

Metody wyznaczania właściwości mechanicznych złączy w spawanych laserowo wsadach do tłoczenia

JERZY ROJEK
MONIKA HYRCZA-MICHALSKA
ADAM BOKOTA
WIESŁAWA PIEKARSKA

Wsady spawane laserowo stanowią wysoko zaawansowany materiał wyjściowy do otrzymania części karoserii samochodowych. Otrzymuje się je przez połączenie blach z różnych gatunków stali lub blach o różnych grubościach. Umożliwia to optymalne wykorzystanie właściwości materiału i zminimalizowanie masy karoserii.

Wsady spawane laserowo stwarzają nowe problemy technologiczne w procesie tłoczenia. Głównym czynnikiem wpływającym negatywnie na własności tłoczne wsadów spawanych laserowo jest umocnienie materiału w strefie przetopienia spoiny i strefie wpływu ciepła (SWC) wywołane zmianami struktury wskutek spawania [1, 2]. Zmniejszona odkształcalność strefy spoiny musi być brana pod uwagę przy projektowaniu wytłoczek z blach spawanych. Symulacja numeryczna stanowi niezwykle cenne narzędzie w procesie projektowania.

Dokładne modelowanie blach spawanych wymaga uwzględnienia strefy złącza i zmienionych własności mechanicznych materiału w tej strefie. Wyznaczenie własności materiału w spoinie i w strefie wpływu ciepła nie jest łatwym zadaniem z powodu małych wymiarów przekroju poprzecznego spoiny. Niniejszy artykuł przedstawia różne dostępne metody wyznaczania wymiarów i własności spoiny i strefy wpływu ciepła. Rozpatrywane są następujące metody:

- mikroskopowe badania metalograficzne,
- pomiary mikrotwardości,
- próby indentacji (wciskania wgłębnika),
- numeryczne symulacje procesu spawania laserowego.

Przygotowanie wsadów spawanych laserowo

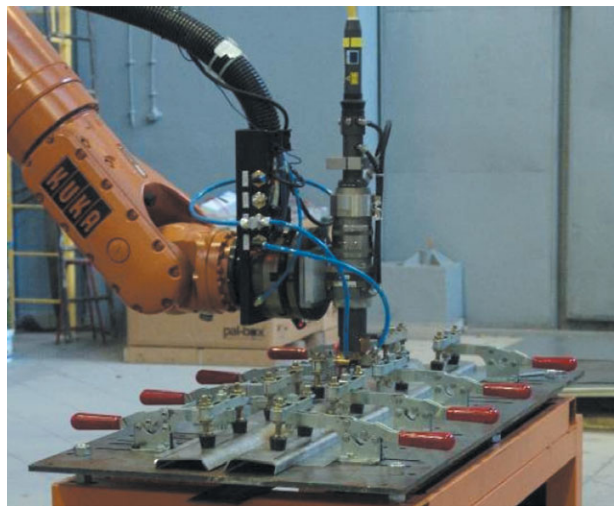
W przedstawionych badaniach wykorzystano prostokątne wsady spawane otrzymane przez połączenie blach o wymiarach 100 mm x 300 mm z tego samego gatunku stali (DC04) i o tej samej grubości (1 mm). Blachy były spawane laserem typu Nd:YAG przy następujących parametrach procesu: moc wiązki lasera – 2000 W, prędkość spawania – 4,0 m/min, średnica wiązki lasera – 600 μ m. Spawanie blach wykonano w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach na stanowisku przedstawionym na rys. 1.

Mikroskopowe badania metalograficzne

Mikroskopowe badania metalograficzne dostarczają informacji o wymiarach przekroju poprzecznego

Dr hab. inż. Jerzy Rojek jest pracownikiem IPPT PAN w Warszawie, dr inż. Monika Hyrcza-Michalska jest pracownikiem Politechniki Śląskiej w Katowicach, dr hab. inż. Adam Bokota, prof. PCz i dr hab. inż. Wiesława Piekarska, prof. PCz są pracownikami Politechniki Częstochowskiej.

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



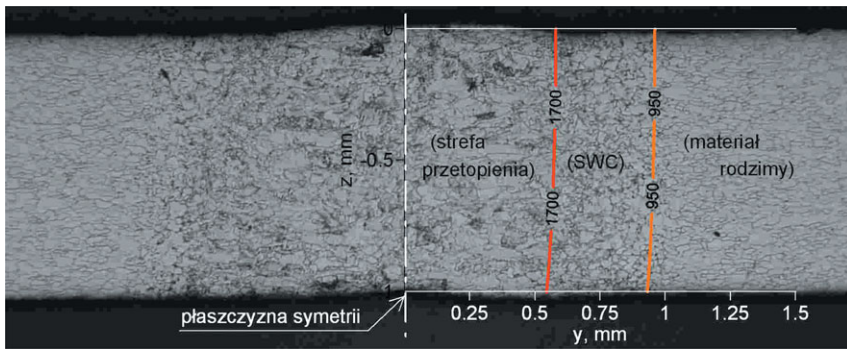
Rys. 1. Stanowisko do spawania laserowego

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.

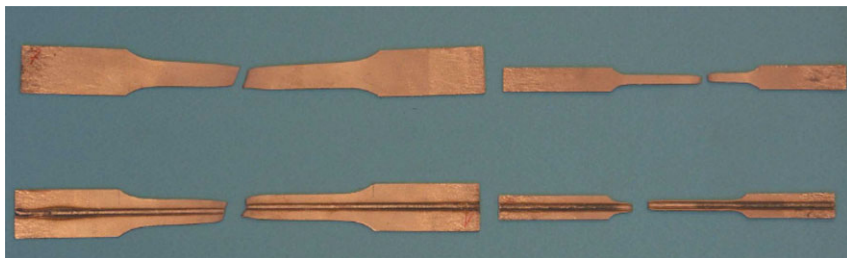
Próby jednoosiowego rozciągania

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.

