

POLSKA METALURGIA W LATACH 2006 – 2010

Redaktor Wydania:

K. Świątkowski

Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Redaktorzy Działów:

J. Dańko, M. Pietrzyk

Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

L. Blacha

Politechnika Śląska, Katowice

J. Dutkiewicz

Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków

J. Kazior

Politechnika Krakowska, Kraków

**KOMITET METALURGII
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

A. BĄCZKOWSKI

Kształtowanie wyrobów cylindrycznych z wybranych stopów aluminium metodą zgniatania obrotowego..... 539

A. GONTARZ

Porównanie efektywności procesów kucia korpusu noża obrotowego 549

Z. PATER

Walcowanie poprzeczno-klinowe korpusów noży obrotowych 557

H. DYJA, S. MRÓZ, S. SAWICKI, P. SZOTA, A. STEFANIK

Teoretyczna i doświadczalna analiza procesu walcowania prętów żebrowanych platerowanych stalą odporną na korozję..... 565

W. MATYSIAK, K. ŚWIĄTKOWSKI

Wpływ cięcia laserowego na przebieg procesu wywijania obrzeży otworów w blachach grubych 573

J. ROJEK, M. HYRCZA-MICHALSKA, A. BOKOTA, W. PIEKARSKA

Doświadczalne i numeryczne wyznaczanie właściwości mechanicznych złącz wsadów do tłoczenia spawanych techniką laserową 582

M. HYRCZA-MICHALSKA

Badania podatności blach i rur spawanych laserowo do kształtowania ciecżą 590

W. MUZYKIEWICZ

Implementacja niekonwencjonalnych wysokocenergetycznych technik cięcia do gęstej perforacji blachy 598

M. HYRCZA-MICHALSKA, P. PŁONKA, T. MRUGAŁA

Analiza podatności do tłoczenia stali żarowytrzymałych i żaroodpornych stopów niklu stosowanych na konstrukcje silników lotniczych..... 607

S. KUT

Zastosowanie funkcji odkształcalności granicznej w prognozowaniu jakości geometrycznej wykojek..... 615

M. KNAPIŃSKI, H. DYJA, A. KAWAŁEK, M. KWAPISZ

Zmiana wielkości ziarna austenitu podczas nagrzewania wsadu i walcowania wstępnego blach grubych ze stali S460NL1 623

H. PAUL, Ł. MADEJ, M. BIJAK, L. TRĘBACZ, W. WAJDA, M. MISZCZYK

Modelowanie rozwoju mikrostruktury stopu AA1050 wyciskanego w procesie ECAP 632

W. WAJDA, H. PAUL, K. PERZYŃSKI, Ł. MADEJ

Wpływ orientacji sąsiadujących krystalitów na zmiany tekstury i zachowanie umocnieniowe w pobliżu granicy ziaren 641

DOŚWIADCZALNE I NUMERYCZNE WYZNACZANIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ZŁĄCZ WSADÓW DO TŁOCZENIA SPAWANYCH TECHNIKĄ LASEROWĄ

JERZY ROJEK¹, MONIKA HYRCZA-MICHALSKA²,
ADAM BOKOTA³, WIESŁAWA PIEKARSKA³

¹ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa

² Politechnika Śląska, Katowice

³ Politechnika Częstochowska, Częstochowa

Abstract

Mechanical properties of the weld zone are necessary for accurate modelling of forming processes involving tailor-welded blanks (TWB). This paper presents different methods which can be used to determine mechanical properties of the weld zone in tailor-welded blanks. Methods based on experimental tests and numerical simulation as well as those combining experimental procedures with numerical studies are described. The methods presented include uniaxial tension tests, microhardness tests, indentation tests combined with inverse numerical analysis, and numerical simulation of laser welding. The stress-strain curves for the weld zone determined with different methods have been compared with one another.

