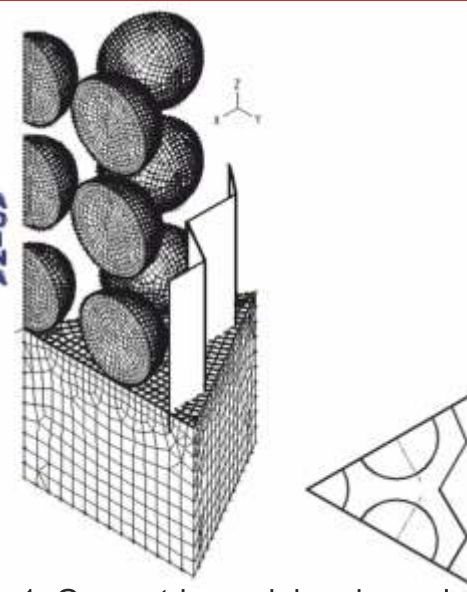


Wstęp

Fizyczny opis procesu termicznego natryskiwania jest bardzo złożony, a istniejące modele numeryczne opisujące proces nanoszenia powłok i formowania naprężeń własnych wymagają dalszych udoskonaleń. W większości opisywanych w literaturze modeli nie uwzględnia się wpływu naprężeń mechanicznych, które są skutkiem uderzenia z wysoką prędkością cząstek materiału powłoki w podłoże i wcześniej naniesioną podwarstwę na poziom naprężeń własnych. W pracy zbudowano model numeryczny (z wykorzystaniem MES) do obliczeń rozkładu naprężeń własnych w powłokach nanoszonych termicznie na podłoże. Obliczenia przeprowadzono dla kołowych próbek składających się z powłoki Ti, Ni, Cu naniesionych na podłoże ceramiczne Al₂O₃ metodą HVOF. Wyniki obliczeń zostały zweryfikowane eksperymentalnie przez pomiary ugięcia próbek po ich schłodzeniu oraz przy użyciu techniki XRD. Cienkie powłoki metaliczne na podłożu Al₂O₃ posłużą do metalizacji ceramiki lub jako warstwa pośrednia, która pozwoli łączyć ceramikę z innymi metalami, co opisano w pracach [1, 2].

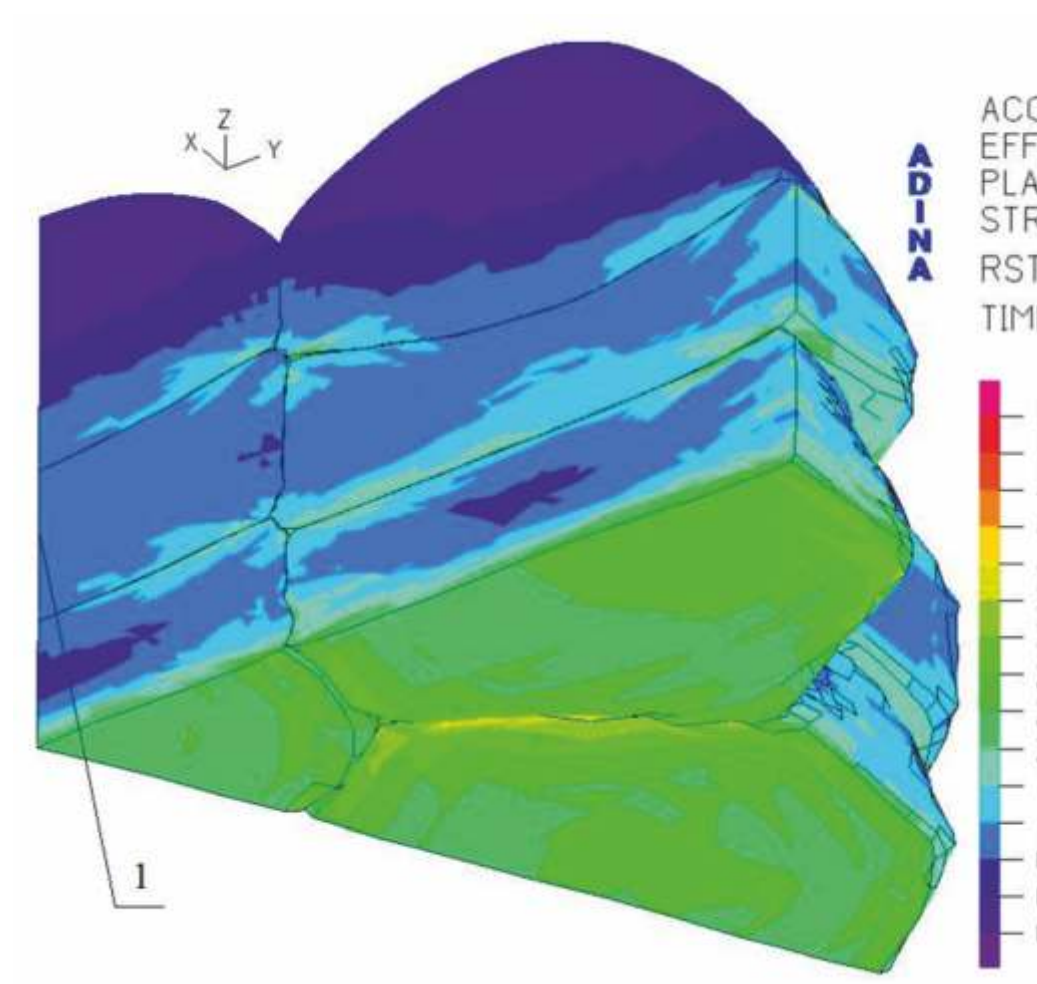
Uderzenie cząstki metalu w podłoże Al₂O₃

