

Analiza numeryczna mechanizmu wiązania proszku cyny z powierzchnią tworzywa sztucznego w procesie natryskiwania na zimno

Numerical simulation of tin powder spraying onto ABS substrate plastic in the Cold Spray method

Streszczenie

W procesie nanoszenia powłok metodą Cold Spray cząsteczki są przyspieszane do dużych prędkości za pomocą rozgrzanego i sprężonego gazu, a po uderzeniu w podłoże osadzają się wskutek deformacji plastycznej. Ze względu na niską temperaturę występującą w tej metodzie wydaje się ona odpowiednia do metalizacji tworzyw sztucznych. W artykule zawarto analizę literaturową z zakresu metalizacji tworzyw sztucznych. Przedstawiono wyniki symulacji numerycznej MES nanoszenia proszku cyny na podłoże z tworzywa ABS. Analizie zostały poddane pola temperatury podczas procesu nanoszenia. Otrzymane wyniki zweryfikowano w oparciu o zdjęcia z mikroskopu skaningowego.

Abstract

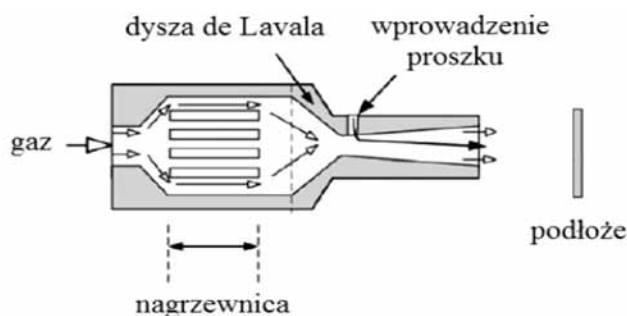
In Cold Spray process particles are accelerated to high speed by heated and compressed gas, and after impact deposited on the substrate as a result of plastic deformation. Due to the low temperatures during the process the Cold Spray method seems to be appropriate to the metallization of plastics. The article includes analysis of the literature of plastics metallization. The results of numerical simulation of tin powder spraying onto ABS substrate plastic are presented. The temperature fields during the spraying process are analyzed. The obtained results are verified on the basis of scanning microscope images.

Wstęp

Metoda natryskiwania na zimno (*Cold Spray*) wynaleziona w latach 80 ub.w. w Rosji należy do najnowszej generacji metod natryskiwania cieplnego. Istota jej działania opiera się na przyspieszeniu nanoszonego proszku w strumieniu sprężonego i podgrzanego gazu do prędkości naddźwiękowych przy zastosowaniu zbieżno-rozbieżnej dyszy de Laval'a. W zależności od stosowanego ciśnienia gazu wyróżnia się dwie odmiany natryskiwania na zimno: nisko- i wysokociśnieniową.

Mgr inż. Aleksandra Małachowska, mgr inż. Marcin Winnicki, dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, prof. PWR – Politechnika Wroclawska.

W przypadku metody niskociśnieniowej gazem roboczym jest najczęściej powietrze o ciśnieniu do 1 MPa, a nagrzewnica umieszczona jest w palniku. Proszek wprowadzany jest radialnie tuż za przewężeniem (rys. 1).



Rys. 1. Schemat metody niskociśnieniowego natryskiwania na zimno [1]
Fig. 1. Scheme of Low Pressure Cold Spray method [1]

Umożliwia to uzyskanie prędkości do 700 m/s, co pozwala na przenoszenie proszków metali ciągliwych: Cu, Al, Ni, Zn i Sn [1, 2].

W przypadku metody wysokociśnieniowej możliwe jest osiągnięcie prędkości nawet do 1200 m/s i tym samym poszerzenie zakresu наносzonych proszków m.in. o proszki Ti, Si, Ta, Ag, WC, HA, jak również zwiększenie wydajności наносzenia. Zwiększenie prędkości osiąga się przez zastosowanie jako gazu roboczego lub bądź helu o ciśnieniu powyżej 1 MPa i nagrzewnicy o większej mocy stanowiącej osobny element [2, 3]. Połączenie w metodzie Cold Spray w przypadku metali powstaje wskutek odkształcenia mechanicznego materiału podłoża i cząstki. Podczas uderzenia cząstki o wysokiej energii kinetycznej dochodzi do wzrostu temperatury w miejscu styku z podłożem i tym samym zmiękczenia materiału ułatwiającego jego plastyczne odkształcenie. Pojawia się adiabatyczne ścinanie i w rezultacie przepływ uplastycznionego materiału, wraz z którym usuwana jest otoczka tlenków znajdujących się na podłożu i na cząsteczce, co umożliwia połączenie czystych materiałów [3]. Prędkość, przy której cząsteczki mają dostateczną energię kinetyczną, by doszło do osadzenia 50% natryskwanego materiału, określana jest jako prędkość krytyczna [3]. Zależy ona od właściwości natryskwanego materiału, a także rodzaju podłoża. Wraz ze wzrostem prędkości wzrasta też ilość osadzonego materiału – aż do 100%. Jednak przy zbyt dużych prędkościach a tym samym zbyt dużej energii kinetycznej może dojść do erozji substratu. Obszar osadzania materiału występuje więc pomiędzy prędkością krytyczną a prędkością powodującą erozję, przy czym najlepsze właściwości powłok uzyskuje się przy zastosowaniu górnych dopuszczalnych prędkości [3].

