

SPIS TREŚCI

Wykaz oznaczeń i skrótów	11
Przedmowa.....	13
Wstęp	17
1. Natryskiwanie ciepłe powłok	19
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
2. Wybrane właściwości powłok natrykiwanych	50
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
3. Materiały powłokowe do natrykiwania	66
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

4. Badania powłok nanoszonych termicznie metodą płomieniową i detonacyjną	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 ₂ O ₃	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 ₂ O ₃ natrykiwanych metodą detonacyjną na podłoże Al ₂ O ₃	103
4.9.1. Materiały powłokowe	103
4.9.2. Parametry natryskiwania detonacyjnego	104
4.9.3. Pomiary krzywizny wygięcia w próbkach po natrykiwaniu detonacyjnym	105
4.9.4. Naprężenia w natryskanej powłoce na podstawie krzywizny wygięcia próbki ..	106
4.10. Podsumowanie	111
5. Modelowanie naprężeń własnych w procesie natryskiwania termicznego	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 ₂ O ₃ 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 ₂ O ₃ podczas natryskiwania detonacyjnego	140
5.7.2. Rozkłady naprężeń w układzie powłoka Ti–podłoże Al ₂ O ₃ , natrysk detonacyjny ..	142
5.7.3. Wpływ temperatury podgrzania podłoża na naprężenia w układzie powłoka Ti–podłoże Al ₂ O ₃	143
5.8. Wpływ prędkości uderzenia na naprężenia własne w układzie powłoka (Ti)–podłoże (Al ₂ O ₃)	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

6. Modelowanie uderzenia pojedynczej cząstki w podłoże	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
7. Badania strukturalne i modelowanie naprężeń własnych w powłokach metalowych natryskiwanych metodą HVOF na ceramice	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 metalicznych 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
8. Badania odkształceń i naprężeń w natryskiwanych powłokach Ti i Cu metodą interferometrii siatkowej	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 Al_2O_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 Al_2O_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/ Al_2O_3 i Ti/ Al_2O_3 przed i po przecięciu płyty.....	296
8.9.1.	Model powłoka Cu–podłoże Al_2O_3	297
8.9.2.	Model powłoka Ti–podłoże Al_2O_3	299
8.10.	Porównanie wyznaczonych naprężeń własnych.....	302
8.11.	Podsumowanie.....	302
9.	Podsumowanie i wnioski końcowe.....	305
	Bibliografia.....	314