

WPLÝW WSTĘPNEGO PODGRZEWANIA PODCZAS SPAWANIA LASEROWEGO NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ STREFY WPLÝWU CIEPŁA

Wiesława PIEKARSKA

Spawanie laserowe jest jedną z nowocześniejszych metod łączenia materiałów, konkurujące swymi cechami technologicznymi i ekonomicznymi z innymi metodami spawania. Niewielkie wymiary zogniskowanej wiązki laserowej oraz możliwość sterowania jej ruchem, pozwalają na szybkie miejscowe przetopienie materiału i uzyskanie dobrej jakości spoiny o małej szerokości. Zapewnia to dużą wydajność spawania, co ma szczególne znaczenie przy spawaniu długich elementów. Spawanie wiązką promieniowania laserowego stwarza nowe nietypowe wymagania i jest przyczyną wielu zjawisk towarzyszących temu procesowi niespotykanych w konwencjonalnych metodach spawania [3,7,9]. Oddziaływanie skupionych źródeł ciepła o dużej gęstości mocy powoduje powstawanie dużych gradientów temperatury, a wraz ze zmianą temperatury zmieniają się również własności termofizyczne. W procesie nagrzewania i chłodzenia mają miejsce przemiany fazowe i w wielu stalach konstrukcyjnych podczas chłodzenia powstaje struktura wieloskładnikowa. Temperatura i przemiany fazowe są powodem powstawania znaczących odkształceń izotropowych, gdyż w procesie chłodzenia powstają struktury o większej niż austenit objętości właściwej. Są to odkształcenia strukturalne, które w połączeniu z cieplnymi generują naprężenia chwilowe a następnie własne [3,9]. Składniki strukturalne charakteryzują się różnymi własnościami mechanicznymi i wytrzymałościowymi, toteż udziały poszczególnych faz w strukturze decydują o własnościach połączenia spawanego. Przy modelowaniu zjawisk towarzyszących spawaniu należy uwzględnić nie tylko zmiany temperatury, ale również przemiany fazowe i ich kinetykę. Można to uzyskać za pomocą symulacji numerycznych, wykorzystując do tego celu wykresy CTPc-S.

Duże szybkości chłodzenia występujące podczas spawania laserowego (znacznie wyższe niż przy metodach konwencjonalnych) prowadzą do powstawania struktur hartowniczych nawet w dobrze spawalnych stalach konstrukcyjnych zarówno w spoinie jak i w SWC. Celem zmniejszenia szybkości chłodzenia stosuje się podgrzewanie elementu spawanego przed spawaniem. Przy spawaniu długich elementów tradycyjne podgrzewanie jest utrudnione i kosztowne. Problem podgrzewania wstępnego rozwiązuje zastosowanie podwójnej wiązki laserowej [6,8]. Jedna z wiązek (mniejsza) jest użyta jako źródło podgrzewania, druga (główna) jako źródło spawania.

W pracy przedstawiono analityczno-numeryczny model spawania laserowego ze wstępnym podgrzewaniem. Za-

równo dla źródła podgrzewającego jak i dla właściwego - spawającego przyjęto wiązki o rozkładzie gaussowskim.

Wykonano symulacje numeryczne wyznaczając pole temperatury, udziały fazowe i ich kinetykę w płaskowniku spawanym ze stali 18G2AV.

POLE TEMPERATURY

Pole temperatury otrzymano z rozwiązania równania nieustalonego przepływu ciepła w postaci:

$$a \nabla^2 T(\mathbf{x}, t) - \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla T(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{v} + \frac{Q_V}{C_{ef}} = 0 \quad (1)$$

gdzie: $a = \lambda / (\rho c)$ jest współczynnikiem wyrównywania temperatury, λ współczynnikiem przewodzenia ciepła, C_{ef} jest właściwą pojemnością cieplną, Q_V jest mocą objętościowych źródeł ciepła, $\mathbf{x} = \mathbf{x}(x_i)$ jest wektorem położenia punktu, $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ wektorem przesuwu wiązki laserowej.

