

MODELOWANIE POLA TEMPERATURY I PRZEMIAN FAZOWYCH W ELEMENTACH REGENEROWANYCH NAPAWANIEM

JERZY WINCZEK

MODELLING OF TEMPERATURE FIELD AND PHASE TRANSFORMATION IN ELEMENTS REGENERATED BY SURFACING

Abstract

In work the model of field temperature and phase changes calculation for multibeads solid wire GMA surfacing is presented. For adopted diagram of surfacing the temperature field is given, with regard of call out of temperature changes was qualified analytically applied next deposit welds (increases of temperature with next passages of electrode and cooling already applied padding welds, as well as earlier warmed areas). The kinetic of phase changes during heating is by temperatures of beginning and end of austenitic transformation limited, however progress of phase changes during cooling is by TTT-welding diagram calculated. Phase changes calculations for rectangular prism made from steel St3S was carried out. Results of calculations by schedule of temperature in cross section of surfaced element, as well thermal cycles, participations phases graphs and dilatometric curves for choose points, as well participation of bainite in cross section surfaced element after individual deposits during surfacing are illustrated.

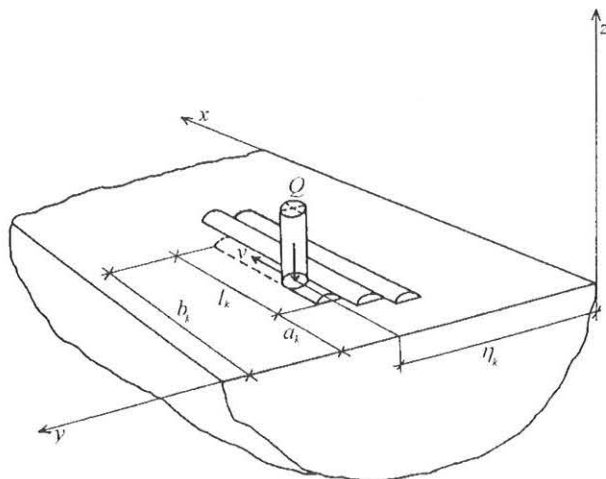
1. WPROWADZENIE

Zużycie elementów maszyn pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych jest na ogół intensywne. Napawanie jest wówczas racjonalnym zabiegiem. Stosuje się je często do regeneracji czopów wałów, walców hutniczych, wałków prostownic i samotoków, prowadnic, ław, powierzchni uszczelniających zamknięć wielkopieczowych, matryc kuziennych, zębów koparek, łyżek spycharek, jak również do naprawy wybrakowanych odlewów staliwnych (Klimpel i in. 1973, 1976, 1983, Szendzielorz, 1994, Pilarczyk i Pilarczyk 1996). W przypadku wielokrotnego napawania nałożenie kolejnej napoiny powoduje ponowne nagrzanie i przetopienie napoin wcześniej wykonanych. Procesy nagrzewania stali powyżej tempe-

ratury austenitizacji prowadzą do przemiany struktur materiału w austenit, a podczas chłodzenia do przemiany austenitu w ferryt perlit, bainit i martenzyt. Podczas kolejnych cykli cieplnych materiał w obszarze oddziaływania ciepła może ulegać przemianom fazowym prowadzącym do zróżnicowania struktury pomiędzy poszczególnymi napoinami i strefami wpływu ciepła przy tych samych parametrach napawania (Parkitny i Winczek, 1999).

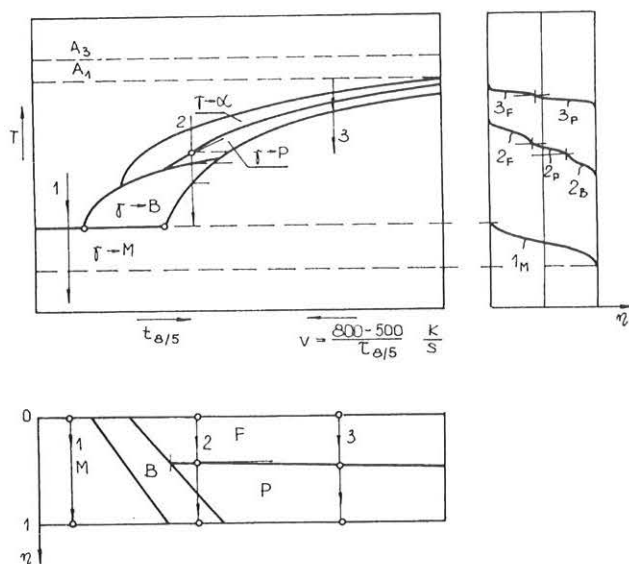
2. POLE TEMPERATURY W PROCESIE NAPAWANIA - UJĘCIE ANALITYCZNE

Rosenthal (1941, 1946) jako pierwszy poprzez wprowadzenie niezależnych od temperatury własności cieplno-mechanicznych nagrzewanego materiału

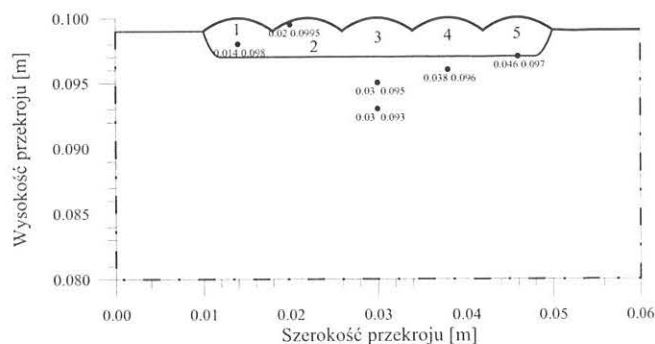


Rysunek 1. Schemat nakładania napoin

uzyskał równanie rozkładu temperatury dla stanu quasi-stacjonarnego dla różnych modeli źródła ciepła (punktowego, liniowego i powierzchniowego). Od tamtej pory wielu badaczy podejmowało próby analitycznego opisanego pola temperatury w celu uzyskania jak najbliższego odwzorowania rzeczywistego pola temperatury podczas spawania. W istocie obliczenia zależą od matematycznych i fizycznych uproszczeń, które są konieczne do rozwiązania problemu cieplnego. Bazując na rozwiązaniu Rosenthal'a dla punktowego źródła ciepła Christensen i in. (1965) zaproponowali bezwymiarowe rozwiązania pola temperatury pozwalające na określenia wymiarów strefy wpływu ciepła i prędkości stygnięcia. Ponieważ analityczne rozwiązanie równania przewodzenia ciepła oferuje szybszą ocenę pola temperatury i jego zależność od takich parametrów jak prędkość źródła ciepła, ten sposób w dalszym ciągu znajduje wielu zwolenników nie tylko w opisie technik spawalniczych (Tsai i Eagar



Rysunek 2. Schemat przemian fazowych austenitu przechłodzonego w zależności od prędkości chłodzenia w przedziale 800-500°C.



Rysunek 3. Strefa ubytków regenerowanego przedmiotu i schemat kolejności nakładania napoin.

1983, Giang i Lesiński 1989, Jeong i Cho 1997, Nguyen i in. 1999, Komanduri i Hou 2000), ale również laserowych (Geissler i Bergmann 1988, Maier i in. 1992, Parkitny i in. 1993). W odniesieniu do spawania wielokrotnego dane literaturowe są bardzo skąpe, zarówno w zakresie modelowania zjawisk cieplno-mechanicznych (Reed i Bhadeshia 1994), jak i badań eksperymentalnych (Murugan i in. 1998).

Charakterystycznym dla procesu spawania (napawania) jest działanie skoncentrowanego, ruchomego źródła ciepła, wywołującego zmienne w czasie i przestrzeni pole temperatury, którego analityczny opis uzyskuje się wychodząc od równania przewodnictwa ciepła w nieruchomym układzie współrzędnych (x, y, z) :

$$\nabla(\lambda \nabla T) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

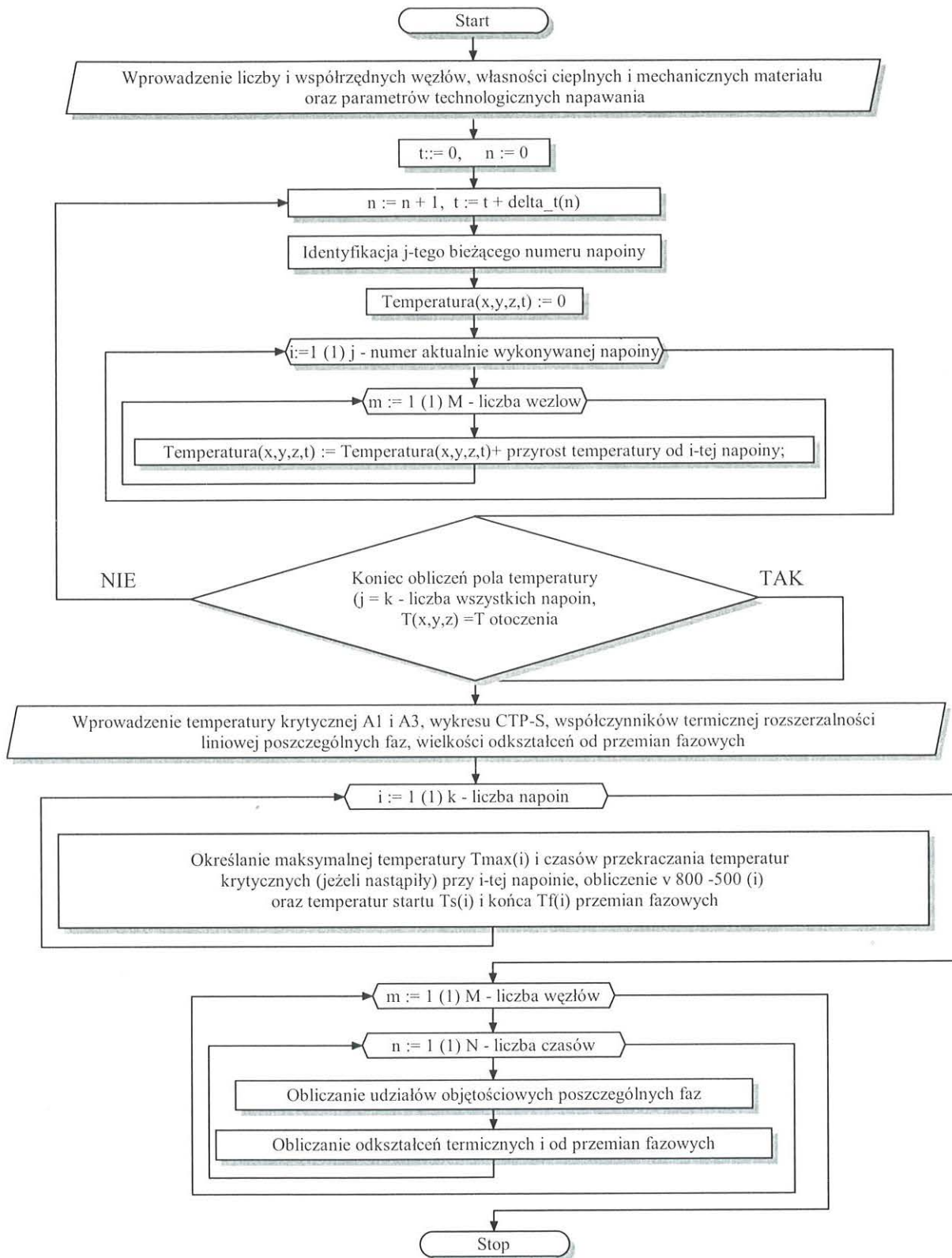
gdzie:

- ρc – pojemność cieplna [J/kgK],
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła [J/msK],
- T – temperatura [K],
- t – czas [s].