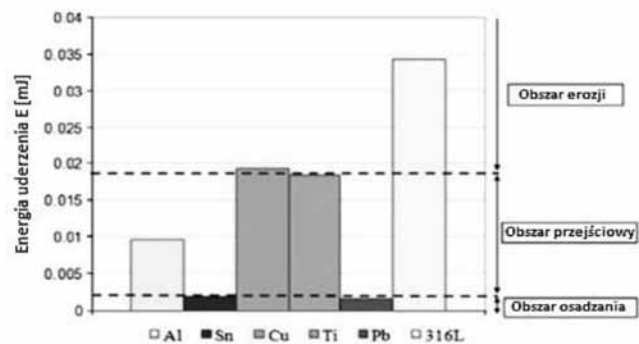
Jedną z głównych zalet metody Cold Spray jest niska temperatura procesu umożliwiająca наносzenie powłok na materiały termicznie wrażliwe, takie jak tworzywa sztuczne. O ile w przypadku natryskiwania proszków metali na podłoża metalowe dostępnych jest wiele publikacji dotyczących mechanizmu wiązania powłoki do podłoża, to temat metalizacji powierzchni tworzyw sztucznych wciąż nie jest dokładnie zbadany. Tymczasem w przemyśle wzrasta systematycznie udział tworzyw sztucznych, dlatego istotna jest możliwość modyfikacji ich powierzchni, w tym metalizacja pełniąca funkcje np. powłoki ochronnej, bądź też przewodzącej.

Stan zagadnienia

Natryskiwanie powłok metalowych na tworzywa za pomocą Cold Spray wydaje się perspektywiczną metodą, ze względu na brak wpływu ciepła oraz stosunkowo niskie koszty. W literaturze światowej można znaleźć informacje o udanym natryskiwaniu powłok metalowych na tworzywa, m.in. cyny na PC/ABS, polipropylen, polistyren i poliamid-6 [4]; miedzi na PA66 [5],

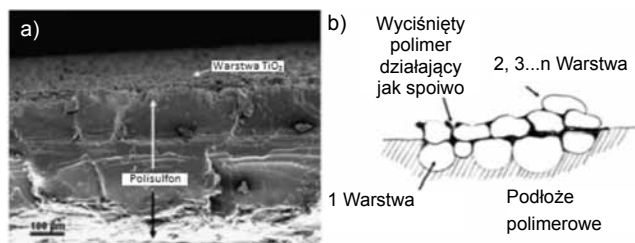
a także aluminium na PEEK450CA30 [6]. Uzyskane powłoki były gęste o małej porowatości. W przypadku наносzenia miedzi na ABS oraz kompozyt wzmacniany włóknem szklanym osadzanie zależało od doboru parametrów, zwłaszcza ciśnienia gazu, a tym samym prędkości cząstek. Korzystne parametry procesu, przy których udało się uzyskać ciekłą powłokę, to niskociśnieniowe natryskiwanie (0,5 MPa) bez podgrzania gazu. Przy zastosowaniu ciśnienia 3 MPa bez podgrzania i tym samym podwyższeniu prędkości cząsteczek obserwowano głównie erozję substratu [4]. W pracy [5] odnotowano jednak, że po uzyskaniu pierwszej szczelnej powłoki miedzi nie następuje dalsze osadzanie, co jest spowodowane zmianą rodzaju podłoża na metalowe a tym samym potrzebę zastosowania wyższych prędkości. W przypadku cyny udało się uzyskać szczelną powłokę o grubości 45÷100 µm przy zastosowaniu azotu o ciśnieniu 3 MPa bez podgrzania i przy obliczonej prędkości cząsteczek 310 m/s. Wytworzona powłoka charakteryzowała się dobrą przewodnością [4]. Na podstawie badań opisano zachowanie różnych proszków metalowych przy наносzeniu na tworzywo, co przedstawiono na rysunku 2. Materiały o dużej gęstości i wysokiej prędkości krytycznej generują dużą energię uderzenia E zgodnie ze wzorem $E = 1/2mv^2$, gdzie: m – masa, v – prędkość krytyczna, co może spowodować duże naprężenia i uszkodzenie powierzchni polimeru. Dla miedzi energia pojedynczego uderzenia cząstki wynosi $E = 0,2$ mJ. Natomiast w przypadku cyny potrzebne są dużo mniejsze prędkości krytyczne, dlatego też generowana energia jest 10,7 razy mniejsza niż w przypadku miedzi. Metale lekkie charakteryzujące się małą gęstością, np. aluminium, aby wygenerować potrzebną energię, wymagają dużych prędkości [4]. Warto jednak zaznaczyć, że ponieważ nie stosowano podgrzewania gazu, uzyskiwane prędkości były stosunkowo niskie w odniesieniu do zastosowanych ciśnień, nie występowało również zmiękczenie polimeru.

W pracy [7] zaproponowano model wiązania cząsteczek ceramiki TiO_2 z tworzywem PSU. Podczas наносzenia powłoki następuje zagłębianie się cząsteczek w powierzchnię tworzywa i jego wpływę, która następnie działa jako czynnik wiążący (rys. 2) [7].



