Nr 5 ISSN 1509-5878 5/2012
AUTOBUSY
Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe

Grzegorz CHOMKA

ODDZIAŁYWANIE TERMICZNE STRUGI WODNO-LODOWEJ PODCZAS USUWANIA POWŁOK LAKIERNICZYCH

Streszczenie

W artykule omówiono oddziaływanie termiczne, jakie wywiera wysokociśnieniowa struga wodno-lodowa na powłokę lakierniczą oraz materiał podłoża. Rozpatrzono kierunek rozchodzenia się ciepła zgodny z posuwem strugi oraz występujący w głąb materiału.

Słowa kluczowe: struga wodno-lodowa, powłoka lakiernicza, temperatura, współczynnik wyrównywania temperatury

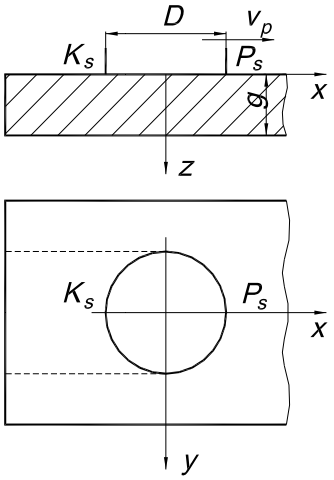
WSTĘP

Usuwanie warstw wierzchnich wysokociśnieniową strugą wodną i wodno-lodową jest zdecydowanie bardziej proekologiczne niż tradycyjne metody obróbki np. szczotkowanie czy piaskowanie. Ze względu na dostępność i stosunkowo proste metody przechowywania najczęściej do kreowania strugi wodno-lodowej jak również powietrzno-lodowej używa się zestalonego dwutlenku węgla o temperaturze sublimacji. Zastosowanie suchego lodu CO_2 zwiększa sprawność obróbki wysokociśnieniową strugą wodną, a po czyszczeniu cząstki lodu znikają sublimując do atmosfery.

1. TEORETYCZNA ANALIZA ZAGADNIENIA

Ważnym elementem analiz termodynamicznych, podczas rozpatrywania możliwości obróbki strugą wodno-lodową, jest oddziaływanie strugi na materiał obrabiany. Gdy struga wodno-lodowa ma temperaturę niższą od temperatury początkowej materiału, to w wyniku wymiany ciepła następuje ochłodzenie powierzchni obrabianej. Takie zmiany temperatury materiału zachodzą zarówno w kierunku przemieszczania się strugi (oś x) jak i w głąb materiału, czyli wzdłuż osi z (rys. 1).

Aby określić zmiany temperatury zachodzące w materiale założono, że znane są: posuw v_p oraz średnica strugi wodno-lodowej D o początku w punkcie P_s i końcu w punkcie K_s, a także grubość obrabianego materiału g i jego współczynnik wyrównywania temperatury *a*.



Rys. 1. Wymiary stosowane w modelu rozchodzenia ciepła podczas obróbki strugą wodno-lodową
Źródło: Opracowanie własne.

1.1. Rozkład temperatur w kierunku osi z

Dla teoretycznego określenia rozkładu temperatur, wzdłuż osi z, w obrabianym materiale, posłużono się modelem matematycznym stosowanym przy rozwiązywaniu zagadnień przewodzenia ciepła [1, 2]. W analizie przyjęto założenia, że materiał poddany obróbce jest ciałem jednorodnym o temperaturze początkowej równej zeru, zaś jego powierzchnia w chwili zetknięcia ze strugą wodno-lodową osiąga temperaturę równą T_1, czyli temperaturę jaką osiąga woda podczas kontaktu strugi z powierzchnią. Wówczas równanie opisujące ten przypadek wymiany ciepła przybiera postać [1, 2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{1}$$

a warunki graniczne i początkowe można zapisać jako:

$$T_m = 0 \qquad \text{w chwili} \qquad t = 0 \tag{2}$$

przy

$$z = 0 \qquad T = T_1 \qquad \text{przy} \quad t > 0 \tag{3}$$

Stosując przekształcenie Fouriera [85] otrzymuje się równanie:

$$\frac{dT_s}{dt} + a\omega^2 T_s = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot a\omega T_1 \tag{4}$$

z warunkiem początkowym $T_s = 0°C$, gdy t = 0, które po zastosowaniu przekształcenia odwrotnego prowadzi do równania rozkładu temperatury:

$$T = \frac{2T_1}{\pi}\int_0^{\infty}(1 - e^{-a\omega^2 t}) \cdot \sin(\omega z)\frac{d\omega}{\omega} \tag{5}$$

a po dalszych przekształceniach prowadzi do wyniku:

$$T = T_1 erfc\frac{z}{2\sqrt{at}} \tag{6}$$

gdzie:

$T_1 = T_{kw}$ – temperatura strugi wodnej,
a – współczynnik wyrównywania temperatury,
t – współrzędna czasowa,
z – odległość od źródła ciepła w głąb materiału.