W poszukiwaniu opisu pola temperatury korzysta się na ogół z rozwiązania podstawowego równania (1) dla ciała nieskończonego z chwilowym źródłem ciepła Q przyłożonym w dowolnym punkcie ciała o współrzędnych (x', y', z') (Rykalin, 1947, 1951, 1971, Myśliwiec 1970, Ravi Vishnu i Easterling 1991, Cerjak i Easterling 1993):

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at}\right) \quad (2)$$

Przy czym, podobnie jak w niniejszej pracy, przyjmuje się następujące założenia dotyczące napawanego przedmiotu: materiał jest jednorodny i izotropowy, własności cieplno-mechaniczne nie zależą od temperatury, nie uwzględnia się wpływu przemian fa-



Rysunek 4. Schemat blokowy obliczania pola temperatury i przemian fazowych podczas wielośćowego napawania

zowych na temperaturę oraz pomija się ciepło Joule'a w procesie napawania elektrycznego. Pole temperatury wywołane ruchomym objętościowym źródłem ciepła o gaussowskim rozkładzie gęstości mocy i pręd-

kości przesuwu v [m/s], dostarczającym do spawanego materiału strumień ciepła \dot{q} [J/s], w nieruchomym układzie współrzędnych (x, y, z) wyrazimy dla k -tej napoiny wzorem (Winczek, 1993, 1998):



$$T_k(x, y, z, t) - T_0 = \frac{3\dot{q}}{8\pi\rho c a z_0} \exp\left(-\frac{\xi_k v}{2a} - \frac{v^2 t_0}{4a}\right) \int_0^{\mu_k} \frac{\mu_k}{1 + \mu_k^2} \exp\left(-\frac{\xi_k^2 + (y - \eta_k)^2}{4at_0(1 + \mu_k^2)} - \frac{v^2 t_0 \mu_k^2}{4a}\right) \left(1 - \frac{z^2 + 2at_0 \mu_k^2}{z_0^2} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{z + z_0}{2\mu_k \sqrt{at_0}}\right) - \Phi(z) \operatorname{erf}\left(\Phi(z) \frac{z - z_0}{2\mu_k \sqrt{at_0}}\right)\right)\right) + \frac{4at_0 \mu_k^2}{z_0^2} \left(\frac{z + z_0}{2\mu_k \sqrt{\pi at_0}} \exp\left(\frac{(z - z_0)^2}{4at_0 \mu_k^2}\right) - \frac{z - z_0}{2\mu_k \sqrt{\pi at_0}} \exp\left(\frac{(z + z_0)^2}{4at_0 \mu_k^2}\right)\right) d\mu_k \quad (3)$$

gdzie: $\mu_k = \sqrt{(t - t_k)/t_0}$,

a – współczynnik wyrównywania temperatury [m²/s],

z_0 – głębokość zalegania źródła ciepła [m],

T_0 – temperatura otoczenia [°C],

a_k, η_k – współrzędne początku napoiny k (rysunek 1),

t_k – czas rozpoczęcia nakładania napoiny k ,

oraz

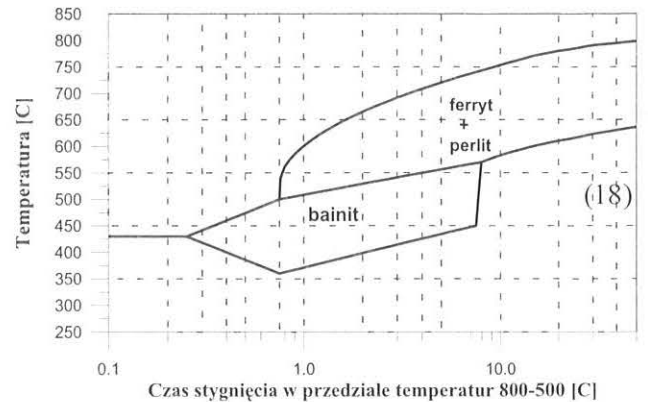
$$\xi_k = x - a_k - v(t - t_k - t_0) \quad (4)$$

$$\Phi(z) = \begin{cases} -1 & \text{dla } z \in < 0, z_0 \\ 1 & \text{dla } z \in < z_0, -\infty \end{cases}$$

$$t_k = \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{l_i}{v} + t_{pi} \right) \quad (5)$$

przy czym t oznacza bieżący czas całego procesu napawania, t_{pi} – czas pomocniczy poprzedzający wykonanie i -tej napoiny (czas jałowego ruchu elektrody), l_i – długość i -tej napoiny.

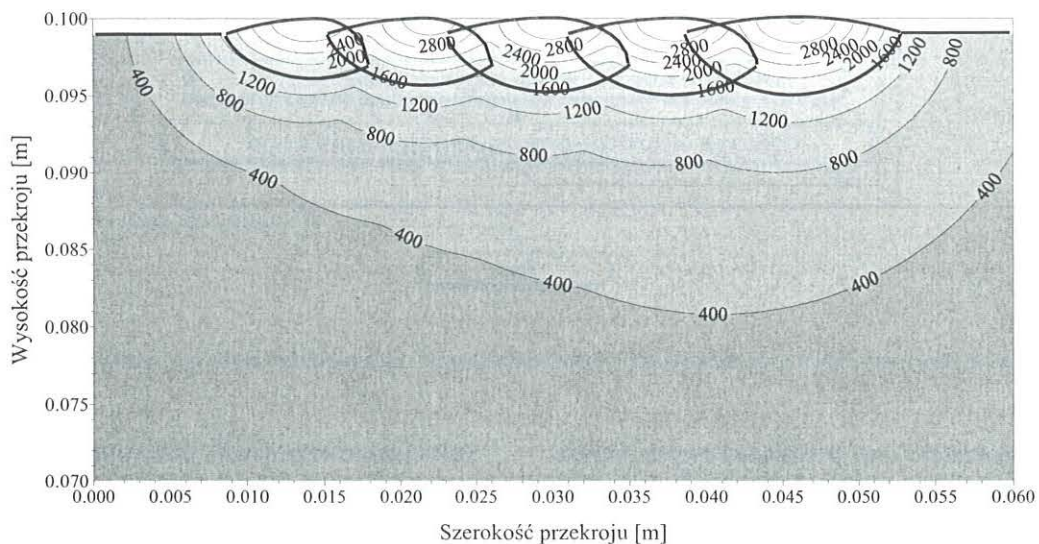
Wielkość t_0 charakteryzuje powierzchniowy rozkład źródła ciepła, przy czym $r_B^2 = 4at_0$ (Ravi Vishnu i Easterling, 1991).



Rysunek 5. Wykres CTPC-S dla stali St3S

W obliczeniach pola temperatury pomija się dodatkowy wpływ ciepła przez nakładany materiał napoiny, uwzględnia się natomiast zmiany temperatury wywołane nakładaniem kolejnych napoin (przyrosty temperatury z kolejnymi przejściami elektrody i stygnięcia już nałożonych napoin i obszarów wcześniej nagranych), w tym również pokrywanie się obszarów przetopionych (zakładek) zgodnie z zależnością (por. rys. 6):

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^k T_i(x, y, z, t) \quad (6)$$



Rysunek 6. Izolinie maksymalnej temperatury w przekroju poprzecznym ($x = 0.045$ [m]) napawanego elementu z zaznaczonymi obszarami przetopień.

3. PRZEMIANY FAZOWE

Problematyce opisu i numerycznego modelowania przemian fazowych stali jest poświęconych wiele prac, których przegląd przedstawili Rhode i Jeppson, 2000. Rodzaj nowopowstałej fazy zależy w dużym stopniu od kinetyki procesu nagrzewania i stygnięcia. Kinetykę tych procesów opisują reguły W.A. Johnson'a i R.F. Mehl'a oraz M. Avrami'ego (Fernandes i in., 1985). Zgodnie z nią ilość austenitu η_A powstałego podczas nagrzewania stali ferrytyczno-perlitycznej jest określana według wzoru:

$$\eta_A = \sum_i \eta_i^0 \left(1 - \exp(-b_i T^{n_i})\right) \quad (7)$$

gdzie η_i^0 stanowią udziały początkowe ferrytu ($i \equiv F$), perlitu ($i \equiv P$) i bainitu ($i \equiv B$), a stałe b_i i n_i są wyznaczone empirycznie.

