

# SPIS TREŚCI

Wykaz oznaczeń i skrótów .....	11
Przedmowa.....	13
Wstęp .....	17
<b>1. Natryskiwanie ciepłe powłok.....</b>	<b>19</b>
1.1. Metody nanoszenia warstw i powłok.....	20
1.2. Natryskiwanie łukowe .....	23
1.3. Natryskiwanie plazmowe.....	25
1.4. Natryskiwanie płomieniowe.....	28
1.4.1. Natryskiwanie płomieniowe z prędkością poddźwiękową.....	28
1.4.2. Natryskiwanie płomieniowe z prędkością naddźwiękową HVOF .....	31
1.5. Natryskiwanie laserowe.....	39
1.6. Natryskiwanie na zimno (Cold Spray).....	40
1.7. Stopowanie i przetapianie laserowe.....	43
1.7.1. Stopowanie laserowe .....	43
1.7.2. Przetapianie laserowe powłok .....	46
1.8. Porównanie metod natryskiwania.....	46
<b>2. Wybrane właściwości powłok natrykiwanych.....</b>	<b>50</b>
2.1. Proces tworzenia się powłoki .....	50
2.2. Przyczepność powłoki do podłoża.....	52
2.2.1. Wpływ przygotowania powierzchni.....	53
2.2.2. Wpływ temperatury .....	54
2.2.3. Wpływ energii kinetycznej.....	54
2.2.4. Wpływ fizykochemicznych własności materiałów.....	55
2.3. Naprężenia własne w warstwach powierzchniowych.....	57
2.4. Naprężenia własne wywołane niedopasowaniem cieplnym.....	61
<b>3. Materiały powłokowe do natrykiwania.....</b>	<b>66</b>
3.1. Materiały metalowe .....	66
3.1.1. Stopy na osnowie żelaza.....	66
3.1.2. Stopy na osnowie kobaltu.....	67
3.1.3. Stopy na osnowie niklu.....	67
3.1.4. Stopy na osnowie miedzi .....	68
3.2. Czyste metale.....	68
3.3. Kompozyty ceramiczno-metalowe .....	69
3.4. Materiały ceramiczne.....	69
3.5. Tworzywa sztuczne.....	70

<b>4. Badania powłok nanoszonych termicznie metodą płomieniową i detonacyjną</b> .....	71
4.1. Badania wstępne powłok nanoszonych termicznie metodą płomieniową i detonacyjną...	73
4.2. Charakterystyka materiałów powłokowych .....	73
4.3. Naprężenia w układzie powłoka–podłoże .....	75
4.4. Budowa przyrządu do badania wygięcia podłoża z powłoką po procesie natryskiwania...	78
4.5. Natryskiwanie powłok tytanowych na podłoża ceramiczne .....	79
4.6. Wyznaczanie naprężeń własnych w natrykiwanych powłokach .....	80
4.6.1. Powłoki tytanowe .....	80
4.6.2. Powłoki kompozytowe Ti+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	82
4.7. Analiza numeryczna naprężeń własnych w powłokach tytanowych i kompozytowych...	83
4.7.1. Wyniki obliczeń .....	84
4.8. Pole temperatury w czasie chłodzenia układu powłoka–podłoże .....	88
4.8.1. Przedmiot badań .....	89
4.8.2. Założenia do obliczeń numerycznych .....	90
4.8.3. Wyniki obliczeń .....	91
4.8.4. Analiza porównawcza wyników obliczeń rozkładu temperatury .....	96
4.9. Badania naprężeń w powłokach Ti oraz Ti+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> natrykiwanych metodą detonacyjną na podłoże Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	103
4.9.1. Materiały powłokowe .....	103
4.9.2. Parametry natryskiwania detonacyjnego .....	104
4.9.3. Pomiary krzywizny wygięcia w próbkach po natryskiwaniu detonacyjnym .....	105
4.9.4. Naprężenia w natryskanej powłoce na podstawie krzywizny wygięcia próbki ..	106
4.10. Podsumowanie .....	111
<b>5. Modelowanie naprężeń własnych w procesie natryskiwania termicznego</b> .....	114
5.1. Wstęp – modelowanie fizyczne procesu i generowania naprężeń własnych .....	114
5.2. Metodologia przyjęta do modelowania naprężeń własnych w termicznie nakładanych powłokach .....	117
5.3. Modelowanie uderzenia cząstek przy użyciu programu ANSYS-AUTODYN .....	120
5.4. Wybrane wyniki obliczeń .....	125
5.5. Modelowanie uderzenia cząstek w podłoże .....	128
5.6. Uderzenie cząstek Ti w podłoże Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> i cząstek w podwarstwę w procesie natrysku detonacyjnego .....	129
5.6.1. Wpływ temperatury początkowej cząstki .....	132
5.7. Model termomechaniczny procesu termicznego natryskiwania .....	135
5.7.1. Rozkłady temperatury w układzie powłoka Ti–podłoże Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> podczas natryskiwania detonacyjnego .....	140
5.7.2. Rozkłady naprężeń w układzie powłoka Ti–podłoże Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , natrysk detonacyjny ..	142
5.7.3. Wpływ temperatury podgrzania podłoża na naprężenia w układzie powłoka Ti–podłoże Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	143
5.8. Wpływ prędkości uderzenia na naprężenia własne w układzie powłoka (Ti)–podłoże (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	154
5.8.1. Wyniki dynamicznych obliczeń uderzenia cząstki materiału powłokowego w podłoże ceramiczne .....	156
5.8.2. Uderzenie cząstek materiału powłokowego Ti w podwarstwę powłoki Ti .....	161
5.8.3. Wyniki obliczeń rozkładów temperatury dla różnych prędkości natryskiwania. 165	
5.8.4. Wyniki obliczeń ugięć płyty i rozkładów naprężeń dla różnych prędkości natryskiwania .....	168
5.9. Podsumowanie .....	173