W praktyce najczęściej temperatura materiału T_m jest większa od zera, a jednocześnie również większa od padającej na nią strugi wodno-lodowej. W takim przypadku równanie (6), po nieodzownych przekształceniach, przybiera formę:

$$T = (T_{kw} - T_m) erfc \frac{z}{2\sqrt{at}} + T_m \tag{7}$$

1.2. Rozkład temperatur w kierunku osi x

Do teoretycznego określenia rozkładu temperatur w obrabianym materiale, w kierunku przemieszczania się strugi, czyli zgodnie z kierunkiem osi x posłużono się modelem nieustalonego przewodzenia ciepła w warunkach poruszającego się zewnętrznego źródła tej energii [1, 2]. Zgodnie z analizą Rosenthala opartą na spostrzeżeniu, że jeśli wymiary ciała są dostatecznie duże, to zachodzi w nim stan quasi-ustalony, można stwierdzić, że dla obserwatora poruszającego się ze źródłem ciepła ciało znajduje się w stanie ustalonym. W układzie trójwymiarowym równanie przewodnictwa ciepła wyraża zależność:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{8}$$

Jeśli przyjąć, że źródło ciepła porusza się w kierunku osi x ze stałą prędkością v_p, to można wprowadzić nowy układ współrzędnych o początku umieszczonym w punkcie, w którym znajduje się źródło. Osie tego nowego układu są równoległe do osi układu x, y, z, z tym że porusza się on w kierunku osi x z prędkością v_p i dlatego współrzędną x w nowym układzie zastępuje się przez ξ, a pozostałe współrzędne pozostają bez zmian.

Przechodząc z układu x, y, z, trzeba dokonać przekształcenia współrzędnych. Zależność między x a ξ jest następująca:

$$\xi = x - v_p t \tag{9}$$

z której wynika, że

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = 1 \qquad \text{oraz} \qquad \frac{\partial \xi}{\partial t} = -v_p \tag{10}$$

Oznaczając przez t' czas w nowym układzie współrzędnych, przyjmuje się

$$t = t' \tag{11}$$

a więc

$$\frac{\partial t}{\partial t'} = 1 \tag{12}$$

Zgodnie z założeniem pochodna $\frac{\partial T}{\partial t'} = 0$, gdyż odnosi się ona do nowego układu współrzędnych, w którym rozkład temperatury jest ustalony w czasie. Równanie przewodnictwa opisujące stan quasi-ustalony po przekształceniach przyjmuje ostateczną postać:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{v_p}{a}\frac{\partial T}{\partial \xi} \tag{13}$$

W przypadku strugi wodno-lodowej istotną sprawą jest poznanie rozkładu temperatury, jaki powstaje w materiale przed strugą, która porusza się z określoną prędkością. Należy jednak rozważyć dwa przypadki. W pierwszym z nich temperatura strugi wodno-lodowej jest wyższa od temperatury obrabianego materiału, dla którego wynosi $T_m = 0°C$, natomiast w przypadku drugim obrabiany materiał ma temperaturę różną od zera ($T_m \neq 0°C$). Znając średnicę strugi D, jaką styka się ona z materiałem poddanym obróbce, można przyjąć, że stanowi ona przesuwające się płaskie źródło ciepła o wydajności q_F, ograniczone jej powierzchnią.

