

MODELOWANIE PROCESU TŁOCZENIA BLACH ŁĄCZONYCH LASEREM

ANTONI PIELA, JOANNA LISOK

MODELING OF DEEP DRAWING OF TAILORED BLANKS JOINT USING LASER WELDING

Abstract

Application of welded sheet metal allows for significant decrease of the weight of the car body. Efficient design of the deep drawing technology for these sheets requires simulation of material deformation during industrial processes. Thus, the main objective of the present work is investigation of various aspects of modeling of sheet forming for tailored blanks. Description of the geometry of welded blank as well as representation of the properties of welded material are investigated and presented in the paper. Developed by the authors models of various complexity, which describe the material properties in the transient zones, are described. Results of simulations of cup drawing of welded sheets are presented. Modeling allowed an analysis of local strain distribution around the weld zone. Discussion of material's workability and appearance of cracks is presented for various combinations of thickness and properties of sheets.

1. WPROWADZENIE

Wymagania przemysłu motoryzacyjnego w odniesieniu do właściwości mechanicznych blach stosowanych do budowy karoserii, określić można jako dążenie do poprawy relacji pomiędzy tłocznością a wytrzymałością. W konstrukcjach nowoczesnych karoserii coraz szerzej stosowane są do tłoczenia wsady z blach platerowanych, wielowarstwowych, perforowanych, zaś ostatnio, wykroje wsadowe z blach łączonych spoiną laserową tzw. tailored blanks (Kiefer, 1997, Haferkamp i in., 1997). Blachy tego typu to odpowiednio przygotowane dla konkretnej wytłoczki wykroje wsadowe, wytwarzane metodą połączenia spoiną laserową różnych blach składowych. Kształty

wykrojów oraz rodzaj blach składowych dobiera się na podstawie analizy konstrukcyjno-technologicznej wytłoczek. Rozwiązanie to stwarza możliwość łączenia w ramach jednej wytłoczki, blach o różnych grubościach, różnych właściwościach mechanicznych lub też rodzaju pokrycia (Kusuda i in., 1997; Kinsey i in., 2000; Lange, 1997). Pozwala także, na tworzenie wykrojów wsadowych o konstrukcji hybrydowej tzn. łączenia np. blach aluminiowych i stalowych (Klose, 2001, Niemeyer i in., 2000).

Wprowadzenie do tłoczenia, tego typu z założenia niejednorodnego geometrycznie i fizycznie wsadu, wymaga rozpoznania charakterystyki właściwości tłocznych blach łączonych i określenia niezbędnych zmian w technologii tłoczenia. Wiedza w tym zakre-

się determinuje konieczne zmiany w konstrukcji tłocznic, a także zmiany warunków procesu tłoczenia. Projektowanie technologii tłoczenia, zwłaszcza wytłoczek o złożonym kształcie, ciągle jeszcze stwarza trudności. Wynika to z faktu, iż trudno jest określić rzeczywiste warunki kształtowania blachy występujące w projektowanym procesie. Trudno jest też przewidzieć, jakie będą występowały w projektowanej wytłoczce odkształcenia lokalne, zaś informacje te są nieodzowne dla doboru właściwości blachy i opracowania najbardziej technologicznie bezpiecznego procesu tłoczenia. Zważywszy, że dla blach łączonych nieograniczona jest ilość możliwych połączeń blach składowych, w zakresie ich właściwości jak i kształtu, a także położenia oraz orientacji linii spoiny w wytłoczce, określenie a priori tłoczności dla bliżej nieokreślonej blachy łączonej jest praktycznie niemożliwe. Problem podatności do tłoczenia blachy łączonej należy, zatem sprowadzić do określenia związków pomiędzy tłocznością blach składowych oraz odkształcalnością strefy spoiny. Zróżnicowane płynięcie materiału podczas tłoczenia, wywołane ogólnie rozumianą niejednorodnością wsadu, należy przewidywać drogą numerycznej symulacji procesu (Zhao i in., 2001), np. przy użyciu metody elementów skończonych (MES). Oczywiście charakter, wyznaczonych drogą symulacji, rozkładów poszczególnych wielkości stanu mechanicznego jest zdeterminowany wprowadzonymi do obliczeń danymi, określającymi warunki brzegowe i początkowe. Równie istotne jest określenie poprawnych charakterystyk właściwości odkształcanych blach składowych, a także modele strefy połączenia.

2. CHARAKTERYSTYKA PODSTAWOWYCH WŁAŚCIWOŚCI BADANYCH BLACH

Badania właściwości tłocznych blach i taśm prowadzone są w dwóch zasadniczych przypadkach. W celu oceny materiału wsadowego i kontroli dostaw

oraz w przypadku, gdy na tłoczni występują problemy z uzyskaniem dobrej wytłoczki. W odniesieniu do blach łączonych rozpoznania wymaga zarówno kwestia oceny właściwości wsadu do tłoczenia, jak i dobór wykrojki wsadowej dla konkretnej wytłoczki, tzn. ułożenie pasów blach składowych, położenie linii spoiny. Analizę procesu tłoczenia blach łączonych, a ściślej rozpoznanie problemu oddziaływania spoiny na proces plastycznego płynięcia materiału blachy, przeprowadzono wykorzystując próbę rozciągania oraz technologiczne próby oceny tłoczności (Piela i in., 2000b; Piela, 2001; Piela i in., 2001c). Technologiczne próby symulujące dobierano kierując się kryterium osiąganego w poszczególnych próbach schematem lokalnego odkształcenia. Odkształcenia lokalne mierzono metodą siatek koordynacyjnych, przy użyciu systemu automatycznej analizy obrazu (Piela i in., 2000c; Świłło i in., 2000). W badaniach wykorzystano próby: misczkowania, Erichsena, KWI oraz próbę wybruszania blachy cieczą (Piela, 2000; Hyrcza i Piela, 2000). Technika wybruszania pasów blachy różnej szerokości, kuliście zakończonym stemplem, wyznaczono krzywe graniczne tłoczenia (Piela i Hyrcza, 2001a). Blachy łączone wykonano z blach składowych ze stali niskowęglowej oraz ze stali mikrostopowych o podwyższonej wytrzymałości. Są to materiały najszerzej stosowane w przemyśle samochodowym. Charakterystykę badanych blach zebrano w tablicy 1.

Blachy łączone wykonano metodą spawania laserowego (Lalik, 2000). Spoiny wykonano przy użyciu lasera CO₂ typu VFA 2500 o nominalnej mocy maksymalnej równej 2,5 kW, długość fali 10,6 m. Do prób spawania zaprojektowano i wykonano przyrząd do pozycjonowania blach składowych, umożliwiający wykonywanie spoin długości 300 mm. Wiązkę lasera o modzie bliskim TEM 01, rozbieżność wiązki < 1,7 mrad, ogniskowano głowicą soczewkową z soczewką ZnSe o ogniskowej 152,4 mm. Osiągana w ognisku wiązki średnia gęstość mocy wynosiła około 4 MW/cm², średnica wiązki 0,2 mm. Podczas prób spa-

Tablica 1. Charakterystyka podstawowych właściwości badanych blach.

Lp.	Blacha w gatunku	Grubość [mm]	Rm [MPa]	Re/R ₀₂ [MPa]	A ₈₀ [%]	n ₀	r ₀	IE ₂₀ * [mm]	m
1	DX53D+ZF wg. PN-EN 10142: 2000	1,0	295	225	34,3	0,216	1,82	10,7	2,03
2	DX53D+Z wg. PN-EN 10142: 2000	1,2	310	200	33,7	0,208	1,89	11,1	2,04
3	DC03	0,8	295	175	36,3	0,204	1,72	9,9	2,01
4	PN-EN 10130:1991 + A1/1999	1,5	305	215	39,1	0,256	1,86	11,6	2,06
5	DC04 PN-EN 10130:1991 + A1/1999	0,7	290	205	40,3	0,214	1,97	10,3	2,18
6		1,0	295	205	39,7	0,181	1,86	10,8	2,09
7		1,2	305	215	39,9	0,211	2,06	12,0	2,11
8		1,6	300	180	39,6	0,207	1,89	12,0	2,14
9	H340LAD+Z PN-EN 10292: 2001	1,4	480	385	21,4	-	-	9,5	1,62

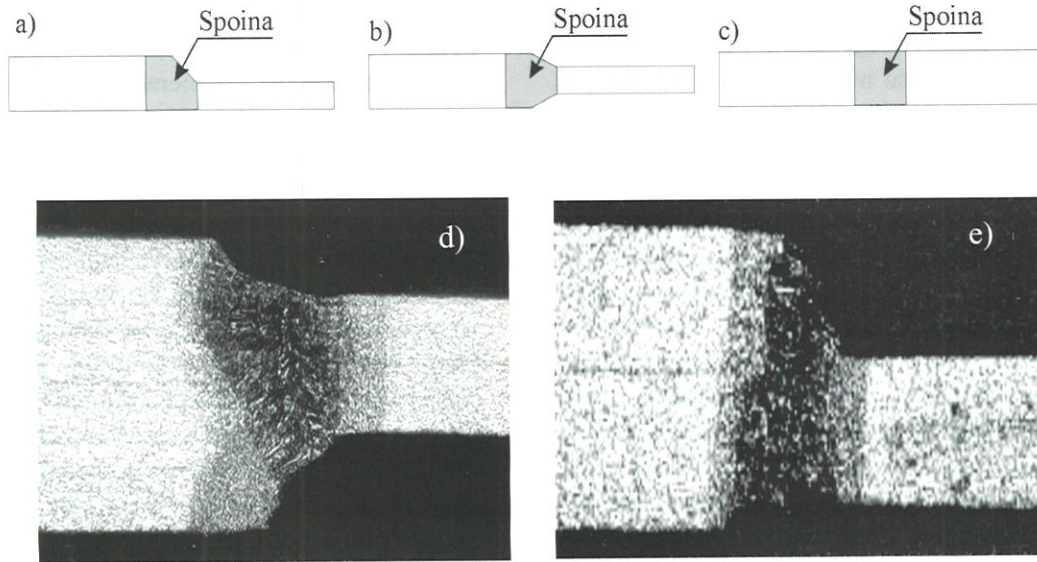
* W przypadku próby Erichsena podano wynik najmniejszy z 5-ciu pomiarów.



