

mgr. inż. Jakub Łuszczek  
Szkoła Doktorska  
Wojskowa Akademia Techniczna  
ul. Sylwestra Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa

Warszawa. 18.06.2024 r.

## **Streszczenie rozprawy doktorskiej pt. „Trwałość zmęczeniowa stykowa i mechanizm uszkodzeń kół zębatych ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM”**

Duża dynamika rozwoju dostępnych techniki przyrostowych spowodowała coraz szersze ich wykorzystywanie w procesach produkcyjnych gotowych elementów. Na tle wciąż doskonalonych konwencjonalnych procesów technologicznych, techniki przyrostowe, takie jak selektywne stapianie laserowe, może stanowić alternatywne rozwiązanie. Duża uniwersalność techniki SLM w zakresie kształtu finalnego wyrobu w połączeniu z podejściem NNS (ang. Near Net Shape), mającym na celu minimalizację liczby zabiegów postprocesowych i uzyskanie dużej oszczędności wykorzystanego w procesie selektywnego stapiania laserowego materiału, kreśli perspektywę jej szerokiego zastosowania w produkcji między innymi kół zębatych.

Jedną z zasadniczych kwestii podjętych w pracy było zbadanie trwałości zmęczeniowej stykowej i identyfikacja przebiegu zużywania powierzchni bocznych zębów kół zębatych walcowych wytwarzanych techniką SLM ze stali 21NiCrMo2. W celu potwierdzenia możliwości alternatywnego, praktycznego zastosowania kół zębatych wytwarzanych przyrostowo, wyniki badań zmęczeniowych odniesiono do rezultatów uzyskanych dla elementów o tej samej geometrii, wykonanych z wykorzystaniem techniki konwencjonalnej.

Szeroki zakres badań przedstawiony w pracy dotyczył procesu doboru parametrów selektywnego stapiania laserowego stali 21NiCrMo2 z wykorzystaniem techniki SLM, który obejmował trzy zmienne: moc wiązki promieniowania lasera ( $P_L$ ), prędkość naświetlania ( $v_s$ ) i odległość między wektorami naświetlania ( $h_d$ ). Dobór parametrów realizowano w oparciu o pomiary udziału pustek wewnątrz struktury materiału, a także porównanie właściwości mechanicznych elementów modelowych wytwarzanych z wykorzystaniem wytypowanych grup parametrów. Etap ten wzbogacono o adaptacje i praktyczne wykorzystanie matematycznego modelu kwadratowej regresji powierzchni odpowiedzi, który pozwalał na estymację udziału pustek w strukturze materiału w zależności od wartości rozważanych zmiennych niezależnych. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań wytypowano jedną grupę parametrów:  $P_L = 240$  W,  $v_s = 600$  mm/s,  $h_d = 0,10$  mm/s, z wykorzystywaniem których wytworzone elementy modelowe charakteryzowały się średnią wartością porowatości 0,13%. Dzięki realizacji szeregu badań mikrostrukturalnych, wytrzymałościowych, w tym niskocyklowej trwałości zmęczeniowej, uzyskano pełną charakterystykę materiału 21NiCrMo2 wytwarzanego z wykorzystaniem techniki SLM w stanie po wydruku i po obróbce cieplnej

w postaci wyżarzania odprężającego. Ponadto wyniki te zestawiono z właściwościami uzyskanymi dla materiału wytworzonego konwencjonalnie w stanie po normalizacji.

Z uwagi na konieczność uzyskania twardej, odpornej na zużywanie ściernie warstwy wierzchniej boków zębów, w pracy określono również wpływ obróbki cieplno-chemicznej (nawęglania, hartowania i odpuszczania niskiego) na właściwości mechaniczne elementów wytwarzanych przyrostowo. Zarejestrowane wartości poszczególnych parametrów wytrzymałościowych porównano z wartościami odnotowanymi dla materiału uzyskanego konwencjonalnie, w tym samym stanie.

Poddane badaniom koła zębate wytworzone techniką SLM charakteryzowały się wartościami parametrów chropowatości powierzchni bocznych zębów wynoszącymi  $R_a = 12,82 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 80,89 \mu\text{m}$ , a także niską klasą dokładności wykonania (klasa 11 według PN-ISO 1328-1;2:2015), co wymusiło konieczność realizacji obróbki wykańczającej w postaci szlifowania obwodniowego. W wyniku usunięcia warstwy materiału, podczas obróbki mechanicznej, następowało otwarcie porowatości strukturalnej zaobserwowanej w postaci defektów na powierzchni bocznej zębów kół zębatach. Dalsze analizy strukturalne wykazały nierównomierność rozkładu porowatości na obwodzie wieńca zębatego, a zarejestrowane lokalnie wartości udziału pustek wynosiły mniej niż 1%. Wzrost wartości porowatości kół zębatach powiązано z warunkami procesu stapiania proszku i ograniczoną efektywnością odprowadzania odprysków cząstek materiału podczas laserowego naświetlania warstwy proszku w zastosowanej maszynie przyrostowej. Ponadto wyniki badań właściwości mechanicznych wytworzonych kół zębatach techniką SLM wskazywały na wyższą twardość warstwy wierzchniej (755 HV1), niż w przypadku kół wykonanych konwencjonalnie (710 HV1), przy jednocześnie zbliżonych grubościach warstwy utwardzonej (0,8 mm - 0,9 mm).

Analiza wyników badań zmęczeniowych trwałości stykowej kół zębatach zrealizowanych z wykorzystaniem stanowiska pracującego w układzie mocy krążącej wykazała, że zużycie masowe badanych kół zębatach wytworzonych przyrostowo, po osiągnięciu bazowej liczby cykli zmian obciążenia ( $N = 5 \cdot 10^6$  cykli), w całym zakresie zadawanych obciążeń ( $\sigma_{\text{HI}} = 1683 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\text{HII}} = 1807 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\text{HIII}} = 1904 \text{ MPa}$ ) było niższe o 39-55% w odniesieniu do kół wytworzonych konwencjonalnie, co uzasadniono większą twardością powierzchni bocznych kół zębatach wytworzonych techniką SLM. Na powierzchniach bocznych zębów zaobserwowano obecność mikropittingu i rozwijającego się pittingu, przy czym maksymalny udział sumarycznej powierzchni zarejestrowanych ubytków w kołach wytworzonych konwencjonalnie wyniósł 2,33%, a w kołach wytworzonych przyrostowo – 7,79%. Zasadniczy wpływ na mechanizm zmęczeniowego zużycia powierzchni bocznych zębów kół wytwarzanych przyrostowo wywiera obecność porowatości otwartej, podskórnej i podpowierzchniowej, co dało podstawę do wyróżnienia 4 różnych mechanizmów powstawania wykruszeń w miejscach objętych występowaniem defektów.

Ponadto losowe rozmieszczenie porowatości wpłynęło na obserwowaną nierównomierność zużywania powierzchni bocznych poszczególnych zębów na obwodzie wieńca zębatego. Maksymalna zarejestrowana głębokość wykruszeń w postaci jamek pittingowych na powierzchniach bocznych zębów kół wytwarzanych techniką konwencjonalną wyniosła ok. 178  $\mu\text{m}$ , a w przypadku kół wytworzonych techniką SLM - 400  $\mu\text{m}$ . Średnie wartości głębokości wykruszeń, po osiągnięciu bazowej liczby cykli, były blisko czterokrotnie większe w kołach wytwarzanych przyrostowo.