Do symulacji procesu uderzenia cząstek w procesie natryskiwania przyjęto kuliste cząstki metaliczne (Ti, Ni, Cu), które w przybliżeniu tworzą powłokę składającą się z trzech podwarstw. Cząstki nanoszone były na podłoże ceramiki Al₂O₃ metodą natryskiwania płomieniowego HVOF. Geometrię modelu wraz z siatką MES pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Geometria modelu uderzenia cząstki metalu w podłoże Al₂O₃, wraz z siatką MES w procesie HVOF

Obliczenia numeryczne (MES) przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie ADINA v8.6 oraz analizę typu „dynamics-explicit”. Prędkość uderzenia cząstek ustalono na 600 m/s na podstawie parametrów zastosowanego procesu HVOF i obliczeń autorów [3,4] dla średnicy cząstek proszku d=50 μm. Dla materiałów cząstek przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału „Plastic-Bilinear”. Podłoże ceramiczne zamodelowano jako materiał sprężysty. W modelu zastosowano opcję kontaktu cząstek między sobą, podłożem oraz płaszczyznami blokującymi.

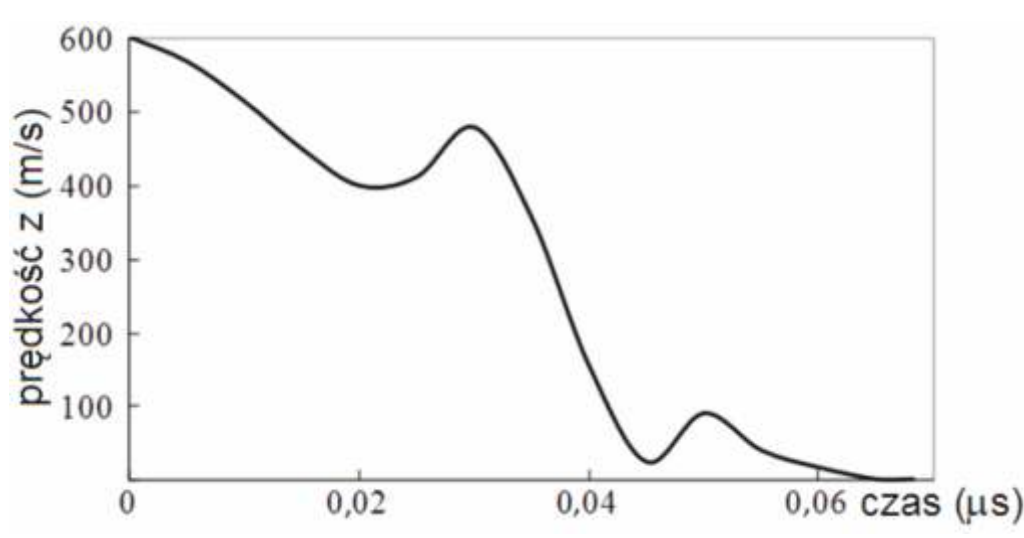


Rys. 2. Mapa odkształceń plastycznych w tytanowej podwarstwie