Rys. 2. Wpływ energii uderzenia proszku metalu na możliwość osadzania na powierzchni polimerów [4]

Fig. 2. Effect of impact energy to the possibility of metal powder deposition on the surface of polymers [4]



Rys. 2. Przekrój tworzywa PSU pokrytego TiO_2 (a), model wiązania powłoki z podłożem na powierzchni tworzywa (b) [7]

Fig. 2. Cross-section of PSU coated by TiO_2 (a) and the model of coating and substrate joining [7]

Obecnie do najczęściej metalizowanych tworzyw zalicza się sztucznych ABS (akrylonitryl – butadien-styren). Jest to termoplastyczne amorficzne tworzywo o dużej gęstości oraz dużej odporności termicznej i chemicznej. Dzięki dobrym właściwościom mechanicznym, a także niskiej gęstości umożliwiające zmniejszenie końcowej wagi produktu znalazło szerokie zastosowanie w przemyśle m.in. na osłony lusterek samochodowych czy elementy osłony silnika [8]. Metalizacja powierzchni ABS wykonywana jest zarówno ze względu na jej ochronę, jak i względy dekoracyjne. Obecnie wykorzystuje się w tym celu m.in. metalizację chemiczną czy też elektrochemiczną. Na podstawie informacji literaturowych [4] wydaje się, że perspektywną metodą metalizacji powierzchni tworzywa ABS mogłoby być natryskiwanie metodą Cold Spray.

Materiały i metodyka badań

W celu przeanalizowania możliwości metalizacji powierzchni tworzywa ABS za pomocą metody Cold Spray postanowiono przeprowadzić symulację numeryczną i zweryfikować jej wyniki doświadczalnie. Do symulacji numerycznej wybrano model materiałowy Johnsona-Cooka uwzględniający uplastycznienie termiczne. Jest on powszechnie stosowany do modelowania zjawisk zachodzących podczas uderzeń przy dużych prędkościach, wysokich prędkościach odkształceń i dużych odkształceniach plastycznych. Efektywne naprężenie w modelu Johnsona-Cooka wynosi [9]:

$$\sigma = \left(A + B \epsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*) \right) \left(1 - (T^*)^m \right) \quad (1)$$

gdzie: σ – efektywne naprężenie, ϵ_p^n – efektywne odkształcenie plastyczne, $\dot{\epsilon}^*$ – znormalizowana prędkość odkształcenia plastycznego wyznaczona z $\dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_p^0$, A, B, C, n, m – stałe materiałowe, T^* – temperatura unormowana określona zależnością:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad \begin{array}{l} \text{dla } T < T_r \\ \text{dla } T_r \leq T \leq T_m \\ \text{dla } T > T_m \end{array} \quad (2)$$

gdzie: T_m – temperatura topnienia, T_r – temperatura odniesienia.

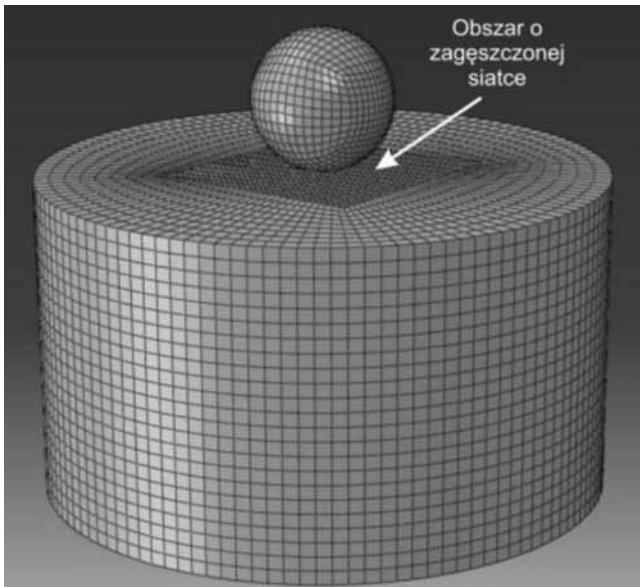
Tablica I. Dane materiałowe zastosowane do symulacji [10, 11]

Table I. Materials data for simulation [10, 11]

Parametry J-C	ABS	SnAg3,5
A, MPa	39	29
B, MPa	48	243
C	0,53	0,0956
m	0,879	0,8
n	1,5	0,703
T_r , °C	26,85	25
T_m , °C	239,85	228
ϵ , s ⁻¹	8×10^{-4}	1
Właściwości ogólne i termiczne		
Gęstość, kg/m ³	1050	7360
Ciepło właściwe, J · kg ⁻¹ K ⁻¹	1500	220
Przewodność cieplna, W · m ⁻¹ K ⁻¹	0,17	67
Rozszerzalność cieplna	7,38E-05	2,27E-05
β	0,9	0,9
Modul Younga, GPa	2,3	45
Współczynnik Poissona	0,39	0,33

Dane do modelu Johnsona-Cooka (tabl. I) zostały zaczerpnięte z opracowań [10, 11]. W przypadku tworzywa dostępne dane zostały wyznaczone przy dużo niższych prędkościach odkształcenia niż osiągnięte podczas natryskiwania Cold Spray.