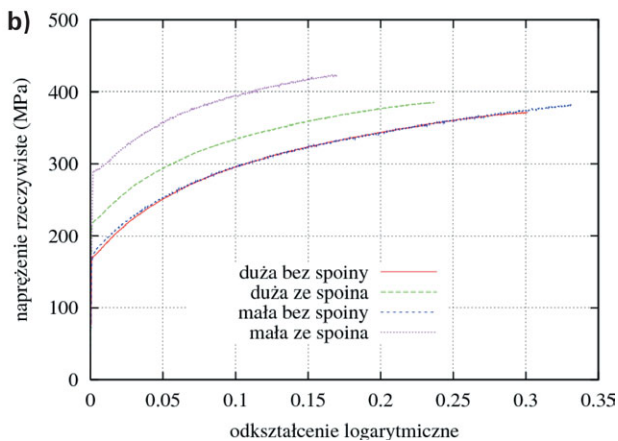
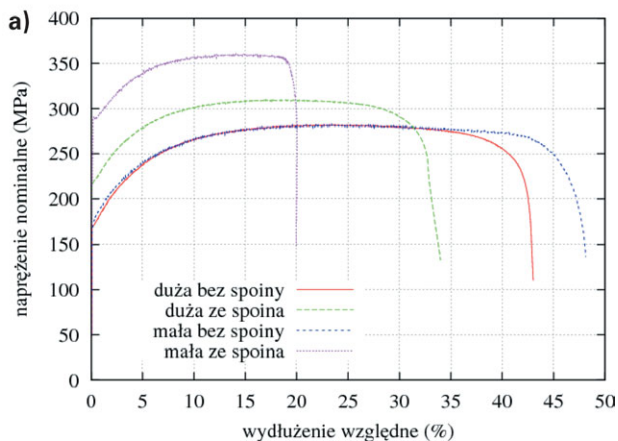
Zerwane próbki po testach rozciągania są przedstawione na rys. 3. Krzywe umocnienia otrzymane dla różnych próbek są pokazane na rys. 4a przy wykorzystaniu inżynierskich miar odkształcenia i naprężenia. Krzywe dla próbek bez spoiny charakteryzują właściwości wytrzymałościowe materiału rodzimego. Można zaobserwować, że wytrzymałość na rozciąganie dla próbek ze spoiną jest wyższa niż wytrzymałość materiału rodzimego. W ten sposób uwidacznia się wpływ wzmocnienia materiału



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



Rys. 3. Zerwane próbki po testach jednoosiowego rozciągania



Rys. 4. Krzywe rozciągania otrzymane dla różnych próbek: a) miara naprężenia – naprężenie nominalne, miara odkształcenia – wydłużenie względne, b) miara naprężenia – naprężenie rzeczywiste (Cauchy'ego), miara odkształcenia – odkształcenie logarytmiczne (rzeczywiste)

w strefie spoiny. Zwiększeniu wytrzymałości towarzyszy zmniejszenie maksymalnego wydłużenia względnego.

Symulacja numeryczna procesów tłoczenia wymaga znajomości rzeczywistej krzywej umocnienia, w której miarą naprężenia jest naprężenie *Cauchy'ego*, a rzeczywiste odkształcenie jest tożsame z logarytmiczną miarą odkształcenia. Rzeczywiste krzywe umocnienia dla próbek użytych w próbach rozciągania przedstawiono na rys. 4b. Rzeczywista krzywa umocnienia charakteryzuje właściwości mechaniczne materiału.

Na podstawie wyników próby rozciągania przeprowadzonej dla próbek wyciętych z materiału rodzimego bez spoiny oraz dla próbek ze spoiną wzdłuż kierunku obciążenia można wyznaczyć krzywą umocnienia dla samej spoiny. Założono, że całkowita siła w próbce ze spoiną

jest wypadkową naprężeń w materiale rodzimym i w spoinie:

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

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. Dla tak zdefiniowanych pól przekrojów ma miejsce równość:

$$A_{psp} = A_{sp} + A_{mr} \quad (2)$$

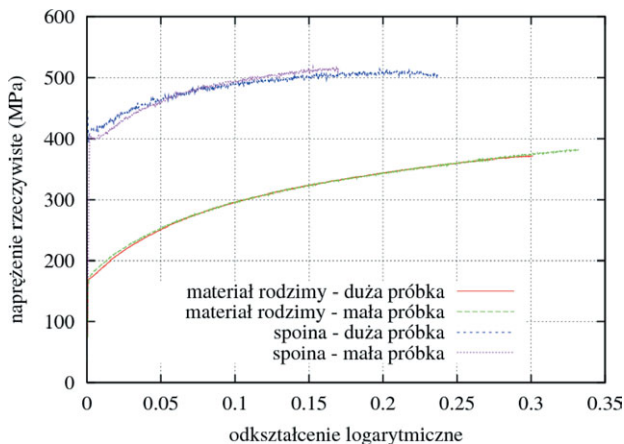
Początkowa wielkość pola A_{psp} jest równa przekroju próbki, a wielkość początkową pól A_{sp} i A_{mr} można ustalić na podstawie obserwacji pod mikroskopem przekroju ze spoiną (rys. 2). Założono, że pola przekroju w trakcie próby zmieniają się proporcjonalnie, tzn.:

$$\frac{A_{sp}}{A_{psp}} = \text{const}, \quad \frac{A_{mr}}{A_{psp}} = \text{const}, \quad \frac{A_{mr}}{A_{sp}} = \text{const} \quad (3)$$