1. Wstęp

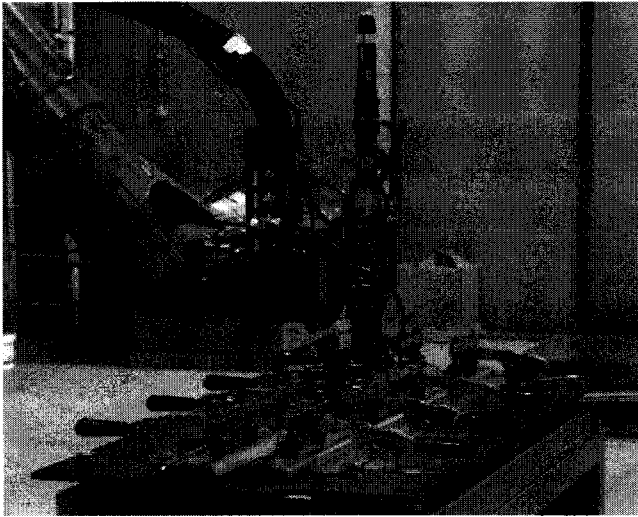
Wsady spawane laserowo stanowią wysoko zaawansowany materiał wyjściowy do otrzymywania elementów karoserii samochodowych. Otrzymuje się je poprzez spawanie blach z różnych gatunków stali lub blach o różnych grubościach. Daje to możliwość optymalnego wykorzystania właściwości materiału w zależności od potrzeb konstrukcyjnych oraz zminimalizowanie masy karoserii.

Kształtowanie wsadów spawanych laserowo metodami przeróbki plastycznej, w omawianym przypadku – tłoczenia, stwarza nowe problemy technologiczne wymagające rozwiązania. Głównym czynnikiem wpływającym negatywnie na własności tłoczne wsadów spawanych laserowo (ang. TWB – tailor welded blanks) jest umocnienie materiału w strefie przetopienia spoiny i strefie wpływu ciepła (SWC) wywołane zmianami struktury wskutek spawania taką techniką [1, 2]. Zmniejszona odkształcalność strefy spoiny i strefy wpływu ciepła musi być brana pod uwagę przy projektowaniu wytłoczek z takich wsadów, a symulacje numeryczne stanowią niezwykle cenne narzędzie wspomagające projektowanie ich tłoczenia.

Dokładne modelowanie łoczenia blach spawanych laserowo wymaga uwzględnienia strefy złącza i zmienionych własności mechanicznych materiału w tej strefie. Wyznaczenie własności materiału w spoinie i w strefie wpływu ciepła nie jest zadaniem łatwym, a to z powodu złożoności zjawisk spawania laserowego oraz znikomych wymiarów przekroju poprzecznego spoiny.

2. Przygotowanie wsadów spawanych laserowo

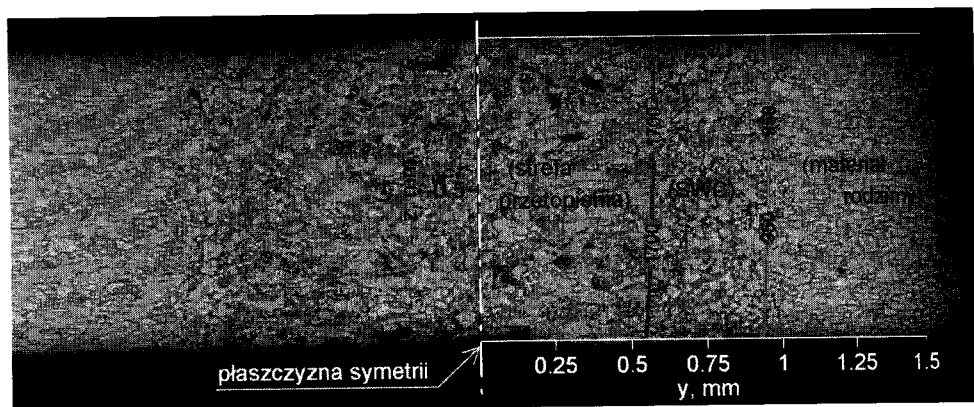
W przedstawionych badaniach wykorzystano prostokątne wsady spawane otrzymane przez połączenie blach o wymiarach 100 mm x 300 mm z tego samego gatunku stali (DC04) i o tej samej grubości (1 mm). Blachy były spawane laserem typu Nd:YAG przy następujących parametrach procesu: moc wiązki lasera, 2000 W, prędkość spawania, 4.0 m/min, średnica wiązki lasera, 600 μm . Spawanie blach wykonano w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach na stanowisku przedstawionym na rys. 1.



