

## Streszczenie

W dobie coraz większej różnorodności rozwiązań technicznych oraz specjalizacji wyrobów wzrasta zapotrzebowanie na elastyczność systemów wytwórczych, które byłyby zdolne zapewnić wymagany poziom indywidualizacji oraz sprostać coraz krótszym cyklom wytwórczym. Jednym z efektywnych narzędzi zapewnienia indywidualizacji są technologie generatywne, które mogą być również wykorzystane jako metoda wytwarzania cienkościennych wyrobów prototypowych w branży automotive. Posiadają one jednak wadę w postaci tworzenia materiału o jednorodnych własnościach, podczas gdy specyficzna funkcjonalność elementów cienkościennych wynika zwykle z ich zróżnicowania w określonych miejscach (np. za pomocą lokalnych przetłoczeń). Skutecznym narzędziem różnicowania własności materiałowych może być wykorzystanie technik lokalnej modyfikacji, które umożliwią dostosowanie funkcjonalności istniejących elementów. Z uwagi na selektywność oraz wysoką koncentrację energii, doskonale do tego celu nadają się technologie laserowe, które zapewniają możliwość obróbki nawet bardzo małych obszarów. W przypadku stali wytwarzanych generatywnie możliwym sposobem modyfikacji jest lokalne umacnianie, które może być z powodzeniem zrealizowane z wykorzystaniem technologii hartowania laserowego

Proces projektowania sposobu lokalnej modyfikacji jest obecnie wspomagany metodami numerycznymi poprzez określanie wpływu danego kształtu umocnienia na funkcjonalność elementu oraz poprzez obliczenia optymalnego kształtu umocnienia do danego zastosowania. Jednak geometrie analizowanych i proponowanych lokalnych obszarów modyfikowanych stanowią wyzwanie zarówno pod kątem technologiczności wytwarzania jak i możliwości charakteryzacji rzeczywistych rezultatów obróbki na potrzeby analizy ich funkcjonalności. Obiecującym rozwiązaniem tego zagadnienia może być charakteryzacja obszaru umocnionego na podstawie wirtualnego modelu obróbki laserowej. Wykorzystanie w tym celu symulacji wielofizycznej procesu hartowania laserowego umożliwi predykcję rezultatów rzeczywistej obróbki w postaci kształtu obszaru umocnionego. Dodatkowo symulacje takie zapewniają dane o geometrii umacniania w formie cyfrowej, możliwej do bezpośredniej adaptacji w symulacji dynamiki nieliniowej.

W ramach niniejszej pracy podjęto szereg prac badawczych, których celem było symulacyjne scharakteryzowanie strefy przemian materiałowych reprezentujących umocnienie w eksperymentalnej stali przetwarzanej generatywnie (StaVari) na użytek opracowania sposobu lokalnego umacniania za pomocą hartowania laserowego.

Celem otrzymania założonych rezultatów dokonano szczegółowej analizy zagadnienia technologii hartowania laserowego, metodyki jego numerycznego modelowania oraz charakteryzacji badanego materiału. Przeprowadzono obszerne badania materiałowe celem określenia parametrów termofizycznych na użytek symulacji numerycznej oraz określenia stanu materiału przed i po obróbce laserowej. Na drodze eksperymentalnej opracowano cztery zestawy parametrów obróbki reprezentujące okno procesowe i umożliwiające uzyskanie umocnienia oraz przeprowadzono pomiary na użytek przyszłej walidacji modelu symulacyjnego. Model wirtualny, reprezentujący proces hartowania, opracowano w środowisku COMSOL Multiphysics, które umożliwia łączenie opisu różnych zjawisk zachodzących w czasie obróbki (np. przepływu ciepła i przemian fazowych). W ramach prac symulacyjnych opracowano główny model przepływu ciepła wewnątrz elementu a także wyznaczono zastępczy model wiązki oscylacyjnej i opracowano metodę jego walidacji. Główny model symulacyjny przepływu ciepła zvalidowano w oparciu o pomiary procesowe i rozszerzono o funkcjonalność wyznaczania obszaru umocnienia pełnego i częściowego, odpowiadającego strefie przejściowej. Zaproponowano trzy modele umacniania: jedno-, dwu- i wieloparametryczny, różniące się złożonością opisu umocnienia. Dla modelu dwuparametrycznego opracowano metodę zastępczego wyznaczania zależności temperatur  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$  (częściowej i pełnej austenitizacji) od szybkości nagrzewania. Dla

modelu wieloparametrycznego opracowano metodę opisu przemian materiałowych zdefiniowanych wykresem CTPc poprzez równania przemian dyfuzyjnych oparte o model Leblonda-Devouxa.

Po przeprowadzeniu analizy wyników symulacji z różnymi modelami umocnienia, jako najkorzystniejszy pod względem dokładności predykcji kształtu obszaru umocnionego wskazano model dwuparametryczny, oparty o zależności temperatur  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$  od szybkości nagrzewania. Przeprowadzono również analizę jakościową opartą o mapy rozkładu twardości, reprezentującą rzeczywisty rozkład umocnienia w porównaniu z wynikami symulacyjnymi. Na podstawie wybranego modelu przeprowadzono charakteryzację wyników procesu hartowania, uwzględniającą opis rezultatów obróbki, które w przypadku analizy na drodze badań eksperymentalnych byłyby niedostępne do zbadania.

Wyniki prac znalazły również zastosowanie aplikacyjne. Opracowana technologia hartowania laserowego została zaadaptowana i wykorzystana do lokalnego umacniania elementu cienkościennego typu crashbox w ramach projektu AM-Crash. Modele symulacyjne procesu, opracowane w ramach niniejszych badań, sprawdzono pod kątem wykorzystania do takiego zadania technologicznego. Zostały one również wykorzystane na użytek wyznaczenia przebiegu mocy pozwalającego na redukcję długości obszaru przejściowego wzrostu twardości oraz do opracowania wirtualnego laboratorium hartowania laserowego opartego o aplikacje symulacyjne z dedykowaną funkcjonalnością. Wyniki pracy stanowią również punkt wyjścia do rozwoju bardziej zaawansowanych metod lokalnego umacniania, opartych o wykorzystanie wirtualnych modeli obszarów umocnionych i symulacyjne wspomaganie doboru parametrów obróbki laserowej.