL) stosowane do kontroli partii za partią.
- [92] PN-ISO 3534-02:1999 Statystyka. Statystyczne sterowanie jakością. Terminologia i symbole.
- [93] PN-84/H-04507/01: Metalograficzne badania wielkości ziarna. Mikroskopowe metody określenia ziarna.
- [94] PN-81/H-92131: Blachy i taśmy ze stali węglowej konstrukcyjnej zwykłej jakości.
- [95] PN-M-47900-01:1996 Rusztowania stojące, metalowe, robocze – określenia, podział, główne parametry.
- [96] PN-M-47900-02:1996 Rusztowania stojące, metalowe, robocze – rusztowania stojakowe z rur.
- [97] PN-M-47900-03:1999 Rusztowania stojące, metalowe, robocze – rusztowania ramowe.
- [98] PN-60/M-66002: Tłoczenie, nazwy i określenia.
- [99] PN-86/M-66211: Tulejki stemplowe mocujące, szybkowymienne.
- [100] PN-86/M-66213: Tłoczники - stemple tnące, szybkowymienne, okrągłe, kwadratowe i owalne.
- [101] PN-86/M-66215: Tłoczники - stemple okrągłe o średnicy części roboczej 1- 10 mm.
- [102] PN-89/M-66290: Tłoczники - stemple okrągłe ciągnowe o średnicy 15-190 mm.

Formowanie połączeń blach prasowaniem na zimno

Streszczenie

W pracy przedstawiono nowe rozwiązanie techniczne z zakresu połączenia blach cienkich. Metoda formowania połączeń blach prasowaniem na zimno polega na równoczesnym kształtowaniu w dwóch blachach wgłębienia z jednej strony i wypukłości z drugiej, a następnie sprasowaniu powstałego połączenia za pomocą stempla i matrycy, co powoduje uzyskanie trwałego połączenia.

Zaletą tego sposobu połączenia jest nie występowanie w nim dodatkowego elementu łączącego, takiego jak nit czy spoina. Tego typu połączenie charakteryzuje się również możliwością zastosowania do blach pokrytych powłokami ochronnymi, przy czym przy prawidłowej geometrii złącza wykazuje znaczną wytrzymałość statyczną i zmęczeniową.

W pracy podjęto zadanie opracowania technologii kształtowania połączeń kształtowych na drodze technologii miejscowego prasowania na zimno, w celu modernizacji aktualnie stosowanych połączeń wykonanych tradycyjną technologią spawalniczą, która, jak się okazało w warunkach eksploatacji, w wyniku zmian w strukturze materiału, głównie na skutek powstawania pola naprężeń termicznych, wywołuje niszczenie powłok ochronnych i korozję stykową. Przeprowadzono analizę kompleksową pod kątem minimalizacji wymiarów złączy, z zachowaniem właściwości fizyczno-mechanicznych blach, a głównie ich warstw wierzchnich z możliwością eliminacji technik uciążliwych dla zdrowia.

Przedstawiono zasadę kształtowania złącza z podaniem rozkładu mikrotwardości w strefie złącza wynikającej ze zmiany struktury materiału. Omówiono praktyczne zastosowanie opracowanej technologii wraz z badaniami wytrzymałościowymi wyrobu, w którym zastosowano powyższą metodę. Dokonano również analizy ekonomicznej proponowanej metody łączenia w stosunku do dotychczas stosowanej technologii spawania.

Formation of metal sheets connection by a cold moulding method

Abstract

New technical solutions in connection of thin metal sheets were presented in the paper. The method of sheets connection by a cold moulding consists in a simultaneous formation of indentation from one side and protuberance from other side in two sheets and then in pressing of such connection using punch and die block what result in the permanent connection.

Lack of additional connecting element such as rivet or weld is an advantage of such a method of connection. Such a connecting method can also be used in joining the sheets covered by protective coatings and in the case of proper geometry of such a joint the connection has a significant static and fatigue strength. Development of technology of formation of the shape connection by the method of cold moulding to modernize the manufacture of present joints made by the traditional welding technology, which due to the changes in a material structure, mainly in the result of thermal stresses, leads to a destruction of protective coatings and causes the contact corrosion, was the project objective.

A comprehensive analysis was carried out as regards minimization of joints size, keeping the same physical-and-mechanical properties of metal sheets, especially their outside surfaces, with a possibility of elimination of technologies that are dangerous to health. The rule of formation of the joint, with determination of microhardness distribution in the joint area, resulting from changing the material structure, was given. Practical use of developed technology and strength tests of the product manufactured by that method were discussed. Also ergonomic analysis of the suggested method of sheets connection in comparison to the present welding technology was made.