Rys. 1. Stanowisko do spawania laserowego.

3. Mikroskopowe badania metalograficzne

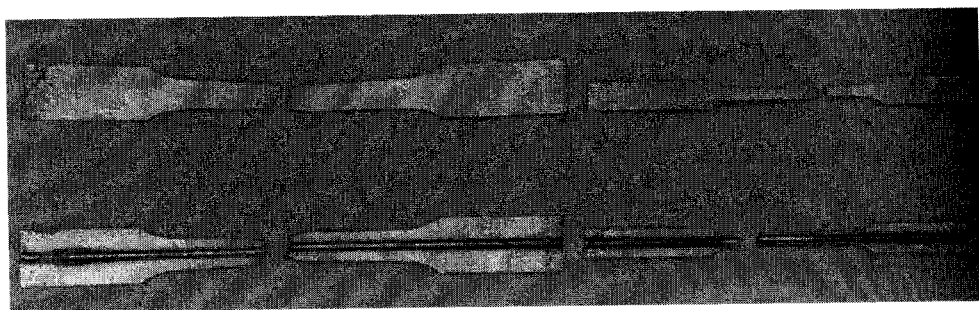
Mikroskopowe badania metalograficzne dostarczają informacji o wymiarach przekroju poprzecznego spoiny i strefy wpływu ciepła, jak również o mikrostrukturze i składzie fazowym materiału rodzimego oraz materiału w obszarze spoiny i strefy wpływu ciepła. Mechaniczne właściwości spoiny zależą od mikrostruktury powstałej po spawaniu. Stwierdzono, że w badanym wsadzie po procesie spawania otrzymano w strefie spoiny mieszaną strukturę złożoną z około 50% bainitu, 45% ferrytu oraz 5% martenzytu (rys. 2). Wyniki mikroskopowych badań metalograficznych wykorzystano do weryfikacji wyników symulacji procesu spawania.



Rys. 2. Mikrostruktura badanego połączenia spawanego (izolinie temperatury opisano w kelwinach).

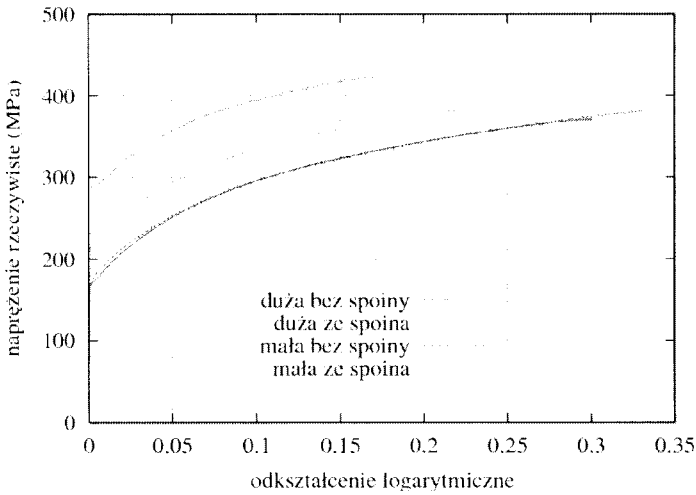
4. Próby jednoosiowego rozciągania

Próby jednoosiowego rozciągania pozwalają uzyskać krzywe umocnienia dla materiału rodzimego. Uzyskanie krzywych umocnienia w sposób bezpośredni dla materiału spoiny jest trudne ze względu na małe wymiary przekroju poprzecznego. W pracy wykorzystano w tym celu procedurę opracowaną przez Abdullaha et al. [3]. Próby zostały wykonane dla próbek o różnych wymiarach wyciętych z materiału rodzimego oraz z materiału ze spoiną w ten sposób, że spoina jest równoległa do kierunku obciążenia.