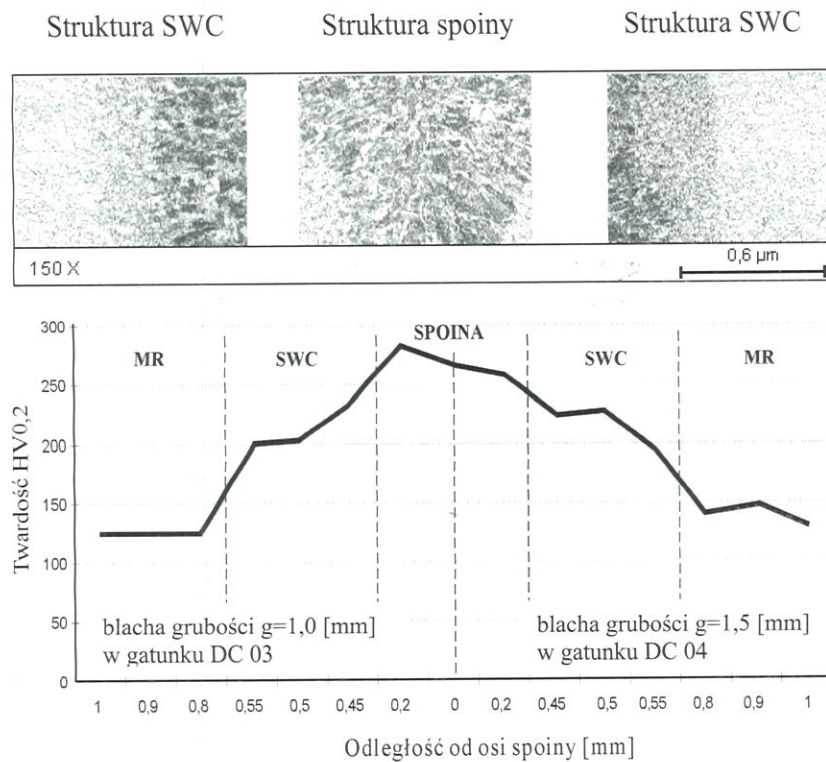
wania stosowano nadmuch argonu z wydatkiem 10 do 15 l/min z dysz o średnicy równej 6,0 mm, przy odległości między powierzchnią dyszy, a położeniem ogniska równej 9 mm. Warunki spawania laserowego ustalono zmieniając gęstość mocy lasera w zakresie od 4,0 do 6,05 MW/cm², prędkość skanowania od 3 do 4 m/min, co 0,1 m/min.

Na rysunku 1 przedstawiono modele geometryczne spoiny przy łączeniu blach a) i b) różnej oraz c) tej

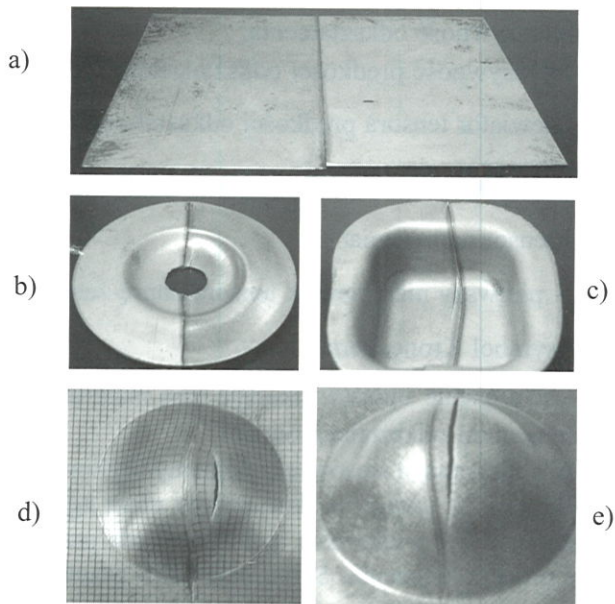
samej grubości. Mikrofotografie strefy spoiny odpowiadające modelom z rysunku 1 a) i b) przedstawiono na rysunkach d) oraz e). Spoina laserowa pomimo niewielkiej szerokości, w porównaniu do innych typów spoin, w sposób istotny zmienia właściwości mechaniczne strefy połączenia. W tym wypadku, jako strefę połączenia należy rozumieć zarówno samą spoinę jak i przyległe strefy wpływu ciepła. Proces spawania laserowego generalnie powoduje pogorszenie właści-



Rysunek 1. Model kształtu spoiny przy łączeniu blach a) i b) różnej oraz c) tej samej grubości; d), e) mikrofotografie strefy spoiny odpowiadające modelom typu a) i b).



Rysunek 2. Struktura strefy spoiny laserowej, rozkład mikrotwardości w strefie złączy spawanych. SWC – strefa wpływu ciepła, MR – materiał rodzimy.



Rysunek 3. Fotografie: a) blachy łączone laserem z blach w gatunku DC03 grubości 0,7 mm oraz gatunku DC04 grubości 1,2 mm; b) wytłoczka z próby miseczkowania stemplem kwadratowym 40 mm o płaskim dnie; c) wytłoczka próby KWI. d) wytłoczka z próby Erichsena, e) blacha wybrzuszona stemplem $\varnothing 75$ o kulistym zakończeniu.

wości plastycznych spoiny w stosunku do właściwości plastycznych łączonych blach. Jednocześnie w miejscu połączenia występuje wzrost twardości blachy, co potwierdziły pomiary mikrotwardości strefy spoiny (Lisok i Piela, 2000). Rozkład mikrotwardości złącza laserowego dla jednego z badanych przypadków przedstawiono na rysunku 2. Obserwowane zmiany twardości dotyczą głównie rdzenia spoiny oraz w mniejszym stopniu stref wpływu ciepła SWC. Są one wynikiem zmian struktury, wywołanych temperaturowym oddziaływaniem procesu spawania.

Na rysunku 3 przedstawiono fotografie blachy łączonej oraz wytłoczek z prób technologicznych. Widoczne na przedstawionych fotografiach przemieszczenia linii spoin są wynikiem zróżnicowanego płynięcia materiału w symetrycznie rozłożonych względem linii połączenia strefach wytłoczki. Pękanie materiału w tego typu blachach następuje po stronie blachy cieńszej, konstrukcyjnie słabszej, w pobliżu linii spoiny, na granicy strefy wpływu ciepła. Zniszczenie materiału wytłoczki w tym miejscu jest spowodowane pogorszeniem właściwości blachy w wyniku procesu spawania. Omówione rezultaty uzyskano we wszystkich wykonanych próbach technologicznych tzn.: Erichsena (rysunek 3d), KWI – rozpeczęcia otworu (rysunek 3b), miseczkowania (rysunek 3c) oraz wybrzuszania stemplem (rysunek 3e).

Pomiary odkształceń lokalnych (Piela i in., 2000c) potwierdziły przytoczone wnioski, iż płynięcie materiału blachy ulega istotnemu zaburzeniu zarówno

wskutek różnic grubości i właściwości tłoczonych blach, jak i wpływu odmiennych właściwości samej spoiny. Ogólnie należy stwierdzić, że spoina charakteryzując się zwiększoną wytrzymałością i zmniejszoną plastycznością w porównaniu do materiału blach składowych, stanowi element ograniczający plastyczne płynięcie materiału blachy łączonej. Zależnie od orientacji spoiny względem kierunku sił rozciągających powoduje w różnym stopniu blokowanie odkształceń plastycznych i wymaga większych sił niezbędnych do jej odkształcenia. W każdym wypadku stwierdzono zaburzenie rozkładu odkształceń lokalnych zarówno w strefie samej spoiny jak i strefach przyległych, obejmujących obszar stref wpływu ciepła. W przypadku, gdy główne odkształcenie rozciągające jest zgodne z kierunkiem spoiny, plastyczność blachy łączonej jest ograniczona do właściwości spoiny (Lisok i Piela, 2000). W pozostałych przypadkach, odpowiada plastycznym właściwościom blachy konstrukcyjnie słabszej.

3. MODELOWANIE PROCESU TŁOCZENIA BLACHY ŁĄCZONEJ SPOINĄ LASEROWĄ

Zasadność stosowania wspomaganie komputerowego do analizy procesu płynięcia blach łączonych wynika z potencjalnie bardzo dużej ilości możliwych wariantów połączeń blach. Uzasadnia to stosowanie metod symulacji komputerowej zarówno do analizy procesu projektowania konfiguracji optymalnych złożów blachy łączonej, jak i projektowania procesu tłoczenia. Proponowana koncepcja rozwiązania tych problemów przewiduje wykorzystanie metody elementów skończonych do symulacji procesu plastycznego płynięcia, przy uwzględnieniu charakterystyk materiałowych pozwalających na modelowanie zjawisk występujących podczas tłoczenia blach niejednorodnych geometrycznie i fizycznie. Podstawą takiej analizy jest ilościowa charakterystyka rozkładu odkształceń lokalnych, odniesiona do granicznej krzywej tłoczenia lub wyników prób technologicznych. Chodzi zatem o to, aby stworzyć narzędzie analizy dowolnego procesu tłoczenia na bazie metod symulacyjnych, w których podstawową niewiadomą jest geometria wyrobu i tłoczników, zaś kinematyka płynięcia metalu jest determinowana stanem mechanicznym strefy odkształcenia oraz wprowadzonymi do obliczeń charakterystykami materiałowymi. Dowolność wariantów połączeń zawarta jest w każdorazowo tworzonego modelu wsadu, w którym projektowane są owe zróżnicowania geometryczne i fizyczne blachy łączonej, zaś najważniejszym elementem jest materiałowy model strefy połączenia.

Rozwiązanie przedstawionych problemów przeprowadzono dwiema metodami. W metodzie pierwszej założono, że proces przygotowania wsadu do tłoczenia wymaga symulacji oddziaływania wiązki laserowej na zmiany temperaturowe blach w strefie połączenia, które skutkują powstawaniem naprężeń spawalniczych. Metoda druga natomiast wymaga opracowania modelu strefy połączenia. W zasadzie rozwiązanie tą metodą polega na przyporządkowaniu wydzielonym strefom modelu dyskretnego odpowiednich parametrów funkcji opisującej zmiany naprężenia uplastyczniającego. W tym przypadku temperaturowe oddziaływanie procesu spawania uwzględnione jest przez zmiany struktury materiału w strefie spoiny, które skutkują zróżnicowaniem umocnienia odkształceniowego.

4. SYMULACJA PROCESU SPAWANIA I TŁOCZENIA

W metodzie tej komputerowa symulacja (MES) procesu kształtowania blach łączonych laserem wymaga rozwiązania dwóch zasadniczych zagadnień: modelowania wstępnego spawania wsadu oraz modelowania procesu tłoczenia. Do symulacji procesu tłoczenia z zastosowaniem spawanego laserem wsadu użyto programu MARC K7.3.2, który uzupełniono własnymi podprogramami, pozwalającymi na symulację procesu spawania (Zimniak i Piela, 2000a; Zimniak i Piela, 2000b; Piela i Zimniak, 2000a).