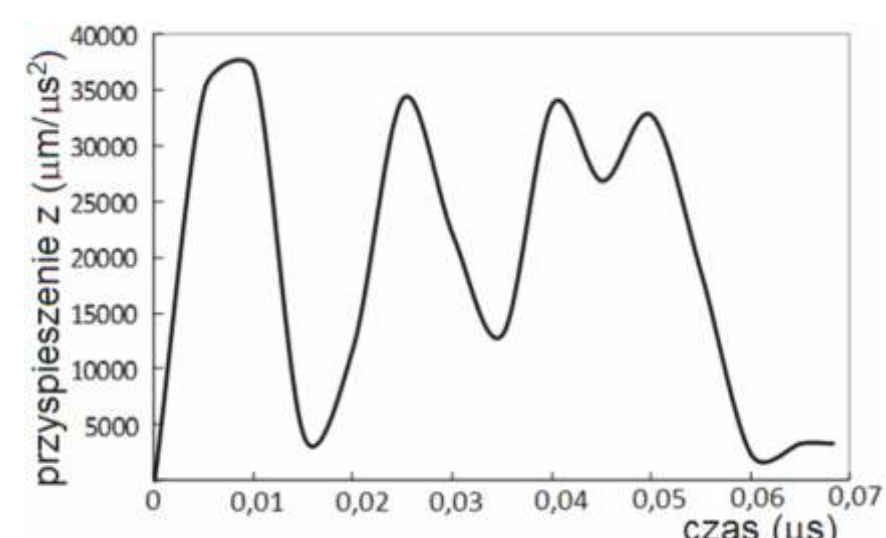
Na rys. 2 przedstawiono przykładowy rozkład odkształceń plastycznych cząstek Ti formujących podwarstwę powłoki po uderzeniu w podłoże ceramiczne Al₂O₃ po czasie 70 ns gdy prędkość cząstek spadła do zera. Maksymalne odkształcenia rzędu 500% występują przy granicy znacznie sztywniejszego podłoża oraz w okolicach powierzchni kontaktu. Nastąpiło spłaszczenie cząstek i ich zetknięcie powodując wypełnienie wolnych przestrzeni między nimi. Analiza explicite wykazała, że po uderzeniu kuliste cząstki materiału powłokowego bezpośrednio stykające się z podłożem zmieniły kształt w formę dysków o grubości w przybliżeniu równej 12 μm.

Na rys. 3 i 4 zamieszczono odpowiednio przebiegi prędkości i przyspieszenia środka masy centralnej cząstki Ti po uderzeniu w podłoże ceramiczne. Przy uderzeniu kulki w podłoże ceramiczne Al₂O₃ przyspieszenie (opóźnienie) osiąga wartość -36000 μm/μs². Podczas uderzenia cząstek z dużą prędkością występują

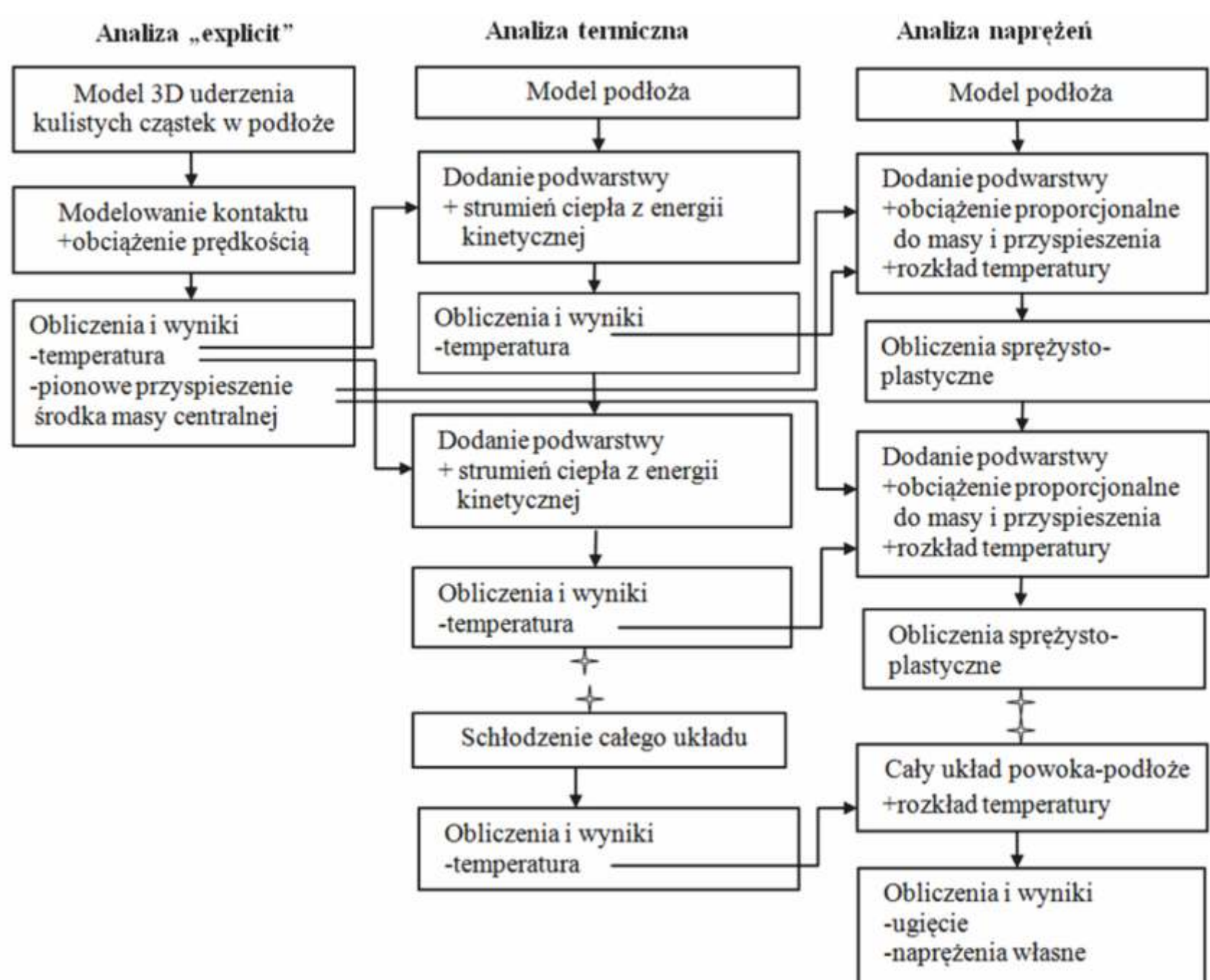
niejednorodne deformacje, drgania, a towarzyszące efekty mają charakter falowy.