Symulacja numeryczna została wykonana w programie Abaqus 10 w module Dynamic-Temp-Disp-Explicit z wykorzystaniem współrzędnych materiałowych Lagrange'a. Do symulacji przyjęto wielkość cząstek 20 µm. Jako podłoże wybrano walec o promieniu dwukrotnie większym od średnicy cząsteczki. i wysokości 45 µm. Model został podzielony w celu poprawy jakości siatki. W miejscu styku cząsteczki z podłożem podczas uderzenia siatka została zagęszczona (rys. 3). Wykorzystano elementy 8-węzłowe o stopniach swobody przemieszczenia i temperatury C3D8RT. Wielkość elementów siatki wyniosła 1 µm zarówno dla cząsteczki, jak i dla podłoża. Wybrano formułę kontaktu powierzchnia-do-powierzchni. Współczynnik tarcia między tworzywem ABS a cyną przyjęto na poziomie 0,30, opierając się na współczynniku tarcia między tworzywem ABS a stalą [12]. Wzrost temperatury bazuje na powszechnie przyjętym założeniu, że 90% uplastycznienia i cała praca tarcia zamieniana jest w ciepło. Szczególnie ważnym elementem podczas symulacji za pomocą algorytmu Langrage'a jest możliwość dużego zniekształcenia elementów przy powierzchni kontaktu, zwłaszcza w przypadku dużych prędkości. Dlatego tak ważne jest dobranie odpowiednich parametrów siatki. Odkształcenie elementów było kontrolowane za pomocą tłumienia energii *hourglass* i dopuszczalnego stopnia zniekształcenia elementu. Zdecydowano się również na zastosowanie algorytmu ALE *adaptive mesh* w celu zapobieżenia znacznej deformacji siatki. Okazało się jednak, że podobnie jak w przypadku metali [13, 14], algorytm ten nie wpłynął na polepszenie jakości wyników.



Rys. 3. Siatka z zaznaczonym zagęszczonym obszarem
Fig. 3. Grid view of the marked area of dense grid

Tablica II. Parametry nanoszenia proszku cyny na podłoże wykonane z tworzywa ABS

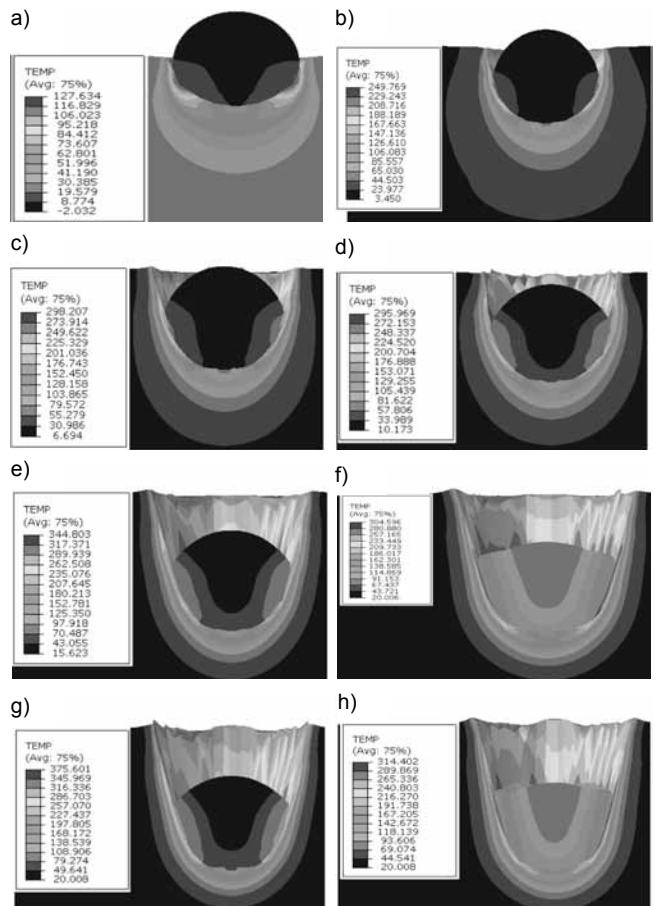
Table II. Parameters for coating of tin powder on the ABS substrate

Nr próby	Ciśnienie nastawione na urządzeniu p, MPa	Temperatura nastawiona na urządzeniu T, °C	Prędkość cząsteczki v _p , m/s	Temperatura cząsteczki T _p , °C
1	0,1	20	236	-3
2	0,2	20	325	2
3	0,3	20	371	5
4	0,4	20	412	8
5	0,5	20	479	12
6	0,5	200	501	62
7	0,6	20	519	15
8	0,6	200	537	63

Ze względu na późniejszą weryfikację doświadczalną badań numerycznych zdecydowano się przyjmując parametry nanoszenia możliwe do ustawienia na posiadanym urządzeniu Dymet 413. Prędkości i temperatura cząsteczek cyny zostały wyliczone przy założeniu jednowymiarowego izentropowego przepływu gazu przez dyszę de Laval'a. Szczegółowo proces wyliczania prędkości został podany w [15]. Istotne jest, że obliczona w ten sposób prędkość dotyczy pojedynczej cząstki o wielkości 20 μm poruszającej się w osi dyszy tuż przed jej opuszczeniem. W przypadku cząstek o większej średnicy uzyskiwane prędkości są mniejsze. W obliczeniach nie uwzględnia się również zmniejszenia prędkości wskutek powstającej przy wyjściu z dyszy oraz przy powierzchni substratu fali uderzeniowej, a także wpływu ilości podawanego proszku [16].