W takim układzie równanie opisujące rozkład temperatury przed strugą oraz w obrębie jej działania można wyprowadzić na podstawie zależności opisanej wzorem (13) [2]. Powyższe równanie upraszcza się do równania różniczkowego zwyczajnego:

$$\frac{d^2T}{d\xi^2} + \frac{v_p}{a}\frac{dT}{d\xi} = 0 \tag{14}$$

gdyż rozpatrywane zagadnienie staje się jednowymiarowe. Dla przypadku pierwszego warunki graniczne są następujące:

$$\text{przy} \quad \xi \to \pm\infty \qquad \frac{dT}{d\xi} = 0 \qquad \text{oraz} \quad T = 0 \tag{15}$$

$$\text{przy} \quad \xi = 0 \qquad -\lambda\frac{dT}{d\xi} = q_F \tag{16}$$

Rozwiązanie ogólne równania (14) ma postać:

$$T = Ae^{\frac{-v_p}{a}\xi} + B \tag{17}$$

z którego wynika, że:

$$\frac{dT}{d\xi} = -A\frac{v_p}{a}e^{\frac{-v_p}{a}\xi} \tag{18}$$

Dalsze rozważania należy przeprowadzić w obszarze $\xi < 0$ oraz w obszarze $\xi > 0$. Zgodnie z otrzymanymi wynikami rozkład temperatury opisany jest następującymi równaniami:

$$\text{przy } \xi < 0 \qquad T_{\xi<0} = \frac{q_F}{\xi c v_p} = T_{max} \tag{19}$$

$$\text{przy } \xi > 0 \qquad T_{\xi>0} = \frac{q_F}{\xi c v_p}e^{\frac{-v_p}{a}\xi} = T_{max}e^{\frac{-v_p}{a}\xi} \tag{20}$$

gdzie:

$T_{max} = T_{kw}$ – temperatura powierzchni, przez którą przesuwa się źródło energii.

Jeśli temperatura obrabianego materiału będzie różna od zera, to w takim przypadku rozkład temperatury opisany zostanie następującymi równaniami:
przy $\xi < 0$ otrzymuje się wzór identyczny z zależnością (19), a

$$\text{przy } \xi > 0 \qquad T_{\xi>0} = \left(\frac{q_F}{\xi c v_p} - T_m\right)e^{\frac{-v_p}{a}\xi} + T_m = (T_{max} - T_m)e^{\frac{-v_p}{a}\xi} + T_m \tag{21}$$