Z równania (1) otrzymuje się zależność na naprężenia uplastyczniające materiału spoiny:

$$\sigma_{sp} = \sigma_{psp} \frac{A_{psp}}{A_{sp}} - \sigma_{mr} \frac{A_{mr}}{A_{sp}} \quad (4)$$

Stosując zależność (4) dla całego zakresu odkształcenia, otrzymuje się krzywą umocnienia dla spoiny. Naprężenia σ_{psp} bierze się z wyników dla próbki ze spoiną, a naprężenia σ_{mr} – z wyników dla próbki bez spoiny, dla takiego samego odkształcenia. Proporcje między odpowiednimi polami zgodnie z założeniem (3) przyjęto takie same dla całego rozpatrywanego zakresu odkształcenia. Procedurę tę przeprowadzono oddzielnie dla małych i dużych



Rys. 5. Krzywe umocnienia materiału rodzimego i spoiny otrzymane dla próbek o różnych wymiarach

próbek. Otrzymane krzywe umocnienia dla spoiny przedstawiono na rys. 5. Można zauważyć dużą zgodność wyników uzyskanych dla różnych rozmiarów próbek.

Krzywe umocnienia uzyskane w wyniku prób rozciągania otrzymane metodą bezpośrednią są traktowane w niniejszej pracy jako krzywe odniesienia do krzywych uzyskanych innymi metodami.

Wiele programów do symulacji kształtowania blach wymaga analitycznej postaci krzywej umocnienia. Jednym z częściej stosowanych równań aproksymujących rzeczywistą krzywą umocnienia jest równanie *Swifta*:

$$\sigma = C(\varepsilon_0 + \varepsilon_{ef}^p)^n \quad (5)$$

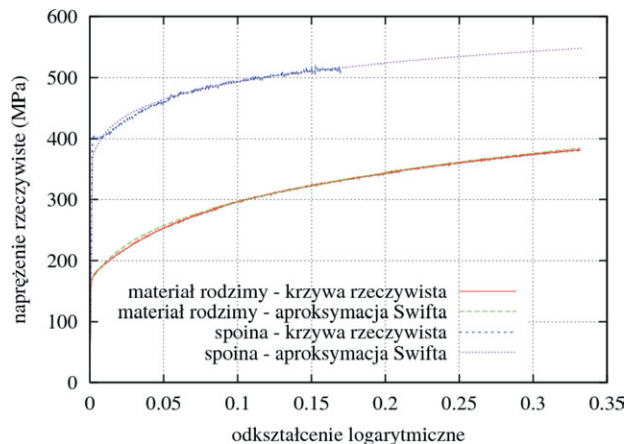
gdzie: C , ε_0 i n są parametrami materiałowymi, a ε_{ef}^p jest efektywnym odkształceniem plastycznym.

Wyniki aproksymacji krzywych umocnienia dla spoiny i materiału rodzimego funkcjami analitycznymi danymi równaniem *Swifta* (5) przedstawiono na rys. 6. Krzywą analityczną dla materiału rodzimego uzyskano z następującymi parametrami: $C = 491$ MPa, $\varepsilon_0 = 8,119 \times 10^{-3}$, $n = 0,22579$. Natomiast parametry wyznaczające krzywą umocnienia dla spoiny to: $C = 603,8$ MPa, $\varepsilon_0 = 4,069 \times 10^{-3}$, $n = 8,897 \times 10^{-2}$.

Pomiary mikrotwardości

Pomiary mikrotwardości w przekroju lub na powierzchni blach spawanych pozwalają określić zasięg strefy przetopienia spoiny i strefy wpływu ciepła, jak również wyznaczyć przybliżone właściwości wytrzymałościowe. Do pomiaru mikrotwardości 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 mikrotwardości 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



Rys. 6. Aproksymacja krzywych umocnienia materiału rodzimego i spoiny dla małych próbek funkcjami analitycznymi według równania *Swifta*

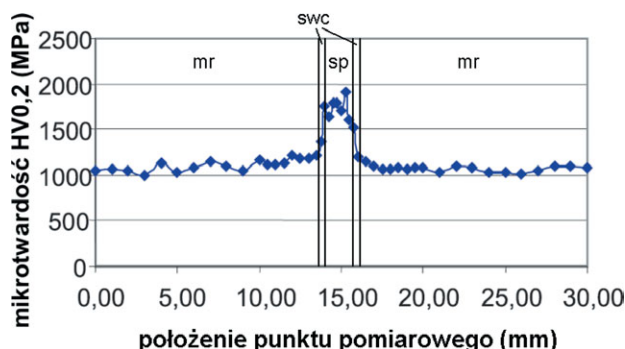
a parametrami wytrzymałościowymi tego materiału. W pracy założono proporcjonalność między twardością a naprężeniem uplastyczniającym. Znając krzywą umocnienia materiału rodzimego, otrzymuje się krzywą umocnienia materiału spoiny:

$$\sigma_{sp} = \sigma_{mr} \frac{\mu H_{sp}}{\mu H_{mr}} \quad (6)$$

Skalując krzywą umocnienia materiału rodzimego otrzymaną w próbie rozciągania w całym zakresie odkształcenia współczynnikiem $\mu H_{sp} / \mu H_{mr} = 1,714$, otrzymuje się krzywą umocnienia dla spoiny (rys. 8). Porównując tę krzywą z krzywą umocnienia spoiny otrzymaną z prób rozciągania, można stwierdzić, że krzywa umocnienia otrzymana na podstawie pomiaru twardości przewiduje mniejsze naprężenia uplastyczniające dla małych odkształceń oraz większe – dla odkształceń dużych.