Wyniki badań

W przypadku nanoszenia powłoki metalowej na tworzywo kluczowym parametrem jest temperatura, dlatego zbadano jej przebieg przy różnych parametrach procesu nanoszenia. W przypadku przyjęcia wyjściowej prędkości i temperatury cząstki na poziomie odpowiednio 236 m/s i -3°C (nr 1, tabl. II) cząsteczka jedynie częściowo wbija się w tworzywo, doznając przy tym nieznacznych odkształceń (rys. 4a). Temperatura cząsteczki praktycznie nie ulega zmianie, podczas gdy podłoże nagrzewa się do temperatury 127°C, co stanowi ok. połowę temperatury topnienia tworzywa ABS. Wyliczona prędkość cząsteczki 236 m/s wydaje się za niska, by zaszło osadzenie powłoki. Począwszy od parametrów natryskiwania nr 2 (tabl. II) cząsteczki wbijają się w materiał podłoża, przy czym głębokość wbicia zależy od prędkości początkowej cząsteczki, a także jej temperatury (rys. 4b-h). Jednocześnie



Rys. 4. Pola temperatury po osadzeniu cząstki o prędkości: a) 236 m/s, b) 325 m/s, c) 371 m/s, d) 412 m/s, e) 479 m/s, f) 501 m/s, g) 519 m/s, h) 537 m/s (parametry procesu podano w tablicy II)

Fig. 4. Fields of temperature after particle deposition with the speed of: a) 236 m/s, b) 325 m/s, c) 371 m/s, d) 412 m/s, e) 479 m/s, f) 501 m/s, g) 519 m/s, h) 537 m/s (process parameters in table II)

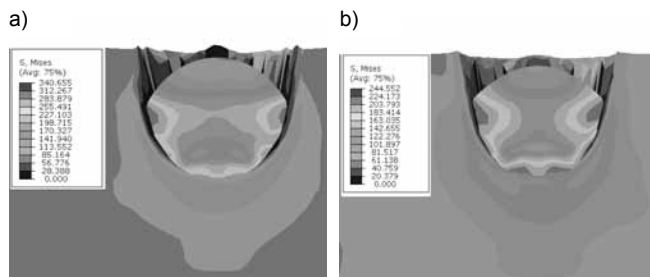
dochodzi do silnego odkształcenia materiału podłoża i jego nagrzania w miejscach najintensywniejszego kontaktu powyżej temperatury topnienia ABS (238°C). Nie zaobserwowano natomiast, niezależnie od wyjściowej prędkości, znacznego odkształcenia cząstki. Wyliczony współczynnik spłaszczenia wyniósł we wszystkich przypadkach ok. 9%. Jest to miara zmiany wysokości cząsteczki względem pierwotnej średnicy, obliczona wg [17]:

$$R_p = \frac{D_p - h_p}{D_p} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: R_p – współczynnik spłaszczenia, %; D_p – średnica cząstki, μm ; h_p – wysokość cząsteczki po deformacji, μm .

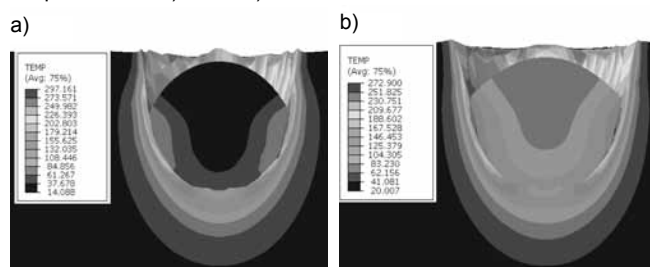
W przypadku zwiększenia początkowej temperatury (nr 6, 8, tabl. II) dochodziło do większych odkształceń cząstek. Występował również większy wzrost temperatury cząstek przy jednoczesnym obniżeniu temperatury podłoża w stosunku do zbliżonych prędkości, ale bez podgrzania.

Ze względu na istotny wpływ temperatury na sposób odkształcenia cząstki postanowiono dodatkowo porównać cząstki o takiej samej prędkości 400 m/s, ale w dwóch wariantach temperatury: 12 i 62°C. W obydwu wariantach nastąpiło zbliżone zagłębienie cząstki w podłoże. Zaobserwowano natomiast większe odkształcenie cząsteczki cyny przy podwyższonej temperaturze. Znacząca była również różnica naprężeń w materiale cząsteczki sięgająca prawie 100 MPa, co wynika z łatwiejszego odkształcania materiału podgrzanej cząsteczki (rys. 5). Temperatura podłoża zarówno w jednym, jak i drugim przypadku przekroczyła temperaturę topnienia, co wynika z siły tarcia



Rys. 5. Pole naprężeń po osadzeniu cząstki o temperaturze początkowej: a) 12°C, b) 62°C

Fig. 5. View of the stress field after deposition of particles with initial temperature of: a) 12°C, b) 62°C

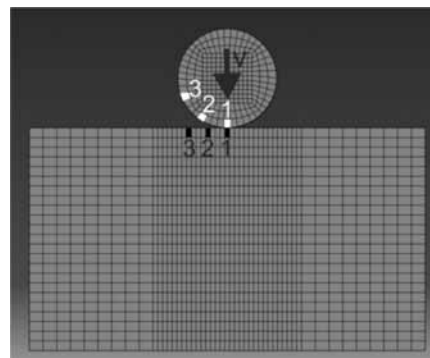


Rys. 6. Pole temperatury po osadzeniu cząstki o temperaturze początkowej: a) 12°C, b) 62°C

