

Renforcement de la structure interne de pièces imprimées par une technique de remaillage adaptée à l'extrusion en continu

S. Madugula¹, L. Giraud-Moreau¹, P.-A. Adragna¹,

¹ICD-LASMIS, Université de Technologie de Troyes, France, {sashi.madugula, laurence.giraud-moreau, adragna}@utt.fr

Résumé — L'impression 3D par extrusion en continu est une évolution du procédé de fabrication additive par dépôt de fil chaud permettant une meilleure homogénéité de la pièce fabriquée, comparé au procédé actuel d'impression 3D. Tenant compte des contraintes liées à ce procédé, l'objectif est de faire évoluer la structure interne d'un objet par rapport aux contraintes mécaniques subies. Dans cet article, une méthode d'optimisation est proposée afin de renforcer la structure interne dans les zones sollicitées mécaniquement. Cette méthode est basée sur une procédure itérative utilisant des techniques de remaillage et d'analyse par simulations numériques par éléments finis. La démarche proposée est appliquée dans cet article pour une poutre en PLA soumise à de la flexion quatre points.

Mots clés — impression 3D, remaillage, simulation numérique, fabrication additive, extrusion continue

1. Introduction

La Fabrication additive est un procédé de fabrication qui a commencé à émerger dans les années 80 avec la stéréolithographie et qui permet de fabriquer une pièce par ajout de couches successives de matières. Aujourd'hui, ce procédé laisse entrevoir une alternative très intéressante aux procédés classiques de fabrication et est particulièrement bien adaptée dans le cas de pièces unitaires, de petites séries ou de pièces à formes internes complexes. Il offre une réponse en solutions de réparation, pour une production locale et à la demande et est de plus très pertinent dans le contexte actuel de personnalisation, l'absence d'outil permettant à ce procédé d'être extrêmement flexible. Aujourd'hui, parmi les différents procédés de fabrication additive, le plus diffusé et le plus abordable est la fabrication additive par dépôt de fil chaud appelé FDM (Fused Deposition Modeling) qui consiste à déposer un matériau thermoplastique sur un support pour construire couche à couche un objet. Le matériau de base est conditionné sous forme de bobine de fil ou de granulats et sa composition est variée tant sur le polymère (PLA, ABS, PETG, ASA, PEI, PEEK etc) que sur son renfort (aucun, poudre ou fibre courte organique ou minérale).

Malgré le nom de prototypage rapide, la fabrication additive par dépôt de fil chaud FDM est un procédé qui peut sembler très lent. Afin d'améliorer le temps d'impression, des travaux ont été menés sur l'optimisation des trajectoires d'impression pour réduire les trajets de déplacement de buse [1, 2] ou maximiser les vitesses de déplacement durant l'impression [3]. D'autres approches consistent à produire localement la pièce sur plusieurs couches successives avant de changer de zone d'impression [6]. Une autre solution consiste à imprimer par extrusion en continu. Le constat est que l'impression 3D classique nécessite de nombreux arrêts d'extrusion du matériau, ce qui provoque de plus des hétérogénéités locales dans la pièce fabriquée et donc des sources de fragilité lors d'une sollicitation mécanique. L'impression 3D par extrusion en continu permet un gain de temps et une meilleure homogénéité de la pièce fabriquée.

Une autre problématique est la tenue mécanique des pièces produites. Certains travaux étudient l'influence des différentes structures internes sur les performances mécaniques de la pièce fabriquées [5], cependant ces structures sont identiques dans toute la pièce et donc pas forcément optimum car

toutes les zones ne subissent pas les mêmes sollicitations mécaniques. D'autres techniques consistent à décrire des structures de taille variable [4] sans pour autant tenir compte de contrainte mécanique. Dans ce papier, on propose un outil d'optimisation des structures internes de pièces imprimées par extrusion en continu afin de tenir compte le plus tôt possible lors de la chaîne numérique de fabrication, des zones fragiles de la pièce où un renfort est nécessaire. La méthode, basée sur des techniques de remaillage afin de contrôler la trajectoire de la buse lors d'une l'impression 3D par extrusion en continu est présentée. Cette technique est couplée à un logiciel de simulation numérique dans une procédure itérative afin de définir la trajectoire optimum permettant de renforcer la pièce dans les zones de forte contrainte où la tenue mécanique doit être améliorée (maillage plus fin). Un exemple d'application est présenté pour une pièce de forme rectangulaire en PLA, de section constante dans la hauteur, imprimée par extrusion en continu et soumise à des efforts en flexion quatre points afin de montrer la pertinence de la méthode.