We wstępnych obliczeniach symulujących wykorzystywano modele ciała: sprężysto-plastycznego oraz sztywno-plastycznego. Ostatecznie do analizy procesów tłoczenia blach łączonych, ze względu na czasy obliczeń, wybrano metodę analizy sztywno-plastycznej. Ponadto, założenie sztywno-plastycznego modelu pozwala na analizowanie dużych przyrostów odkształceń. W modelu tym ośrodek jest materiałem spełniającym warunek płynięcia Hubera - Misesa. Przy takich uwarunkowaniach, związki fizyczne w postaci prawa płynięcia stowarzyszonego z wymienionym warunkiem plastyczności opisuje równanie:

$$\sigma_{ij}' = \left(\frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}(\varepsilon)}{\dot{\varepsilon}} \right) \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (1)$$

w którym, zastępczą intensywność prędkości odkształcenia wyraża równanie:

$$\dot{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}} \quad (2)$$

natomiast, część dewiatorową tensora naprężenia opisuje zależność:

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (3)$$

gdzie:

ε – intensywność odkształcenia;

$\dot{\varepsilon}$ – intensywność prędkości odkształcenia;

$\dot{\varepsilon}_{ij}$ – dewiator tensora prędkości odkształcenia;

σ_{ij}' – dewiator tensora naprężenia;

σ_{ij} – tensor naprężenia;

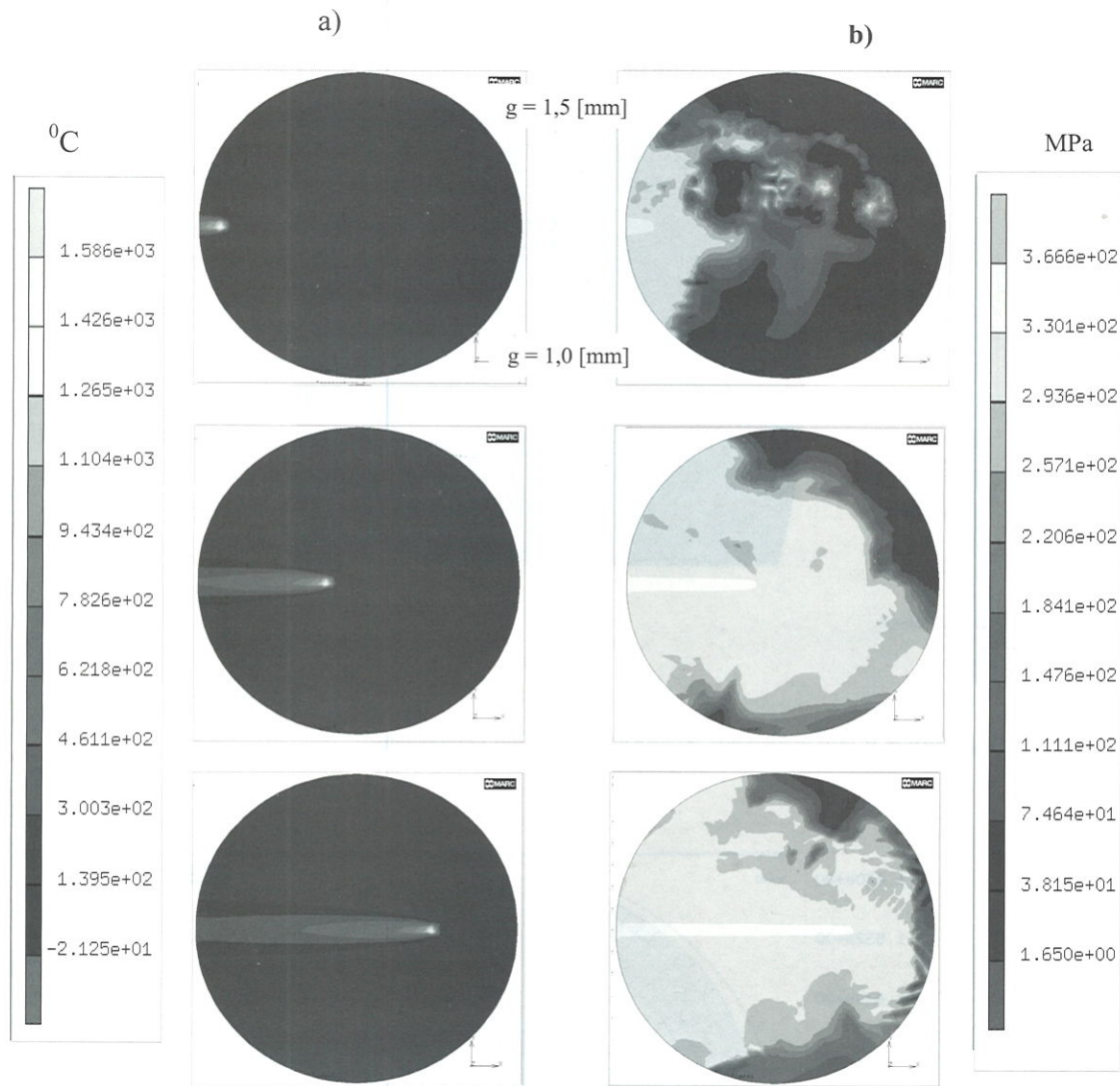
σ_{kk} – pierwszy niezmiennik tensora naprężenia;

δ_{ij} – symbol Kroneckera;

$\bar{\sigma}$ – naprężenie uplastyczniające (dla materiałów z umocnieniem odkształceniowym);

W obliczeniach stosowano elementy bryłowe oraz powłokowe, z uwagi na dominujący efekt zginania występujący w większości symulowanych przypadków procesu tłoczenia. Symulacje MES przeprowadzono używając sztywne narzędzia (matryca, stempel, dociskacz) oraz odkształcalną blachę. Tarcie uwzględniano stosując model Coulomba, przy stałym współczynniku tarcia $m = 0,1$. W obliczeniach symulujących przyjęto następujące założenia:

- 1) Wsad do tłoczenia składa się z dwóch blach głębokotłocznych o grubościach 1 mm i 1,5 mm posiadających różne właściwości materiałowe (Tablica 1, poz. 4 i 6).
- 2) Ciepło wytwarzane przez laser jest modelowane za pomocą strumienia ciepła wprowadzonego w miejscu styku łączonych materiałów, mającego określony promień plamki lasera wynikający z rozkładu Gaussa.
- 3) Założono, że nie całe ciepło jest doprowadzane do blachy (w obliczeniach przyjęto współczynniki absorpcji dla materiałów blachy).
- 4) Ciepło odprowadzane jest z blachy za pomocą konwekcji i promieniowania.
- 5) W rozważaniach uwzględniono ciepło utajone wynikające z przemiany fazowej materiału blachy, poprzez przyjęcie zmiennej wraz z temperaturą zależności na ciepło właściwe – zgodnie z koncepcją Browna i Songa (Piela, 2001).
- 6) Przyjęto stałą temperaturę blachy łączonej przed spawaniem równą 20°C.
- 7) Określono czas stygnięcia blachy po procesie spawania, gwarantujący całkowite schłodzenie do temperatury przed spawaniem (doświadczalnie).
- 8) Założono stałą prędkość spawania blach.
- 9) W obliczeniach symulujących proces tłoczenia dla strefy spawania laserowego nie przyjęto lokalnie innego współczynnika tarcia (Saunders & Wagoner (Lange, 1997).
- 10) Symulacje procesu tłoczenia z zastosowaniem analizy termomechanicznej wykonano dla trójwymiarowego modelu, bez uproszczeń, na które po-



Rysunek 4. Symulacja procesu spawania: a) zmiany rozkładu temperatury, b) zmiany rozkładu naprężeń spawalniczych.

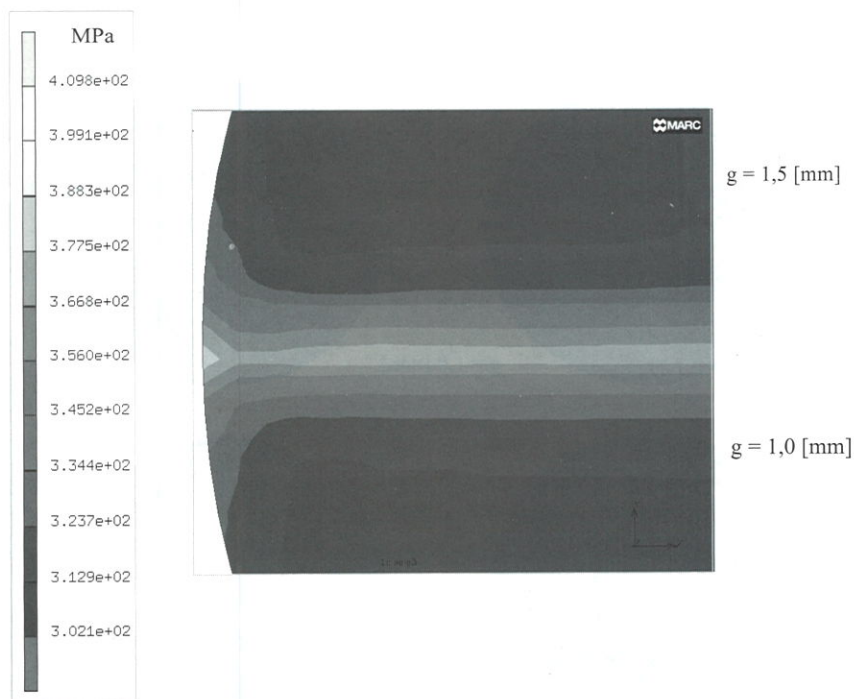
zwala osiowa symetria analizowanej wytłoczki kwadratowej.

Zastosowanie analizy termomechanicznej pozwoliło na uwzględnienie zjawisk zachodzących w blachach podczas spawania, a następnie użycie tak zdefiniowanego modelu wsadu do symulacji procesu tłoczenia. Poszczególne etapy spawania laserowego wsadu do tłoczenia z widocznym rozkładem temperatury blachy oraz naprężeń spawalniczych przedstawiono na rysunku 4. Model wsadu, czyli występujący w blasze rozkład naprężeń po procesie spawania i chłodzenia przedstawiono na rysunku 5. Naprężenia te mają istotny wpływ na charakter płynięcia blachy podczas tłoczenia, gdyż współoddziałują z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń narzędzi kształtujących.