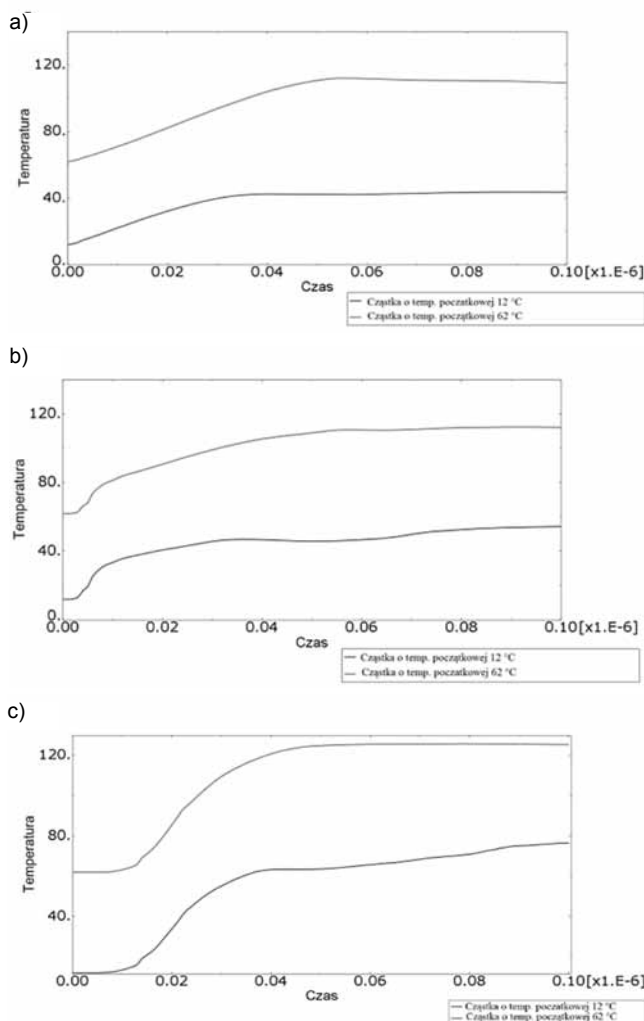
Fig. 6. View of the temperature field after deposition of particles with initial temperature of: a) 12°C, b) 62°C

występujących między cząsteczką a materiałem podłoża. Osiągnięta przez podłoże temperatura w obu przypadkach wykraczała poza temperaturę topnienia tworzywa ABS (228°C), chociaż w przypadku podgrzania gazu temperatura cząsteczki była wyższa (rys. 6).

Przeprowadzono również monitoring temperatury w pojedynczych elementach oznaczonych na rysunku 7.

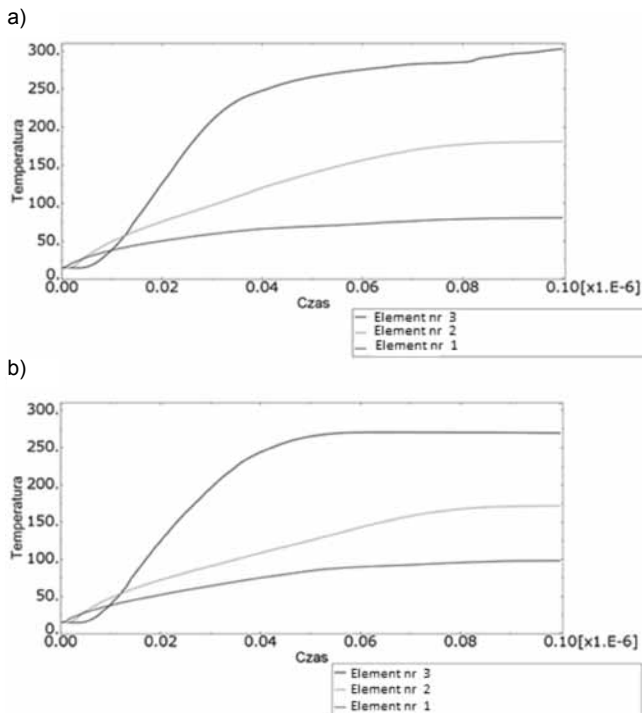


Rys. 7. Oznaczenie analizowanych elementów podłoża i cząsteczki
Fig. 7. Designation of analyzed parts of substrate and particle



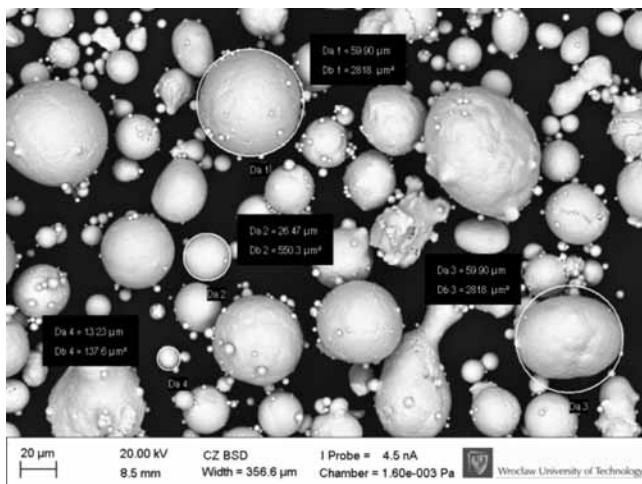
Rys. 8. Wykres temperatury w funkcji czasu dla elementów cząsteczki: a) nr 1, b) nr 2, c) nr 3 (oznaczenia wg rys. 7)