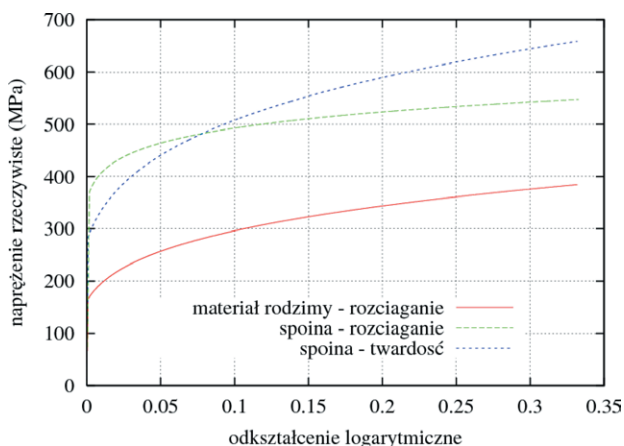
Próby wciskania

Stosując procedurę, podobnie jak w pomiarach twardości, opartą na wciskaniu wgłębnika, można otrzymać znacznie więcej informacji charakteryzujących właściwości wytrzymałościowe materiału, umożliwiając dokładniejsze wyznaczenie właściwości sprężysto-plastycznych materiału niż przy zastosowaniu tylko wzoru (6). Próby wciskania przeprowadzono na powierzchni blachy spawanej za pomocą twardościomierza *Rockwella*, przyjmując



Rys. 7. Rozkład mikrotwardości na powierzchni blachy w kierunku poprzecznym do spoiny; mr – materiał rodzimy, sp – strefa przetopienia, swc – strefa wpływu ciepła

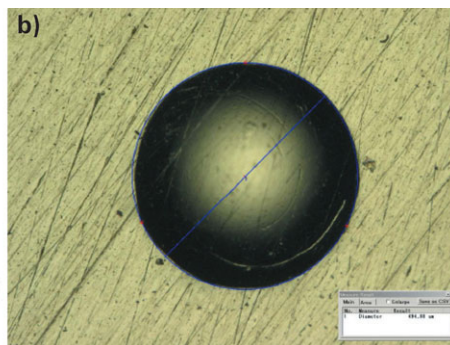
skalę HR15 T z węglnikiem kulistym o średnicy 1/16". Wyniki próby wciskania przedstawiono na rys. 9. Właściwości sprężysto-plastyczne materiału wyznaczono za pomocą analizy odwrotnej przy



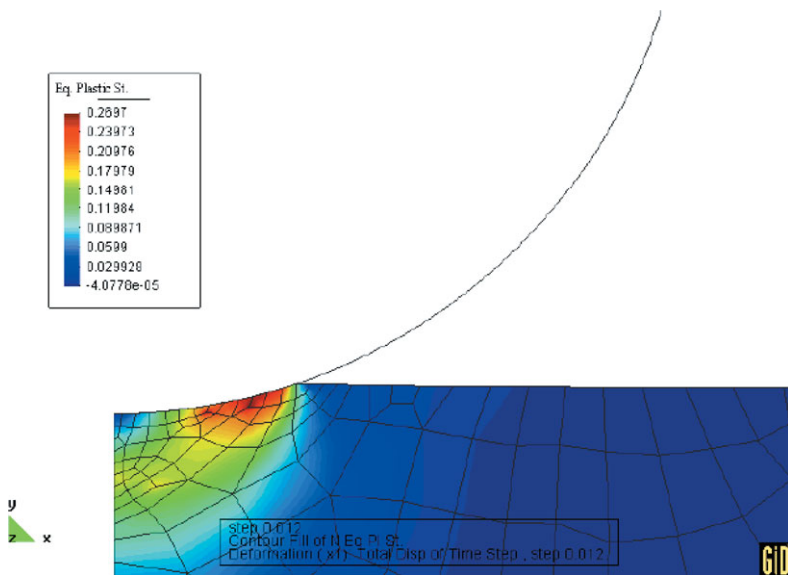
Rys. 8. Krzywe umocnienia spoiny na podstawie pomiaru twardości zestawione z krzywymi umocnienia materiału rodzimego i spoiny z próby rozciągania (wszystkie krzywe aproksymowano równaniem *Swifta*)

wykorzystaniu modelu MES dla próby wciskania. Te wyniki są przedstawione na rys. 10 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. 11a i 11b). Krzywe umocnienia wyznaczone w analizie odwrotnej dane są równaniem *Swifta* (5) o parametrach: $C = 465 \text{ MPa}$, $\epsilon_0 = 7,117 \times 10^{-3}$, $n = 0,2589$ dla materiału rodzimego oraz $C = 850 \text{ MPa}$, $\epsilon_0 = 7,01 \times 10^{-3}$, $n = 0,2499$ dla spoiny. Uzyskane krzywe przedstawiono na rys. 12, 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. Krzywa umocnienia dla materiału rodzimego wyznaczona z analizy odwrotnej dla próby wciskania ma zbliżony przebieg do krzywej wyznaczonej z próby rozciągania, jednak wykazuje ona, w całym zakresie odkształcenia, niższe wartości naprężeń uplastyczniających. Krzywa umocnienia uzyskana w analizie odwrotnej dla spoiny charakteryzuje się niższymi wartościami naprężenia w zakresie małych odkształceń, ale przy charakteryzującym ją wyższym umocnieniu, naprężenia uplastyczniające rosną szybciej i w zakresie dużych odkształceń przewyższają naprężenia przewidywane przez krzywą umocnienia dla spoiny wyznaczoną w próbach rozciągania. W porównaniu z krzywą umocnienia dla spoiny, wyznaczoną na podstawie pomiarów twardości, krzywa umocnienia otrzymana w analizie odwrotnej ma podobny przebieg, ale przewiduje ona niższe wartości w całym zakresie odkształcenia.