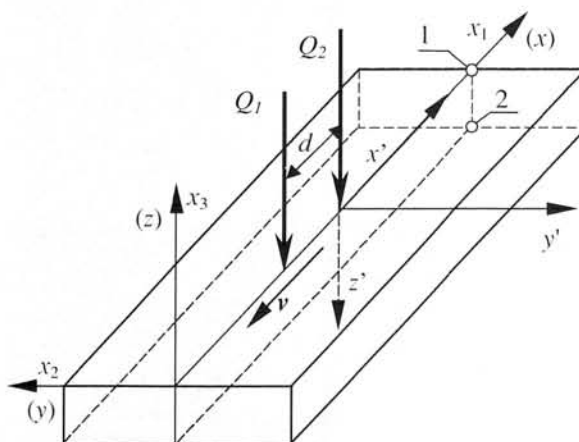
Równanie (1) rozwiązano metodą superpozycji funkcji Greena. Zaproponowana w pracy [6] metoda polega na całkowaniu funkcji Greena w obszarze prostopadłościanu $(-\infty < x, y < \infty, 0 \leq z < \infty$ z warunkiem początkowym:

$$T(x, y, z, 0) = T_{init} \quad (2)$$

i warunkami brzegowymi:

$$T(x, y, z, t) = 0 \quad \text{dla} \quad \begin{cases} x, y \rightarrow \pm\infty \\ z \rightarrow \infty \end{cases} \quad (3)$$

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} = 0 \quad \text{dla} \quad z = 0 \quad (4)$$



Rys. 1. Schemat rozważanego układu.

Przyjmuje się zatem model ciała półnieskończonego, w którym pomija się wymianę ciepła z otoczeniem. Początek układu współrzędnych $\{x', y', z'\}$ znajduje się w miejscu działania większego źródła ciepła (rys. 1.)

W algorytmie rozwiązania zastosowano technikę źródeł fikcyjnych. Zakłada się, że rozwiązanie stacjonarne istnieje dla czasu t a ruchomy układ współrzędnych $\{x', y', z'\}$ porusza się względem układu podstawowego z prędkością $\mathbf{v}=\mathbf{v}(u, 0, 0)$ równoległe do osi x .

Pole temperatury zależy od źródła o rozkładzie gaussowskim:

$$q_1(x', y', z') = \frac{Q_1(1-R)}{2\pi r^2} \exp\left(-\frac{(x')^2 + (y')^2}{2r^2} - \beta|z'|\right) \quad (5)$$

gdzie: β jest współczynnikiem absorpcji, Q_1 mocą wiązki laserowej, R współczynnikiem odbicia, przyjmowanym najczęściej 0.3, zaś $\sqrt{2} r$ jest promieniem wiązki [6].

Zmiana temperatury w rozważanym obszarze w wyniku działania źródła (5) w przyroście czasu dt' wynosi:

$$T_1(x, t) = \frac{1}{C_{ef} \rho V} \int \int \tilde{Q}(x', t') G(|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|, t - t') dV' dt' + T_{init} \quad (6)$$

Przeprowadzając całkowanie (6) po współrzędnych przestrzennych uwzględniając (5) otrzymuje się:

$$T_1(x, y, z, t) = \int_0^t \frac{Q_1(1-R)}{4\pi\rho c [r^2 + 2a(t-t')]^2} \times \exp\left(\alpha\beta^2(t-t') - \frac{[x-u(t-t')-d]^2 + y^2}{4\alpha(t-t') + 2r^2}\right) \left[e^{\beta z} \operatorname{erfc}\left(\beta\sqrt{a(t-t')} + \frac{z}{2\sqrt{a(t-t')}}\right) + e^{-\beta z} \operatorname{erfc}\left(\beta\sqrt{a(t-t')} - \frac{z}{2\sqrt{a(t-t')}}\right) \right] dt' + T_{init} \quad (7)$$

gdzie: $\operatorname{erf}(x)$ jest funkcją błędów, $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$.