W ilościowym ujęciu postęp przemiany fazowej podczas chłodzenia szacuje się, stosując zasadę addytywności, udziałem objętościowym powstającej fazy, co wyrazimy analogicznie do formuły Avrami'ego wzorem (Hougardy, 1987):

$$\eta_i = \eta_i^0 \left(1 - \exp(-b_i T^{n_i})\right) \quad (8)$$

gdzie η_i^0 jest maksymalnym udziałem objętościowym fazy i przy czym całkowity ułamek objętościowy jest równy:

$$\sum_{i=1}^j \eta_i = 1 \quad (9)$$

W celu ilościowego opisanego zależności struktury i własności materiału od temperatury i czasu przemiany austenitu przechłodzonego, można posługiwać się spawalniczymi wykresami czas-temperatura-przemiana przy chłodzeniu ciągłym (CTPc-S). Sporządza się je przy założeniu, że chłodzenie w przedziale temperatur 800–500°C następuje ze stałą prędkością i w ujęciu ilościowym postęp przemiany fazowej szacuje się w zależności od czasu $t_{8/5}$ (czasu przebywania materiału w tym zakresie temperatury).

Podczas napawania każdy obszar poddany temu procesowi podlega nagrzewaniu a w następnej kolejności chłodzeniu. O ile temperatura maksymalnego nagrzania przekroczy temperaturę początku przemiany austenicznej A_1 to wówczas mamy do czynienia z niepełną przemianą austeniczną, a o ile zaś przekroczy temperaturę A_3 to struktura pierwotna (wyściowa) ulega całkowitej przemianie w austenit. Przemiany te opisujemy jak dla procesu ciągłego.

Opis zależności udziałów strukturalnych od temperatury i czasu przemiany austenitu w procesie chłodzenia sporządzamy na podstawie wykresów, które

wiążą czas chłodzenia $t_{8/5}$ (czas przebywania w zakresie temperatury 800–500°C), bądź prędkość chłodzenia ($v_{8/5} = (800 - 500)/t_{8/5}$) i temperaturę z postępowaniem przemiany fazowej (rys. 2). Wykresy te zwane są wykresami CTPc-S.

W ilościowym ujęciu postęp przemiany fazowej szacuje się udziałem objętościowym η_i powstającej fazy, przy czym i będzie oznaczać ferryt ($i \equiv F$), perlit ($i \equiv P$), bainit ($i \equiv B$) lub martenzyt ($i \equiv M$). Udział objętościowy η_i powstającej fazy wyrazimy na wzór formuły (8), zastępując czas t nową zmienną niezależną, którą jest temperatura T (Parkitny i Winczek, 1999). Otrzymujemy:

$$\eta_i = \eta_i^0 \left(1 - \exp(-b_i T^{n_i})\right) \quad (10)$$

gdzie:

$$n_i = \frac{\ln \left(\ln \left(1 - \frac{\eta_i^f}{\eta_i^0} \right) / \ln \left(1 - \frac{\eta_i^s}{\eta_i^0} \right) \right)}{\ln(T_i^s / T_i^f)}$$

$$b_i = \frac{n_i \left(1 - \frac{\eta_i^s}{\eta_i^0} \right)}{T_i^s}$$

$$\eta_i^s / \eta_i^0 = 0.01$$

$$\eta_i^f / \eta_i^0 = 0.99$$

przy czym $T_i^s = T_i^s(v_{8/5})$ oraz $T_i^f = T_i^f(v_{8/5})$ są odpowiednio temperaturą początku i końca przemiany fazy i , zaś η_i^0 całkowitym udziałem fazy i w ogólnej mieszaninie.

4. ODKSZTAŁCENIA TERMICZNE I OD PRZEMIANY FAZOWYCH

W przypadku wielokrotnego oddziaływania źródła ciepła, podobnie jak to ma miejsce w analizie pola temperatury, całkowite odkształcenie jest sumą odkształceń termicznych i wywołanych przemianami fazowymi, w kolejnych procesach nagrzewania i chłodzenia będących skutkiem oddziaływania elektrody:

$$\varepsilon(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^k \varepsilon_j(x, y, z, t) \quad (11)$$

gdzie:

$$\varepsilon_j(x, y, z, t) = \varepsilon_j^H + \varepsilon_j^C \quad (12)$$

ε_j^H – odkształcenie termiczne i od przemian fazo-

wych podczas nagrzewania,

ε_j^C – odkształcenie termiczne i od przemian fazowych podczas chłodzenia.

Nagrzewanie prowadzi do wzrostu objętości materiału, natomiast przemiana struktury początkowej (ferytycznej, perlitycznej czy bainitycznej) w austenit wywołuje skurcz związany z różną masą właściwą danych struktur. Wówczas odkształcenie podczas nagrzewania wyrazimy wzorem:

$$\varepsilon_j^H = \varepsilon_j^{Th} - \varepsilon_j^{Trh} \quad (13)$$

w którym ε_j^{Th} jest odkształceniem wywołanym rozszerzaniem termicznym materiału

$$\varepsilon_j^{Th} = \sum_{i=A,P,F,B,M} \left(\begin{array}{l} \alpha_i \eta_{i0} (T - T_{0j}) H(T_{A_i} - T) + \\ \alpha_i \eta_i (T - T_{A_i}) H(T_{A_3} - T) H(T - T_{A_i}) + \\ \alpha_A (T - T_{A_3}) H(T - T_{A_3}) \end{array} \right) \quad (14)$$

a ε_j^{Trh} odkształceniem od przemian fazowych podczas nagrzewania,

$$\varepsilon_j^{Trh} = \sum_{i=P,F,B,M} \eta_i \gamma_{iA} \quad (15)$$

gdzie: γ_{iA} – odkształcenie przemiany i -tej struktury w austenit, T_{0j} – początkowa temperatura nagrzewania w j -tym przejściu lasera, α_i – współczynnik cieplnej rozszerzalności liniowej i -tej struktury, a $H(x)$ jest funkcją Heaviside'a określoną w sposób następujący

$$H(x) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } x > 0 \\ \frac{1}{2} & \text{gdy } x = 0 \\ 0 & \text{gdy } x < 0 \end{cases} \quad (16)$$

Stygnięcie materiału wywołuje jego skurcz, a przemiana austenitu w struktury chłodzenia powoduje z kolei wzrost jego objętości. Prowadzi to do skomplikowanych zmian odkształceń zależnych nie tylko od bieżącej temperatury materiału podczas stygnięcia, ale również od temperatury początku i końca przemian austenitu w ferryt, perlit, bainit lub martenzyt oraz od udziałów objętościowych poszczególnych składników strukturalnych (w tym także austenitu). Odkształcenie podczas chłodzenia określimy z zależności:

$$\varepsilon_j^C = \varepsilon_j^{Tc} + \varepsilon_j^{Trc} \quad (17)$$

w której ε_j^{Tc} jest odkształceniem wywołanym skurczem termicznym materiału

$$\varepsilon_j^{Tc} = \alpha_A (T - T_{SOL}) H(T - T_s) + \alpha_A (T_s - T_{SOL}) H(T_s - T) + \sum_{i=A,P,F,B,M} \alpha_i \eta_i (T - T_{si}) H(T_{si} - T) \quad (18)$$

a ε_j^{Trc} odkształceniem od przemian fazowych podczas chłodzenia,

$$\varepsilon_j^{Trc} = \sum_{i=P,F,B,M} \eta_i \gamma_{Ai} \quad (19)$$

gdzie T_{SOL} jest temperaturą solidusu, T_s – temperaturą początku przemian fazowych, T_{si} – temperatura początku przemiany austenitu w i -tą strukturę, γ_{Ai} – odkształcenie przemiany austenitu w i -tą strukturę.

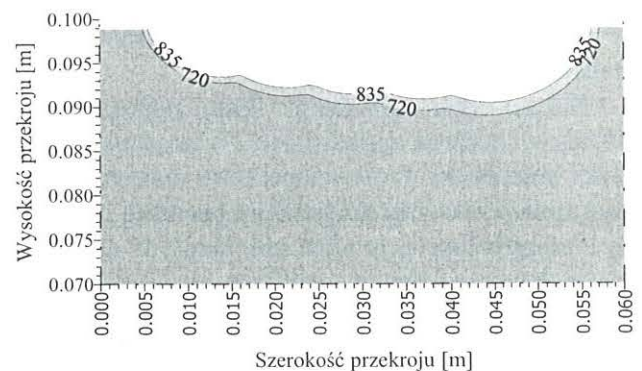
Przy czym, ze względu na ograniczenie istnienia fazy stałej materiału

$$\varepsilon(x, y, z, t) = 0 \quad \text{dla } T > T_{SOL} \quad (20)$$

5. PRZYKŁAD OBLICZEŃ

Obliczenia zmiennego w czasie pola temperatury i postępu przemian fazowych dokonano dla prostopadłościennego elementu stalowego o szerokości 0,16 [m], grubości 0,099 [m] i długości 0,68 [m]. Do analizy przyjęto strefę zużycia materiału o szerokości 0,04 [m], głębokości 0,002 [m] i długości 0,09 [m] w środkowej części regenerowanego elementu. Strefę ubytków uzupełniono jedną warstwą napawania składającą się z pięciu ściegów jednakowej długości (rysunek 3).