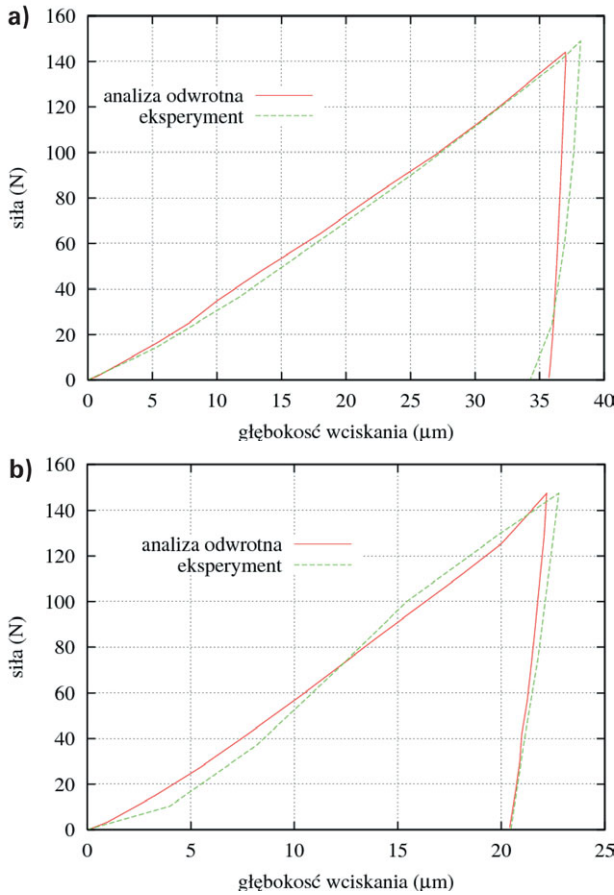
Rys. 9. Próba wciskania: a) siła w funkcji głębokości wciskania, b) odcisk wgłębnika



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]. Program składa się z trzech części (modułów), a mianowicie: termicznej, przemian fazowych w stanie stałym i mechanicznej, którą uzyskuje się in-

Rys. 10. Wyniki numerycznej symulacji próby wciskania dla materiału rodzimego – rozkład efektywnego odkształcenia plastycznego, przy maksymalnej głębokości wciskania



Rys. 11. Wyniki analizy odwrotnej próby wciskania – dopasowanie numerycznego i eksperymentalnego wykresu siły w funkcji głębokości wciskania: a) dla materiału rodzimego, b) dla spoiny

formacje o stanie naprężenia i odkształcenia w procesie spawania. Podstawowe parametry procesu spawania, takie jak moc wiązki laserowej, jej średnica i prędkość spawania, podano w rozdziale „Przygotowanie wsadów spawanych laserowo”.

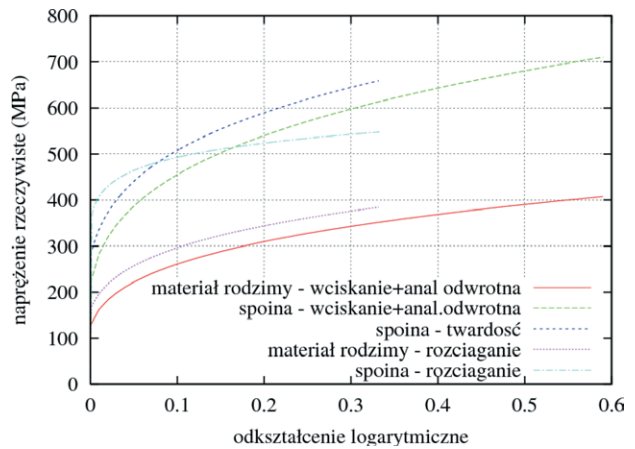
Moduł termiczny to rozwiązywanie, metodą funkcji *Greena* z gaussowskim rozkładem wiązki laserowej, równania przewodnictwa z członem konwekcyjnym (rozwiązanie we współrzędnych *Eulera*). Rozważana geometria to prostopadłościan, zadanie 3D (rozdz. „Przygotowanie wsadów spawanych laserowo”). Średnie wartości parametrów termofizycznych występujących w równaniu przewodnictwa, takie jak współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i gęstość materiału były równe odpowiednio: 50 W/(mK), 7760 kg/m³ i 644 J/(kgK). Wielkości te ustalono na podstawie danych literaturowych dla stali o podobnym składzie chemicznym.

Część dotycząca przemian fazowych w stanie stałym, to obliczanie ułamków poszczególnych faz w procesie nagrzewania i chłodzenia, wykorzystując formuły *Avramiego* dla przemian dyfuzyjnych oraz formuły *Koistinen-Marburgera* dla martenzytu. Obliczanie ułamków faz w procesie chłodzenia oparto na spawalniczym wykresie ciągłego chłodzenia (CTP_c-S). Nie budowano wykresu ciągłego chłodzenia dla rozważanej stali, a skorzystano z wykresu literaturowego sporządzonego dla stali o podobnym składzie chemicznym [6]. Wykres CTP_c-S wykorzystywany w module przemian fazowych przedstawiono na

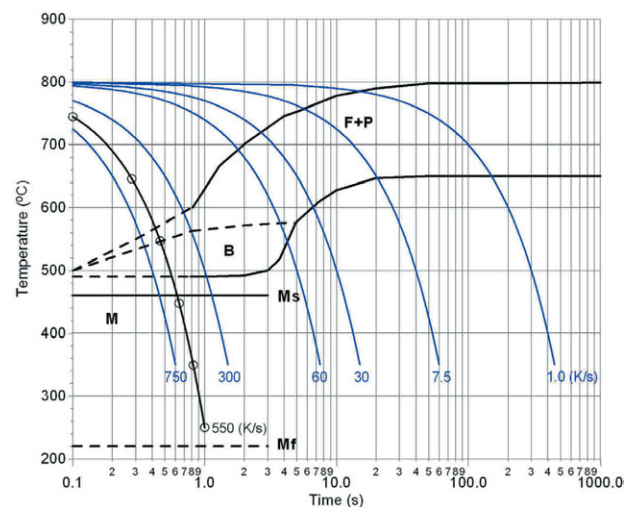
rys 13. Przystosowując ten wykres do symulacji przemian fazowych w rozważanej stali, uwzględniono wyniki badań mikrostruktury (podane są w rozdziale „Mikroskopowe badania metalograficzne”), a dotyczące składu fazowego spoiny i strefy wpływu ciepła po spawaniu wsadu z tej stali.

Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 14 w postaci rozkładów izolinii temperatury i udziałów fazowych w przekroju poprzecznym złącza. Porównania, przez nałożenie izolinii (konturów) na obraz mikrostruktury rzeczywistego złącza, wskazują na poprawność symulacji numerycznej. Ponadto, informacje o rozkładzie poszczególnych faz pozwalają na precyzyjną ocenę wielkości poszczególnych stref, a w szczególności na ocenę szerokości SWC (por. rys. 2, 14 i 15).

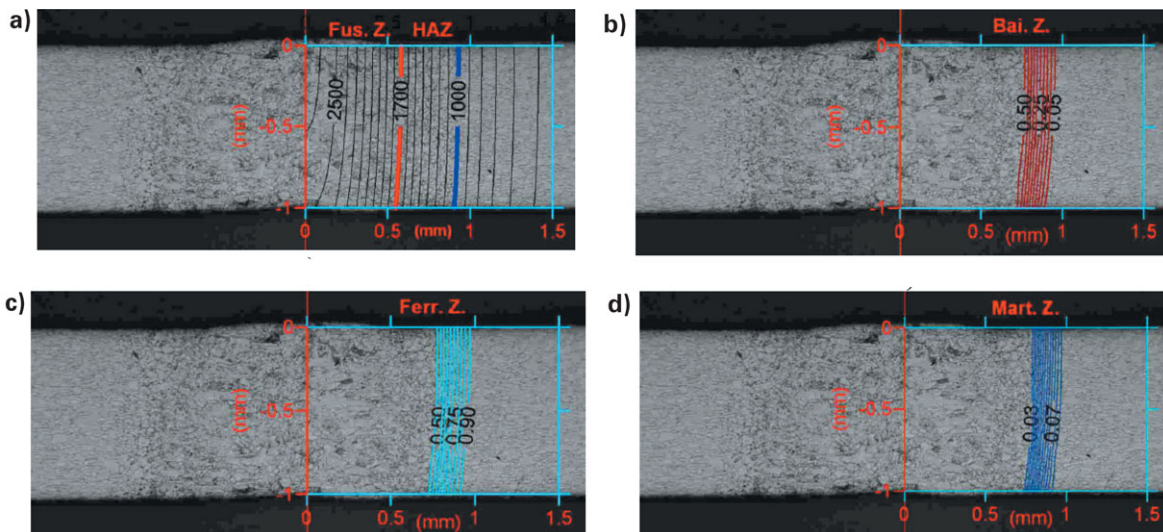
Do wyznaczenia odkształceń plastycznych zastosowano model nieizotermicznego plastycznego płynięcia z warunkiem plastyczności *Hubera-Misesa* i wzmocnieniem izotropowym, w którym naprężenie uplastyczniające zależne jest od składu fazowego, temperatury oraz efektywnych odkształceń plastycznych. W modelu uwzględniono odkształcenia



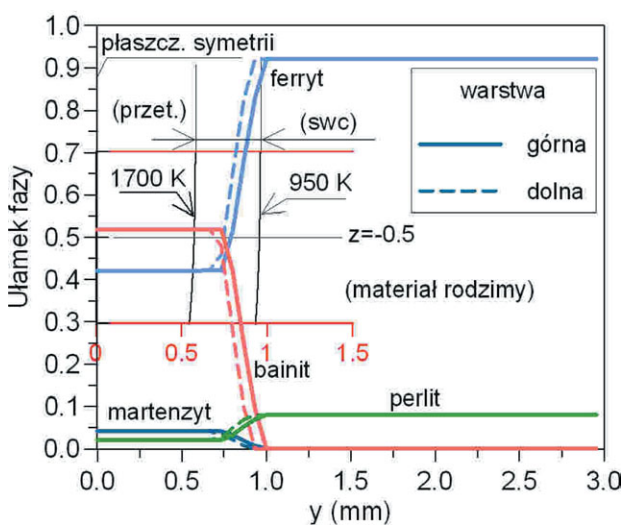
Rys. 12. Krzywe umocnienia materiału rodzimego i spoiny otrzymane z analizy odwrotnej próby wciskania porównane z krzywymi umocnienia wyznaczonymi z prób rozciągania oraz na podstawie pomiaru twardości



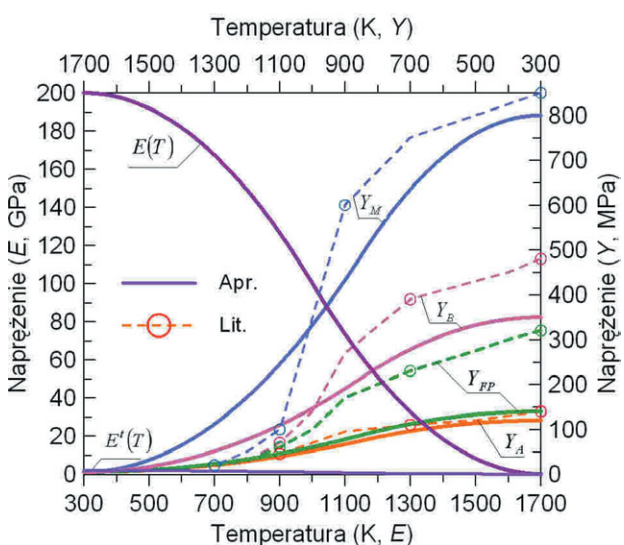
Rys. 13. Wykres CTP_c-S wykorzystany w symulacji przemian chłodzenia (na wykresie wyróżniono średnią prędkość chłodzenia w spoinie ($v_{800-500}$), uzyskiwaną w symulacji spawania rozważanej blachy (~550 K/s))



Rys. 14. Wyniki symulacji numerycznej spawania laserowego: a) izolinie temperatury, b) izolinie udziału fazowego bainitu, c) izolinie udziału fazowego ferrytu, d) izolinie udziału fazowego martenzytu

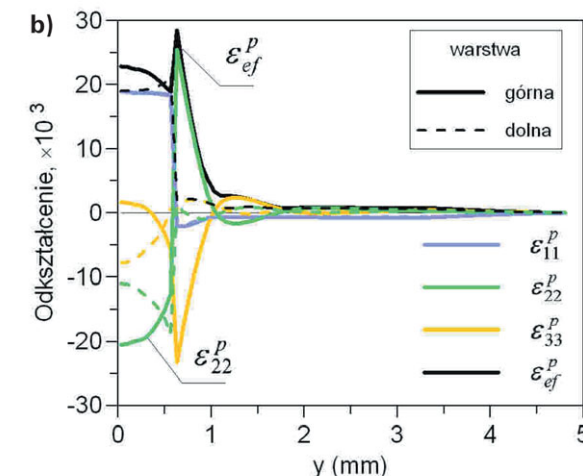
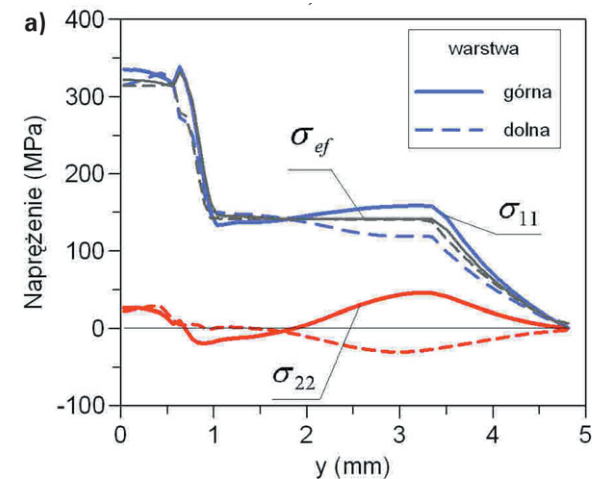


Rys. 15. Udziały faz w warstwach przypowierzchniowych po spawaniu



Rys. 16. Moduły Younga i styczny oraz granice plastyczności w zależności od temperatury (w obliczeniach wykorzystano krzywe z aproksymacji)

termiczne, strukturalne i plastyczne. Ze względu na znikomą objętość spoiny i SWC, odkształcenia transformacyjne pominięto. Moduły Younga i styczny E i E' oraz granice plastyczności Y_r , zależne od temperatury i składu fazowego, aproksymowano funk-

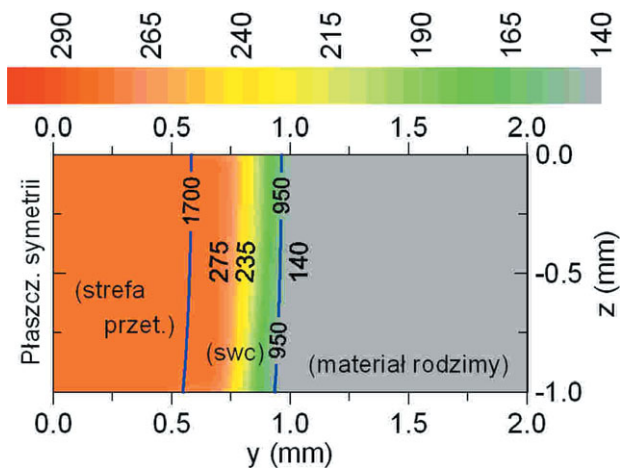


Rys. 17. Własne naprężenia osiowe ($\sigma_{11}=\sigma_x$) i poprzeczne ($\sigma_{22}=\sigma_y$) (a) oraz odkształcenia plastyczne (b) w warstwach przypowierzchniowych

cjami kwadratowymi (rys. 16), przyjmując: moduły Younga i styczny 2×10^5 i 2×10^3 MPa, granice plastyczności 120, 350, 140, 800 i 140 MPa odpowiednio dla austenitu, bainitu, ferrytu, martenzytu i perlitu, w temperaturze 300 K. W temperaturze 1700 K moduły Younga i styczny były równe 100 i 2 MPa, natomiast granice plastyczności – 2 MPa. Symulację naprężeń i odkształceń plastycznych przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia, w warstwach prostopadłych do kierunku spawania. Stopnie swobody odebrano w płaszczyźnie symetrii i od dołu spawanej blachy (przyleganie spawanej blachy do podłoża, zgodnie z rys. 1).

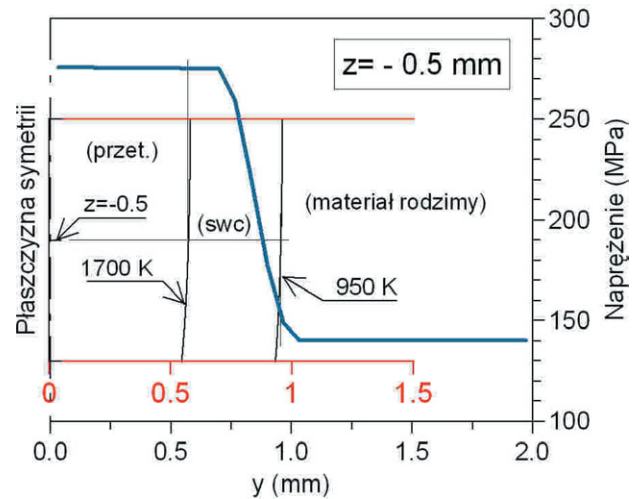
Uzyskane z symulacji zjawisk mechanicznych naprężenia i odkształcenia przedstawiono na rys. 17.

Efektywne właściwości mechaniczne spoiny wyznaczone zostały na podstawie teorii mieszania, uwzględniając otrzymane udziały fazowe i właściwości odpowiednich faz. Otrzymane w ten sposób rozkłady granicy plastyczności przedstawiono na rys. 18 i 19.



Rys. 18. Rozkład granicy plastyczności (MPa) po spawaniu w przekroju poprzecznym do spoiny (izolinie temperatury opisano w kelwinach)

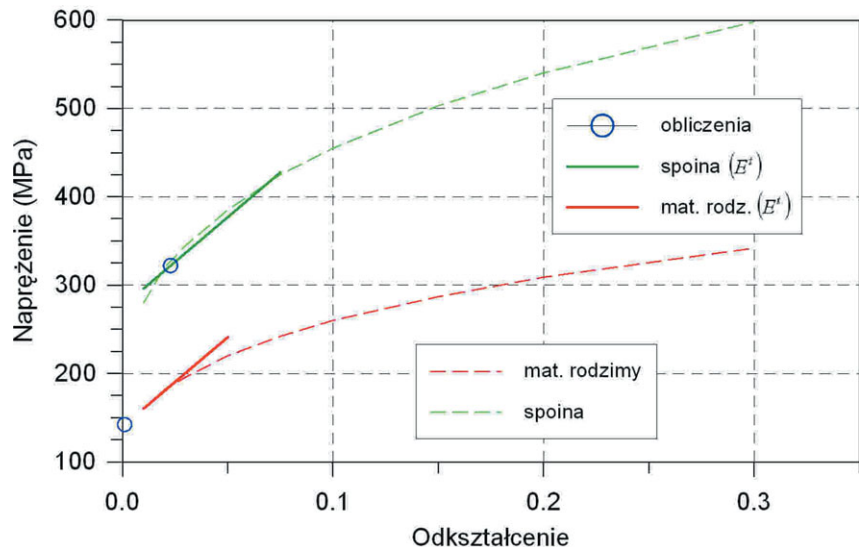
Wartości granicy plastyczności otrzymane w symulacji numerycznej spawania (rys. 17 i 18) są zgodne z wartościami otrzymanymi w procedurach eksperymentalnych. Wskazują na to również wartości naprężeń własnych uzyskane z symulacji (rys. 17a). Można zauważyć, że plastyczne odkształcenie efektywne, po spawaniu, ma ekstremalną wartość rzędu 0,03 (rys. 17b i 20), a zatem nie jest ono duże. Ocena właściwości mechanicznych spawanych laserowo wsadów do tłoczenia, na podstawie symulacji numerycznych, ogranicza się do wskazania poziomu granicy plastyczności, a nie do wyznaczania krzywych umocnienia dla danego materiału. W większości materiałów krzywe umocnienia to krzywe logarytmiczne i można założyć, że informacje o granicy plastyczności, wynikające z symulacji numerycznej, są wystarczające do wyznaczenia właściwości materiału.



Rys. 19. Rozkład granicy plastyczności po spawaniu w kierunku poprzecznym do spoiny

Wnioski końcowe

- Różne metody eksperymentalne dają możliwość wyznaczenia krzywych umocnienia materiału rodzimego oraz spoiny we wsadach spawanych laserowo. Na podstawie krzywej umocnienia można wyznaczyć parametry charakteryzujące właściwości mechaniczne strefy połączenia. 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 dużą zgodność z wynikami doświadczalnymi.
- Procedury doświadczalne oraz obliczenia numeryczne dowodzą, że materiał w strefie złącza cha-



Rys. 20. Wyniki symulacji w odniesieniu do krzywych rozciągania (por. rys. 12)

rakteryzuje się podwyższoną wytrzymałością, a tym samym mniejszą odkształcalnością.

LITERATURA

1. *Piela A., Rojek J.*: Validation of the results of numerical simulation of deep drawing of tailor welded blanks. Archives of Metallurgy No. 48/2003, pp. 37 – 51.
 2. *Hycza-Michalska M., Grosman F.*: The research of laser welded blanks characteristic in basic and technological drawability tests. Metal Forming Conference 2008, Steel Research International, 79, Special Edition, Vol. 1, pp. 780 – 787, 2008.
 3. *Abdullah K., Wild P.M., Jeswiet J.J., Ghasempoor A.*: Tensile testing for weld deformation properties in similar gage tailor welded blanks using the rule of mixtures. Journal of Materials Processing Technology No. 112/2001, pp. 91 – 97.
 4. *Bokota A., Piekarska W.*: Modeling of residual stresses in laser welding. The Paton Welding Journal, No. 6/2008, pp. 19 – 25.
 5. *Piekarska W.*: Analiza numeryczna zjawisk termomechanicznych procesu spawania laserowego. Pole temperatury, przemiany fazowe i naprężenia. Seria Monografie nr 135, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2007.
 6. *Brózda J., Pilarczyk J., Zeman M.*: Spawalnicze wykresy przemian austenitu CTPc-S. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1983.
-