Główne źródło spawające znajduje się w odległości d za źródłem podgrzewającym ($x = 0$ i $y = 0$) o rozkładzie mocy postaci:

$$q_2(x', y', z') = Q_2 \cdot \frac{H(z')}{h_z} \quad \text{dla} \quad \begin{cases} x' = 0 \\ y' = 0 \\ -\infty < z' < \infty \end{cases} \quad (8)$$

gdzie: h_z jest głębokością penetracji źródła, natomiast H przyjmuje wartości:

$$H(z') = \begin{cases} 1 & \text{dla } -h_z \leq z' \leq h_z \\ 0 & \text{dla } |z'| > h_z \end{cases} \quad (9)$$

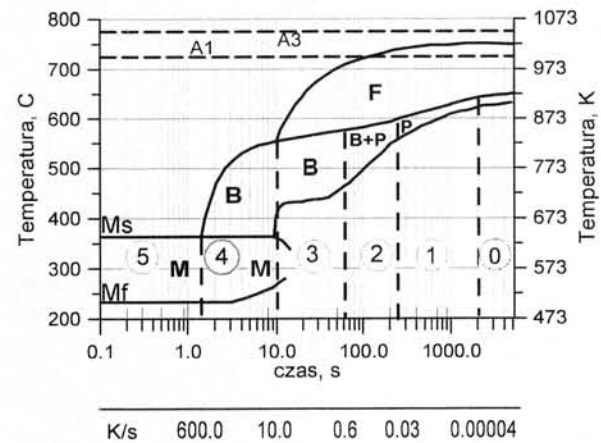
Po całkowaniu po współrzędnych przestrzennych przyrost temperatury w przedziale czasu $[0, t]$ w wyniku działania źródła ciepła jest następujący:

$$T_2(x, y, z, t) = \int_0^t \frac{Q_2(1-R)/h_z}{8\rho c [\pi a(t-t')]^2} \exp\left(\frac{[x-u(t-t')]^2 + y^2}{4a(t-t')}\right) \times \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{z-h_z}{2\sqrt{a(t-t')}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{z+h_z}{2\sqrt{a(t-t')}}\right) \right] dt' \quad (10)$$

Temperatura wypadkowa jest sumą T_1 i T_2 .

PRZEMIANY FAZOWE

Model numeryczny wyznaczania udziałów fazowych przedstawia się dla spawalnej stali 18G2A, o złożonej strukturze, której wykres CTPc-S prezentuje rysunek 2.



Rys. 2. Wykres CTPc-S stali 18G2AV.

Udział austenitu podczas nagrzewania wyznacza się korzystając z formuły Mehla-Avramiego [2,4,7]:

$$\tilde{\eta}_A(T, t) = 1 - \exp(-bt^n) \quad (1)$$

gdzie: $\tilde{\eta}_A$ jest objętościowym udziałem austenitu powstającego w procesie nagrzewania, t czasem, współczynniki $b=b(T)$ i $n=n(T)$ wyznacza się warunkując udział początkowy oraz końcowy przemiany.

Udziały faz powstałych z austenitu w procesie chłodzenia są determinowane temperaturą i szybkością chłodzenia w przedziale $[800, 500]^\circ\text{C}$. Udział nowej fazy, takiej jak bainit, ferryt czy perlit wyznaczany jest wzorem stosowanym do przemian dyfuzyjnych (formułą Mehla-Avramiego) uwzględniając w nim istniejące już udziały, tzn.

$$\eta_i(T, t) = \tilde{\eta}_A(1 - \sum \eta_i)(1 - \exp(-bt^n)) \quad (2)$$

Udział martenzytu natomiast, szacuje się zależnością Koistinen-Marburgera [4].

$$\eta_M(T, t) = \tilde{\eta}_A(1 - \sum \eta_i)(1 - \exp(-k(M_S - T))) \quad (3)$$

gdzie: k jest współczynnikiem zależnym od temperatury zakończenia przemiany martenzytycznej (M_i).