Rys. 3. Obliczona MES zmiana prędkości środka masy centralnej kulki Ti po uderzeniu w podłoże Al₂O₃



Rys. 4. Obliczona MES zmiana przyspieszenia środka masy centralnej kulki Ti po uderzeniu w podłoże Al₂O₃



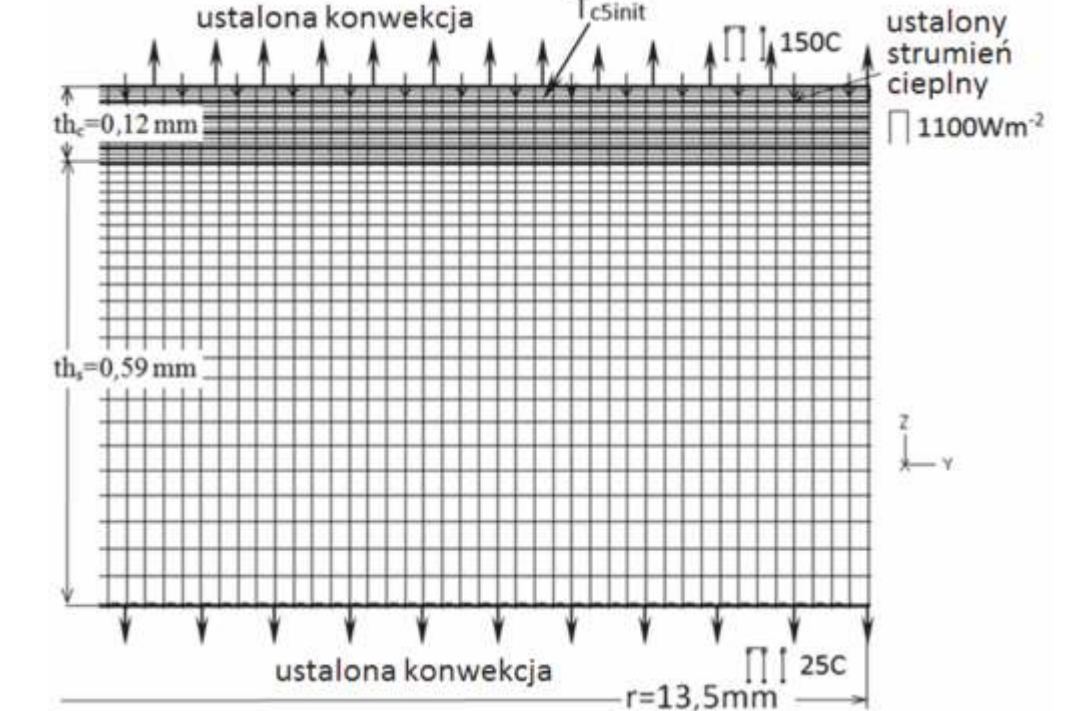
Rys. 5. Schemat metodyki zastosowanej do określania naprężeń własnych w układzie powłoka-podłoże w procesie HVOF

W analizie naprężeń każda nowa pojawiająca się podwarstwa została obciążona tą samą wielkością proporcjonalną do masy i przyspieszenia. Schemat metodologii zastosowanej do określania naprężeń własnych generowanych w układzie powłoka-podłoże w procesie HVOF zamieszczono na rys. 5.