Fig. 8. Chart of temperature in time function for particle parts: a) no 1, b) no 2, c) no 3 (designation acc. to fig. 7)

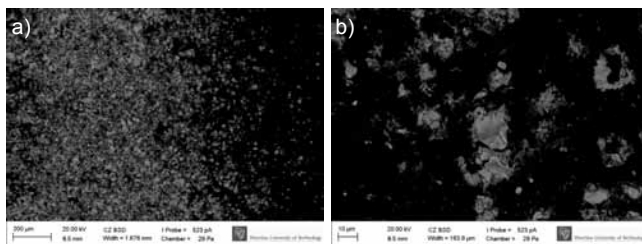


Rys. 9. Wykres temperatury w funkcji czasu dla elementów podłoża przy wyjściowej temperaturze uderzającej cząsteczki: a) 12°C, b) 62°C (oznaczenia wg rys. 7)

Fig. 9. Chart of temperature in time function for substrate parts in the initial temperature of particle: a) 12°C, b) 62°C (designation acc. to fig. 7)



Rys. 10. Proszek cyny (Sn97Cu3) zastosowany do natryskiwania
Fig. 10. Tin powder (Sn97Cu3) used for spraying



Rys. 11. Powłoka cyny na powierzchni tworzywa ABS przy parametrach nanoszenia nr 4 wg tabl. II (a), powiększone obrzeże powłoki (b)

Fig. 11. Tin coating on the ABS substrate made with parameters from no. 4 in table II (a), the edge of coating in higher magnitude (b)

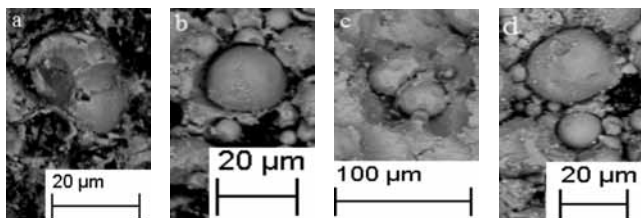
Na wykresach temperatury w funkcji czasu dla elementów cząsteczki widać, że temperatura w żadnym wypadku nie przekroczyła 130°C (rys. 8). Krzywe temperaturowe dla obydwu przypadków mają zbliżoną postać, są jedynie przesunięte o wartość wstępnego podgrzania cząsteczki, co oznacza, że praca tarcia w obydwu przypadkach była zbliżona. Najwyższa temperatura osiągnięta jest w elemencie 3.

W przypadku krzywych temperaturowych wyznaczonych dla elementów podłoża widać, że dla elementów położonych dalej od punktu styku cząsteczki z podłożem występuje opóźnienie we wzroście temperatury (rys. 9). Uderzenie cząsteczki wstępnie podgrzanej skutkuje łagodniejszym wzrostem temperatury podłoża. Jest to być może wynikiem zmiękczenia materiału cząsteczki i tym samym mniejszymi naprężeniami potrzebnymi do jej odkształcenia.

Wyniki symulacji porównano ze zdjęciami powierzchni próbek z tworzywa ABS pokrytych powłoką cyny. Powłoki naniesiono za pomocą urządzenia do niskociśnieniowego natryskiwania na zimno Dymet 413, przy wykorzystaniu sferycznego proszku stopu cyny Sn97Cu3 o ziarnistości poniżej 71 μm, wytworzonego w procesie atomizacji (rys. 10). Jako gaz roboczy zastosowano powietrze.

W przypadku pierwszych trzech nastaw urządzenia (nr 1÷3, tabl. II) nie zaobserwowano osadzania się powłoki na podłożu z tworzywa ABS, mimo że symulacja pokazuje wbijanie się cząstek w podłoże od parametrów nr 2 (tabl. II). Biorąc pod uwagę, że prędkość krytyczna dla cyny, przy nanoszeniu na podłoże metalowe, kształtuje się na poziomie 160÷180 m/s, wydaje się, że powinno dojść do jej osadzania, mimo miękkiego podłoża [18]. Przypuszczenie to potwierdza uzyskanie szczelnej powłoki cyny na powierzchni substratu ABS/PC przy zastosowaniu prędkości 310 m/s [4]. Wartość prędkości została obliczona metodą symulacji [4]. Ponieważ osadzanie cząsteczek cyny jednak nie nastąpiło, wydaje się, że tuż przed uderzeniem w substrat mają one mniejszą prędkość niż obliczona na podstawie izentropowego przepływu gazu. Najbardziej prawdopodobną przyczyną obniżenia prędkości jest duża ilość podawanego proszku.

Zagłębianie się cząstek w podłoże w sposób zgodny z wynikami symulacji numerycznej jest widoczne dopiero od parametrów nanoszenia nr 5 (tabl. II) o obliczonej prędkości cząsteczek 479 m/s i temperaturze 12°C (rys. 12). Podgrzanie gazu przy tym samym ciśnieniu i tym samym podwyższenie temperatury cząsteczki do 62°C (nr 6, tabl. II) skutkuje większym zagłębieniem cząstki (rys. 12b). Podobny efekt można zaobserwować przy porównaniu powłok uzyskanych przy zastosowaniu parametrów 7 i 8 (tabl. II), przy których różnica między obliczoną prędkością wynosi zaledwie 18 m/s, natomiast różnica temperatury 48°C. W przypadku podgrzania



Rys. 12. Widok cząsteczki cyny na powierzchni tworzywa ABS przy parametrach nanoszenia wg tablicy II: a) nr 5, b) nr 6, c) nr 7, d) nr 8
Fig. 12. Tin particle on the ABS substrate made with parameters from table II: a) no. 5, b) no. 6, c) no. 7, d) no. 8

gazu praktycznie nieodkształcone cząstki wbijają się w substrat, natomiast bez podgrzewania występuje większe odkształcenie uderzających cząstek. Różnica ta jest prawdopodobnie spowodowana mięknieniem polimeru pod wpływem temperatury i tym samym mniejszą energią potrzebną do jego odkształcenia.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- możliwe jest utworzenie szczelnych powłok cynowych na tworzywie ABS za pomocą natryskiwania na zimno, przy czym kluczową rolę w procesie odgrywa prędkość i temperatura,
- energia uderzenia cząstki cyny powoduje jej zagłębienie się w materiał podłoża,
- największy wzrost temperatury występuje w miejscach największego odkształcenia cząsteczki,
- wzrost temperatury uderzającej cząsteczki powoduje zmniejszenie występujących w niej podczas uderzenia naprężeń i odkształceń.

Literatura

- [1] Xian-Jin N., Jae-Hoon J., Hyung-Jun K.: The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process, *Applied Surface Science*, 2007, vol. 253, s. 7449-7455.
- [2] Winnicki M., Kocimski J., A. Ambroziak A.: Porównanie wydajności procesu dwóch metod natryskiwania na zimno: niski i wysokociśnieniowej, XXXIX Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Krynica, 27-30 IX 2011: [monografia pod red. Jerzego Pacyny]. Kraków 2011, s. 247-252.
- [3] Klassen T., Gärtner F., Schmidt T., Kliemann J.-O., Onizawa K., Donner K.-R., Gutzmann H., Binder K., Kreye H.: Basic principles and application potentials of cold gas spraying, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech*, 2010, vol. 41, no. 7, s. 575-584.
- [4] Lupoi R., O'Neill W.: Deposition of metallic coatings on polymer surfaces using cold spray, *Surface & Coatings Technology*, vol. 205 (2010), s. 2167-2173.
- [5] Barletta M., Gisario A., Tagliaferri V.: Electrostatic spray deposition (ESD) of polymeric powders on thermoplastic (PA66) substrate, *Surface & Coatings Technology*, vol. 201 (2006), s. 296-308.
- [6] Zhou X.L., Chen A.F., Liu J.C., Wu X.K., Zhang J.S.: Preparation of metallic coatings on polymer matrix composites by cold spray, *Surface & Coatings Technology*, vol. 206 (2011), s. 132-136.
- [7] Burlacov I., Jirkovský J., Kavanb L., Ballhorn R.: Heimann R.B., Cold gas dynamic spraying (CGDS) of TiO₂ (anatase) powders onto poly(sulfone) substrates: Microstructural characterisation and photocatalytic efficiency, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2007, vol. 187, s. 285-292.
- [8] Hyla I.: Tworzywa sztuczne. Właściwości – przetwórstwo – zastosowanie, Gliwice 2000.
- [10] Louche H., Piette-Coudol F., Arrieux R., Issartel J.: An experimental and modeling study of the thermomechanical behavior of an ABS polymer structural component during an impact test, *International Journal of Impact Engineering* vol. 36 (2009), s. 847-861.
- [11] Qin Fei, An Tong, Chen Na: Strain rate effect and Johnson-Cook models of lead-free solder alloys, *Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, 2008. ICEPT-HDP 2008. International Conference.
- [12] Pouzada A.S., Ferreira E.C., Pontes A.J.: Friction properties of moulding thermoplastics, *Polymer Testing*, 2006, vol. 25, s. 1017-1023.
- [13] Wen-Ya Li, Wei Gao: Some aspects on 3D numerical modeling of high velocity impact of particles in cold spraying by explicit finite element analysis, *Applied Surface Science* 255 (2009), s. 7878-7892.
- [14] Wen-Ya Li, Chao Zhang, Chang-Jiu Li, Hanlin Liao: Modeling Aspects of High Velocity Impact of Particles in Cold Spraying by Explicit Finite Element Analysis, *Journal of Thermal Spray Technology*, Mid-December 2009, vol. 18 (5-6), s. 921-933.
- [15] Winnicki M., Małachowska A., Ambroziak A.: Badania numeryczne tworzenia powłoki z cyny na podłożu aluminiowym metodą LCPS, *Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej*, praca w druku.
- [16] Gilmore D.L., Dykhuizen R.C., Neiser R.A., Roemer T.J., Smith M.F.: Particle Velocity and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process, *Journal of Thermal Spray Technology*, 1999, vol. 8(4), s. 576-582.
- [17] Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M.: Numerical simulation of cold spray coating, *Surface & Coatings Technology*, 2011, vol. 205, s. 5294-5301.
- [18] Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., Klassen T.: From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, Mid-December 2009, vol. 18(5-6), s. 794-808.