<b>6. Modelowanie uderzenia pojedynczej cząstki w podłoże</b> .....	175
6.1. Opis modelu.....	175
6.2. Model Steinberga-Guinana .....	178
6.3. Model Johnsona-Holmquista .....	180
6.4. Model pomocniczy Cu-Cu.....	183
6.4.1. Budowa geometryczna i numeryczna .....	183
6.4.2. Symulacja komputerowa .....	184
6.5. Założenia do modelu cząstka Ti natryskiwana na podłoże ceramiczne i metalowe.....	188
6.5.1. Wyniki modelowania natryskiwania cząstki Ti na podłoże ceramiczne $Al_2O_3$ ( $V = 500$ m/s) .....	189
6.5.2. Model natryskiwania cząstki Ti na podłoże ceramiczne $Al_2O_3$ ( $V = 800$ m/s)....	196
6.6. Analiza porównawcza symulacji uderzenia cząstek w podłoże ceramiczne i metalowe ..	201
6.6.1. Cząstka tytanowa .....	201
6.6.2. Cząstka miedziana .....	207
6.6.3. Geometria cząstki po uderzeniu w podłoże .....	215
6.7. Modelowanie uderzenia rozgrzanej cząstki Ti w podłoże ceramiczne.....	216
6.7.1. Model geometryczny .....	216
6.7.2. Wyniki symulacji deformacji modeli .....	218
6.7.3. Rozkład temperatury w układzie cząstka Ti–podłoże $Al_2O_3$ .....	223
6.7.4. Rozkład naprężeń zredukowanych w układzie cząstka Ti–podłoże $Al_2O_3$ .....	224
6.8. Podsumowanie .....	228
<b>7. Badania strukturalne i modelowanie naprężeń własnych w powłokach metalowych natryskiwanych metodą HVOF na ceramike</b> .....	231
7.1. Stanowisko do natryskiwania .....	231
7.2. Badania strukturalne .....	236
7.3. Badania zwilżalności powłok .....	241
7.3.1. Badania zwilżalności w argonie .....	243
7.3.2. Badania zwilżalności w próżni .....	244
7.3.3. Podsumowanie .....	245
7.4. Badania naprężeń własnych w układzie powłoka–podłoże.....	245
7.4.1. Wyznaczanie naprężeń własnych w oparciu o krzywiznę wygięcia próbki.....	246
7.4.2. Badania naprężeń własnych w powłokach metodą rentgenowską (X-ray) .....	251
7.5. Podsumowanie .....	256
7.6. Numeryczna i eksperymentalna analiza naprężeń własnych generowanych w metalicz- nych powłokach nanoszonych metodą HVOF na podłoże $Al_2O_3$ .....	257
7.6.1. Uderzenie cząstek Ti w podłoże $Al_2O_3$ .....	257
7.6.2. Rozkłady temperatury w układzie powłoka Ti, Cu, Ni .....	260
7.6.3. Rozkłady naprężeń w układzie powłoka Ti (Cu; Ni)–podłoże $Al_2O_3$ .....	263
7.6.4. Podsumowanie .....	267
<b>8. Badania odkształceń i naprężeń w natryskiwanych powłokach Ti i Cu metodą interfe- rometrii siatkowej</b> .....	269
8.1. Metoda interferometrii siatkowej.....	269
8.2. Technologia siatek dyfrakcyjnych.....	272
8.3. Automatyczna analiza obrazów prążkowych .....	272
8.4. Stanowisko pomiarowe.....	273
8.5. Procedura pomiarowa .....	275

8.6.	Pomiary na powłoce tytanowej natryskanej na podłożu $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	276
8.6.1.	Pomiar przemieszczeń w polu pomiarowym $14,3 \times 14,3$ mm przed wykonaniem nacięcia.....	277
8.6.2.	Pomiar przemieszczeń w polu pomiarowym $14,3 \times 14,3$ mm po wykonaniu nacięcia.....	278
8.6.3.	Pomiar przemieszczeń w polu pomiarowym $14,3 \times 14,3$ mm po wykonaniu drugiego nacięcia.....	281
8.6.4.	Pomiary w małym polu pomiarowym ( $3,7 \times 3,7$ mm).....	284
8.7.	Pomiary na powłoce miedzianej natryskanej na podłożu $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	286
8.7.1.	Pomiar przemieszczeń w polu pomiarowym $14,3 \times 14,3$ mm przed wykonaniem nacięcia.....	287
8.7.2.	Pomiar przemieszczeń w polu pomiarowym $14,3 \times 14,3$ mm po wykonaniu nacięcia.....	288
8.7.3.	Pomiary w małym polu pomiarowym ( $3,7 \times 3,7$ mm).....	291
8.8.	Porównanie odkształceń dla próbek z powłoką Cu i Ti.....	293
8.9.	Modelowanie ugięcia i naprężeń własnych w układach Cu/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ i Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ przed i po przecięciu płyty.....	296
8.9.1.	Model powłoka Cu–podłoże $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	297
8.9.2.	Model powłoka Ti–podłoże $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	299
8.10.	Porównanie wyznaczonych naprężeń własnych.....	302
8.11.	Podsumowanie.....	302
<b>9.</b>	<b>Podsumowanie i wnioski końcowe</b> .....	<b>305</b>
	Bibliografia.....	314