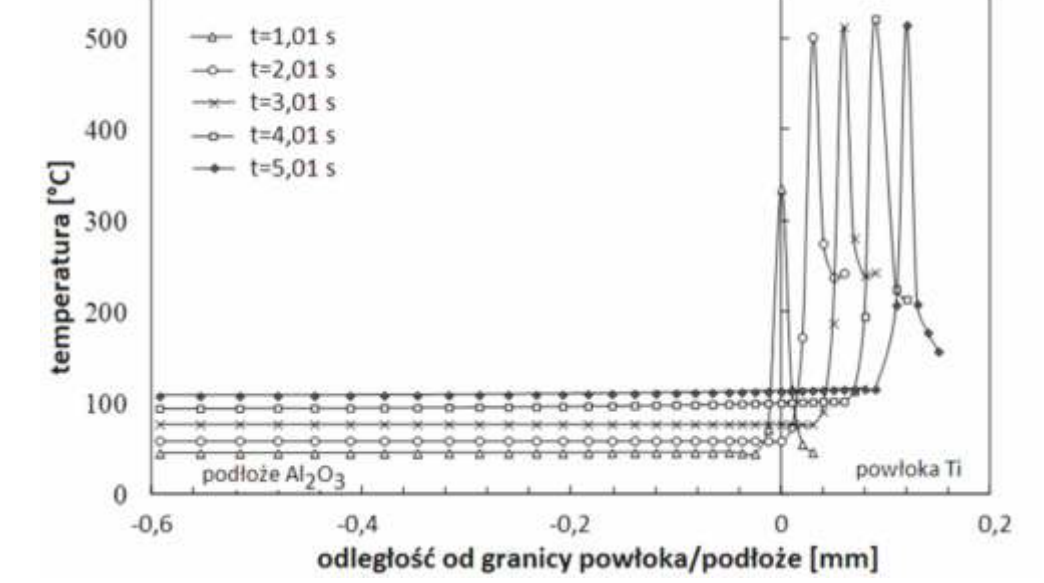
Rozkłady temperatury w układzie z powłoką Ti, Cu, Ni

Proces modelowania pola temperatury podzielono na kilka etapów, a obliczenia w każdym z nich bazują na równaniach nieustalonego przepływu ciepła. Przyjęto zwłokę równą 1 s między pojawieniem się kolejnych podwarstw, obliczoną z ruchu palnika podczas procesu natryskiwania. Cząstki materiału powłokowego uderzając w ceramiczne podłoże deformują się w kształcie lameli i są gwałtownie schładzane. Znaczny spadek temperatury cząstek na podłożu prowadzi do formowania naprężeń wewnętrznych w indywidualnych lamelach. Wzrostowi tych naprężeń częściowo przeciwdziałają powstające w powłoce mikropęknięcia.

Termiczne warunki brzegowe i początkowe modelu przedstawiono na rys. 6. Wartości współczynników konwekcji przyjęto na podstawie [5] a temperatury początkowej proszków wg [6]. Powierzchnie graniczne między podłożem i pierwszą podwarstwą powłoki oraz między kolejnymi podwarstwami obciążano strumieniem cieplnym „q” działającym w czasie t_z=1 μs i aktywowanym wraz z pojawieniem się nowej podwarstwy. Wielkość strumienia dobrano tak, aby zapewnić taki przyrost temperatury jaki wynika z zamiany energii kinetycznej na energię cieplną dla rozpatrywanej prędkości natryskiwania 600 m/s. Po utworzeniu powłoki o ostatecznej grubości następuje schłodzenie całości do temperatury otoczenia.