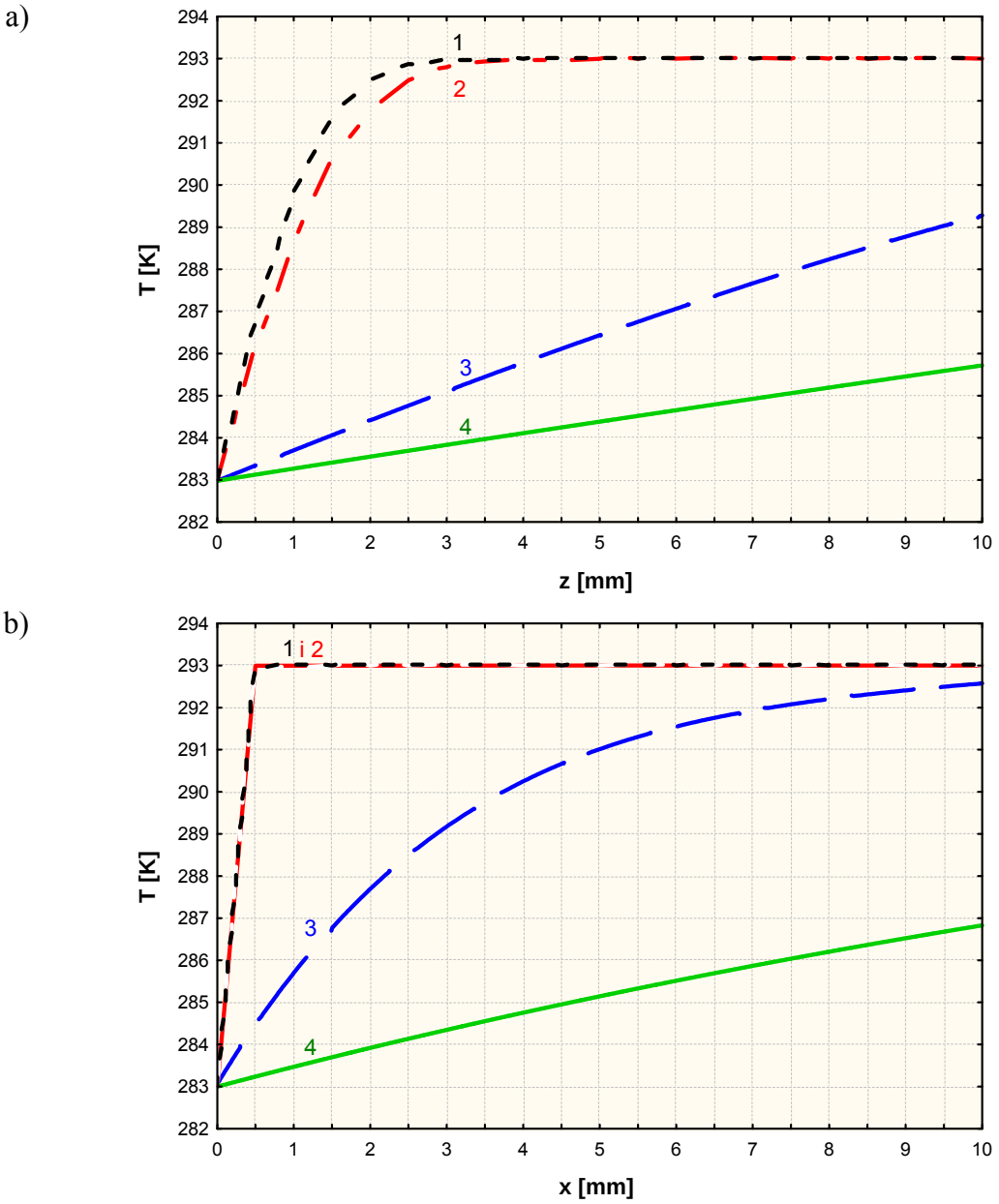
2. OBLICZENIA MODELOWE

2.1. Analiza rozkładu temperatur

Przykładowe rozkłady temperatury, wzdłuż osi x i z, dla różnego typu materiałów przedstawiono na rys. 2a i b. Temperatura materiału jest równa $T_m = 293$ K, a struga wody, o średnicy D = 20 mm poruszająca się z prędkością $v_p = 4$ mm/s przyjmuje temperaturę $T_{kw} = 283$ K.

Dla wszystkich rodzajów zastosowanych materiałów po wstępnym spadku temperatury, do wartości jaką posiada struga wodno-lodowa, następuje jej wzrost do temperatury początkowej materiału. Prędkość zmian temperatury jest uzależniona od wartości współczynnika wyrównywania temperatury. Dla powłok lakierniczych i plexiglassu, posiadających niemal identyczną wartość współczynnika wyrównywania temperatury, oddziaływanie strugi wodno-

lodowej powoduje spadek temperatury utrzymujący się bezpośrednio przy czole strugi. W przypadku próbek stalowych występuje wolniejszy wzrost temperatury niż obserwowany dla powłok lakierniczych i plexiglassu. Jest to spowodowane ponad 100 krotnie większym współczynnikiem wyrównywania temperatury dla stali. Najmniejszy wzrost temperatury obserwuje się dla stopu PA2 odznaczającego się największym (o ponad 750 razy w porównaniu do powłok lakierniczych i plexiglassu) współczynnikiem wyrównywania temperatury.



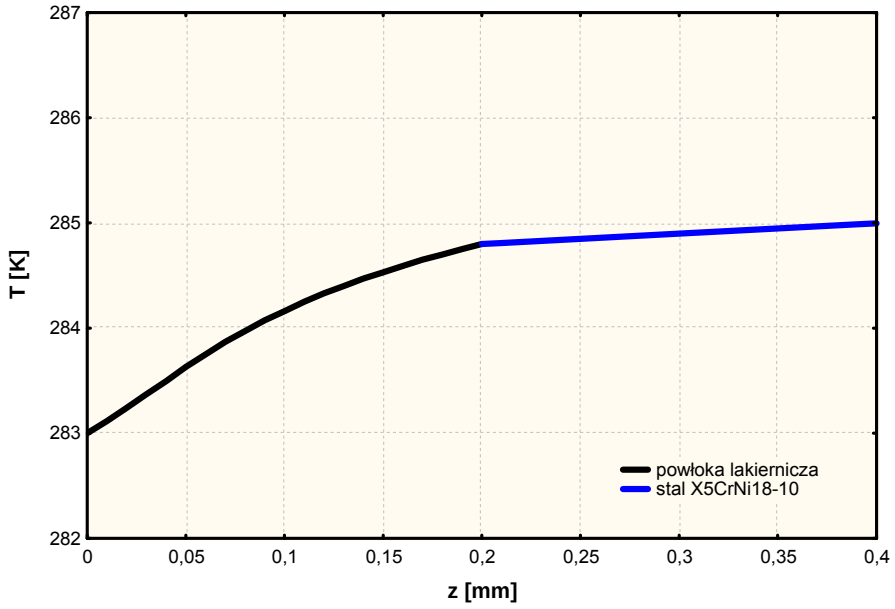
Rys. 2. Rozkład temperatury otrzymany w wyniku oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej o temperaturze T_{kw} = 283 K i posuwie v_p = 4 mm/s na materiał obrabiany o temperaturze początkowej T_m = 293 K wzdłuż osi: a – x, b – z, gdzie: 1 – powłoka lakiernicza, 2 – plexiglass, 3 – stal X5CrNi18-10, 4 – stop aluminium PA2

Źródło: Opracowanie własne.