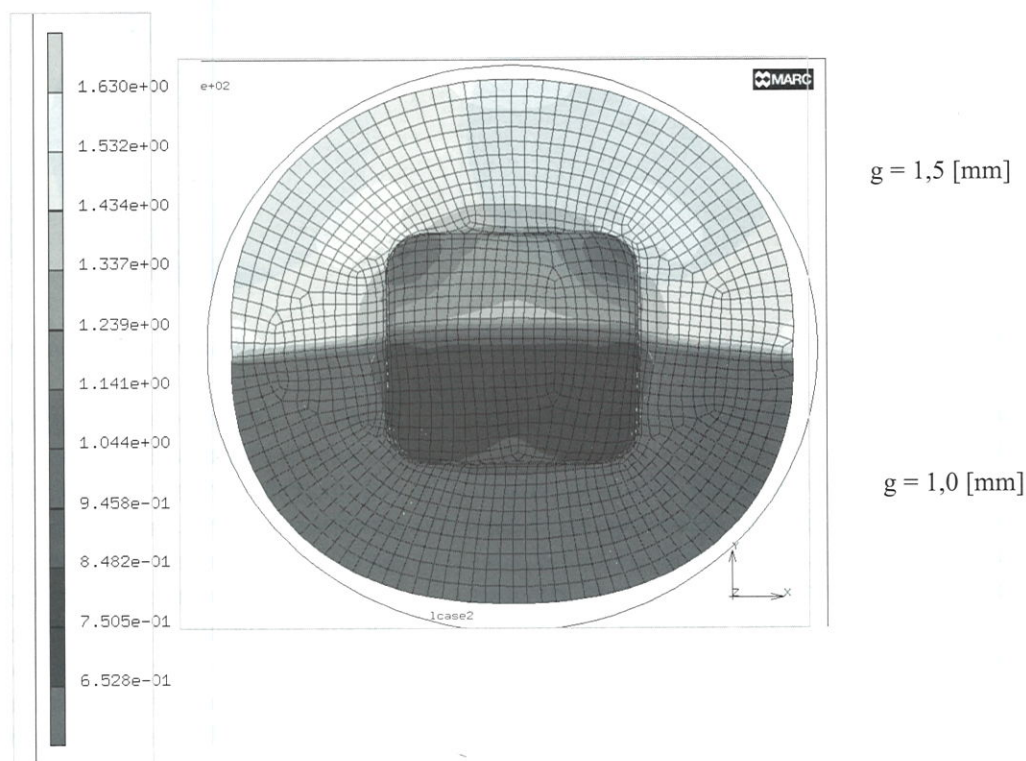
Wyniki symulacji kształtowania przyjętej do analizy wytłoczki kwadratowej zamieszczono na rysunkach 6 oraz 7. Charakterystyczny sposób płynięcia blachy łączonej podczas tłoczenia powodujący, że większe odkształcenia pojawiają się w cieńszej części wytłoczki występuje od samego początku procesu (ry-

sunek 6). Zmiany grubości poszczególnych blach, a zwłaszcza blachy w strefie spoiny, są wynikiem występujących w blasze naprężeń, czyli kumulacji oddziaływania naprężeń spawalniczych oraz naprężeń pochodzących od sił kształtowania blachy. Efektem tego są zróżnicowane odkształcenia lokalne oraz widoczne na rysunku 6 przemieszczenia powodujące wykrzywienie linii spoiny. Omówione zróżnicowania odkształceń lokalnych potwierdzają przedstawione na rysunku 7 rozkłady intensywności odkształceń. Na rysunku 8 przedstawiono obliczone wielkości przemieszczeń spoiny względem pierwotnego położenia w osi krążka wsadowego. Część kołnierzowa wytłoczki (obrzeże) cechuje się charakterystycznym kształtem występującym w wytłoczkach z blach spawanych (Zimniak i Piela, 2000a; Zimniak i Piela, 2000b; Piela i in., 2001e). Kształt ten powstaje w wyniku większego obwodowego ściskania kołnierza w części cieńszej wytłoczki w porównaniu do części grubszej oraz wciąganiem spoiny, której odkształcenie w kierunku długości jest ograniczone z uwagi na jej właściwości





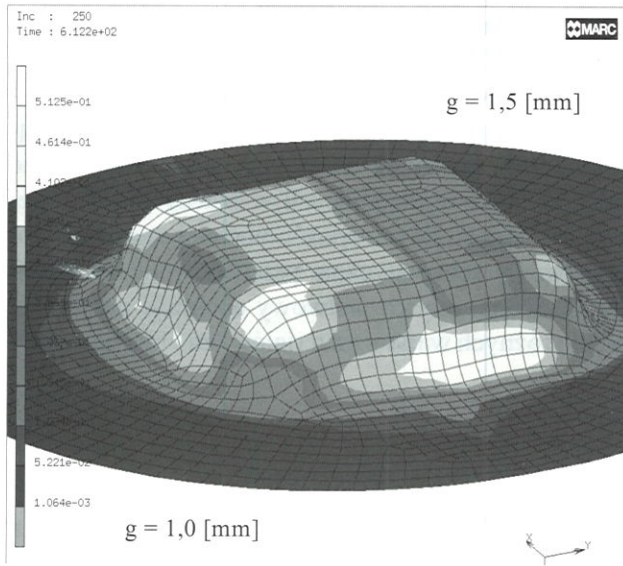
Rysunek 5. Naprężenia pozostające w blasze łączonej po procesie spawania i chłodzenia.



Rysunek 6. Rozkład grubości blachy z widocznym przemieszczeniem linii spoiny.

mechaniczne. Przedstawione na rysunku 8 przemieszczenia linii spoiny wykorzystano do weryfikacji wyników obliczeń symulujących. Porównano wyniki obliczeń z wynikami pomiaru wielkości przemieszczeń linii spoiny. Stwierdzono, że zastosowanie jedynie symulacji temperaturowego oddziaływania na zmiany naprężeń spawalniczych we wsadzie, nie pozwala na uzyskiwanie rezultatów wystarczająco dokładnych

dla celów praktycznych. Przepuszczalnie bardziej istotne dla analizy płynięcia blachy w strefie spoiny, są zmiany wywoływane temperaturowym oddziaływaniem procesu spawania tzn. zmiany intensywności umocnienia odkształceniowego materiału strefy spoiny, aniżeli powstające tam naprężenia spawalnicze. Generalnie wadą tej metody jest brak możliwości uwzględniania w obliczeniach symulujących róż-



Rysunek 7. Wynik symulacji procesu tłoczenia miseczki; rozkład intensywności odkształceń.

kalnych, a ponadto jest czasochłonny w użytkowaniu (Piela i in., 2001e), podjęto prace nad budową warstwowego modelu strefy połączenia.

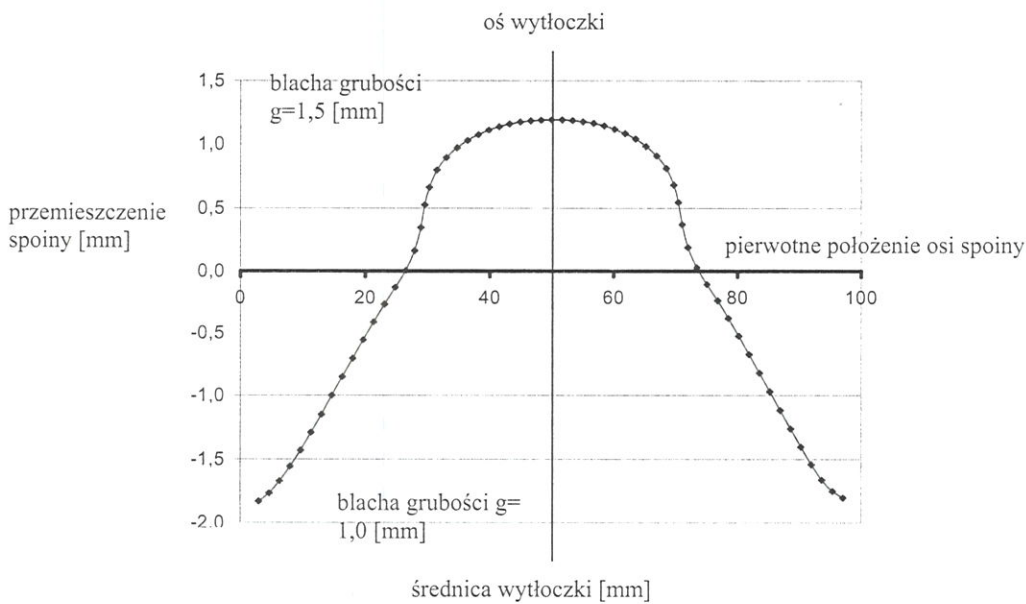
5. SYMULACJA PROCESU TŁOCZENIA – WARSTWOWY MODEL BLACHY ŁĄCZONEJ

Koncepcja budowy wielowarstwowego modelu materiałowego zakłada przyporządkowywanie odpowiednim elementom modelu dyskretnego charakterystyk opisujących zróżnicowane umocnienie wydzielonych elementów. Powstał w ten sposób model (Piela i in.; 2001d), w którym właściwości łączonych blach opisano równaniem:

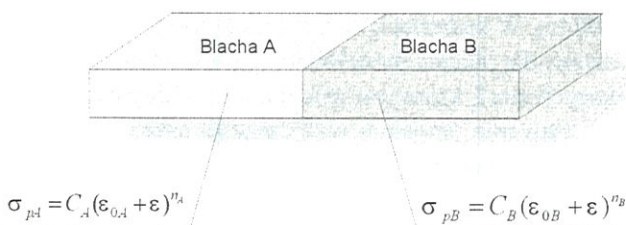
$$\sigma_p = C(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (4)$$

gdzie:

σ_p – naprężenie uplastyczniające,



Rysunek 8. Przemieszczenie linii spoiny na długości połączenia.

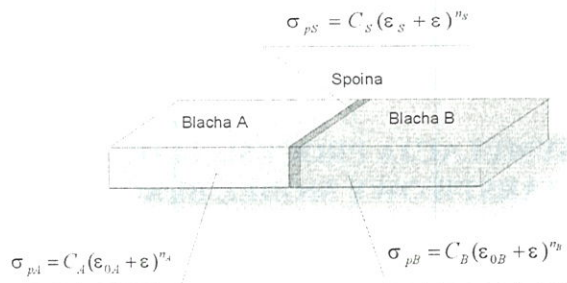


Rysunek 9. Prosty model blachy łączonej z blach o różnych właściwościach mechanicznych.