Rys. 6. Fragment geometrii modelu osiowoosymetrycznego z siatką MES przy aktywowaniu piątej podwarstwy, oznaczenie termicznych warunków brzegowych



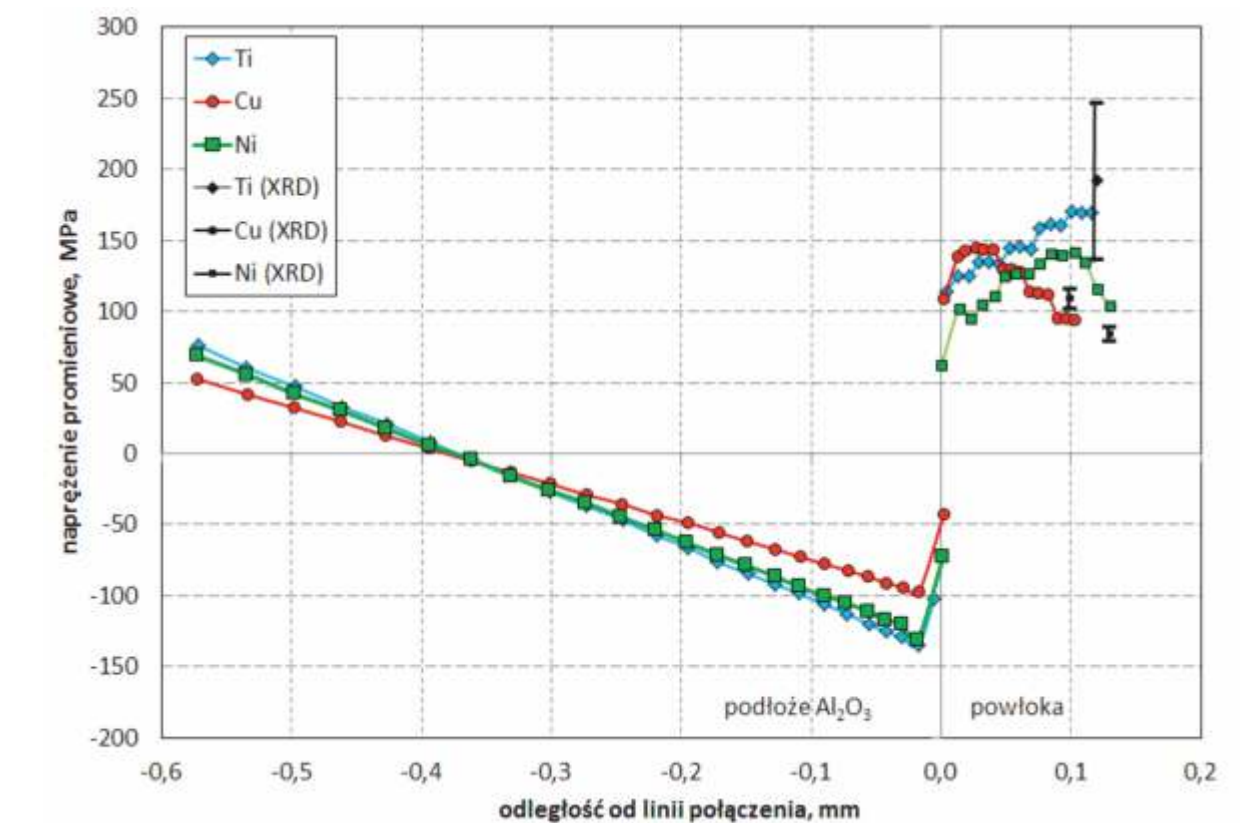
Rys. 7. Rozkład temperatur w osi układu dla czasów nakładania kolejnych podwarstw powłoki Ti na podłożu Al₂O₃

Rozkłady naprężeń w układzie powłoka (Ti, Cu, Ni) – podłoże Al₂O₃

W analizie naprężeń porównano wyniki obliczeń dla przypadku obciążenia modelu poprzez pole temperatury z rozwiązania zagadnienia nieustalonego przepływu ciepła w kolejnych przyrostach czasu, z aktywowanymi nowoprybyłymi podwarstwami (MES1) oraz z uwzględnieniem obciążenia (w czasie 1 μs) proporcjonalnego do masy i przyspieszenia każdej nowoprybyłej podwarstwy (MES2). W ten sposób uwzględniono wpływ uderzenia cząstek materiału powłokowego w podłoże i we wcześniej utworzoną podwarstwę na finalny poziom naprężeń.

powłoka	Średnia grubość powłoki (mm)	Ugięcie próbki (mm)		
		zmierzone	MES1	MES2
Ti	0.119	0.064 ±0.018	0.080	0.067
Ni	0.133	0.069 ±0.011	0.072	0.061
Cu	0.105	0.060 ±0.023	0.061	0.048