2. Contrainte d'impression par extrusion continu

L'impression par extrusion en continu consiste à déposer chaque couche de l'objet à imprimer en une seule phase d'impression, sans arrêt de l'extrusion dû à un déplacement de la buse. Dans le cas d'une pièce particulière permettant l'impression par extrusion en continu, l'analyse des trajectoires d'impression générées par un logiciel de tranchage courant a montré que 25% des déplacements de la buse au sein d'une couche d'impression sont des mouvements non productifs. L'objectif premier de l'impression par extrusion en continu est donc le gain de temps.

Pour pouvoir parcourir le motif d'impression sans arrêter l'extrusion de la matière, le parcours de buse doit représenter un graphe Eulérien ou semi-Eulérien. Pour qu'un graphe soit considéré Eulérien, il faut que chaque nœud qui le compose ait un nombre pair de branche. Dans ce cas, chaque nœud du graphe peut être un point de départ du parcours et sera forcément le point d'arrivée du parcours. Pour qu'un graphe soit considéré semi-Eulérien, il faut qu'au maximum deux de ses nœuds aient un nombre impair de branche. Dans ce cas, l'un des deux nœuds impairs sera un point de départ du parcours et l'autre sera forcément le point d'arrivée du parcours.

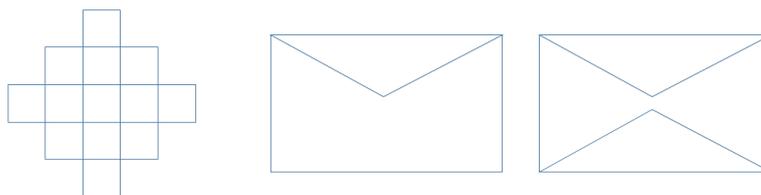


Figure 1 : exemple de parcours Eulérien (à gauche), semi Eulérien (au centre) et non Eulérien (à droite)



Figure 2 : Pièce étudiée, imprimée par extrusion en continu

La figure 2 présente une pièce de forme rectangulaire de dimensions $140 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$, de section constante, imprimée par extrusion en continu en PLA (polymère biodégradable appelé acide

polylactique), ainsi que la structure interne de cette pièce. Dans cet article, toutes les pièces étudiées seront imprimées par extrusion en continu.

3. Optimisation de la structure interne

L'objectif de cet article est d'optimiser la géométrie de la structure interne de la pièce imprimée par extrusion en continu. Une technique simple consiste à tester différentes géométries expérimentalement. Mais cette méthode par essais-erreurs s'avère généralement très coûteuse. Aujourd'hui, dans de nombreux domaines, les simulations numériques par éléments finis sont utilisées et même devenues indispensables afin de limiter les essais expérimentaux et mieux comprendre les procédés. Elles permettent de prédire les sollicitations mécaniques que va subir la pièce et définir ensuite la forme géométrique et les paramètres du procédé les plus adaptés.

Afin de définir la géométrie interne d'une pièce imprimée par extrusion en continu, soumise à des contraintes extérieures, on propose dans cet article une méthode itérative, basée sur l'utilisation de calculs Eléments Finis. Celle-ci consiste à chaque itération à calculer les contraintes mécaniques dans la pièce grâce à un logiciel de simulation numérique puis modifier la structure interne de la pièce afin de renforcer celle-ci dans les zones fragiles où les contraintes dépassent un seuil donné. La méthode choisie pour renforcer la structure interne est inspirée des techniques de remaillage, généralement utilisées pour raffiner ou déraffiner un maillage éléments finis. Comme on peut voir sur la figure 2, la structure interne ressemble à un maillage. Les cellules creuses de cette structure sont délimitées par des parois, de forme triangulaire ou quadrangulaire peuvent être vues comme les éléments d'un maillage. Afin de distinguer ces éléments associés aux cellules creuses de la structure, des éléments finis utilisés lors du maillage de la structure pour le calcul E.F., on parlera dans cet article d'éléments-structure. La méthode proposée ici afin de renforcer la structure interne consiste à subdiviser les cellules creuses dans les zones définies comme fragiles par le calcul E.F., en ajoutant des parois internes. La méthode de remaillage basée sur des techniques de raffinement et développée pour le remaillage au cours de procédés de mise en forme () sera utilisée.

Les différentes étapes de la méthode d'optimisation de la structure interne, permettant de renforcer celle-ci, sont les suivantes :

Structure initiale : La géométrie de la structure interne initiale est définie par l'utilisateur. Elle est composée d'éléments-structure de forme triangulaire ou quadrangulaire qui décrivent des cellules creuses à l'intérieur de la pièce. La matière existe uniquement sur les parois de ces éléments ;

Calcul Eléments Finis : Un maillage Eléments Finis de la structure et un calcul Eléments-Finis sont réalisés sur Abaqus en utilisant un modèle poutre en 2D afin de déterminer les contraintes mécaniques et déformations de la pièce et de sa structure interne lorsque celle-ci est soumise à une sollicitation mécanique donnée ;

Analyse des zones fragiles : Un estimateur d'erreur physique est utilisé afin de détecter les zones fragiles, sur-contraintes compte tenu de critères choisis par l'utilisateur (seuils maxi sur la contrainte, le déplacement...) et définir les éléments-structure à raffiner ;

Test de validité de la structure : En absence de zone fragile, la structure est définie acceptable et peut être imprimée en 3D. Dans le cas contraire, un raffinement de la structure est nécessaire.

Raffinement de la structure : Une nouvelle structure interne est définie à partir de techniques de raffinement des éléments-structure dans les zones fragiles détectées à l'étape de calcul E.F..

Tranchage et impression : Un tranchage de la structure est effectué quand le maillage est déclaré acceptable (suivant les critères définis) pour créer les trajectoires d'impression et générer le fichier

GCODE à transférer à la machine d'impression 3D.

3.1. Analyse des zones fragiles

Un estimateur d'erreur est utilisé afin d'adapter la géométrie de la structure interne à la nature de la solution mécanique. L'objectif de l'estimateur d'erreur est de détecter les zones fragiles de la pièce afin de pouvoir la renforcer là où cela est nécessaire grâce à un raffinement des éléments-structure.

Il consiste ici à détecter les zones sur-contraintes et identifier les éléments-structure à raffiner.

Un ou plusieurs champs mécaniques peuvent être utilisés. Dans ce papier, la contrainte équivalente de Von Mises (définie au point de Gauss de chaque élément fini par une valeur réelle) a été choisie. Si cette valeur dépasse un seuil donné en un élément fini du maillage, alors les deux éléments-structure adjacents (associé à une cellule creuse) doivent être subdivisés. La figure 3 illustre ce principe : la contrainte de Von Mises est supérieure au seuil choisi sur une des parois de la structure interne, la zone est alors définie comme fragile et les deux éléments-structure adjacents (en orange) doivent être raffinés.

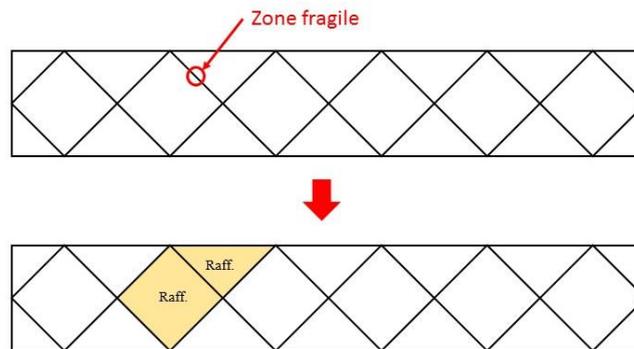


Figure 3 : Estimateur d'erreur, détection des éléments-structure à raffiner

3.2. Raffinement de la structure interne

La méthode de remaillage de la structure interne est basée sur des techniques de raffinement. La méthode de raffinement proposée consiste à raffiner les éléments-structure au voisinage des zones définies comme fragiles par l'estimateur d'erreur. Ce remaillage est purement géométrique, il ne concerne que la structure interne de la pièce et ne doit pas être confondu avec le raffinement d'un maillage éléments-finis (généralement utilisé pour obtenir une solution E.F. plus précise). Ici le remaillage consiste à ajouter des parois à l'intérieur de la structure interne de la pièce et ainsi créer de nouvelles cellules creuses de plus petite taille dans les zones à risque.

Une difficulté supplémentaire lors d'une impression par extrusion en continu est que les règles de raffinement de ces éléments-structure doivent garantir un parcours Eulérien pour permettre l'impression par extrusion continue. La règle simple proposée ici est de raffiner en inscrivant le même type de structure :

- Un élément-structure triangle se raffine en quatre élément-structure triangles : un triangle inscrit et trois triangles dans les coins (voir figure 4) ;
- Une élément-structure quadrilatère se raffine en un élément-structure quadrilatère et quatre élément-structure triangles : un rectangle inscrit et quatre triangles dans les coins (voir figure 5).



Figure 4 : raffinement d'une structure triangle (à gauche), d'une structure quadrilatère (à droite)

Afin de garantir une certaine homogénéité de la structure, un critère de raffinement supplémentaire est ajouté consistant à raffiner un élément structure si celui-ci est entouré de deux éléments adjacents raffiné. La figure 5 présente ce cas précis.

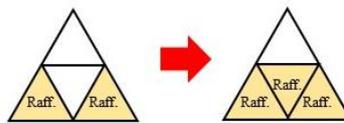


Figure 5 : raffinement supplémentaire

Un tel type de raffinement des éléments-structure permet de conserver un parcours Eulérien et ainsi de permettre l'impression par extrusion en continue de la nouvelle pièce.

4. Etude expérimentale

4.1. Application de la démarche d'optimisation

La démarche proposée est appliquée à un cas simple de poutre en flexion 4 points de dimensions $140 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$. La poutre étudiée est la pièce en PLA présentée figure 2. La figure 6 présente le problème étudié. La pièce est soumise à deux efforts verticaux de 0.7kN chacun. Les calculs Eléments Finis sont réalisés en 2D sur Abaqus. Le maillage éléments finis de la structure est effectué à l'aide d'éléments poutre. Afin de simplifier les calculs, un comportement élastique isotrope avec un module d'Young égal à 1107 MPa et un coefficient de Poisson égal à 0.35 ont été utilisés pour modéliser le matériau dans Abaqus.

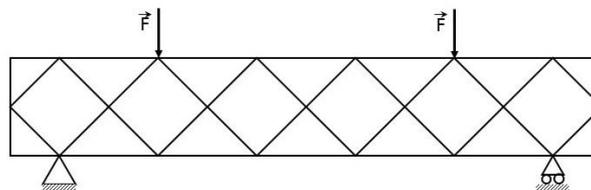
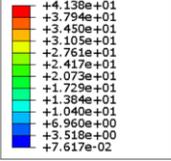
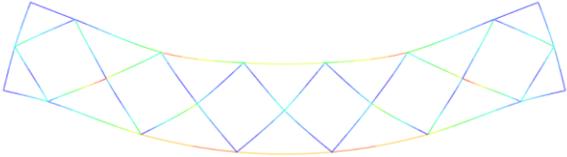
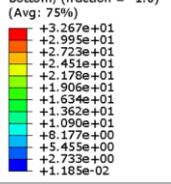
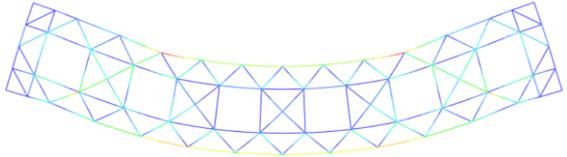
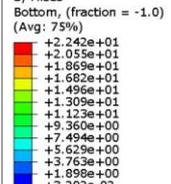
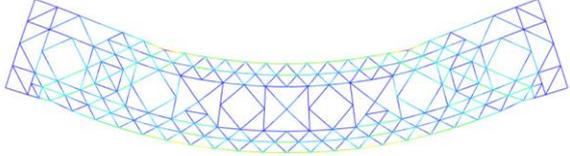
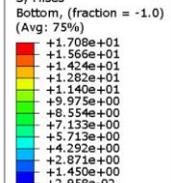
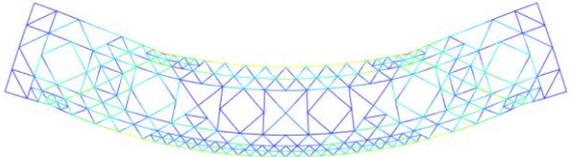


Figure 6 : Flexion 4 points

Table 1 – Valeur maximale de la contrainte de Von Mises à chaque itération

Itération	1	2	3	4
Valeur maximale de la contrainte de Von Mises (Mpa)	41.38	32.67	22.42	17.08

Table 2 – Simulation numériques des itérations de l'optimisation de la structure

Structure initiale 1	<p>S, Mises Bottom, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> 	
Itération 2	<p>S, Mises Bottom, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> 	
Itération 3	<p>S, Mises Bottom, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> 	
Structure finale 4	<p>S, Mises Bottom, (fraction = -1.0) (Avg: 75%)</p> 	

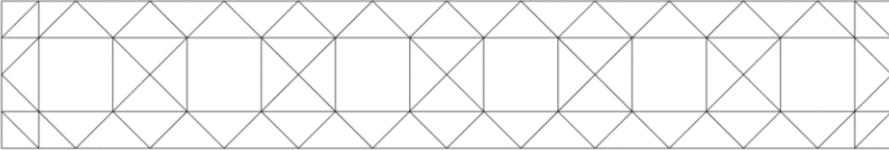
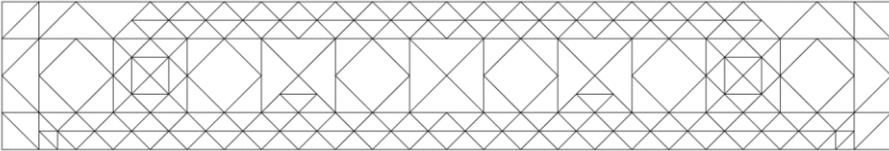
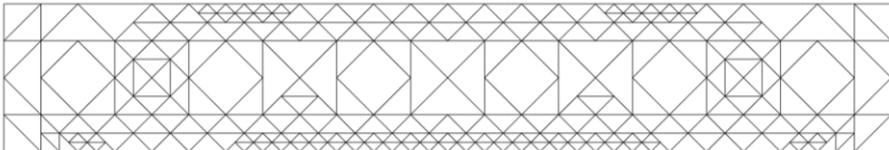
Une longueur de paroi minimale (correspondant à une taille minimale d'arête des éléments-structure) a été imposée lors de la procédure d'optimisation de la structure interne afin de limiter le nombre d'itération. Cette taille minimale est aussi imposée par le procédé lui-même : en effet la longueur de la paroi ne peut pas être inférieure au diamètre de la buse d'impression qui dépose la matière sur le plateau. Ainsi, un élément_structure ne peut être raffiné que si la taille des arêtes après raffinement est supérieure à la longueur minimale définie.

Dans cet exemple, la longueur minimale des arêtes des éléments structure est égale à 2 mm. Le calcul s'est arrêté à la fin de la quatrième itération, la taille minimale étant atteinte.

On peut observer l'évolution de la géométrie interne de la poutre, qui a été renforcée à chaque itération dans les zones sur contraintes. Le champ mécanique représenté sur les pièces déformées après calcul éléments finis est la contrainte de Von Mises, champs mécanique utilisé par l'estimateur d'erreur pour l'analyse des zones fragiles. Le tableau 2 donne la valeur maximale de cette contrainte à chaque itération. On peut observer une diminution de la valeur maximale de cette contrainte à chaque itération grâce au renforcement de la structure interne de la pièce.

La structure finale a alors été tranchée afin de créer la trajectoire d'impression et générer le fichier de transfert à la machine d'impression. La figure 7 présente la pièce imprimée par extrusion en continu.

Table 3 – Résultat des itérations de l'optimisation de la structure

Structure initiale 1	
Itération 2	
Itération 3	
Structure finale 4	

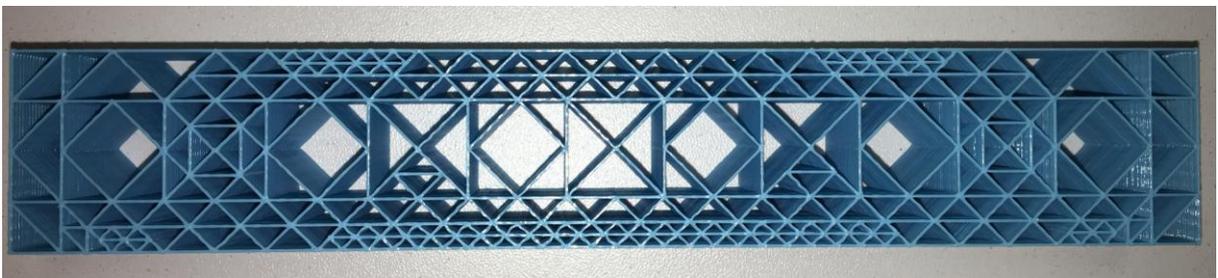


Figure 7 : Pièce imprimée par extrusion en continu, après optimisation de sa structure interne

4.2. Comparaison numérique – expérimental

Les structures ont été imprimées aux différentes étapes et testée en flexion 4 points sur une machine de traction. La comparaison entre le comportement numérique de la structure et sa validation expérimental se limite au comportement rigide car la simulation numérique est uniquement basée sur un comportement élastique.

Table 4 – Valeur de raideur et force à rupture à chaque itération

Itération	2	3	4
Raideur (N/mm)	277,8	454,5	553.0
Force à rupture (N)	143	695	1 060

La comparaison du comportement rigide entre la simulation numérique et les essais de flexion montre une bonne estimation numérique du comportement élastique de la structure par le numérique. Comme attendu, la raideur et la tenue mécanique s'améliore au fur et à mesure des itérations. La structure initiale étant trop souple et n'ayant pas rompu, ses résultats ne sont pas présentés.

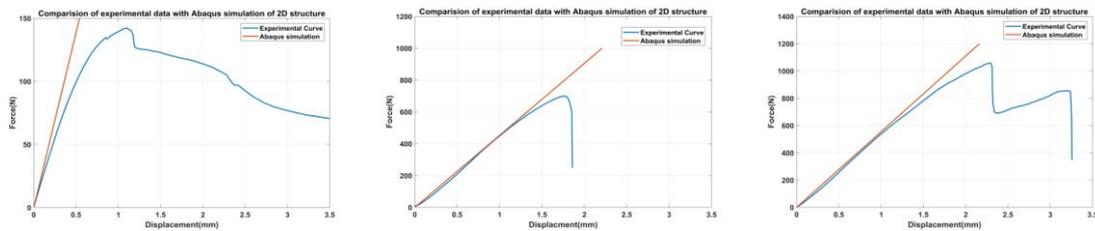


Figure 8 : Courbe force-déplacement en flexion 4 point pour l'itération 2 (à gauche), l'itération 3 (au centre) et l'itération finale 4 (à droite)

4. Conclusion

Une méthode d'optimisation des structures internes pour les pièces imprimées par extrusion en continu a été présentée dans cet article afin de renforcer les pièces dans les zones fragiles. Cette méthode est basée sur un principe itératif intégrant des simulations numériques par éléments finis et des techniques de remaillage de la structure interne. L'avantage principal de cette technique est qu'elle peut être utilisée au plus tôt dans la chaîne numérique de conception limitant ainsi les essais expérimentaux coûteux. La structure interne est renforcée uniquement dans les zones fragiles détectées par le calcul ce qui limite la quantité de matière utilisée lors de l'impression en continu. Cette démarche a été appliquée pour une poutre en PLA en flexion 4 points. Les résultats montrent l'efficacité de la méthode. Il serait maintenant intéressant d'appliquer cette méthode pour des pièces de géométrie plus complexes et de section non constante.

Références

- [1] Castelino K., D'Souza R. and Wright P. K. , Tool-path Optimization for Minimizing Airtime during Machining, Journal of Manufacturing Systems 2004, 22-3,
- [2] Lechomicz P., Koszalka L., Pozniak-Koszalka I. and Kasprzak A., Path Optimization in 3D printer : Algorithms and Experimentation System, International Symposium on Computational and Business Intelligence 2016
- [3] Lensgraf S. and Mettu R. R., Beyond Layers : A 3D-Aware Toolpath Algorithm for Fused Filament Fabrication, International Conference on Robotics and Application 2016
- [4] Martinez J., Dumas J. and Lefebvre S., Procedural Voronoi Foam for Additive Manufacturing, ACM Transaction on Graphics, Association for Computing Machinery 2016, 35, pp. 1-12
- [5] Park S.-I., Rosen D. W., Choi S.-K. and Duty C. E., Effective mechanical properties of lattice material fabricated by material extrusion additive manufacturing, Additive Manufacturing Journal 2014, 1-4, pp. 12-23
- [6] Yu-An J., Yong H., Jian-Zhong F., Wen-Feng G. and Zhi-Wei L., Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology, Additive Manufacturing Journal 2014, 1- 4, pp. 32-47