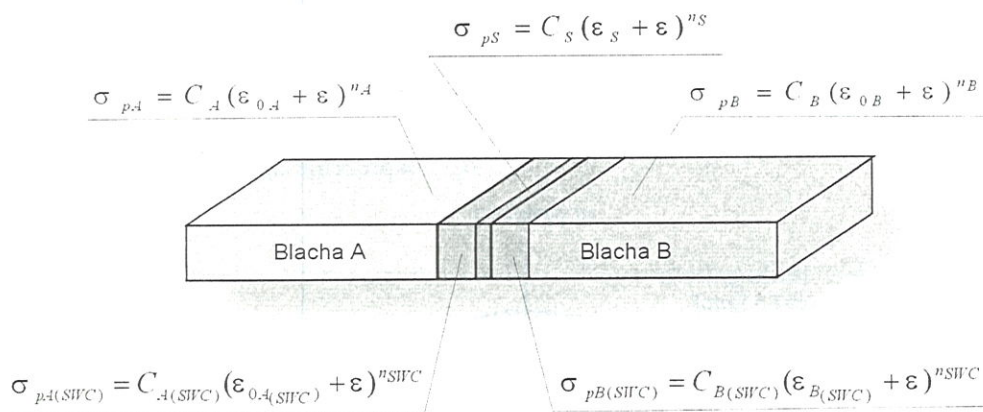
nicowanego umocnienia strefy wpływu ciepła oraz rdzenia spoiny. Ponieważ model ten niezbyt dokładnie odzwierciedla płynięcie materiału w tej strefie podczas tłoczenia, co wykazały pomiary odkształceń lo-

ε_0 – początkowe odkształcenie plastyczne,
 ε – odkształcenie,
 n – wykładnik krzywej umocnienia,
 C – stała materiałowa.

Schematycznie model materiału blachy łączonej przedstawiony na rysunku 9 opisany jest przez funkcję umocnienia różniącą się dla poszczególnych blach składowych jedynie współczynnikami równania (4). Badania symulujące przeprowadzono z wykorzystaniem tego modelu wykazały (Piela i in., 2001d; Piela i in., 2001f; Piela i Lisok, 2001b), że jest to podejście bardzo mało dokładne, głównie ze względu na brak uwzględnienia rzeczywistej szerokości strefy połączenia i skokową zmianę charakterystyk właściwości łączonych blach w miejscu spoiny. Badania metalograficzne wykazały, że spoina ma określoną geometrię



Rysunek 10. Trójwarstwowy model blachy łączonej.



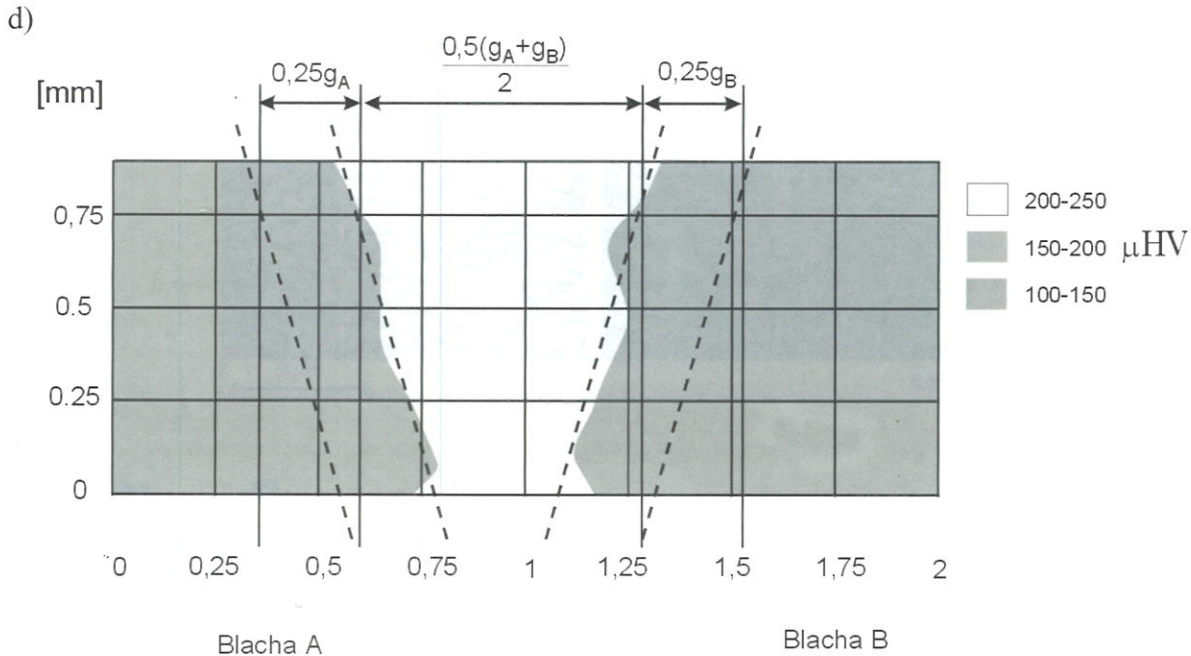
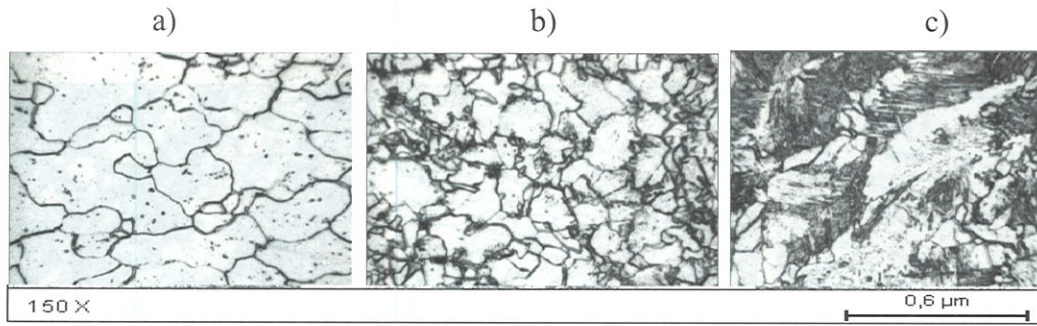
Rysunek 11. Schemat modelu pięciowarstwowego obejmujący połączenie materiałów: blachy A i B, rdzenia spoiny (S) oraz dwóch strefy wpływu ciepła (SWC).

tzn. szerokość i kształt. Spostrzeżenie to dało podstawy do budowy modelu trójwarstwowego, w którym wprowadzono spoinę o określonej szerokości wyznaczoną drogą pomiarów. Schemat tego modelu przedstawiono na rysunku 10.

Prowadzone w dalszym ciągu badania wykazały, że istotną rolę w procesie tłoczenia odgrywa usytuowanie spoiny we wsadzie oraz jej orientacja względem kierunku działania naprężeń. Istotna jest również dla procesu płynięcia materiału blachy, strefa przejściowa pomiędzy materiałem rodzimym a spoiną. Wyniki tych badań stanęły u podstaw prac związanych z budową nowego modelu materiału blachy łączonej. Przyjęto jednocześnie założenie, że sposób wyznaczania parametrów modelu musi cechować prostota oraz mała czasochłonność badań. W tym celu wykonano próbę jednoosiowego rozciągania próbek z blach spawanych, wyciętych pod kątem 0°, 45°, 90° względem linii spoiny oraz próbę hydraulicznego wybrzuszania krążków ze spoiną usytuowaną w osi oraz wzdłuż cięciwy równoległej do średnicy wsadu i przechodzącej przez punkt leżący w połowie długości promienia. Przeprowadzone badania pozwoliły na analizę odkształceń lokalnych w strefie spoiny różnie zorientowanej względem kierunku rozciągania. Bada-

nia te wykazały, podobnie jak prace (Haferkamp, 1997), że dla zwiększenia dokładności odwzorowania symulowanego obiektu, niezbędne jest wprowadzenie dodatkowych stref przejściowych oddzielających rdzeń spoiny od blach łączonych. Strefy te, to odpowiedniki występujących w rzeczywistości stref wpływu ciepła. W ten sposób powstał model pięciowarstwowy schematycznie przedstawiony na rysunku 11. Model pięciowarstwowy obejmuje połączenie pięciu różnych warstw materiałów tzn.: blachę A, bla-

chę B, rdzeń oraz dwie strefy wpływu ciepła. Poszczególnym strefom, traktowanym jako różne materiały, przyporządkowywano odpowiednie funkcje umocnienia. Sposób wyznaczania parametrów dla poszczególnych funkcji umocnienia drogą pomiarów mikrotwardości strefy spoiny i rozciągania wąskich próbek ze spoiną wzdłużną, a także rozciągania próbek z materiałów A i B bez spoiny, omówiono szczegółowo w pracach (Piela i in., 2000b; Piela, 2001; Piela i in., 2001c). W badaniach tych stwierdzono, że istotne znaczenie dla jakości modelowania ma geometria wydzielonych stref, która jest zależna od parametrów procesu spawania, sposobu wzajemnego ustawienia blach (rysunek 1a lub b) oraz rodzaj łączonych blach. Na rysunku 12 przedstawiono mikrofotografie strefy złącza laserowego dla połączenia blach tej samej grubości 0,7 mm – 0,7 mm w gatunku DC04 (tablica 1, poz. 3). Na rysunku tym przedstawiono również zmiany mikrotwardości wydzielonych stref. Dla połączenie blach różnego gatunku oraz różnej grubości (tablica 1, poz. 4 oraz 9) zmiany mikrotwardości oraz strukturę wydzielonych stref przedstawiono na rysunku 13. Pomiarzy mikrotwardości złącz przedstawionych na tych rysunkach wykazały, że wydzielone warstwy róż-