Symulację numeryczną pola temperatury i przemian fazowych przeprowadzono według schematu przedstawionego na rysunku 4. Algorytm rozwiązania problemu stanowi sekwencja trzech procedur. W pierwszej z nich dla kolejnych czasów $t(n)$ obliczane jest pole temperatury $T(x, y, z, t)$. Obliczenia kończą się, gdy temperatura napawanego przedmiotu osiąga temperaturę otoczenia. Następnie dla poszczególnych napoin określane są czasy przekraczania temperatur krytycznych (A_1 i A_2) oraz temperatur początku T_s i końca T_f przemian fazowych oraz prędkości stygnięcia $v_{800-500}$. W oparciu o tak obliczone wielkości ob-

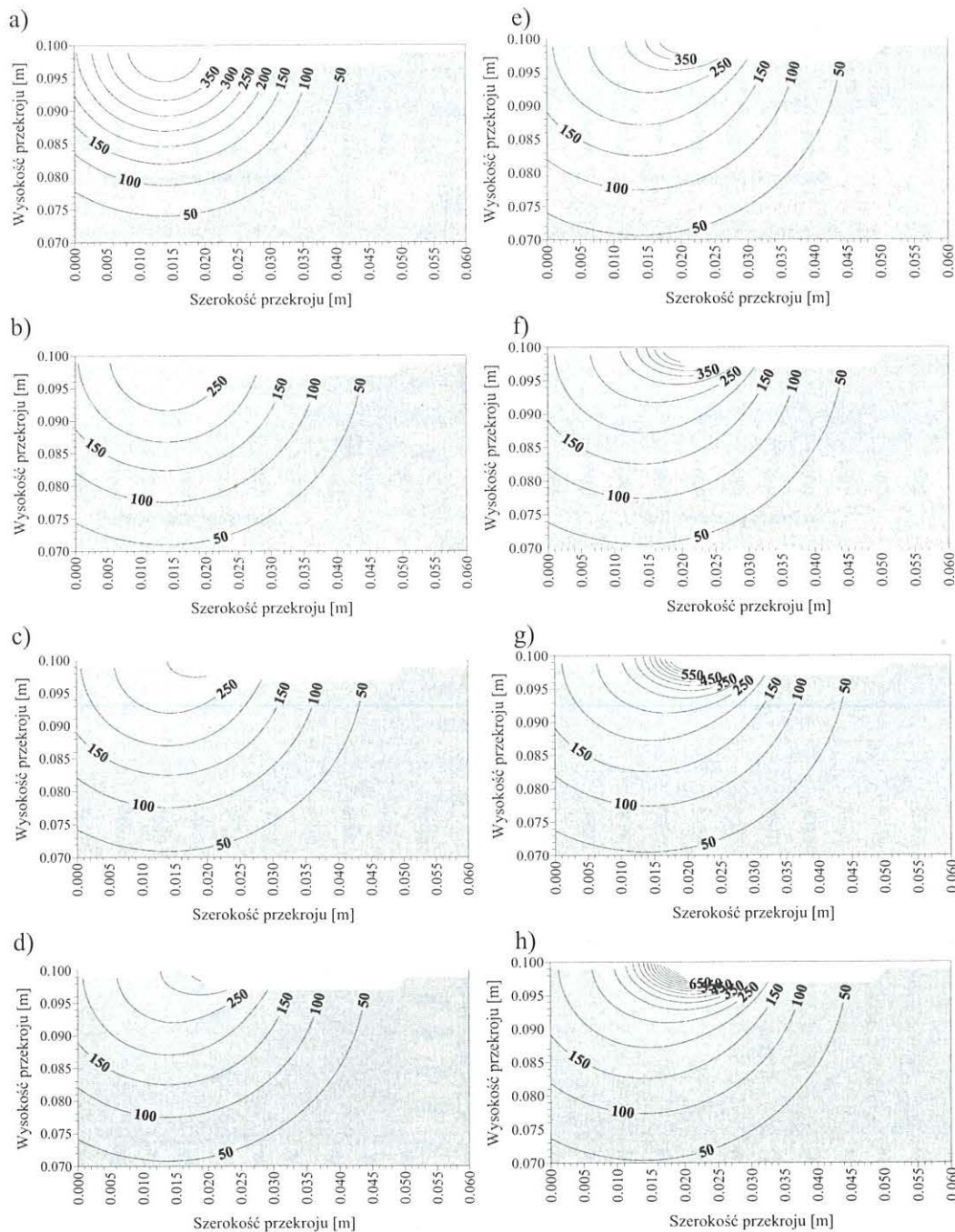


Rysunek 7. Strefa wpływu ciepła w przekroju poprzecznym napawanego elementu: całkowitej przemiany – obszar jasno-szary, powyżej 835 [°C] i przemiany częściowej pomiędzy temperaturami 720 [°C] i 835 [°C].

liczane są udziały objętościowe poszczególnych faz w trakcie procesu oraz odkształcenia termiczne i od przemian fazowych. Obliczenia pola temperatury wykonano dla spawalniczego źródła ciepła o mocy 7140 [W] o gaussowskim rozkładzie gęstości mocy określonym przez $t_0 = 1$ [s] i głębokość zalegania $z_0 = 0,003$ [m], prędkości napawania 0,006 [m/s]. Moc źródła ciepła odpowiada napawaniu przy napięciu łuku 30 [V], natężeniu prądu 280 [A] i współczynniku nagrzewania materiału $\eta = 0,85$, co w praktyce pozwala na wykonywanie metodą GMA napoin o szerokości łoża ponad 8 mm i wysokości nadlewu 3 mm (Klimpel 2000).

Własności cieplne materiału napawanego przedmiotu zostały określone przez współczynnik wyrównywania temperatury $a = 8 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] oraz pojemność cieplną $cr = 5,2$ [MJ/kg°C]. Pole temperatury określono według zależności (1)-(6).

Kinetykę przemian fazowych podczas nagrzewania limitują temperatury początku i końca przemiany austenitycznej, które przyjęto odpowiednio $A_1 = 720$ [°C] i $A_3 = 835$ [°C], natomiast postęp przemian fazowych podczas chłodzenia określono w oparciu o wykres CTPc-S dla stali St3S przedstawiony na rysunku 5 (Brózda i in., 1983). Na rysunku 6 przedstawiono rozkład maksymalnej temperatury w przekroju środ-



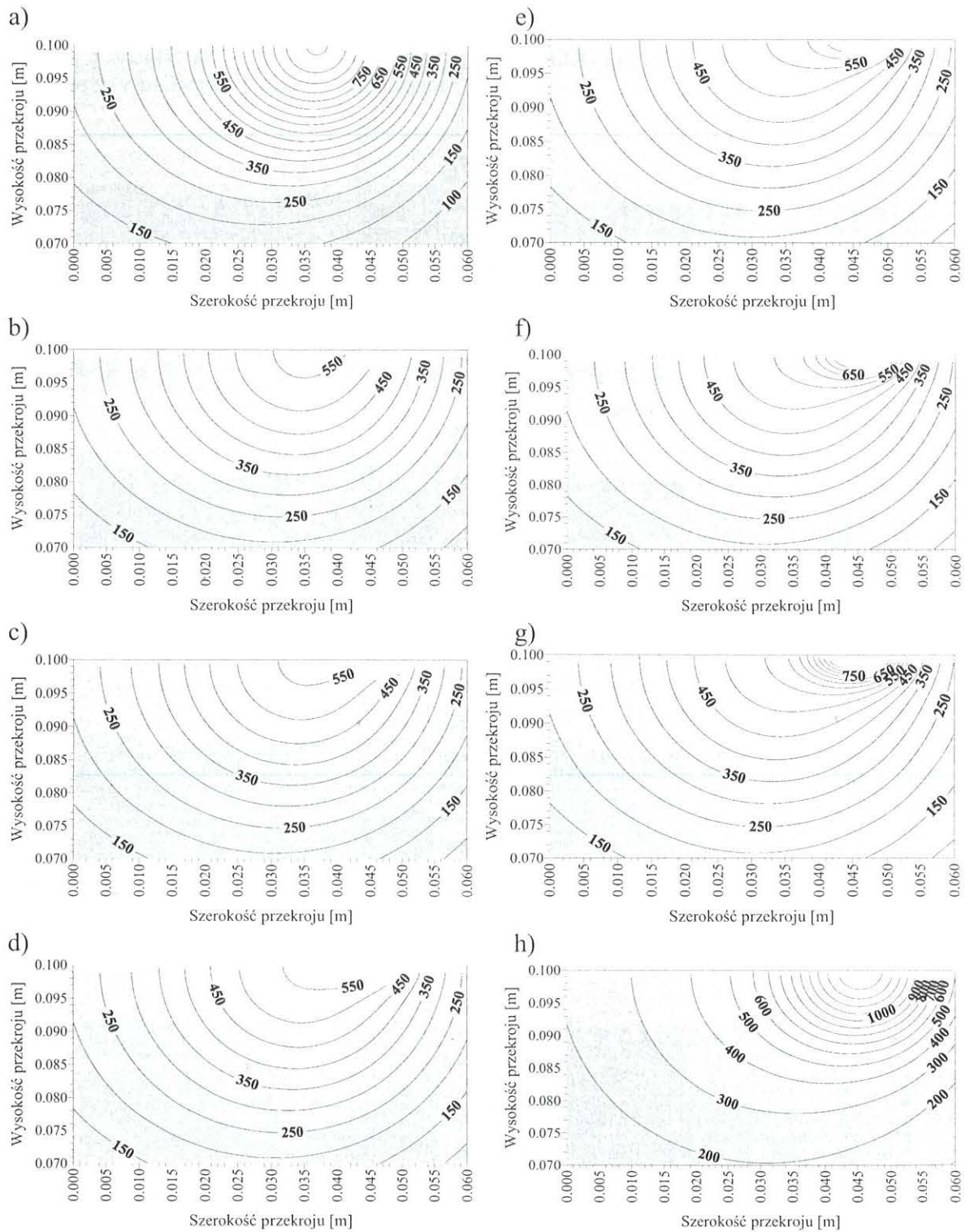
Rysunek 8. Izotermy w przekroju poprzecznym napawanego elementu dla czasów: a) 17 [s], b) 22,4 [s], c) 22,7 [s], d) 22,9 [s], e) 23,1 [s], f) 23,3 [s], g) 23,5 [s], h) 23,7 [s].



kowym napawanego elementu. Na tle izoterm zaznaczono obszary przetopionego materiału podczas wykonywania poszczególnych ściegów. Pokrywające się obszary przetopienia wyznaczają wielkość zakładki. Granice określone temperaturami A_1 i A_3 pozwalają na wyznaczenie strefy wpływu ciepła przedstawionej na rysunku 7 (całkowitej przemiany – obszar jasnoszary i przemiany częściowej – ciemnoszary).

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono izoterm w przekroju poprzecznym napawanego przedmiotu. Przy czym rysunki 8a – 8h ilustrują zmiany temperatury po nałożeniu pierwszej napoiny, rysunki 9a – 9g po nałożeniu czwartej napoiny, a rysunek 9h po nałożeniu napoiny ostatniej, piątej.

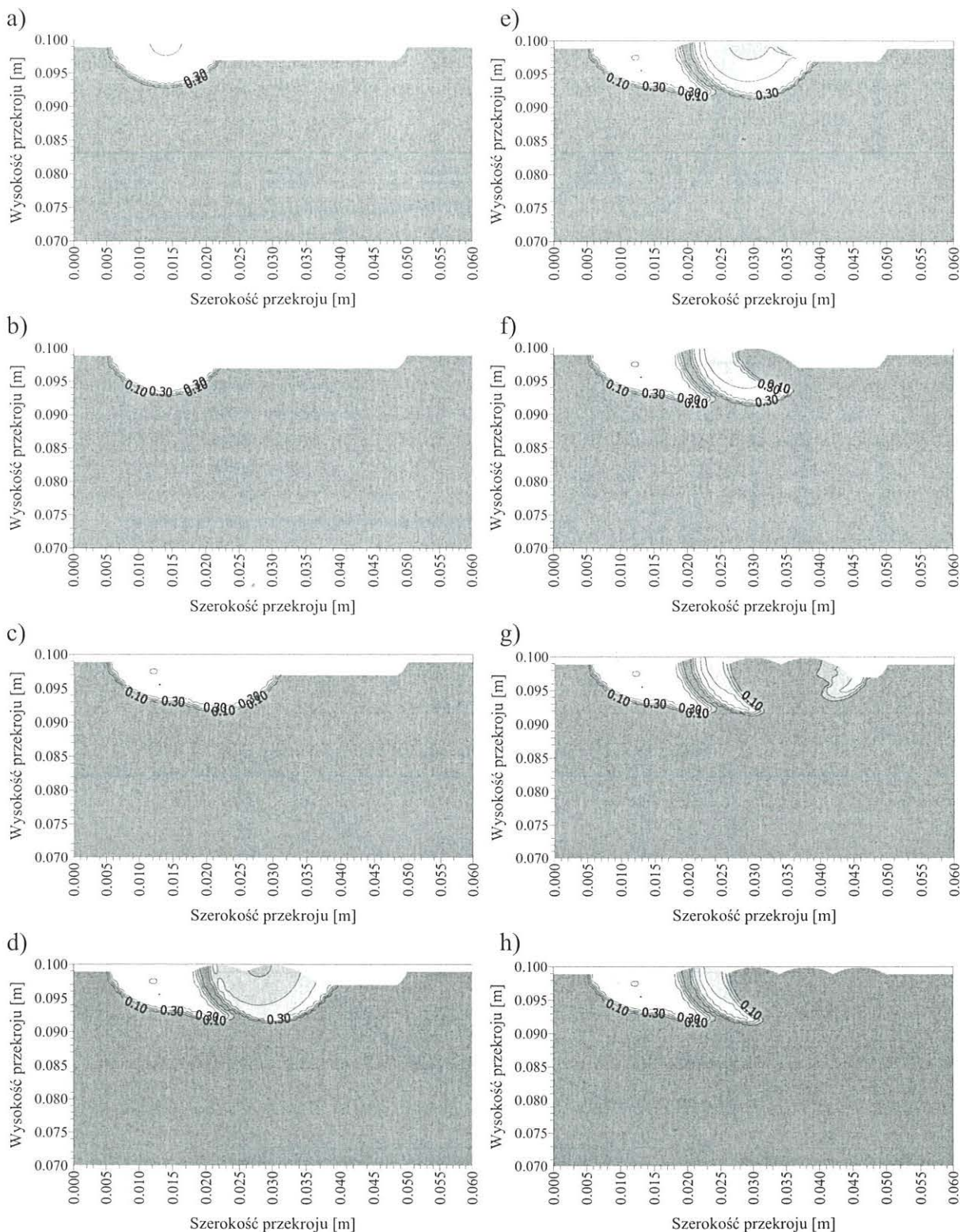
Zmiany udziału fazowego bainitu w poszczególnych miejscach przekroju poprzecznego obrazują



Rysunek 9. Izoterm w przekroju poprzecznym napawanego elementu dla czasów: a) 65,1 [s], b) 73,5 [s], c) 73,7 [s], d) 73,9 [s], e) 74,1 [s], f) 74,3 [s], g) 74,5 [s], h) 79,1 [s].

rysunki 10a – 10h. Po nałożeniu pierwszej i drugiej napoiny (rysunki 10a – 10c) w strefie wpływu ciepła obserwujemy ponad 30-procentowy udział fazowy bainitu powstałego z przechłodzonego austenitu. Podczas nakładania trzeciej i czwartej napoiny (rysunki 10d – 10g) ilość nowopowstałego bainitu wyraźnie spada. Natomiast bainit w wcześniej uformowanych

napoinach wskutek nagrzania powyżej temperatury austenitacji uległ przemianę w austenit. W miejscach tych austenit podczas stygnięcia, ale już dużo wolniejszego, przemienił się w ferryt, perlit i bainit (ale już o mniejszym udziale objętościowym) albo tylko w ferryt i perlit. Po zakończeniu procesu napawania (rysunek 10h) widać wyraźnie, iż w podczas stygnięcia



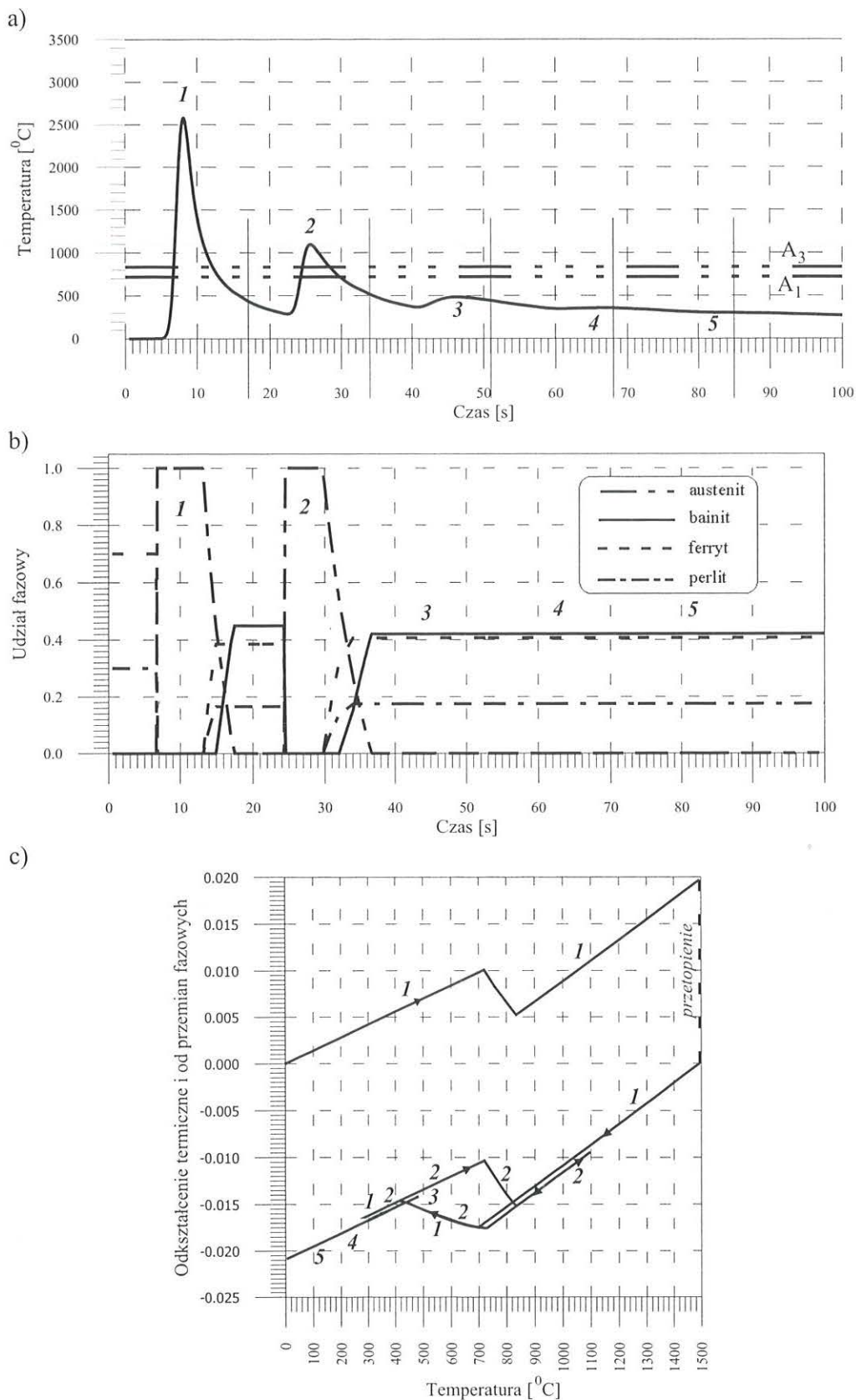
Rysunek 10. Udział objętościowy bainitu w przekroju poprzecznym napawanego elementu w czasie: a) 17 [s], b) 21,4 [s], c) 38,4 [s], d) 55,4 [s], e) 57,4 [s], f) 58,7 [s], g) 72,4 [s], h) 3600 [s].



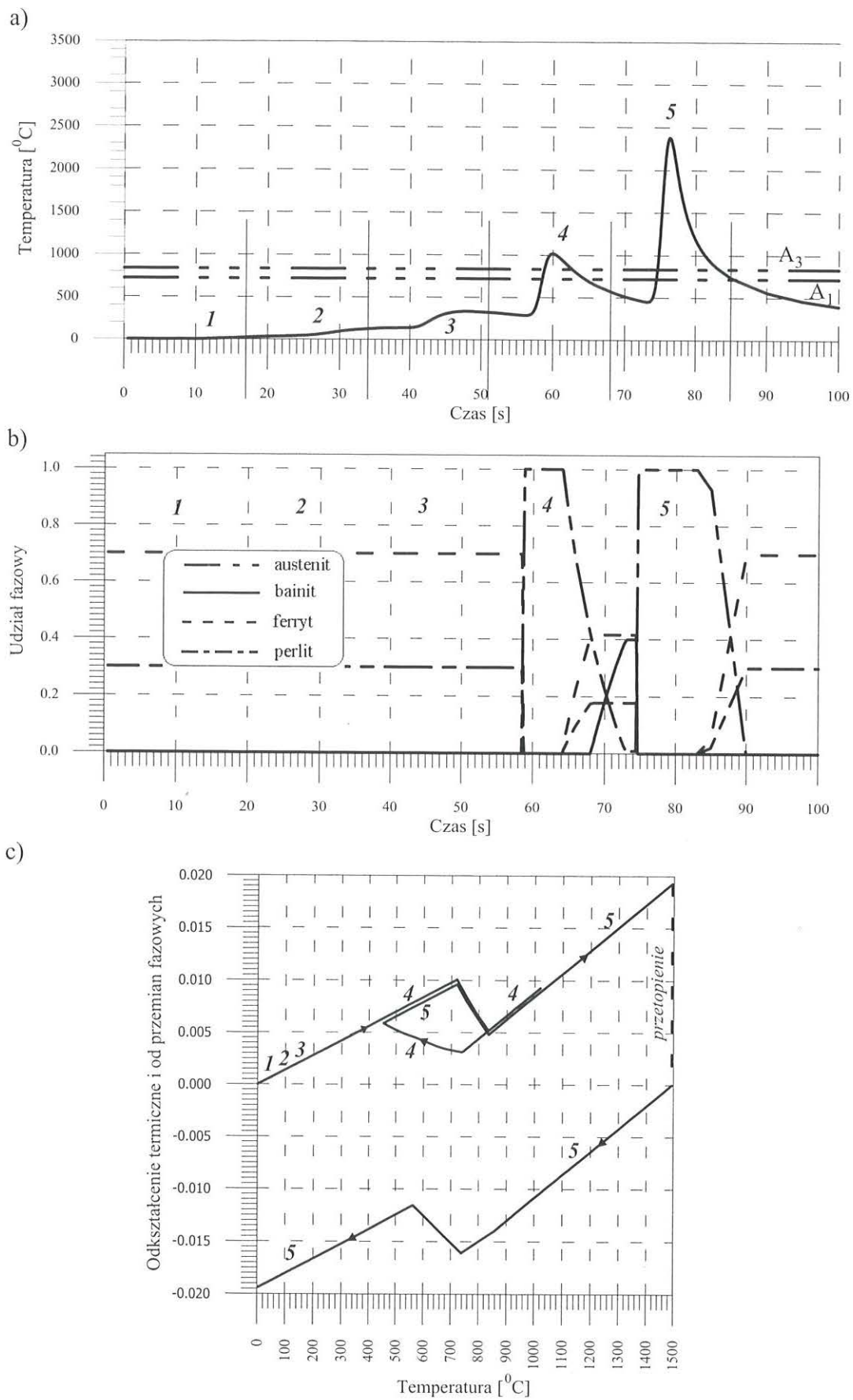
czwartej i piątej napoiny całość austenitu uległa przemianę w ferryt i perlit. Znaczący udział bainitu obserwujemy w obszarze pierwszej i drugiej napoiny oraz w obszarach przyspoinowych pierwszych trzech

napoin.

Skomplikowaną historię zmian temperatury, udziałów fazowych oraz odkształceń termicznych i od przemian fazowych dla wybranych punktów poprzeczne-

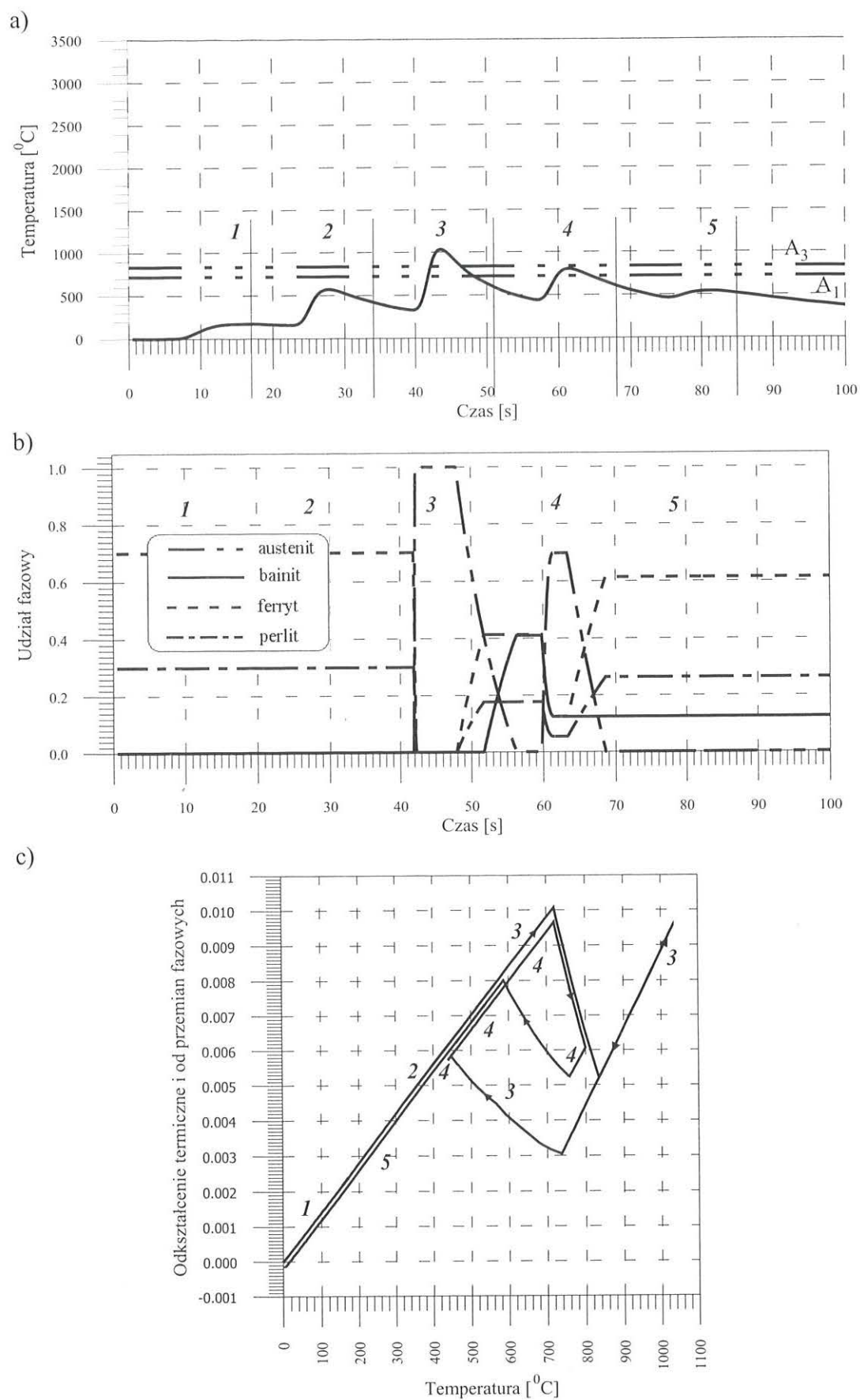


Rysunek 11. Cykl cieplny (a), zmiany udziałów fazowych (b) oraz odkształcenia termiczne i od przemian fazowych w punkcie o współrzędnych $y = 0.014 [m]$, $z = 0.098 [m]$

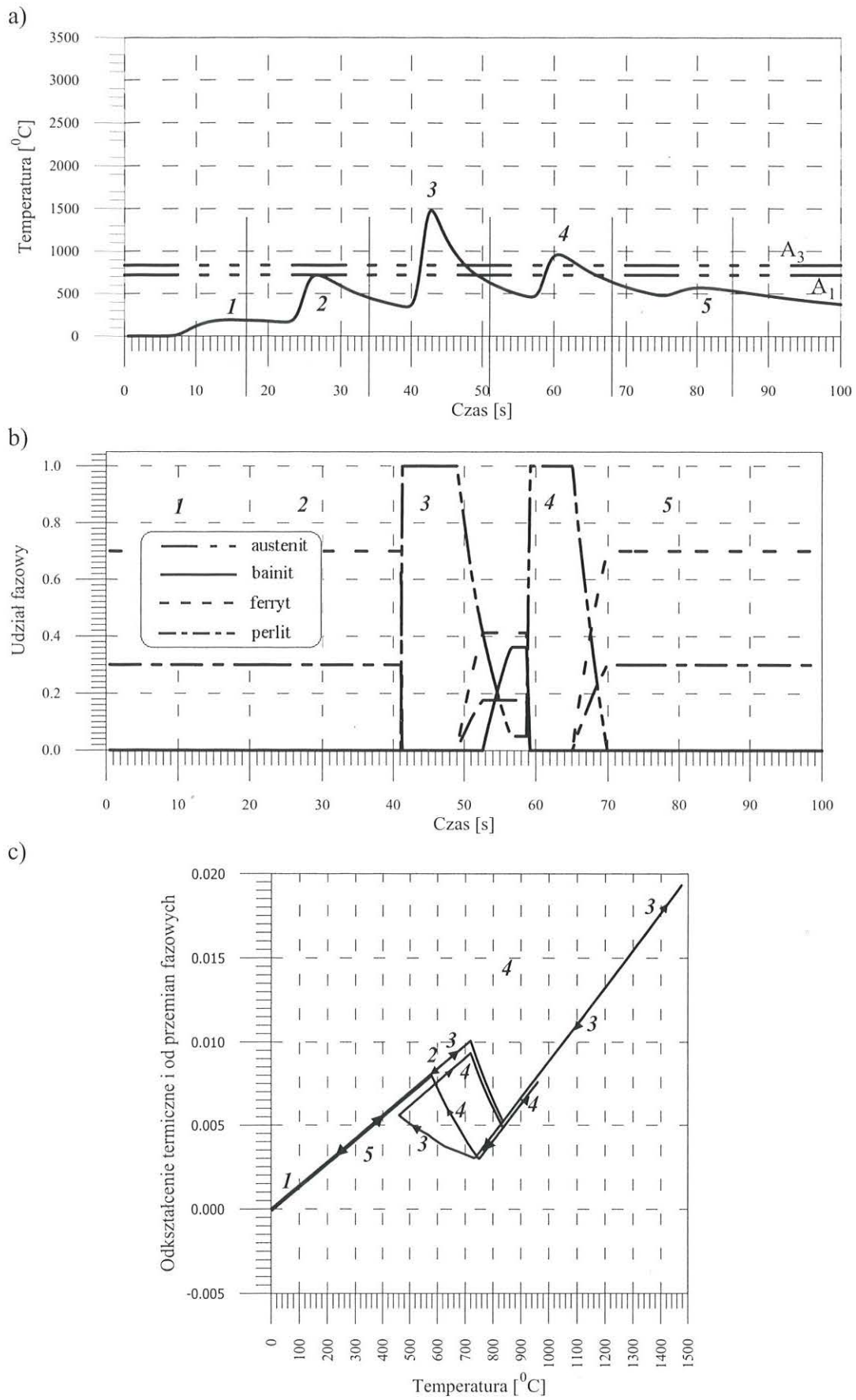


Rysunek 12. Cykl cieplny (a), zmiany udziałów fazowych (b) oraz odkształcenia termiczne i od przemian fazowych w punkcie o współrzędnych $y = 0.046$ [m], $z = 0.097$ [m]



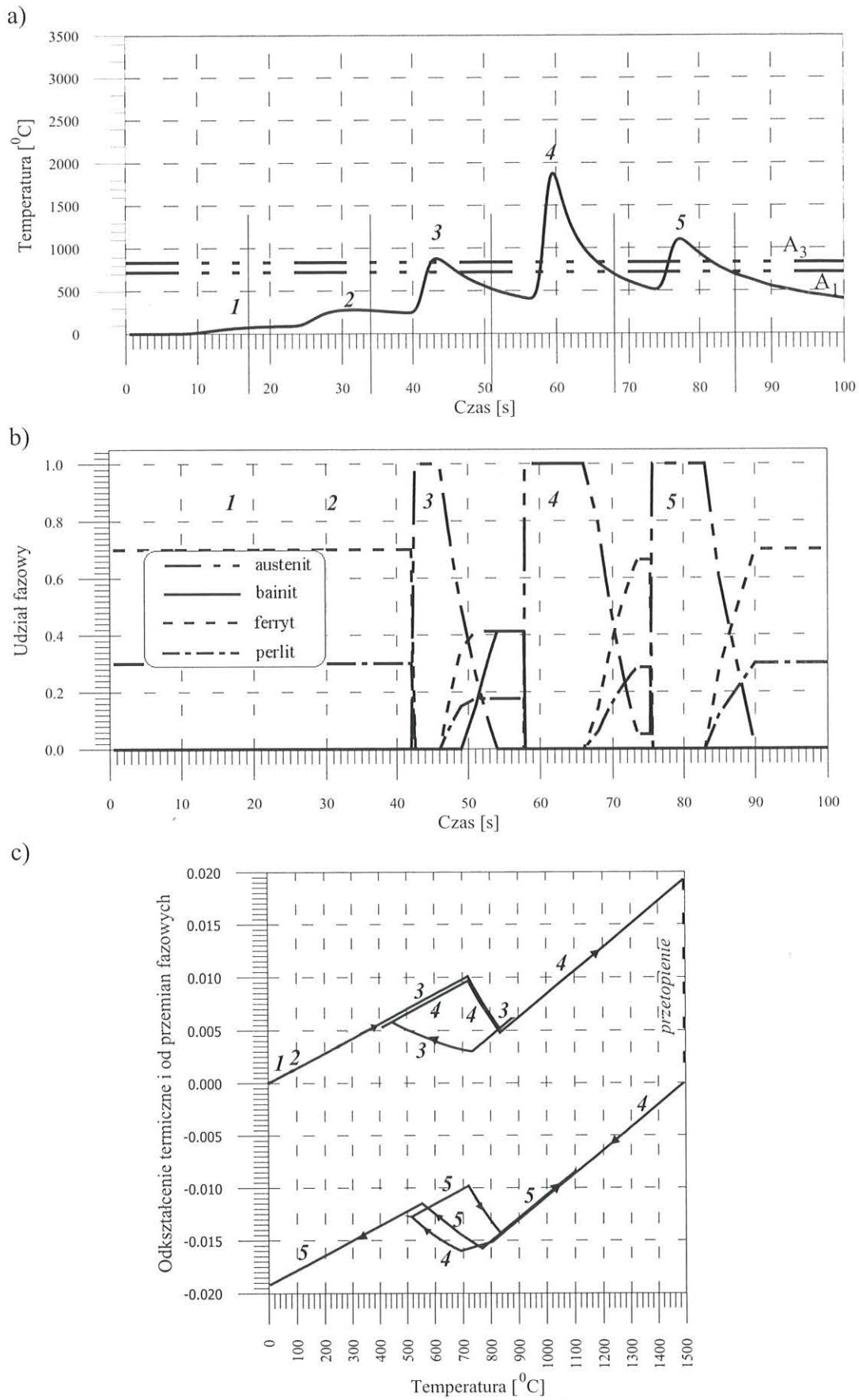


Rysunek 13. Cykl cieplny (a), zmiany udziałów fazowych (b) oraz odkształcenia termiczne i od przemian fazowych (c) w punkcie o współrzędnych $y = 0.03$ [m], $z = 0.093$ [m]

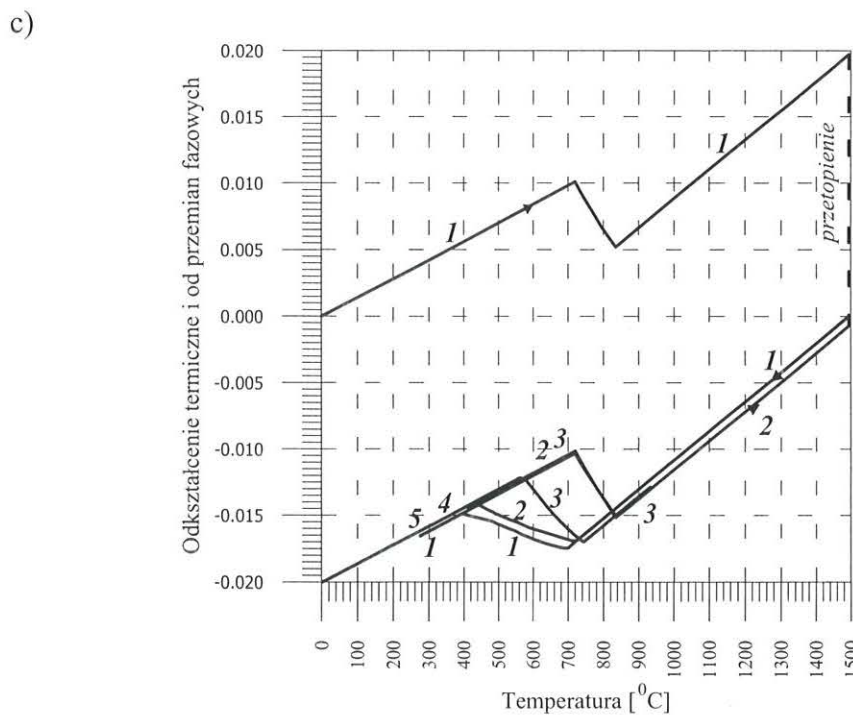
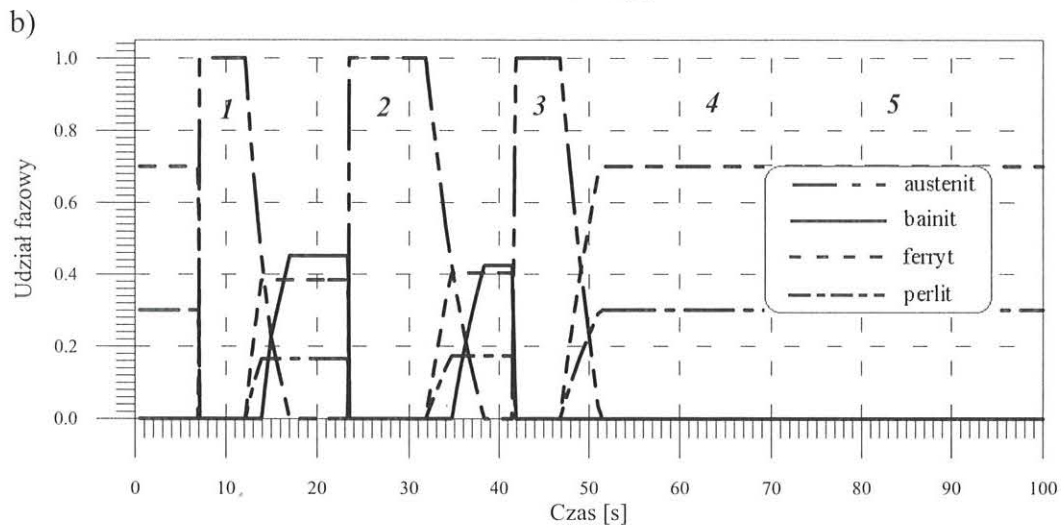
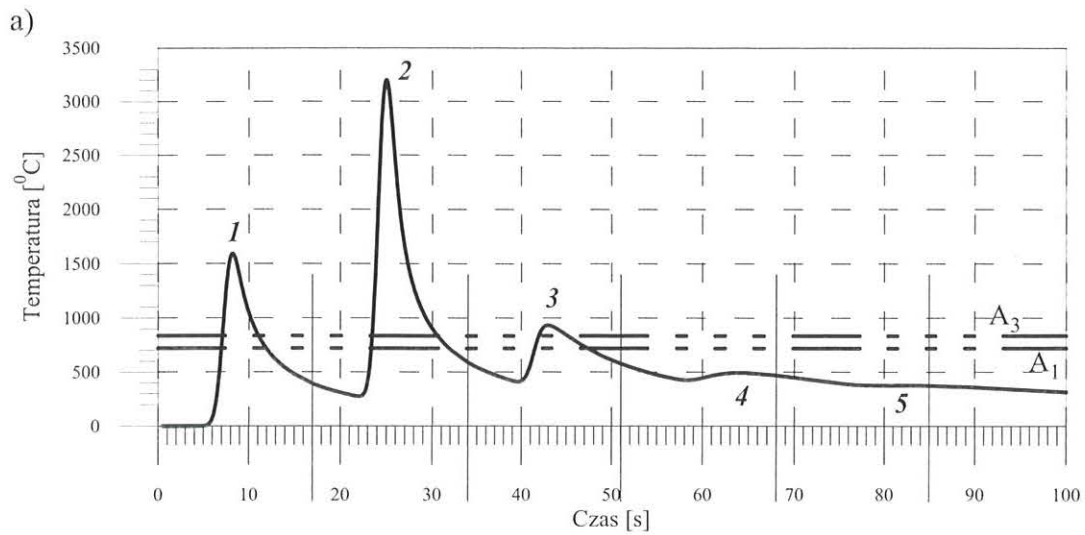


Rysunek 14. Cykl cieplny (a), zmiany udziałów fazowych (b) oraz odkształcenia termiczne i od przemian fazowych (c) w punkcie o współrzędnych $y = 0.03$ [m], $z = 0.095$ [m]





Rysunek 15. Cykl cieplny (a), zmiany udziałów fazowych (b) oraz odkształcenia termiczne i od przemian fazowych (c) w punkcie o współrzędnych $y = 0.038 [m]$, $z = 0.096 [m]$



Rysunek 16. Cykl cieplny (a), zmiany udziałów fazowych (b) oraz odkształcenia termiczne i od przemian fazowych (c) w punkcie o współrzędnych $y = 0.02$ [m], $z = 0.0995$ [m]



go przekroju (rysunek 3) w połowie długości regenerowanego obszaru przedstawiono na rysunkach 11 - 16.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono cykle cieplne i zmiany udziałów fazowych w punktach z obszarów napoin pierwszej i piątej, gdzie w obu przypadkach dochodziło dwukrotnie do pełnej przemiany fazowej przy jednokrotnym pełnym przetopieniu materiału. W punkcie o współrzędnych $y = 0,014$ [m], $z = 0,098$ [m] (rysunek 11), po nałożeniu pierwszej napoiny powstała struktura ferrytyczno-perlityczno-bainityczna. Podczas nakładania drugiej napoiny struktura ta uległa podczas nagrzewania przemianie w austenit, a podczas chłodzenia ponownie w ferryt, perlit i bainit. Natomiast w punkcie o współrzędnych $y = 0,046$ [m], $z = 0,097$ [m] (rysunek 12), powtórnie powstały austenit ulega przemianie tylko w ferryt i perlit.

Przemiana pełna (podczas nakładania trzeciej napoiny), a następnie niepełna (podczas nakładania czwartej napoiny) zachodzi w punkcie o współrzędnych $y = 0,03$ [m], $z = 0,093$ [m] (rysunek 13). Pozostały po pierwszym cyklu przemian ponad 40-procentowy udział objętościowy bainitu, w kolejnym cyklu ulega redukcji do ok. 18% (część bainitu podczas kolejnego nagrzewania przemienia się w austenit, który z kolei podczas chłodzenia ulega przemianie w ferryt i perlit).

W punkcie o współrzędnych $y = 0,03$ [m], $z = 0,095$ [m] (rysunek 14), podobnie jak w poprzednio omawianym przypadku nie dochodzi do przetopienia materiału, ale dwukrotnie zachodzi pełna przemiana austenityczna. Za pierwszym razem (podczas stygnięcia trzeciej napoiny) powstała mieszanina ferrytu, perlitu i bainitu. Podczas ponownego cyklu cieplnego austenit ulega przemianie tylko w ferryt i perlit.

Historię zmian temperatury i przemian fazowych w punkcie o współrzędnych $y = 0,038$ [m], $z = 0,096$ [m] (z czwartej napoiny) przedstawiono na rysunku 15. W punkcie tym trzykrotnie materiał nagrzewa się powyżej temperatury austenitacji. Jednak tylko za pierwszym razem podczas chłodzenia powstaje bainit (ponad 40% udziału objętościowego), w pozostałych dwóch przypadkach strukturą chłodzenia jest mieszanina ferrytu i perlitu.

W punktach o współrzędnych $y = 0,02$ [m], $z = 0,0995$ [m], na styku pierwszej i drugiej napoiny (rysunek 16) materiał trzykrotnie podczas doznaje pełnej przemiany fazowej w austenit. Przy czym po dwóch pierwszych przypadkach podczas chłodzenia tenże austenit przemienia się w ferryt, perlit i bainit, natomiast w trzecim tylko w ferryt i perlit.

5. WNIOSKI

Prezentowany w pracy model pozwala na obliczenie pola temperatury i udziałów fazowych w wielo-

krotnie napawanych elementach stalowych i staliwnych, co umożliwia:

- wyznaczenie strefy wpływu ciepła (SWC), w tym obszarów pełnej i niepełnej przemiany fazowej, a także strefy przetopienia,
- prześledzenie cykli cieplnych, zmian udziałów fazowych oraz odkształceń wywołanych zmianą temperatury i przemianami fazowymi,
- prognozowanie zmian niektórych własności w napawanym materiale, wielkości zakładek oraz składu strukturalnego w SWC.

LITERATURA

- Brózda, J., Pilarczyk, J., Zeman, M., 1983, *Spawalnicze wykresy przemian austenitu CTPc-S*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- Cerjak, H., Easterling, K.E., ed., 1993, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, The Institute of Materials, London.
- Christensen, N., Davies, V.L., Gjermundsen, K., 1965, *Distribution of Temperatures in Arc Welding*, British Welding Journal, 2, 54-75.
- Fernandes, F.M.B., Denis, S., Simon, A., 1985, Mathematical Model Coupling Phase Transformation and Temperature Evolution During Quenching of Steels, *Mat. Sci. Techn.*, 1, 838-844.
- Geissler, E., Bergmann, H.W., 1988, 3D Temperature Fields in Laser Transformation Hardening, Part I: Quasi-Stationary Fields, *Optoelektronik Magazin*, 4, 396-403
- Giang, N.K., Lesiński, K.J., 1989, Obliczanie pola temperatur spoin, *Przegląd Spawalnictwa*, 4, 5-7.
- Hougardy, H.P., 1987, Calculation of the Transformation of Steels on Continuous Cooling, *Metalurgia i Odlewnictwo*, 13, 407-439
- Jeong, S.K., Cho, H.S., 1997, An analytical Solution to Predict the Transient Temperature Distribution in Fillet Arc Welds, *Welding Journal*, 6, 223-232.
- Klimpel, A., Dziubiński, J., 1973, Technologia i urządzenia do napawania czopów zestawów kołowych pod łożyska toczne, *Przegląd Spawalnictwa* 11-12, 259-261.
- Klimpel, A., Luksa K., Smajda J., 1976, Regeneracja przez napawanie czopów walców ze staliwa grafityzowanego, *Przegląd Spawalnictwa*, 6, 130-133.
- Klimpel, A., Dziubiński, J., 1983, *Technologia napawania*, Politechnika Śląska, skrypt uczelniany nr 1144, Gliwice.
- Klimpel, A., 2000, *Napawanie i natryskiwanie cieplne - technologie*, WN-T, Warszawa.
- Komandurí, R., Hou, Z.B., 2000, Thermal Analysis of the Arc Welding Process: Part I. General Solutions, *Metall. Mater. Trans. B*, 31B, 1353-1370.
- Maier, C., Schaff, P., Gonser, U., 1992, Calculation of the Temperature Profile for Laser Treatment of Metallic Samples, *Materials Science and Engineering*, A 150, 271-280
- Murugan, S., Kumar, V.R., Raj, B., Bose, M.S.C., 1998, Temperature Distribution during Multipass Welding of Plates, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75, 891-905
- Myśliwiec, M., 1970, *Cieplno-mechaniczne podstawy spawalnictwa*, WN-T, Warszawa.
- Nguyen, N. T., Matsuoka, K., Suzuki, N., Maeda, Y., 1999, Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi-Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Sources, *Welding Journal*, 8, 265-274.

- Parkitny, R., Winczek, J., 1997, Modelowanie przemian fazowych w spawanych elementach stalowych, *Mat. Konferencyjne XXXVI Sympozjonu "Modelowanie w mechanice"*, Gliwice, 281-286.
- Parkitny, R., Winczek, J., 1999, Modelowanie przemian fazowych wielokrotnego napawania, *XXXVIII Sympozjon PTMTS "Modelowanie w mechanice"*, ZN Katedry Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska, Gliwice 1999, 219-224.
- Parkitny, R., Winczek, J., Jabreen, H., Thiab, S.M., 1993, Pola temperatur w elementach stalowych poddanych działaniu ciągłego i impulsowego laserowego źródła ciepła. *II Ogólnopolska Konferencja Naukowa "Obróbka powierzchniowa"*, Kule 13-15.10.1993, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 129 - 133.
- Pilarczyk, J., Pilarczyk, J., 1996, *Spawanie i napawanie elektryczne metali*, Śląsk, Katowice.
- Ravi Vishnu P., Li W.B., Easterling K.E., 1991, Heat-Flow Model for Pulsed Welding, *Mat. Sci. Techn.*, 7, 649-659.
- Reed, R.C., Bhadeshia, H.K.D., 1994, A Simple Model for Multipass Steel Welds, *Acta Metallurgica Materialia*, 42, 3663-3678.
- Rhode, J., Jeppson, A., 2000, Literature Review of Heat Treatment Simulations with Respect to Phase Transformation, Residual Stresses and Distortion, *Scand. J. Metall.*, 29, 47-62.
- Rosenthal, D., 1941, Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting, *Welding Journal*, 5, 220s-234s.
- Rosenthal, D., 1946, The Theory of Moving Sources of Heat and Applications to Metal Treatments, *Trans. ASME*, 11, 849-866.
- Rykalin, N.N., 1947, *Tieplovyje osnovy svarki*, Moskva.
- Rykalin, N.N., 1951, *Raszcioty tiepłowych processow pri svarkie*, Moskwa, Maszgiz.
- Rykalin, N.N., 1971, Welding Arc Heat Flow, *Welding in the World*, 4, 112-133.
- Szendzielorz, N., red., 1994, *Łukowe spawanie i napawanie stali, staliwa i żeliwa*, praca zbiorowa, Instytut Spawalnictwa, Gliwice.
- Tsai, N.S., Eagar, T.W., 1983, Temperature Fields Produced by Travelling Distributed Heat Sources, *Welding Journal*, 2, 346-355.
- Winczek, J., 1993, *Analiza stanów sprężysto-plastycznych prętów wzdłużnie spawanych, poddanych zmiennym obciążeniom*, praca doktorska, Politechnika Częstochowska.
- Winczek, J., 1998, Pola temperatury wielokrotnego napawania elementów prostopadłościennych, W: *Konferencja Naukowo-Techniczna "Nowe materiały - nowe technologie materiałowe w przemyśle okrętowym i maszynowym"*, Szczecin, Świnoujście.

Artykuł otrzymano 26 maja 2003 r.