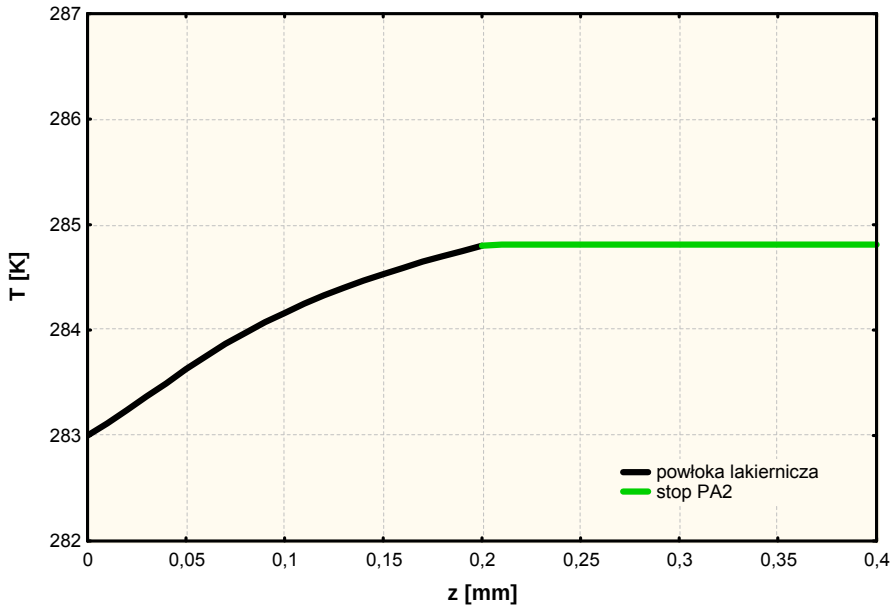
Ustalono, że przy wskazanych powyżej warunkach obróbki większy gradient temperatury występuje wzdłuż osi poziomej x wyznaczającej ruch strugi wodno-lodowej, a mniejszy pod powierzchnią oddziaływania strugi (oś z) ze względu na dłuższy czas jej oddziaływania.

Ze względu na zróżnicowane wartości współczynnika wyrównywania temperatury dla powłoki lakierniczej i stosowanych materiałów podłoża, na ich granicy może wystąpić dostatecznie duży gradient temperatury powodujący złuszczanie warstw lakieru w wyniku powstających termonaprężeń. Rozkład temperatury (wzdłuż osi z) w powłoce lakierniczej o grubości g_l = 0,2 mm i materiale podłoża, na który została ona naniesiona, występujący w wyniku oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej, o identycznych parametrach jak stosowano powyżej, przedstawiono na rys. 3a i b.

a)



b)



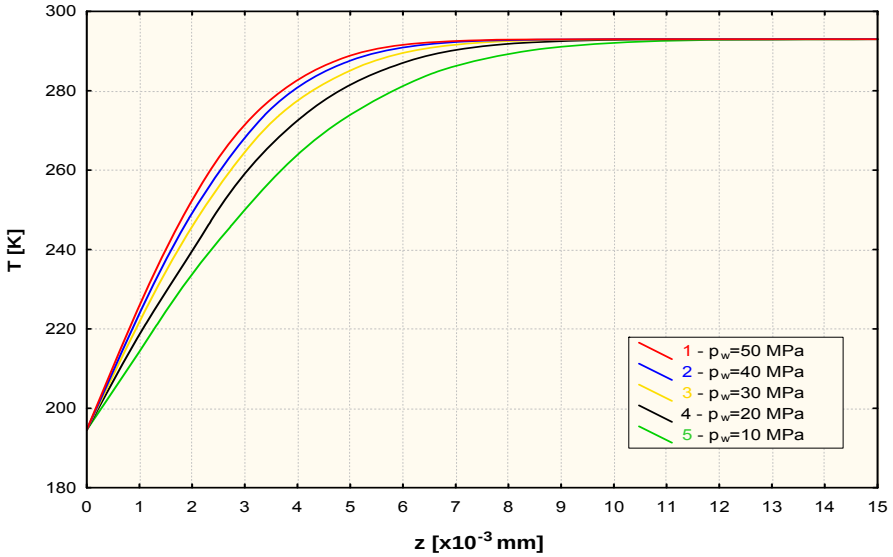
Rys. 3. Rozkłady temperatury wzdłuż osi z otrzymane w wyniku oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej o temperaturze T_{kw} = 283 K i posuwie v_p = 4 mm/s na powierzchnię powłoki lakierniczej o grubości 0,2 mm i leżący pod nią materiał podłoża

Źródło: Opracowanie własne.

Stwierdzono, że w kierunku osi z najniższą temperaturę osiąga warstwa wierzchnia powłoki lakierniczej. W miarę zwiększania głębokości pod tą warstwą następuje przyrost temperatury. Jest on największy dla powłoki lakierniczej, charakteryzującej się najmniejszym współczynnikiem wyrównywania temperatury. Dla materiału podłoża wzrost temperatury jest zdecydowanie mniejszy.

Oddziaływanie termiczne wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej na materiał obrabiany to nie tylko obniżanie temperatury warstw wierzchnich przez padającą na nie strugę ochłodzonej wody, lecz przede wszystkim ich krótkotrwały kontakt z cząstkami suchego lodu CO_2. Temperatura cząstek CO_2 podczas kontaktu ze strugą wodną wzrasta maksymalnie do temperatury sublimacji. Zatem w obszarze obróbki cząstki lodu zderzające się z wierzchnią warstwą lakieru lokalnie obniżają jej temperaturę, sięgając w głąb materiału zgodnie z zależnością (9.7). Przy czym w tym przypadku $T_{kw} = T_L$ (gdzie T_L – temperatura cząstek CO_2).

Przykładowy rozkład temperatury otrzymany w wyniku oddziaływania cząstki suchego lodu CO_2 na powłokę lakierniczą, zgodnie z kierunkiem osi z, dla kilku wartości ciśnienia strugi wodnej zaprezentowano na rys. 4. Zmiany temperatury sięgają na bardzo małą głębokość (około 12 µm). Maksymalny gradient temperatury występuje przy najwyższym ciśnieniu strugi wodnej (p_w = 50 MPa). Przy tej wartości ciśnienia strugi wodnej na głębokości około 7 µm pod powierzchnią zewnętrzną lakieru następuje wyrównanie jej temperatury do temperatury początkowej. Przy najniższym ciśnieniu strugi wodnej (p_w = 10 MPa) uzyskuje się nieco mniejszy gradient temperatury, a temperatura powłoki lakierniczej utrzymuje się na niezmienionym poziomie w odległości około 12 µm od zewnętrznej powierzchni lakieru.



Rys. 4. Rozkład temperatury wzdłuż osi z otrzymany w wyniku oddziaływania cząstki suchego lodu o temperaturze T_L = 194,6 K na powłokę lakierniczą o temperaturze początkowej T_m = 293 K

Źródło: Opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

Rozkłady temperatur wzdłuż osi x i z zależą od wartości współczynnika wyrównywania temperatury, temperatury wysokociśnieniowej strugi wodno-lodowej, temperatury początkowej, a także od prędkości posuwowej strugi.

Ze względu na zróżnicowane wartości współczynnika wyrównywania temperatury dla powłoki lakierniczej i stosowanych materiałów podłoża, na ich granicy występuje dość duży gradient temperatury, który może powodować złuszczanie warstw lakieru w wyniku powstających termonaprężeń.

Oddziaływanie termiczne cząstek suchego lodu CO_2 sięga na bardzo małą głębokość (około 12 µm) od zewnętrznej powierzchni lakieru.

BIBLIOGRAFIA

1. Madejski J., *Teoria wymiany ciepła.* Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1998.
2. Staniszewski B., *Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne.* PWN, Warszawa 1980.

THERMAL IMPACT OF THE WATER-ICE JET DURING THE REMOVAL OF VARNISH COATS

Abstract

The article covers a thermal impact of a high-pressure water-ice jet on the varnish coat and the base material. The direction was considered of the propagation of heat that is compliant with the jet feed and the one that occurs inside the material.

Key words: water-ice jet, varnish coat, temperature, temperature alignment coefficient.

Autor:
dr inż. **Grzegorz Chomka** – Politechnika Koszalińska