Tab. 1. Zmierzone i obliczone za pomocą MES ugięcia próbek w punkcie centralnym

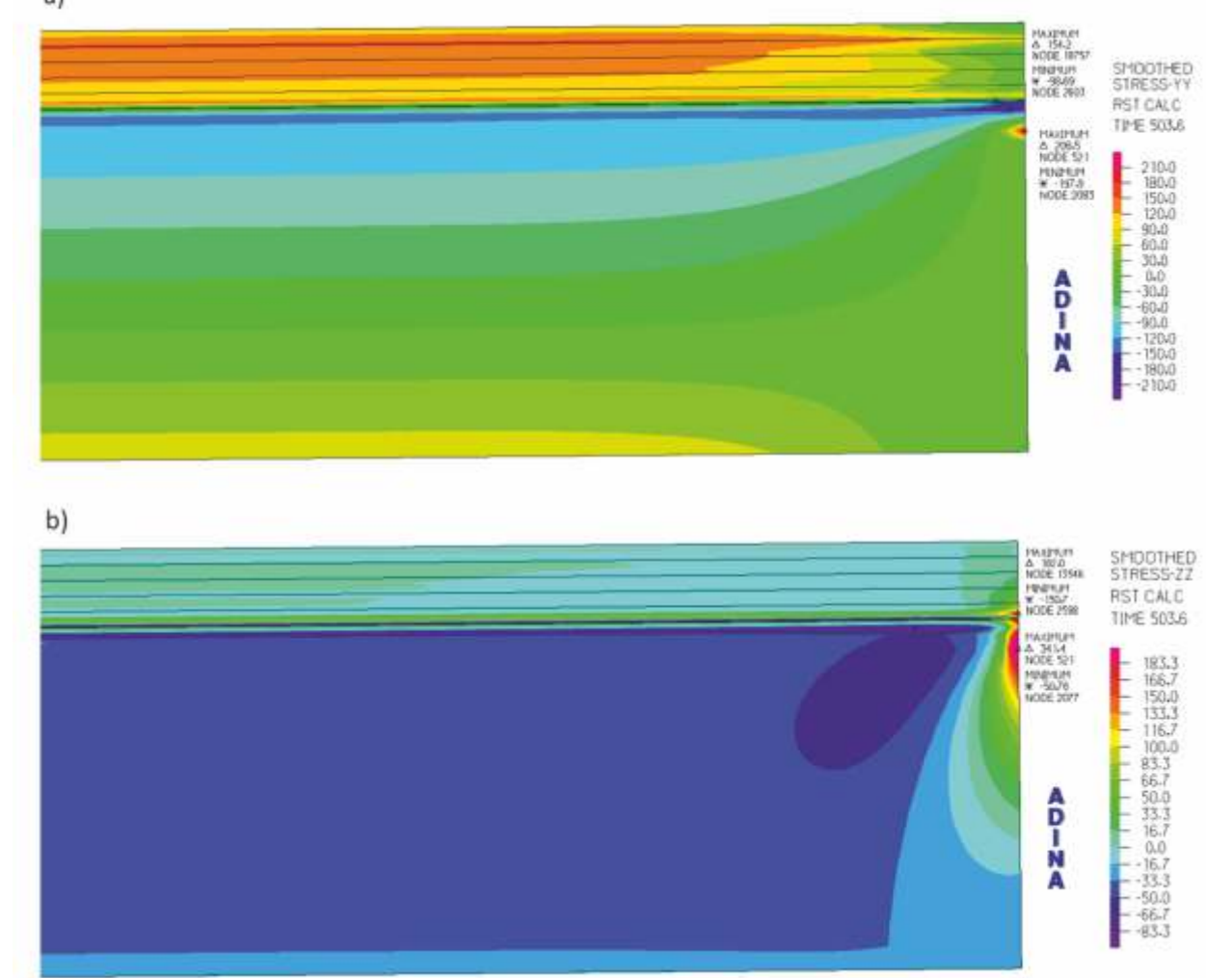


Rys. 8. Rozkład naprężeń własnych promieniowych wzdłuż osi próbki w funkcji odległości od powierzchni granicznej powłoka/Al₂O₃ dla powłoki Ti, Ni, Cu

Próbki z natrykiwanymi na podłożu Al₂O₃ powłokami Ti, Ni, Cu uległy różnym wygięciom. W tabeli 1 zamieszczono wyniki ugięć próbek zmierzone cyfrowym czujnikiem zegarowym w ich centralnym punkcie oraz ugięć obliczonych z modelowania MES. Uzyskano dobrą zgodność ugięcia dla modeli MES2 z ugięciami próbek mierzonym po natrysku HVOF.

