

Streszczenie w języku polskim

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Material characterization of SLM-printed duplex stainless steel

Mengistu Jemberu Dagnaw, M.Sc.

Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy wpływu procesu laser powder bed fusion (LPBF), celowej modyfikacji składu chemicznego niklem oraz obróbki cieplnej po wytwarzaniu na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne i zachowanie elektrochemiczne stali nierdzewnej typu super duplex 2507 (SDSS). W pracy porównano trzy układy materiałowe wytworzone metodą LPBF: standardową stal SDSS 2507, stop SDSS 2507 +3% mas. Ni oraz stop SDSS 2507 +6% mas. Ni. Materiały te traktowano jako specyficzne stany metalurgiczne wynikające z procesu LPBF, a nie jako bezpośrednie odpowiedniki stali duplex wytwarzanych metodami konwencjonalnymi, ponieważ LPBF powoduje szybkie krzepnięcie, cykliczne przegrzewanie, strome gradienty cieplne oraz nierównowagowy stan fazowo-defektowy.

Główny problem badawczy wynika z ograniczonego tworzenia austenitu podczas procesu LPBF. W stali SDSS 2507 bardzo szybkie chłodzenie może prowadzić do zachowania osnowy silnie wzbogaconej w ferryt, natomiast wielokrotne oddziaływanie lasera, lokalna niejednorodność chemiczna, odkształcenia szczątkowe i defekty procesu mogą wpływać na późniejsze przemiany fazowe oraz odpowiedź korozyjną. W rozprawie oceniono, czy dodatek niklu oraz wybrane warianty wyżarzania odprężającego i przesycania umożliwiają kontrolę równowagi fazowej ferryt-austenit, morfologii faz, heterogeniczności orientacji, wytrzymałości, plastyczności, odporności udarowej i laboratoryjnych deskryptorów elektrochemicznych.

Program badań obejmował charakterystykę proszków, dobór okna parametrów LPBF na podstawie porowatości, mikroskopię optyczną i skaningową, mikroanalizę EDS, dyfrakcję rentgenowską, dyfrakcję elektronów wstecznie rozproszonych, transmisyjną i skaningowo-transmisyjną mikroskopię elektronową, pomiary twardości, statyczną próbę rozciągania, nienacinaną próbę udarności Charpy'ego, pomiary potencjału obwodu otwartego, cykliczną polaryzację potencjodynamiczną oraz elektrochemiczną spektroskopię impedancyjną. Zastosowano również ograniczony przepływ analizy przesiewowej wspomaganą uczeniem maszynowym. Ten element służył do porządkowania trendów składu, przetwarzania, obróbki cieplnej i odpowiedzi elektrochemicznej na poziomie deskryptorów, lecz nie zastępował bezpośrednich badań elektrochemicznych i nie stanowił niezależnego dowodu odporności na korozję lokalną.

Wyniki wykazały, że standardowa stal SDSS 2507 oraz stop +3% mas. Ni pozostały silnie ferrytyczne po procesie LPBF i po badanych obróbkach odprężających. Przesycanie w temperaturze 1100 °C przywróciło prawie zrównoważony stan duplex w stopie standardowym, natomiast w stopie +3% mas. Ni doprowadziło do struktury wzbogaconej w austenit. Stop +6% mas. Ni wykazywał znacznie większy udział austenitu już w stanie po wytworzeniu i po wyżarzaniu odprężającym, a po przesycaniu w temperaturze 1150 °C stał się silnie austenityczny. Wyniki te potwierdzają, że dodatek niklu sprzyja stabilizacji austenitu, ale jednocześnie pokazują, że większa zawartość niklu nie gwarantuje automatycznie optymalnie zrównoważonej mikrostruktury duplex.

Badania mechaniczne ujawniły wyraźny kompromis typu proces-mikrostruktura-właściwości. Stany po wytworzeniu oraz wybrane stany po wyżarzaniu odprężającym zachowywały na ogół większą twardość i wytrzymałość na rozciąganie, co jest zgodne z obecnością ferrytu, dziedziczoną po LPBF drobnością struktury i heterogenicznością orientacji. Przesycanie poprawiało plastyczność oraz odpowiedź udarową, lecz obniżało wytrzymałość wskutek redukcji efektów umocnienia pochodzących z procesu LPBF i wzrostu udziału austenitu. W badanym układzie najwyższą ścieżkę wytrzymałości na rozciąganie zapewnił stop SDSS 2507 +3% mas. Ni po wyżarzaniu odprężającym w zakresie 400-450 °C, natomiast stany przesycane były korzystniejsze przy priorytecie plastyczności i odporności udarowej.

Odpowiedź elektrochemiczna zależała od przyjętego kryterium oceny. Gęstość prądu korozyjnego, rezystancja polaryzacyjna, rezystancja przeniesienia ładunku, potencjał przebicia i potencjał repasywacji nie wskazały jednego, uniwersalnie najlepszego stanu materiału. Ranking zmieniał się wraz z wybranym deskryptorem oraz ścieżką stop-obróbka cieplna. Wyniki analizy wspomaganą uczeniem maszynowym interpretowano zatem wyłącznie jako pomocniczą warstwę porządkującą trendy, zgodną z wynikami polaryzacji cyklicznej i impedancji, a nie jako model trwałości eksploatacyjnej lub predykcję odporności na korozję lokalną.

Głównym wkładem rozprawy jest opracowanie kryterialnej mapy ścieżek technologiczno-materiałowych, łączącej parametry LPBF, modyfikację niklem, obróbkę cieplną, skład fazowy, stan krystalograficzny, odpowiedź mechaniczną oraz elektrochemiczne deskryptory przesiewowe. Praca pokazuje, że LPBF-wytwarzana stal SDSS 2507 nie może być oceniana wyłącznie przez porowatość, zawartość niklu albo temperaturę obróbki cieplnej. Jej właściwości wymagają zintegrowanej interpretacji w układzie proces-mikrostruktura-właściwości-korozja, z uwzględnieniem kompromisów między przywracaniem równowagi fazowej, zachowaniem wytrzymałości, odpornością udarową, pasywnością i zdolnością do repasywacji.