ODKSZTAŁCENIA TERMICZNE I STRUKTURALNE

Przyrosty odkształceń izotropowych od temperatury i przemian fazowych (odkształcenia strukturalne), w procesie nagrzewania i chłodzenia określone są odpowiednio wzorami [1,7]:

$$d\varepsilon^{TPh} = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \eta_i dT - \gamma_A d\eta_A, \tag{4}$$

$$d\varepsilon^{TPh} = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \eta_i dT + \sum_{j=1}^4 \gamma_j d\eta_j$$

gdzie: $i, j = A, B, F, M, i P$, $\alpha_i = \alpha_i(T)$ są współczynnikami liniowej dylatacji austenitu, bainitu, ferrytu, martenzytu i perlitu, $\gamma_j = \gamma_j(T)$ są odkształceniami izotropowymi przemiany fazowej: struktury wyjściowej w austenit, austenitu w ferryt, perlit, bainit, bądź w martenzyt.

Współczynniki liniowej dylatacji termicznej oraz zmian objętości od przemian fazowych przyjęto na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych na symulatorze cykli cieplnych dla różnych prędkości nagrzewania i chłodzenia. Metodę tę i jej weryfikację doświadczalną przedstawiono w pracy [7].

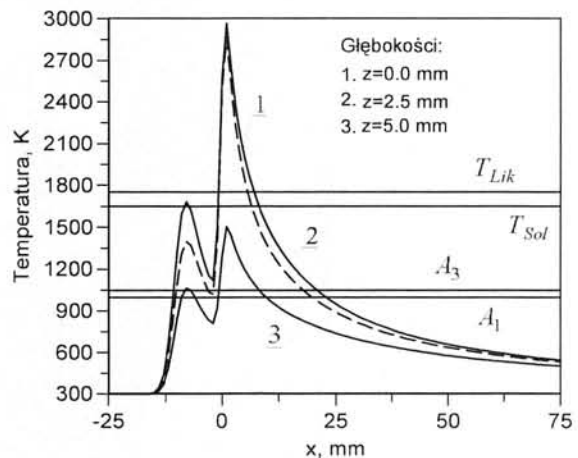
PRZYKŁADY OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Wykonano numeryczną symulację spawania laserowego z podgrzewaniem wstępnym elementu prostokątnego o wymiarach 100x20x5 mm. W obliczeniach przyjęto podgrzewającą wiązkę laserową o mocy $Q_1=2.2$ kW i średnicy 5 mm oraz spawającą wiązkę laserową o mocy $Q_2=4.5$ kW i średnicy 2 mm. Współczynnik absorpcji (β) przyjęto równy 150, a współczynnik odbicia (R) równy 0.3. Źródła ciepła (podgrzewające i spawające) przesuwają się z prędkością 2×10^{-2} m/s., przy czym odległość między nimi wynosi $d=10$ mm.

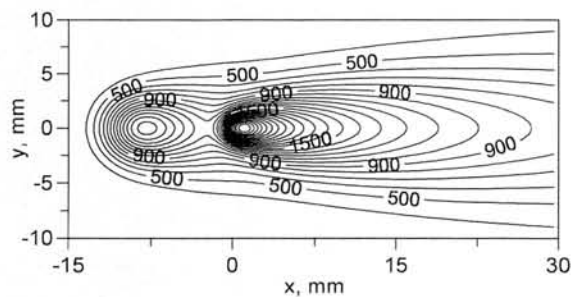
Przy wyznaczaniu przemian fazowych wykorzystano wykres CTP_c-S stali 18G2AV (rys.2).

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono rozkłady temperatury w elemencie spawanym. Zmiany temperatury w płaszczyźnie działania lasera na różnych głębokościach przekroju poprzecznego (powierzchnia górna, środkowa i dolna) ilustruje rysunek 3, a rozkłady temperatury na powierzchni górnej rysunki 4 i 5.

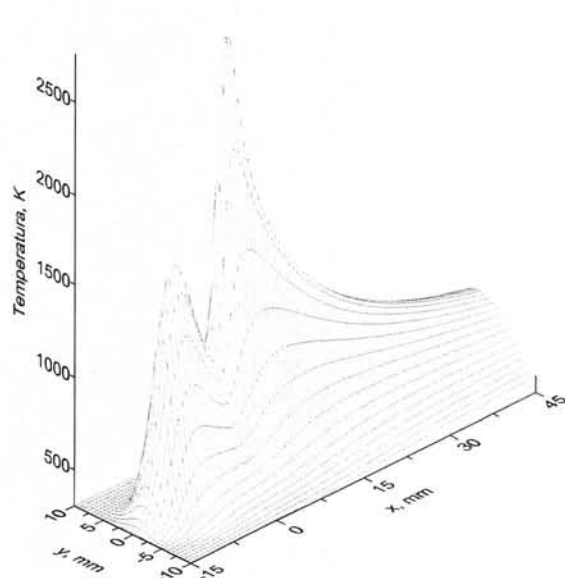
Skład fazowy strefy wpływu ciepła (SWC) połączenia spawanego (rys.6) potwierdza właściwie dobrany model kinetyki przemian fazowych dla badanej stali (por.rys.2 i 7 oraz 9 i 10). Wpływ zastosowania podgrzewania wstępnego na kształt i skład fazowy SWC ilustruje rysunek 8. W przypadku spawania z podgrzewaniem występują mniejsze szybkości chłodzenia, a zatem mniej jest martenzytu a więcej bainitu.



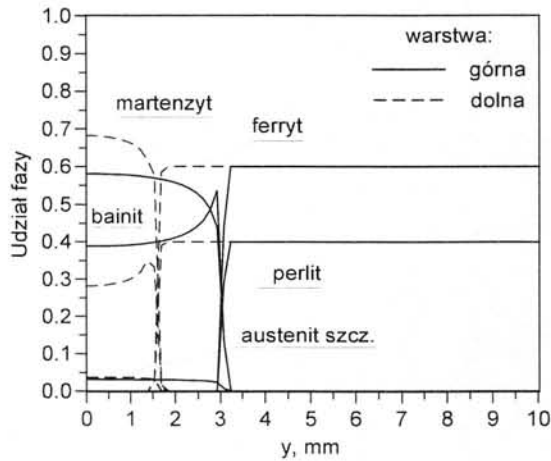
Rys. 3. Rozkład temperatury w płaszczyźnie działania lasera.



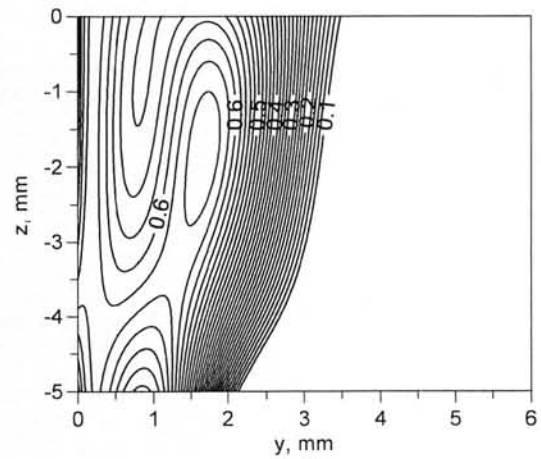
Rys. 4. Izolinie temperatury na górnej powierzchni elementu spawanego.



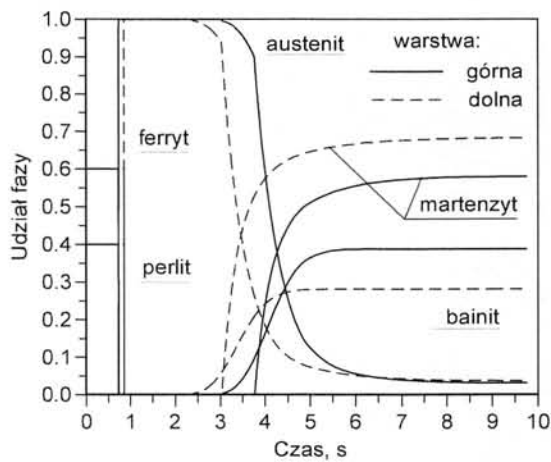
Rys. 5. Obraz rozkładu temperatury na powierzchni elementu spawanego.



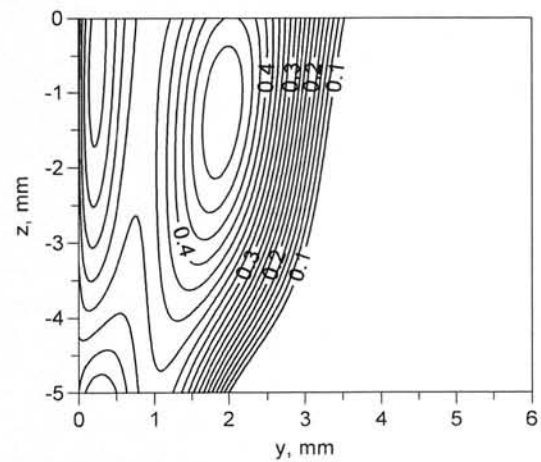
Rys. 6. Udziały faz w SWC w warstwach przypowierzchniowych elementu spawanego.



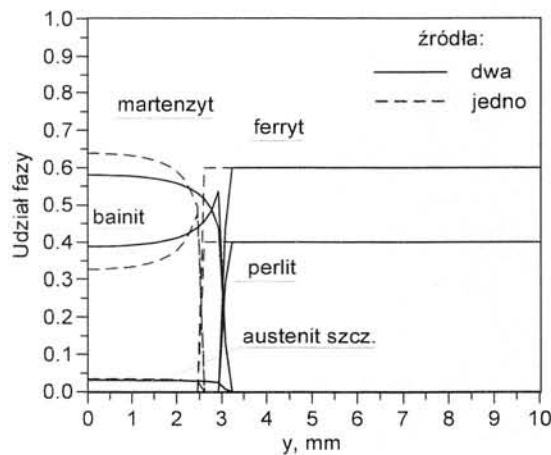
Rys. 9. Izolinie martenzytu w przekroju poprzecznym po spawaniu (SWC).



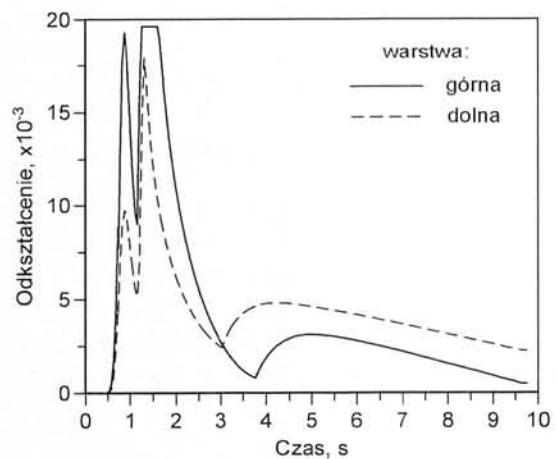
Rys. 7. Kinetyka przemian w punktach 1 i 2 (rys.1), górna i dolna powierzchnia elementu spawanego.



Rys. 10. Izolinie bainitu w przekroju poprzecznym po spawaniu.



Rys. 8. Udziały faz w SWC w górnej warstwie przypowierzchniowej z podgrzewaniem i bez podgrzewania.



Rys. 11. Odkształcenia (termiczne i strukturalne) w punktach 1 i 2 (rys.1), górna i dolna powierzchnia elementu spawanego.

LITERATURA

1. Bokota A., Piekarska W., Modelowanie numeryczne procesu spawania techniką laserową. Strefa wpływu ciepła i naprężenia. *Wiśnyk Technologicznego Uniwersytetu Podilla* № 6, 2003, vol.1(2), 58-66.
2. Cheng-Ji, Notis M.R., Continuous cooling transformation kinetics of steels: a phenomenological rationalization of experimental observations, *Mat. Sc. and Eng. R15*, 1995, 135-208.
3. Klimpel A., Wolnik A. Spawanie laserem diodowym dużej mocy złączy doczołowych blach ze stali o wysokiej wytrzymałości. *Przegląd spawalnictwa* 2001, 10-11, 7-12.
4. Koistinen D.P., Marburger R.E., A General Equation Prescribing the Extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels, *Acta Metall.*, 7, 1959, 59-60.
5. Lankalapalli K.N., Model-based weld penetration depth estimation. *Welding in the World*, 1997, 39, 5, 304-313.
6. Liu Y.-N., Kannatey-Asibu E., Laser beam welding with simultaneous gaussian laser preheating. *Journal of Heat Transfer, Trans. of the ASME*, 115, 1993, 34-41.
7. Piekarska W., Numerical modelling of structures in the heat affected zone during laser welding process, *Proceedings of International Conference "Mathematical modelling and information technologies in welding and related process"*, 16-20 September, 2002, vil. Katsiveli, Crimea, 113-117.
8. Rybakov A.A. i in: Issledovanie rabotosposobnosti svarnych soedinenij trubnoj stali 10G2BT, vypolnennyh dvuchprochnoj lazernoj svarkoj. *Avtom.Svarka* 1995, 7, 12-17.
9. Махненко В.И., Великоиваненко Е.А., Махненко О.В.и др. Исследование влияния фазовых превращений на остаточные напряжения при сварке кольцевых стыков труб. *Автомат сварка*. 2000, 5, 3-8.

Dr inż. Wiesława Piekarska jest pracownikiem Instytutu Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Częstochowskiej, ul. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, tel. (034) 3250699.

c. d. ze str. 80

Data modelling for web enabled design of modular precision assembly devices.

Dane modelowe umożliwiające projektowanie modułowych urządzeń precyzyjnego montażu.

Jednym z kluczowych czynników powodzenia w automatyzacji montażu jest obecnie zdolność systemów montażowych do zapewnienia bardziej niezawodnych i lepiej spełniających wymagania klienta systemów w krótszych okresach czasu. Pomimo aktywnych badań w dziedzinie rozwoju zdecentralizowanych systemów wytwarzania, nadal istnieją potrzeby i wymagania odnośnie rozwijania metod praktycznych i narzędzi do wspomaganie ich współdziałania w różnych wariantach wczesnego produktu i w różnych stadiach projektowania oraz budowy systemów montażowych. W artykule podawane są modelowe dane na temat projektowania procesów montażu i przykłady oprzyrządowania montażowego. Umożliwiają one podejmowanie decyzji o metodach montażowych (przebiegu i kształcie montażu) w oparciu o dane ze zdecentralizowanych stanowisk roboczych.

Force-guided robot in automated assembly of mobile phone: overcoming component misalignment.

Specjalistyczny robot w automatycznym montażu telefonu komórkowego niwelujący wady połączeń komponentów.

Artykuł opisuje rozwój specjalistycznego robota, wykorzystującego informacje do niwelowania wad połączeń komponentów, w automatycznym montażu telefonu komórkowego. Rozpatrywane jest kilka możliwości wadliwego połączenia w montażu tylnej ścianki i przedniego panelu telefonu komórkowego. Zastosowano filozofię (sposób) montażu wykorzystujący odpowiednio wymuszone, ukierunkowane działanie robota w celu poprawnego wykonania zadania montażowego. Rozpatrywana operacja montażowa została wykonana poprawnie pomimo istnienia wadliwych połączenia komponentów obrotowych i przekładniowych. Wyniki doświadczenia pokazały, że proponowane podejście montażowe z powodzeniem zapewniło wykonanie zadania montażowego.

c. d. str. 90