

Sujet. Elaboration d'un simulateur phénoménologique rapide du procédé *Directed Energy Deposition*

Contexte. Projet ANR « KAM4AM ». Partenaires : G-SCOP, I2M, DPRI.

La transition vers l'Industrie 4.0 s'appuie fortement sur l'intégration de nouvelles technologies et du numérique, mais aussi sur l'exploitation de la connaissance. Dans le domaine récent de la fabrication additive (FA), la technologie DED (*Directed Energy Deposition*) connaît actuellement un intérêt croissant chez les industriels du fait qu'elle présente l'avantage d'être moins coûteuse en termes d'équipement et de matériau. Toutefois, la mise en œuvre de ce procédé, et en particulier la génération des trajectoires de dépôt de matière, nécessite de solides connaissances de la part des ingénieurs et techniciens, et se montre ainsi particulièrement difficile à automatiser. Assister la fabrication est alors un enjeu fort pour l'usine du futur, et les logiciels de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) sont des outils essentiels dans cette activité. A ces problèmes viennent s'ajouter de nouvelles difficultés telles que l'impossibilité de faire repasser l'outil de dépose là où de la matière a déjà été déposée et la difficulté de raccorder correctement des cordons de matière aux interfaces des différentes *features*.

Objectif de la thèse.

Afin de réduire l'écart entre le modèle numérique du produit optimisé et la pièce finale issue du procédé DED, le verrou scientifique à lever consiste en une formalisation pertinente des contraintes de fabrication à intégrer dès la phase de conception préliminaire, p.ex. lorsqu'on utilise un logiciel d'optimisation topologique (OT) pour chercher la forme optimale d'un produit par rapport à un cahier des charges donné. Il s'agit d'un défi majeur aussi bien du point de vue de la conception que de celui du procédé. Cependant, la formalisation mathématique d'un ensemble de critères tenant compte des spécificités du procédé DED n'est pas une tâche anodine. Pour ce faire, afin de développer un formalisme pertinent et, ainsi, intégrer dans la formulation du problème d'OT les contraintes technologiques principales du procédé DED, il est indispensable de développer deux modèles numériques multi-échelle du procédé. En effet, pour pouvoir décrire correctement les phénomènes thermomécaniques complexes du procédé DED, deux échelles seront prises en compte: l'échelle microscopique au niveau élémentaire du matériau et l'échelle mésoscopique correspondant à une paroi (considérée comme un empilement d'éléments de base). Un modèle éléments finis (EF) multi-échelle à haute-fiabilité entièrement paramétré (HF-MSFEM) sera développé pour évaluer l'influence des paramètres choisis (stratégie de dépose, quantité de matière déposée, vitesse de dépôt, température de dépôt, ...) sur l'évolution de l'histoire thermique du matériau. Deux volumes élémentaires représentatifs (VERs) appropriés seront alors définis pour chaque échelle. Le VER à l'échelle microscopique intégrera la présence de porosités et fissures. Il sera utilisé pour extraire la loi constitutive équivalente du milieu continu homogène pour caractériser, à l'échelle supérieure, le comportement du cordon. À l'échelle mésoscopique (celle du cordon, qui représente le VER de cette échelle), deux analyses seront conduites: thermique et mécanique. Le résultat de l'analyse thermique permettra d'obtenir l'historique thermique du matériau au cours du processus en fonction de paramètres propres au matériau (conductivité thermique, transformation de phase, etc.) et ceux qui décrivent la source de chaleur. Ces informations seront utilisées pour évaluer la forme, les contraintes et déformations résiduelles lors de la simulation du dépôt et de l'analyse mécanique. Ensuite, en s'appuyant sur les résultats numériques issus du modèle HF-MSFEM et sur ceux expérimentaux obtenus sur des géométries « benchmarks » un modèle phénoménologique rapide et fiable sera réalisé. Le but de ce modèle phénoménologique (qui pourrait être formulé comme un méta-modèle) est de fournir, avec une précision raisonnable et des coûts de calcul réduits, les contraintes / déformations résiduelles pour différentes combinaisons des paramètres du procédé DED. La génération du méta-modèle se fera soit à l'aide de méthodes classiques (p.ex. les réseaux de neurones) soit à l'aide de la stratégie de *meta-modelling* basée sur les hyper-surfaces NURBS développée à l'I2M. Le méta-modèle résultant sera validé et amélioré au moyen d'une campagne expérimentale visant à étudier l'influence de la morphologie des éléments de base sur la distorsion de la pièce.

Déroulement de la thèse.

1. Réaliser l'état de l'art des stratégies de modélisation multi-échelle du procédé DED.
2. Réaliser l'état de l'art des stratégies de réduction de modèle et meta-modelling.
3. Création du HF-MSFEM. Définition de la gamme de paramètres du procédé DED à intégrer dans le modèle.
4. Choix d'une méthode de réduction de modèle pertinente. Génération du méta-modèle rapide du procédé DED.
5. Validation du méta-modèle via les résultats numériques issus du HF-MSFEM et via ceux obtenus à l'aide d'essais de fabrication et mesure de distorsion sur des pièces benchmark.
6. Formulation d'un critère synthétique de nature géométrique/mécanique à intégrer dans l'OT

La thèse débutera en Septembre 2021, pour une durée de 36 mois.

Le(la) candidat(e) recherché(e) pourra effectuer des activités d'enseignement.

Encadrants : Enrico PANETTIERI, Marco MONTEMURRO

Documents à envoyer :

- Curriculum Vitae
- Lettre de Motivation
- Lettre de recommandation
- Relevé des notes (des années correspondant à Bac+4 et Bac+5)

Contact : enrico.panettieri@ensam.eu, marco.montemurro@ensam.eu

Topic. Development of a fast phenomenological model of the Directed Energy Deposition 3D printing technique.

Context. ANR project « KAM4AM ». Partners: G-SCOP, I2M, DPRI.

The shift towards the so-called Industry 4.0 is highly centered on the integration of new technologies and numerical tools guided by the processing of a significant quantity of data.

Among the additive manufacturing technologies, the DED (*Directed Energy Deposition*) technology has recently known an increasing interest in industry because of its relative low cost in terms of material and tools. Nonetheless, an efficient and automatic tuning of this technology requires an in-depth knowledge of the thermo-mechanical phenomena occurring at the local scale of the part in particular when generating curvilinear trajectories.

In the context of the Industry 4.0, the synergy between the manufacturing processes and the computer-aided manufacturing (CAM) software represents a key-aspect for its growth. For the DED technology to reach a convincing level of maturity and robustness, specific difficulties, related in particular to the identification of an efficient strategy to move the deposition tool for complex geometries, need to be treated.

Thesis objectives

In order to reduce the difference between the numerical model of the optimized part and that obtained from the DED process, the key aspect to take into account is the formalization of the manufacturing constraints to be integrated since the preliminary design phases, e.g. when a topology optimization (OT) is performed to identify the optimal material distribution in a part with given requirements. This aspect is a major challenge from both the design and manufacturing process perspectives. The mathematical formalization of a set of criteria taking into account the specificities of the DED process is anything but trivial.

To tackle this problem, the definition of a pertinent mathematical formalization of the manufacturing constraints of the DED process and its integration within the solution scheme of a topology optimization problem as well as the development of a multi-scale model of the process, to correctly describe the complex thermomechanical phenomena involved at different levels, is crucial: at the microscopic scale the bulk material is considered while, at the mesoscopic scale, the focus is on a the model of a wall which is the result of the superposition of consecutive layers.

A fully parametric multi-scale high-fidelity finite element (HF-MSFEM) will be developed to quantify the influence of specific parameters of the DED process (deposition strategy, quantity of deposited material, deposition feed rate, temperature of deposition, etc.) on the evolution of the thermal history of the material. Two suitable representative volume elements (RVEs) will be defined for each scale. The RVE of the microscopic scale will incorporate the presence of porosity and cracks and it will be used to extract the constitutive law of the corresponding equivalent homogeneous medium to characterize, at the upper scale, the thermomechanical behavior of the wall which corresponds to the RVE of the mesoscopic scale.

At the mesoscopic scale, two analyses will be carried out: a thermal analysis and a mechanical one. The result of the thermal analysis will allow to obtain the thermal history of the material during the deposition process with respect to specific parameters of the material (thermal conductivity, phase transition, etc.) and those characterizing the heat source.

This information will be used to evaluate the part distortion, the residual stresses and strains during the simulation of both the material deposition and the mechanical analysis. Following this step, taking advantage of the numerical results coming from the HF-MSFEM model and those obtained from experiments carried out on reference geometries, an efficient and reliable phenomenological model will be created.

The objective of this phenomenological model (which can be formulated as a meta-model) is to provide, with both reasonable precision and limited computational cost, the residual stresses and deformations for different

combinations of DED process parameters. The development of the meta-model will be obtained *via* both classical methods of model reduction (*e.g.* neural networks) and a recently built-in strategy, developed at I2M, to generate meta-models based on NURBS hyper-surfaces. The resulting meta-model will be assessed and improved by means of an experimental campaign aimed at evaluating the influence of the morphology of the structure to be manufactured on the global part distortion.

Contents of the thesis.

1. Carry out a critical literature review of the numerical strategy to simulate multi-scale models of the DED process.
2. Carry out a critical literature review of the reduction strategies and meta-modeling.
3. Development of the HF-MSFEM and definition of the parameters set of the DED process to be considered into the model (sensitivity analyses).
4. Selection of the reduction method and creation of the meta-model of the DED process.
5. Validation of the meta-model by means of both the numerical results obtained via the HF-MSFEM and those measured on *ad-hoc* reference geometries of manufactured pieces.
6. Formulation of a geometrical/mechanical criterion to be integrated within the topology optimization algorithm.

The beginning of the thesis is expected to be in September 2021, for a duration of 36 months.

The candidate may carry out teaching activities.

Supervisors: Enrico PANETTIERI, Marco MONTEMURRO

Required documents:

- Curriculum Vitae
- Cover letter
- Recommendation letter
- Transcripts of Records relative to the last two years of the Master Degree.

Contact : enrico.panettieri@ensam.eu, marco.montemurro@ensam.eu