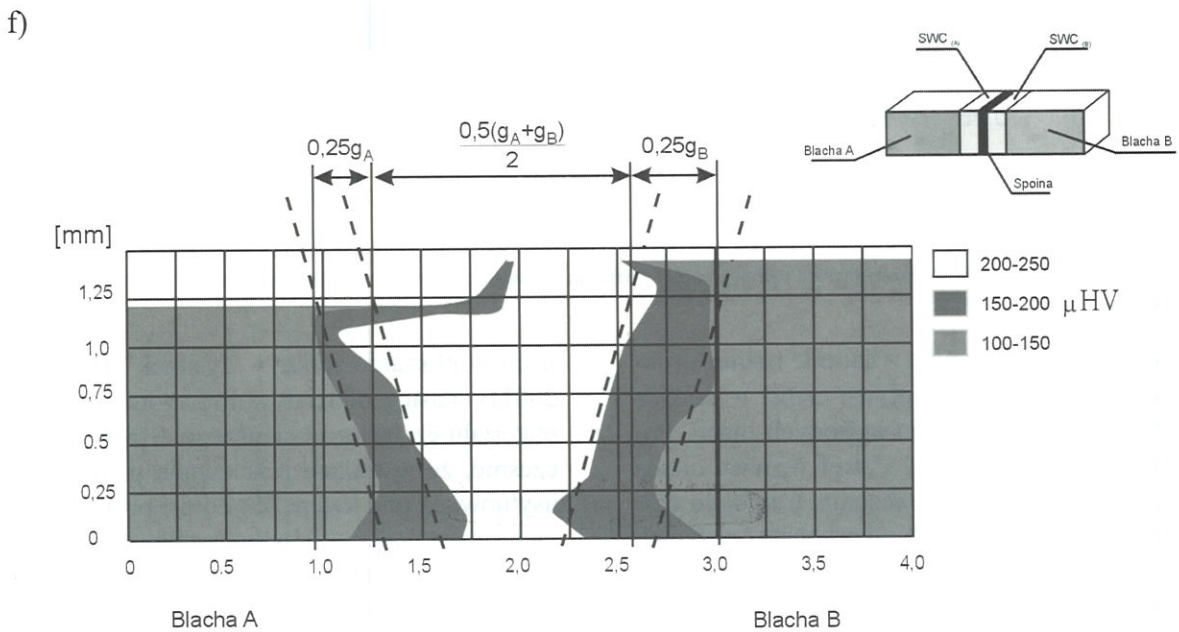
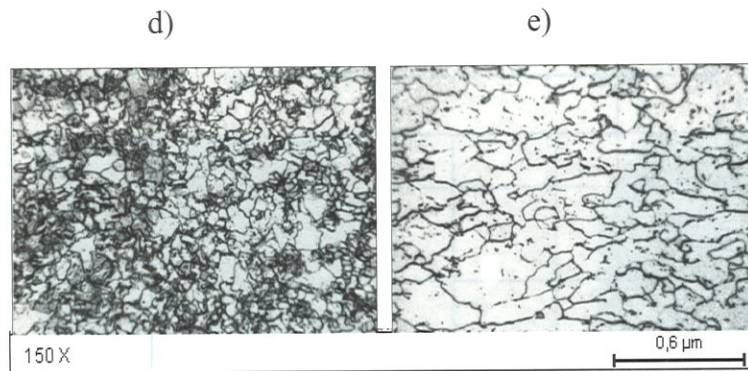
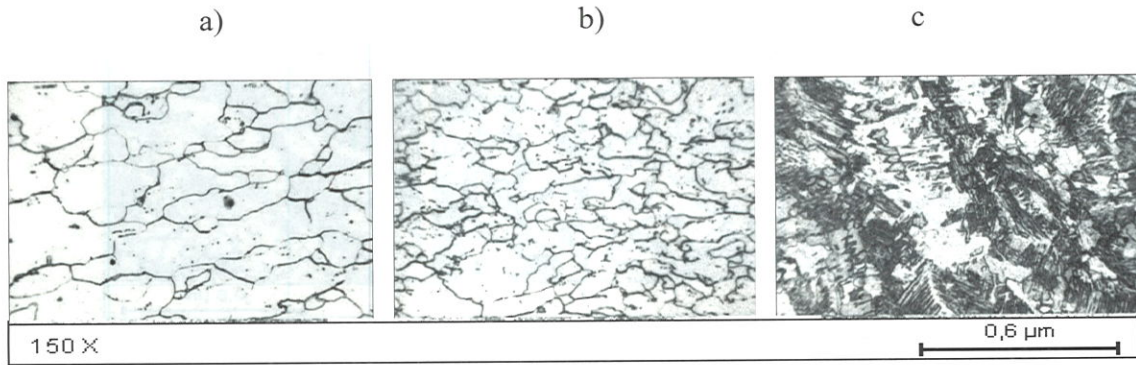
Rysunek 12. Fotografie struktury: a) materiału blachy A (feryt), b) stref wpływu ciepła (feryt + bainit), c) rdzenia spoiny (bainit - feryt), d) rozkład mikrotwardości oraz geometria strefy wpływu ciepła i rdzenia spoiny, na przekroju poprzecznym złącza blach tej samej grubości 0,8 mm - 0,8 mm w gatunku DC03.

nią się twardością, co wynika z istotnie różnej struktury rdzenia spoiny i stref wpływu ciepła w porównaniu do materiału rodzimego łączonych blach. Ponadto, granice rdzenia spoiny i stref wpływu ciepła tworzą złożoną geometrię połączenia, trudną do opisanego w prosty sposób, zależną od grubości łączonych blach oraz sposobu prowadzenia wiązki laserowej. Upraszczając geometrię złącza w modelu pięciowarstwowym przyjęto założenie, iż wydzielone warstwy są do siebie równoległe, jak to pokazano na rysunkach 12d oraz 13f, co odpowiada geometrii modelu przedstawionego na rysunku 11.

Opisany model użyto w obliczeniach symulujących próby jednoosiowego rozciągania próbek ze spoiną różnie zorientowaną względem kierunku rozciągania (rysunki 14–15) oraz próbę dwuosowego rozciągania hydrauliczne wybrzuszenie (rysunek 16a) próbek ze spoiną usytuowaną w różnej odległości od szczytu czaszy. Wyniki badań dotyczące dwuosowego rozciągania omówione w publikacji (Piela, 2001) skonfrontowano z wynikami pomiaru odkształceń lokal-

nych w obszarze spoiny – rysunek 16b (Piela i in., 2001f). Zasięg oddziaływania spoiny jest różny dla materiału grubszego i cieńszego. Stwierdzono jednocześnie, że w trakcie rozciągania próbek ze spoiną usytuowaną pod kątem 45° do osi próbki, spoina obraca się względem kierunku rozciągania, co pokazuje rysunek 15. W trakcie rozciągania kąt między spoiną a kierunkiem rozciągania zmniejsza się. Wielkość obrotu spoiny, jak również zróżnicowanie rozkładów odkształceń po obu jej stronach zależy od wytrzymałości konstrukcyjnej łączonych blach (Rojek i Piela, 2002; Piela i Rojek, 2002).

Podobnie jak dla próby dwuosowego rozciągania dokonano porównania wyników w próbach jednoosiowego rozciągania (rysunek 17). Na podstawie tych badań stwierdzono, że dla poprawnego wyznaczenia odkształceń lokalnych w strefie samej spoiny laserowej, jak i w strefach do niej przyległych, istotne znaczenie ma szerokość przyjętych stref wpływu ciepła. Stwierdzono także (Piela i in., 2001b; Piela i in., 2000c), że głębokość oddziaływania spoiny, zależna

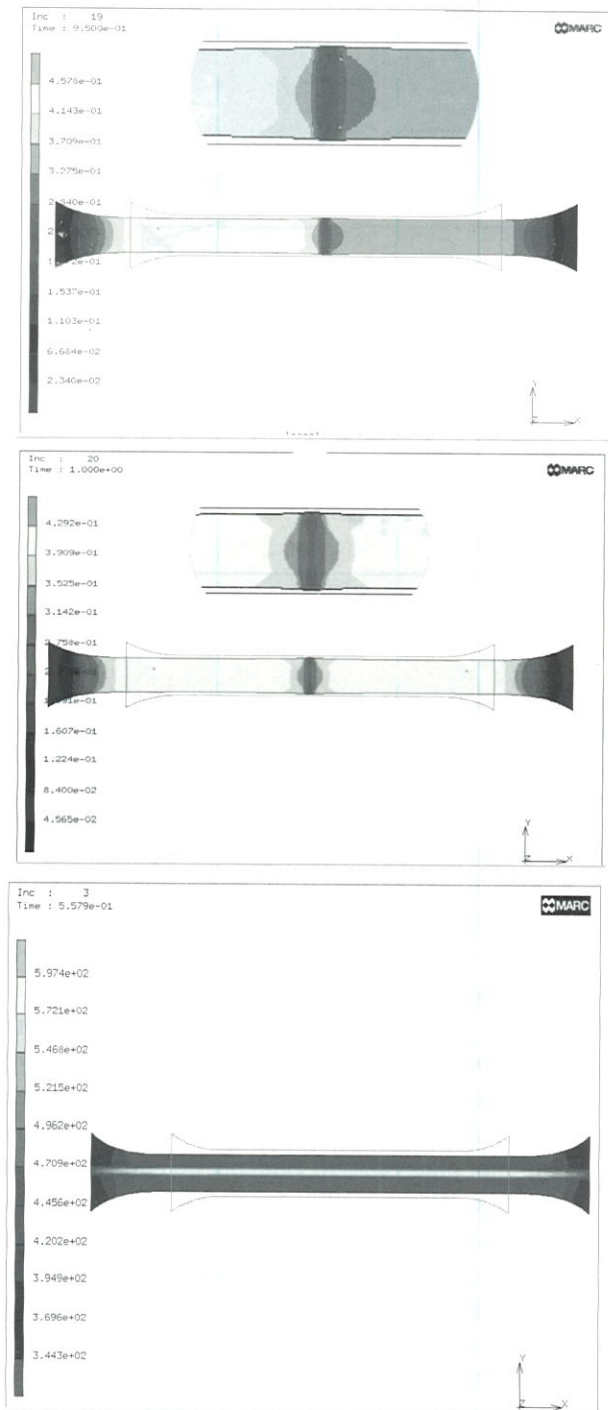


Rysunek. 13. Fotografie struktury: a) materiału blachy A grubości 1,2 mm (ferryt), b) strefy wpływu ciepła blachy A (ferryt + nieliczne obszary bainitu), c) rdzenia spoiny (bainit + ferryt), d) strefy wpływu ciepła materiału blachy B grubości 1,4 mm (drobnoziarnista struktura ferrytyczno-bainityczna), e) materiału blachy B (drobnoziarnista struktura ferrytyczna), f) rozkład mikrotwardości oraz geometria strefy wpływu ciepła i rdzenia spoiny, na przekroju poprzecznym złącza laserowego blach różnej grubości w gatunkach DC04 i H340LAD+Z.

jest od różnicy wytrzymałości konstrukcyjnej łączonych blach tzn. różnicy wytrzymałości i różnicy grubości. Oznacza to, że szerokość przyjętych stref oddzielających rdzeń spoiny od materiałów łączonych blach, z mechanicznego punktu widzenia, nie można ograniczać jedynie do stref wpływu ciepła. Strefa wpływu ciepła (SWC) widoczna pod mikroskopem

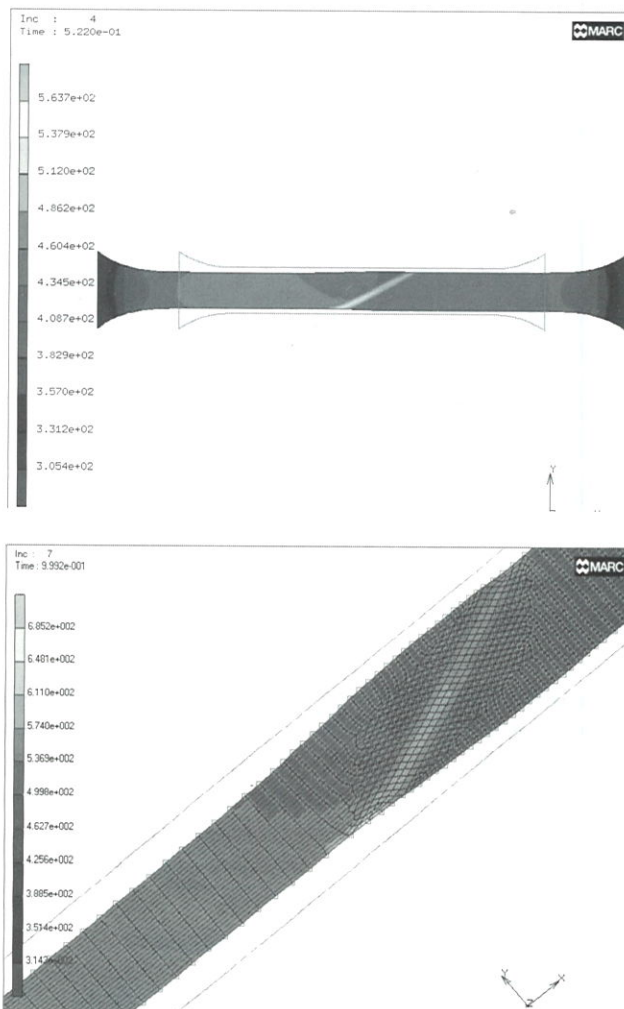
jako strefa o istotnie różnej strukturze nie stanowi bowiem granicy naprężeniowego oddziaływania złącza laserowego na schemat płynięcia blachy w strefach przyspoinowych.

Wykorzystując zmodyfikowany model pięciowarstwowy przeprowadzono obliczenia symulujące próbę Erichsena oraz Kwi. Modyfikacja modelu polega-



Rysunek 14. Rozkład odkształceń lokalnych w strefie spoiny usytuowanej poprzecznie do kierunku rozciągania dla modelu pięciowarstwowego: a) blachy różnej grubości, b) blachy tej samej grubości, c) Rozkład intensywności odkształcenia dla połączenia blach ze spoiną wzdłużną.

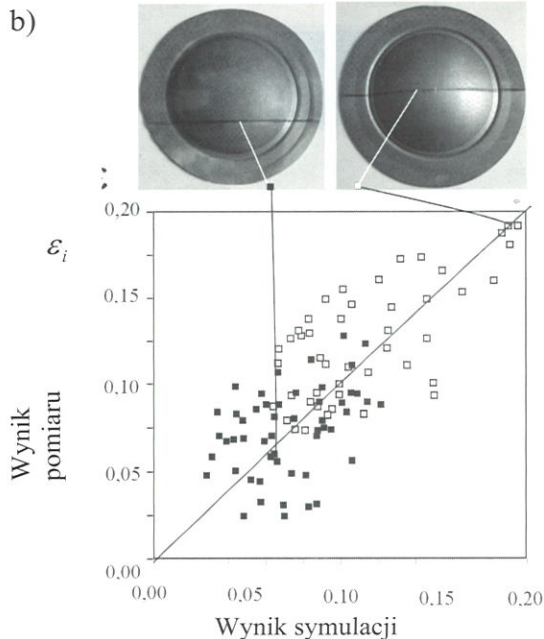
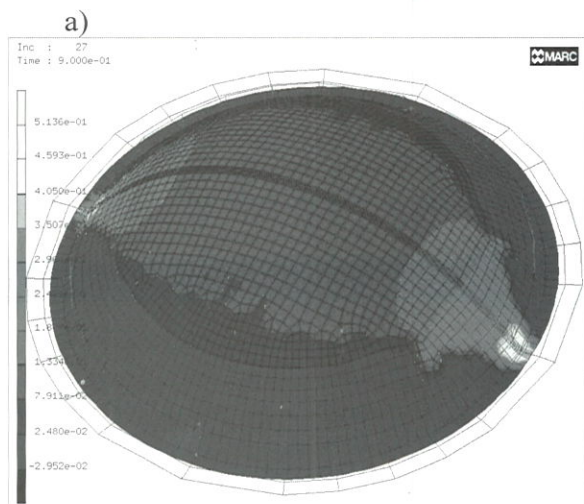
ła na poszerzeniu stref oddzielających rdzeń spoiny od materiału rodzimego. Zmiany szerokości tych stref dobrano na podstawie pomiarów zróżnicowania odkształceń lokalnych stref przyspoinowych wyznaczanych w próbach rozciągania. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 18 oraz 19. Pomiar odkształceń lokalnych w strefie spoiny przeprowadzonych prób KWI oraz Erichsena wykazały, że uzyskane wyniki symulacji poprawnie odzwierciedlają cha-



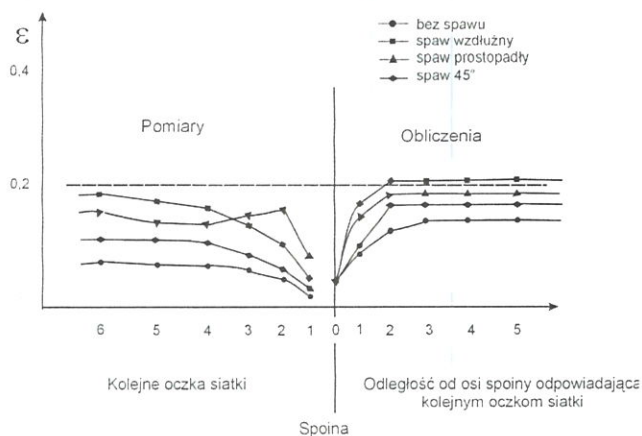
Rysunek 15. Rozkład intensywności odkształceń lokalnych w próbie rozciągania ze spoiną usytuowaną pod kątem 45° względem kierunku rozciągania, e) powiększenie strefy spoiny próbki ze spoiną pod kątem 45° z wyraźnym efektem obracania się spoiny podczas rozciągania.

rakter płynięcia blachy łączonej podczas tłoczenia stemplem o zakończeniu kulistym oraz płaskim. Można zatem stwierdzić, że schematy odkształcenia występujące w różnych próbach technologicznych, tłoczenia również z udziałem tarcia, mogą być modelowane z wystarczającą do celów praktycznych dokładnością, przy użyciu zmodyfikowanego modelu pięciowarstwowego. Potwierdzona pomiarami zgodność wyników symulacji dotyczy zarówno zróżnicowania odkształceń lokalnych w strefie spoiny, jak i efektów wykrzywienia linii spoiny wskutek jej przemieszczenia. Zgodność wyników symulacji i obliczeń dotyczy zarówno zróżnicowania odkształceń lokalnych w strefie spoiny, jak i efektu wykrzywienia linii spoiny wskutek jej przemieszczania.

Pozytywne rezultaty doświadczeń z wykorzystaniem modelu pięciowarstwowego do symulacji jedno i dwuosiowego rozciągania, jak również prób KWI oraz wybrzuszenia stemplem kulistym spowodowały,



Rysunek 16. a) Rozkład odkształceń lokalnych uzyskany podczas symulacji próby hydraulicznego wybrzuszenia. Blachy tej samej grubości, b) porównanie wyników odkształceń symulowanych MES z wynikami pomiarów. Próba hydraulicznego wybrzuszenia. Blachy składowe tej samej grubości.



Rysunek 17. Porównanie odkształceń zastępczych wyznaczonych droga pomiarów oraz obliczeń numerycznych.

że model ten wykorzystano do symulacji tłoczenia blach łączonych w warunkach przemysłowych. Badania te dotyczą zarówno prac związanych z modyfikacją strefy połączenia modelu pięciowarstwowego, jak i użytkowania innych programów komercyjnych stosowanych w tłocznich przemysłu motoryzacyjnego.

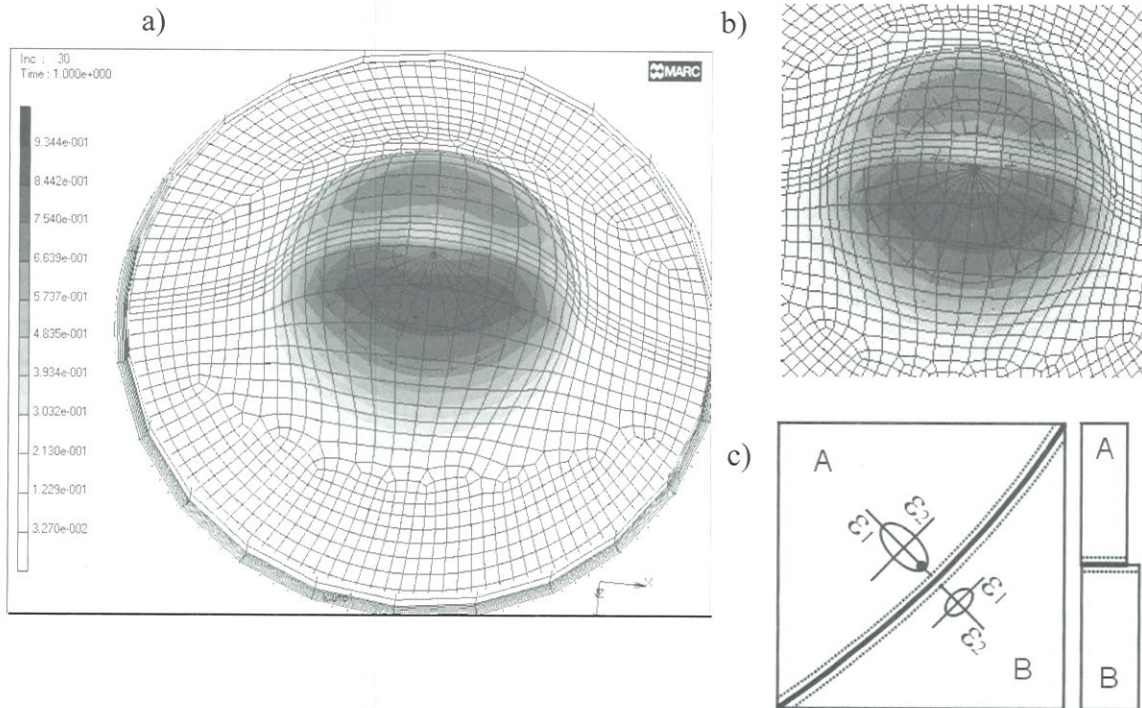
5. WNIOSKI

Uzyskane w badaniach rezultaty można ująć w następujących wnioskach:

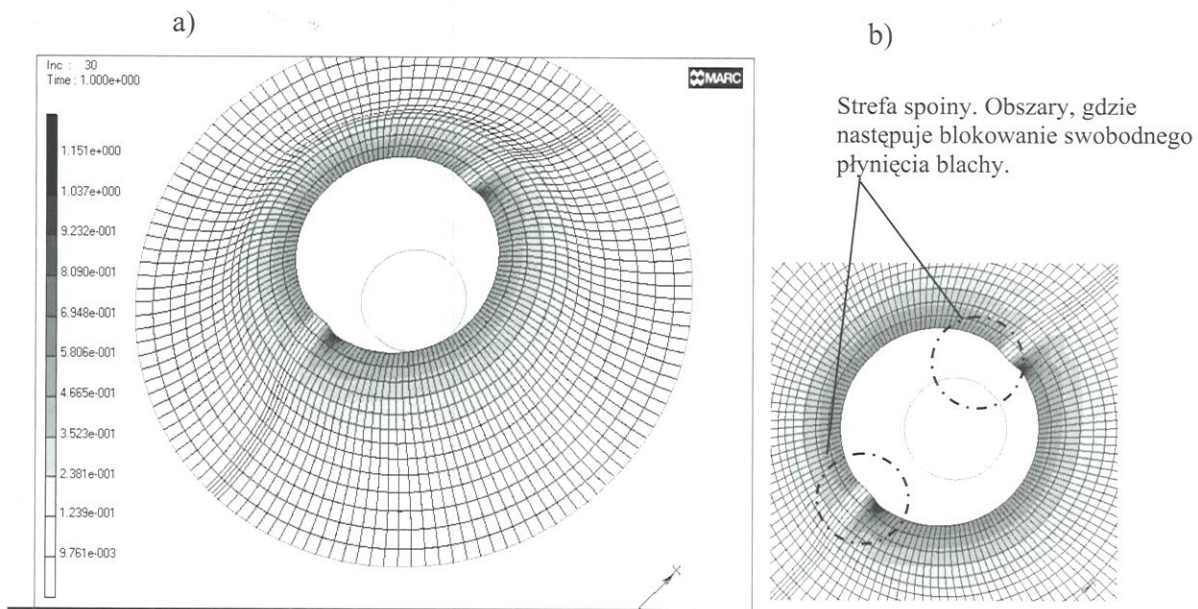
1. Stwierdzono, że odkształcenie blachy spawanej determinowane jest orientacją linii spoiny względem kierunku działania obciążeń, zaś podatność

do tłoczenia blach łączonych zależy od charakterystyki blach składowych oraz jakości spoiny. Z tego względu trudno jest określić tłoczność tego rodzaju wsadu uwzględniając wszystkie możliwe warianty połączeń blach.

2. Spoina jest bardziej wytrzymała, a jednocześnie mniej plastyczna, w porównaniu do łączonych blach, co powoduje, że pęknięcie blachy podczas tłoczenia koncentruje się w miejscu najsłabszym lub najmniej plastycznym zależnie od sposobu jej obciążenia. W przypadku bezpośredniego rozciągania stanowi element determinujący cechy plastyczne odkształcanego materiału, natomiast dla pozostałych przypadków obciążenia prowadzi do zaburzeń procesu plastycznego płynięcia blach w strefie połączenia.
3. Stwierdzono, że charakter plastycznego płynięcia blachy w strefie połączenia zależy od orientacji linii spoiny względem kierunków głównych naprężeń działających w płaszczyźnie blachy.
4. Spoina, ze względu na swe podwyższone właściwości wytrzymałościowe, w porównaniu do łączonych blach staje się elementem wzmacniającym konstrukcję wytłoczki.
5. W przypadku bezpośredniego rozciągania strefy spoiny, wzdłuż kierunku jej przebiegu, utrata stateczności rozpoczyna się od spoiny, zaś dalsze rozdarcie jest efektem penetracji wstępnego uszkodzenia w głąb materiału blach składowych. Owym wstępnym uszkodzeniem może być: nieciągłość spoiny, koncentracja naprężeń lub wada geometryczna.



Rysunek 18. a) Rozkład intensywności odkształceń w modelowanej wytłoczce próby Erichsena IE20, b) powiększenie strefy spoiny (rdzenia i stref przyległych), c) schemat rozkładu kierunków głównych odkształcenia modelowanej wytłoczki.



Rysunek 19. a) Rozkład intensywności odkształcenia w próbie KWI z widocznym efektem blokowania swobodnego płynięcia blachy w strefie spoiny, b) powiększenie strefy spoiny.

tryczna (jak np. brak spoiny na całej grubości blachy).

LITERATURA

- Haferkamp, H., Bach, F., Burmester, L., Höfemann, M., Niemeyer M., Kreutzburg K., 1997, Laserstrahl-fügen von innovativen Werkstoffen Für die Automobilindustrie, *Bänder Bleche Rohre*, (3) 167-178.
- Hyrca, M., Piel, A., 2000, Analiza procesu płynięcia materiału blachy łączonej typu "Tailored Blanks" podczas tłoczenia wyrobów osiowo-symetrycznych. *VII Seminarium Naukowe Wyzd. Inż. Mater. Met. i Transp. Pol. Śl. nt.: "Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej"*. Katowice, 245-250.
- Kiefer, A., 1997, Ein Herstellungsprozeß vom Coil bis zum fertigen Fahrzeugteil, *Bänder Bleche Rohre*, (5) 287-294.
- Kinsey, B., Zhihong, L., Jian, C., 2000, A novel forming technology for tailor-welded blanks, *J. Mat. Proc. Techn.*, 1, 145-153.

- Klose, P., 2001, Vom Werkstofflieferanten zum Systempartner - Der integrative Ansatz zur Anwendung moderner Stahlwerkstoffe Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Freiberg, 1.
- Kusuda, H., Toshiyoku, T., Fumiaki, N., 1997, Formability of tailored blanks, *J. Mat. Proc. Techn.*, 1, 134-140.
- Lalik, S., Niewielski, G., Piela, A., 2000, Badania właściwości mechanicznych i metalograficzne złącz spawanych laserem ze stali St 12.03. *VII Seminarium Naukowe Wydz. Inż. Mater. Met. i Transp. Pol. Śl. nt.: Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej*. Katowice, 233-238.
- Lange, K., 1997, Modern metal forming technology for industrial production, *J. Mat. Proc. Techn.*, 1, 1-13.
- Lisok, J., Piela, A., 2000, Analiza procesu plastycznego płynięcia w strefie spoiny blachy łączonej laserowo w próbie jednoosiowego rozciągania. *VII Seminarium Naukowe Wydz. Inż. Mater. Met. i Transp. Pol. Śl. nt.: Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej*. Katowice, 239-244.
- Niemeyer, M., Müller S., Ullrich W., 2000, Neue Wege im Karosseriebau. *Bänder Bleche Rohre*, (11-12), 39.
- Piela, A., 2000, Nowe materiały do tłoczenia - Tailored Blanks, *XIV Konf. Naukowo-Techniczna Obróbki Plastycznej nt. Konstrukcja i technologia wytłoczek i wyprasek*, Poznań - Czerniejewo, 87 -94.
- Piela, A., Zimniak, Z., 2000a, Simulation of tailored blanks stamping process applying the finite elements method - based on cupping as an example. *Mat. 8. Konf. Metal Forming 2000*, ed., Pietrzyk, M., Kusiak, J., Majta, J., Hartley, P., Pillinger, I., Kraków, Wydawn. A. Balkema, 215-221.
- Piela, A., Hycza, M., Lisok, J., 2000b, Ocena tłoczności wsadów spawanych laserem, *Mat. Konf. FORMING 2000*, Ustroń, 101-106.
- Piela, A., Świlło, S., Kocańda, A., 2000c, Automatyzacja pomiaru odkształceń przy wyznaczaniu granicznej krzywej tłoczenia, *Obróbka Plastyczna Metali*, 11, 5-13.
- Piela, A., 2001, Tłoczność wykrojów spawanych laserem, *IV Konferencja nt. Odkształcalność metali i stopów*, Łańcut.
- Piela, A., Hycza, M., 2001a, Graniczna krzywa tłoczenia blach typu Tailored Blanks, *Mat. Konf. FORMING 2001*, Stara Lesna, 163-170.
- Piela, A., Lisok, J., 2001b, przyczynek do budowy modelu materiałowego blach łączonych typu Tailored Blanks - model geometryczny, *Mat. Konf. FORMING 2001*, Stara Lesna, 171-178.
- Piela, A., Hycza, M., Lisok, J., 2001c, Wsady do tłoczenia spawane laserem, *IX Seminarium Naukowe Wydz. Inż. Metal. i Trans. Pol. Śl. nt. Nowe technologie i materiały w metalurgii i inżynierii materiałowej*, Katowice, 385-388.
- Piela, A., Hycza, M., Lisok, J., 2001d, Model spoiny laserowej we wsadach do tłoczenia typu Tailored Blanks, *Przegląd Mechaniczny*, 4, 19-22.
- Piela, A., Kocańda, A., Zimniak, Z., 2001e, FEM simulation of drawing of tailored blanks, *Mat. Konf. NUMIFORM 2001, Toyohashi*, Wydawn. A. Balkema, 795-800.
- Piela, A., Hycza, M., Lisok, J., Zimniak, Z., Kalita, W., 2001f, Model blachy łączonej spoiną laserową. *Mat. 8. KomPlasTech 2001*, ed., Grosman, F., Piela, A., Kusiak, J., Pietrzyk, M., Korbielów, Wydawn. Akapit, 85-93.
- Piela, A., Rojek, J., 2002, Weryfikacja wyników numerycznej symulacji procesu tłoczenia - część II: tłoczenie niejednorodnych blach typu tailored blanks, *Mat. 9. Konf. KomPlasTech 2002*, ed., Pietrzyk, M., Kusiak, J., Grosman, F., Piela, A., Szczawnica, Wydawn. Aka-pit, 239-246.
- Rojek, J., Piela, A., 2002, Weryfikacja wyników numerycznej symulacji procesu tłoczenia - część I: Tłoczenie jednorodnych blach głębokotłocznych, *Mat. 9. Konf. KomPlasTech 2002*, ed., Pietrzyk, M., Kusiak, J., Grosman, F., Piela, A., Szczawnica, Wydawn. Aka-pit, 231-238.
- Świlło, S., Kocańda, A., Piela, A., 2000, Determination of the forming limit curve by using stereo image processing. *Mat. 8. Konf. Metal Forming 2000*, ed., Pietrzyk, M., Kusiak, J., Majta, J., Hartley, P., Pillinger, I., Kraków, Wydawn. A. Balkema, 545-550.
- Zhao, K.M., Chun, B.K., Lee, J.K., 2001, Finite element analysis of tailor-welded blanks, *J. Mat. Proc. Techn.*, 2, 117-130.
- Zimniak, Z., Piela, A., 2000a, Finite element analysis of a tailored blanks stamping process, *J. Mat. Proc. Techn.*, 1-3, 254-260.
- Zimniak, Z., Piela, A., 2000b, Komputerowe wspomaganie projektowania procesu spawania laserowego blach typu Tailored Blanks, *42 Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza nt. Techniki komputerowe w spawalnictwie*, Warszawa, 23-28.