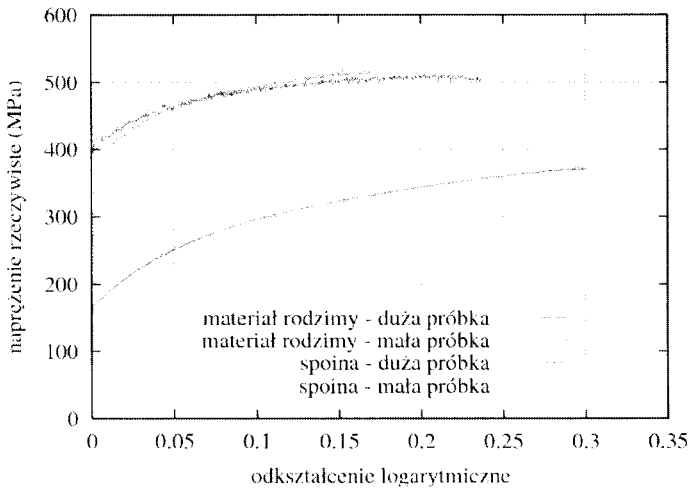


Rys. 3. Zerwane próbki po testach jednoosiowego rozciągania.

Zerwane próbki po testach rozciągania są przedstawione na rys. 3. Krzywe umocnienia otrzymane dla różnych próbek są pokazane na rys. 4. Krzywe dla próbek bez spoiny charakteryzują właściwości wytrzymałościowe materiału rodzimego. Można zaobserwować, że wytrzymałość na rozciąganie dla próbek ze spoiną jest wyższa niż wytrzymałość materiału rodzimego. W ten sposób uwidacznia się wpływ wzmocnienia materiału w strefie spoiny. Zwiększeniu wytrzymałości towarzyszy zmniejszenie maksymalnego wydłużenia względnego.



Rys. 4. Krzywe rozciągania otrzymane dla różnych próbek.



Rys. 5. Krzywe umocnienia materiału rodzimego i spoiny.

Na podstawie wyników próby rozciągania przeprowadzonej dla próbek wyciętych z materiału rodzimego bez spoiny oraz dla próbek ze spoiną wzdłuż kierunku obciążenia wyznaczono krzywą umocnienia dla samej spoiny pokazaną na rys. 5. Obliczenia przeprowadzono zakładając, że całkowita siła w próbce ze spoiną jest wypadkową naprężeń w materiale rodzimym i w spoinie:

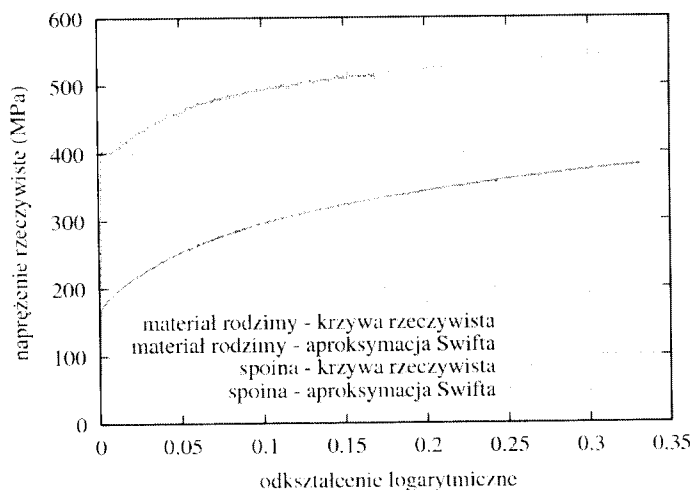
$$\sigma_{\text{psp}} A_{\text{psp}} = \sigma_{\text{sp}} A_{\text{sp}} + \sigma_{\text{mr}} A_{\text{mr}} \quad (1)$$

gdzie σ_{psp} , σ_{sp} , σ_{mr} są odpowiednio średnimi naprężeniami w całym przekroju próbki ze spoiną (A_{psp}), w części przekroju obejmującym strefę przetopioną oraz SWC (A_{sp}) oraz w części A_{mr} , w której materiał zachował strukturę materiału rodzimego.

Rysunek 6 przedstawia również aproksymację krzywych umocnienia równaniem Swifta:

$$\sigma = C(\varepsilon_0 + \varepsilon_{ef}^p)^n \quad (2)$$

gdzie C , ε_0 i n są parametrami materiałowymi, a ε_{ef}^p jest efektywnym odkształceniem plastycznym. Dla krzywej dla materiału rodzimego uzyskano: $C = 491$ MPa, $\varepsilon_0 = 8,119 \times 10^{-3}$, $n = 0,22579$, a dla krzywej umocnienia dla spoiny: $C = 603,8$ MPa, $\varepsilon_0 = 4,069 \times 10^{-3}$, $n = 8,897 \times 10^{-2}$.



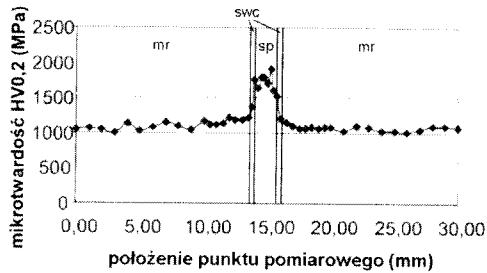
Rys. 6. Krzywe umocnienia materiału rodzimego i spoiny.

5. Pomiary twardości

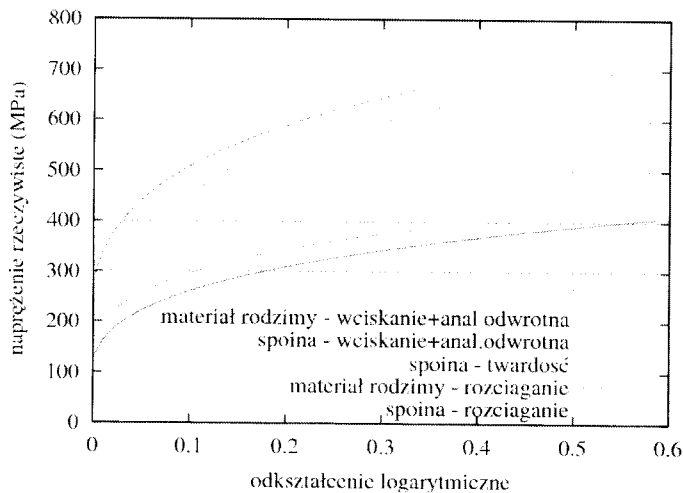
Pomiary twardości w przekroju lub na powierzchni blach spawanych pozwalają określić zasięg strefy przetopienia spoiny i stref wpływu ciepła, jak również wyznaczyć przybliżone właściwości wytrzymałościowe. Do pomiaru twardości wykorzystano mikrotwardościomierz Vickersa. Pomiary wykonano na powierzchni blachy wzdłuż linii prostopadłej do kierunku spoiny. Przyjęto skalę HV 0,2 z obciążeniem zgodnym z normą, tzn. 1.961 N. Uzyskany rozkład twardości przedstawiono na rys. 7. Zaznaczono na tym rysunku zasięg strefy przetopienia spoiny oraz strefy wpływu ciepła. Rozmiar tych stref jest porównywalny z ich zasięgiem obserwowanym pod mikroskopem (rys. 2). Zauważa się, że materiał w strefie spoiny charakteryzuje się znacznie większą twardością (~1800 MPa) niż materiał rodzimy (~1050 MPa). Badania twardości i wytrzymałości materiału wskazują na istnienie zależności między twardością a parametrami wytrzymałościowymi tego materiału. W pracy założono proporcjonalność między twardością a naprężeniem uplastyczniającym:

$$\sigma_{sp} = \sigma_{mr} \frac{\mu H_{sp}}{\mu H_{mr}} \quad (3)$$

Otrzymaną w ten sposób krzywą umocnienia dla spoiny przedstawiono na rys. 8.



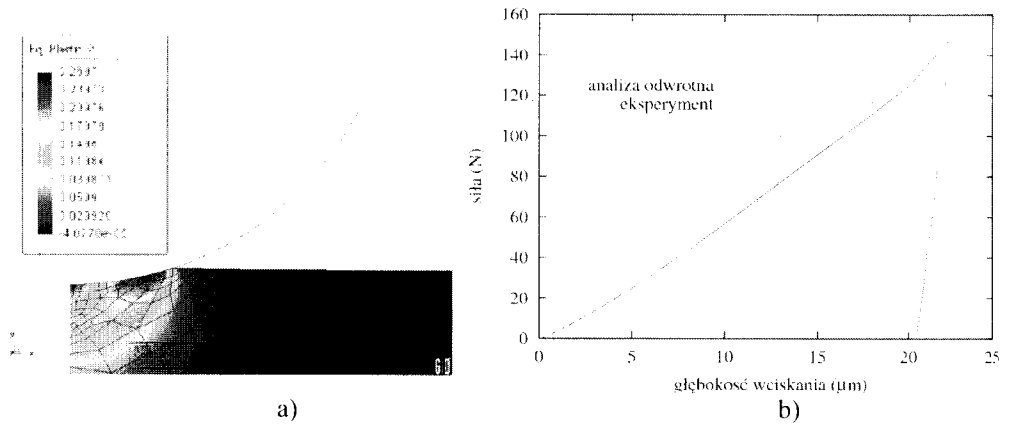
Rys. 7. Krzywe umocnienia materiału rodzimego i spoiny.



Rys. 8. Krzywe umocnienia materiału rodzimego i spoiny.

6. Próby wciskania

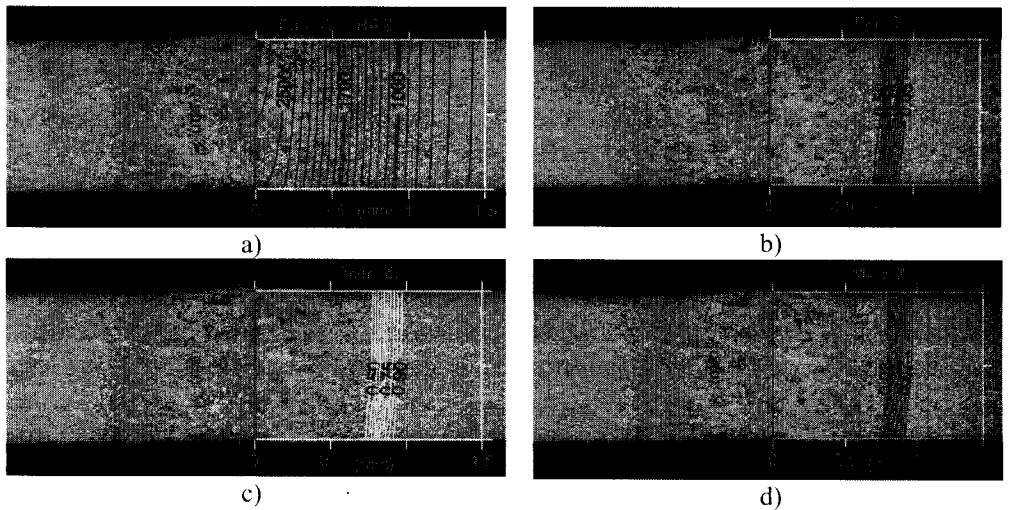
Właściwości sprężysto-plastyczne materiału wyznaczono również za pomocą prób wciskania połączonych z analizy odwrotną MES. Próby wciskania przeprowadzono na powierzchni blachy spawanej za pomocą twardościomierza Rockwella przyjmując skalę HR15T z wgłębnikiem kulistym o średnicy 1/16". Wyniki symulacji MES przedstawiono na rys. 9a w postaci rozkładu efektywnego odkształcenia plastycznego przy maksymalnej głębokości wciskania. Parametry krzywej umocnienia zostały wyznaczone poprzez dopasowanie numerycznej i doświadczalnej zależności siły od głębokości wciskania (rys. 9b). Uzyskane krzywe umocnienia przedstawiono na rys. 8 w zestawieniu z krzywymi umocnienia dla materiału rodzimego i spoiny wyznaczonymi poprzez próby rozciągania oraz z krzywą umocnienia dla spoiny wyznaczoną na podstawie pomiarów twardości.



Rys. 9. Próba wciskania: a) wynik symulacji MES, b) dopasowanie numerycznej i doświadczalnej krzywej siły wciskania w funkcji głębokości wciskania.

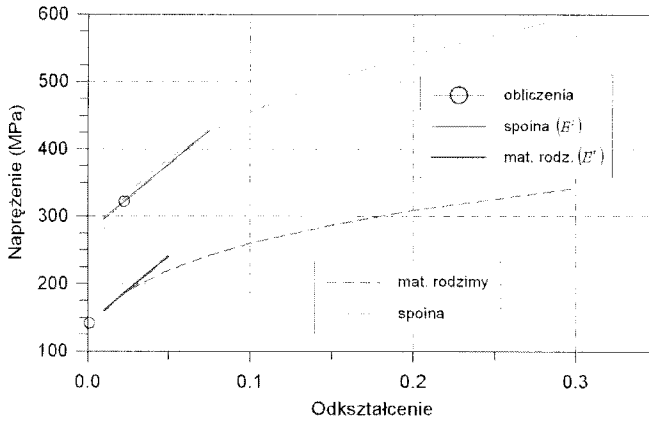
7. Numeryczna symulacja spawania laserowego

Numeryczna symulacja spawania laserowego może być traktowana jako alternatywny sposób wyznaczenia zasięgu i właściwości wytrzymałościowych strefy spoiny. Symulację numeryczną przeprowadzono wykorzystując termomechaniczny model z przeznaczeniem do numerycznej symulacji spawania techniką laserową [4, 5]. Obliczenia wykonano wykorzystując wykresy ciąglego chłodzenia z literatury [6].



Rys. 10. Wyniki symulacji numerycznej spawania laserowego: a) izolinie temperatury, b) izolinie udziału fazowego bainitu, c) izolinie udziału fazowego ferrytu, d) izolinie udziału fazowego martenzytu.

Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 10 w postaci rozkładów izolinii temperatury i udziałów fazowych w przekroju poprzecznym złącza. Krzywe umocnienia otrzymane na podstawie symulacji spawania pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Krzywe umocnienia na podstawie symulacji spawania.

8. Wnioski końcowe

Krzywe umocnienia otrzymane różnymi metodami wykazują zbliżony poziom naprężeń uplastyczniających, choć należy zauważyć, że często zgodność między porównywanymi krzywymi jest lepsza w pewnym zakresie odkształcenia. Jest to spowodowane głównie tym, że w poszczególnych metodach eksperymentalnych materiał jest poddawany różnym odkształceniom. Za najbardziej wiarygodną próbę należy uznać próbę rozciągania, w której otrzymuje się charakterystykę materiału aż do stanu zniszczenia. Zasięg strefy spoiny oraz parametry wytrzymałościowe otrzymane za pomocą symulacji numerycznej procesu spawania wykazuje dobrą zgodność z wynikami doświadczalnymi.

LITERATURA

- [1] Piela A., Rojek J., *Archives of Metallurgy*, **48**, 2003, 37.
- [2] Hycza-Michalska M., Grosman F., *Steel Research International*, **79**, 2008, 780.
- [3] Abdullah K., Wild P.M., Jeswiet J.J., Ghasempoor A., *Journal of Materials Processing Technology*, **112**, 2001, 91.
- [4] Bokota A., Piekarska W., *The Paton Welding Journal*, **6**, 2008, 19.
- [5] Piekarska W., *Analiza numeryczna zjawisk termomechanicznych procesu spawania laserowego. Pole temperatury, przemiany fazowe i naprężenia*; Seria Monografie nr 135, Politechnika Częstochowska, 2007.
- [6] Bruzda J., Pilarczyk J., Zeman M., *Spawalnicze wykresy przemian austenitu CTPc-S*, Wyd. „Śląsk” Katowice 1983.