Na rys. 8 przedstawiono obliczone (wg modeli MES1 i MES2) oraz wyznaczone rozkłady naprężeń własnych promieniowych w analizowanych układach z powłokami Ti, Ni, Cu w osi próbek w funkcji odległości od powierzchni granicznej. Na wykresie naniesiono także wartości naprężeń wyznaczone w analizowanych powłokach poprzez badania metodą rentgenowską (X-ray) [7].

Przykładowe mapy naprężeń promieniowych i osiowych dla układu powłoka Ni/podłoże Al₂O₃ przedstawiono na rys. 9. Rozkład naprężeń jest równomierny wzdłuż promienia próbki oprócz miejsca koncentracji w okolicy zewnętrznego brzegu. Podobny charakter rozkładu występuje w powłokach Ti oraz Cu.



Rys. 9. Mapy naprężeń a) promieniowych, b) osiowych w układzie powłoka Ni-podłoże Al₂O₃

Podsumowanie

Zbudowano model numeryczny (MES) układu powłoka (Ti,Cu,Ni)-podłoże Al₂O₃ w celu prognozowania (symulacji) rozkładów naprężeń własnych. Stworzony model był zgodny wymiarowo z rzeczywistymi próbkami, a geometria powłoki została zamodelowana przyrostowo w odstępach czasu wynikających z częstotliwości natryskiwania. Przeprowadzono obliczenia dla przypadków obciążenia modelu jedynie polem temperatury oraz dodatkowo obciążeniem proporcjonalnie do masy i przyspieszenia każdej nowoprybyłej podwarstwy. Dzięki temu, w modelu uwzględniono wpływ uderzenia z dużą prędkością kulistych cząstek materiału powłoki na poziom końcowych naprężeń własnych całego układu powłoka/podłoże.

Zmierzone ugięcia rzeczywistych próbek pokrywają się z ugięciami otrzymanymi z analizy numerycznej (MES2) w granicach tolerancji błędów. Występuje dość dobra zgodność wyznaczonych metodą XRD naprężeń w powłokach (na głębokości ok. 20 μm) z wartościami obliczonymi poprzez modelowanie. Zastosowanie na materiał powłoki metalu o niższej granicy plastyczności w złączu ceramika/metal powoduje większą dysypację naprężeń, a zatem niższy poziom naprężeń własnych w układzie. Ma to bardzo istotne znaczenie z uwagi na większą podatność ceramiki na pęknięcie w miejscach spiętrzenia naprężeń.

Bibliografia

- [1] Chmielewski T., Golański D.: Selected properties of Ti coatings deposited on ceramic AlN substrates by thermal spraying, Welding International, Vol. 27(8) 2013, 694-698
- [2] Golański D., Chmielewski T., Gontarz G.: Badania związłości ceramiki metalizowanej metodami natrysku cieplnego”, Przegląd Spawalnictwa, Nr 8(2013), 65-69
- [3] Li M., Christoffides P.: Multi-Scale Modelling and Analysis of an Industrial HVOF Thermal Spray Process, Chem. Eng. Sci., 60(2005), 3649-3669.
- [4] Li M., Panagiotis D., Christoffides P.: Computational study of in-flight behavior in the HVOF thermal spray process, Chem. Eng. Sci., 61(2006), 6540-6552.
- [5] Topari M., Sen F., Culha O., Celik E.: Thermal stress analysis of HVOF sprayed WC-Co/NiAl multilayer coatings on stainless steel substrate using finite elements methods, Jour. of Mat. Proc. Tech., 190(2007), 23-32.
- [6] Kim K., Kurada S., Watanabe M.: Microstructural development and deposition behavior of titanium powder particles in warm spraying process: from single sput to coating, Jour. of Therm. Spray Tech., vol.19, 6(2010), 1244-1254.
- [7] Golański D., Kujawiecka M., Chmielewski T., Dymny G., Zimmerman J.: Badania naprężeń własnych w powłokach metalowych natrykiwanych na podłożu ceramiki Al2O3, Przegląd Spawalnictwa, V43(7), No.9, 2015, 70-76.

Kontakt:
 Politechnika Warszawska
 Instytut Technik Wytwarzania, Zakład Inżynierii Spajania
 ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa
 tel.: 22 234 8402, fax: 22 849 96 21
 www.zis.wip.pw.edu.pl
 e-mail: zis@wip.pw.edu.pl

²Politechnika Warszawska
 Instytut Mechaniki i Poligrafii
 Zakład Konstrukcji Maszyn i Inżynierii Biomedycznej
 ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa