

Analyse expérimentale de la réalisation de microcavités sur substrats polymères thermoplastiques par le procédé de roll embossing

M.SAHLI^a, J-C. GELIN^a, C. MILLOT^a, T. BARRIÈRE^a,

^a. FEMTO-ST Institute, Applied Mechanics Dept., CNRS UMR 6174, ENSMM, 25030 Besançon cedex, France

Résumé :

Cette étude présente une démarche expérimentale dédiée à la mise en forme des polymères par le procédé de roll embossing (R2R), et à une analyse des conditions appropriées nécessaires au procédé, pour la réplique de composants micro-structurés, avec des géométries et de tailles variées. Un équipement d'extrusion de polymère a été adapté spécialement pour cette étude expérimentale. Les propriétés rhéologiques de matériaux thermoplastiques ont été étudiées pour la plage de mise en forme du procédé R2R. Une analyse comparative de l'influence de la température de mise en forme sur le taux de remplissage des répliques par rapport aux données rhéologiques et aux caractéristiques des cavités a été réalisée et discutée. Les résultats obtenus montrent que le remplissage des cavités du rouleau est très lié à aux comportements rhéologiques des polymères sélectionnés

Abstract:

This paper presents an experimental procedure for the polymers forming by the roll embossing process (R2R). The objective is determine the appropriate processing conditions for the cavities replication. An extrusion press has been specially adapted for this experimental study. The rheological properties of thermoplastic materials have been investigated in the polymer processing range. A comparative analysis of the influence temperature on the filling rate of cavities compared from the geometry mould has been completed and analysed. The results indicate that the filing of roller cavities is largely depending on the rheological behaviour of polymers selected.

Mots clefs: roll embossing, polymère thermoplastique polymère, microcomposant, rhéologie

1 Introduction

Ces dernières années, les développements et les adaptations des procédés de mise en forme à faible coût pour la miniaturisation et/ou la fabrication des microcomposants sont en plein croissance. Parmi les technologies de fabrication les plus utilisées, on peut notamment citer, le moulage par injection et la compression à chaud [1-3]. A l'échelle industrielle, la fabrication en masse des microcomposants de formes complexes est de fait réalisée par moulage par injection. Le procédé de compression à chaud est généralement utilisé comme une alternative au moulage par injection, pour un prototypage rapide à faible coût. Dans ces dernières années, les besoins de réalisation de composants de très petites tailles sont apparus avec le développement des micro-technologies et des microsystèmes. Ceci a donc conduit au développement de nouvelles techniques de micro-fabrication. A ce titre, on peut citer le procédé Roll to Roll (R2R) comme une technique de réplique pour le transfert en continu des micro-motifs sur des substrats thermoplastiques ou d'autres supports [4]. Le Roll to Roll peut être une alternative pour la production de masse à haute résolution et à faible coût de composants micro-structurés. Dans ce procédé, le préchauffage du substrat est effectué avant le passage entre les rouleaux contenant des microstructures. La figure 1 montre les différentes étapes de mise en forme par le procédé R2R.

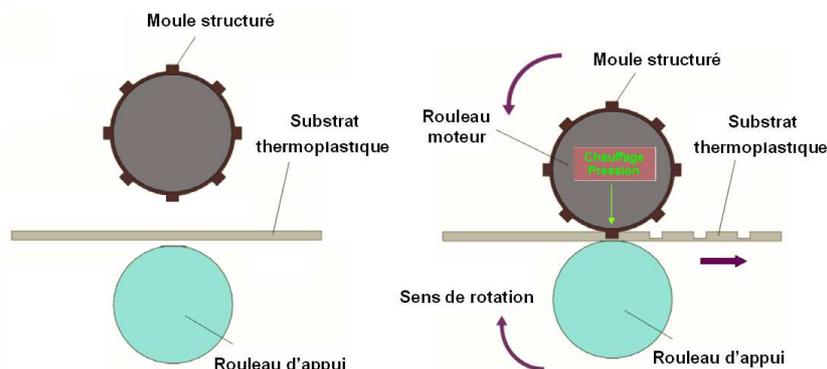


FIG. 1 – Schéma de principe du procédé roll embossing

Dans cet article, on présente une caractérisation rhéologique des polymères qui a été réalisée à des températures proches des conditions de mise en forme. L'influence de la température de formage sur la qualité des microstructures a été étudiée. Puis, une étude comparative des taux de remplissage ainsi qu'une analyse dimensionnelle et topographique des empreintes de moule et des répliques polymères produites est présentée puis discutée.

2 Matériaux et méthode expérimentale

2.1 Matériaux

Les expérimentations ont été réalisées avec les polymères de type polypropylène (PP : EP548N) et polyméthacrylate de méthyle (POM), fournis par les sociétés Bâle Ltd[®] et Chimidis[®]. Ces matériaux se présentent sous forme de granules, de densité égale à 0.9 et 1.4 et d'indice de fluidité égal à 3.5g/10min et 10g/10min respectivement. Les principales propriétés physiques, thermiques, mécaniques et de ces polymères sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés thermo-physiques et thermomécaniques des polymères sélectionnés.

| Matériau | Polypropylène (PP, EP548N) | Poly méthacrylate de méthyle (POM) |
|---|----------------------------|------------------------------------|
| Densité | 0.9 | 1.4 |
| Température de transition vitreuse [°C] | -20 | -85 |
| Température de fusion [°C] | 160 | 195 |
| Température d'extrusion [°C] | 220-280 | 205-215 |
| Indice de fluidité [g/10min] | [230°C/2kg]: 3.5 | [190°C/2.16kg]: 10 |

Pour la caractérisation rhéologique, les polymères thermoplastiques ont été extrudés à travers une filière axisymétrique en carbure de tungstène à l'aide d'un rhéomètre capillaire bi canal (Bohlin Instruments[®] RH2000) fonctionnant à vitesse de descente du piston contrôlée. Ces expériences ont été réalisées à l'aide d'une filière à fond plat de 1mm de diamètre, de rapport longueur/diamètre égal à respectivement 16 et 1 avec un angle d'entrée de 180°. Toutes les expériences ont été réalisées dans une plage de température comprise entre 200 et 220°C et avec un taux de cisaillement variant entre 10^2 à 10^4 s⁻¹. La figure 2 représente les évolutions de la viscosité de cisaillement des deux polymères (PP et POM) mesurée à 210°C. Ces résultats permettent d'observer le caractère rhéofluidifiant des deux matières testées. Les comportements pseudo plastiques du PP et du POM sont presque similaires. La viscosité au plateau notée η_0 à 210°C est estimée à 316Pa.s pour le PP et à 190Pa.s pour le POM. Cet écart significatif entre les viscosités est théoriquement quantifiable en considérant les indices de fluidité de chaque polymère.

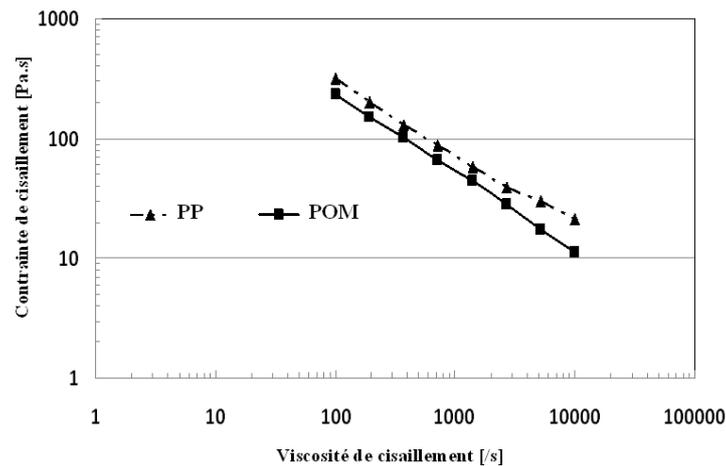


FIG. 2 – Evolution de la viscosité de cisaillement pour deux polymères thermoplastiques à 220 °C.

2.2 Méthode expérimentale

L'extrudeuse Mixer Rheoscam[®] a été adaptée pour réaliser les essais de roll embossing. Grâce à ce équipement, l'extrusion peut être réalisée à une température contrôlée, comprise entre 25°C, jusqu'à 250°C, avec une vitesse maxi de rotation de la vis égale à 160mm/s. Le préchauffage du substrat thermoplastique est effectué avant qu'il ne soit introduit entre rouleaux. La photographie de la machine est relatée en figure 3. La matière plastique est ramollie puis contrainte de traverser une filière ayant une section rectangulaire de 10x1mm². Grâce à un convoyeur, la matière thermoplastique chauffée et fondue, passe entre deux rouleaux structurés en position horizontale, pour transférer des motifs en continu sur substrat thermoplastique.



FIG. 3 – Dispositif expérimental instrumenté, utilisé pour le Roll to Roll en continu.

Tableau 2. Paramètres de procédé utilisés en roll embossing.

| | | |
|-------------------------------|----------|---------|
| Vitesse du convoyeur | [m/min] | 6 |
| Température de chauffage | [°C] | 180-220 |
| Diamètre de la vis | [mm] | 22 |
| Vitesse de rotation de la vis | [tr/min] | 50-100 |
| Couple maxi à la vis | [daN] | 12 |

Deux rouleaux rigides indéformables ont été spécialement conçus et réalisés, permettant d'effectuer des essais de roll embossing en continu (cf. Fig. 4). A titre d'exemple, la géométrie du rouleau avec cinq rainures de différentes profondeurs, variant de 75 à 100µm, obtenues par usinage par enlèvement de copeaux est présentée sur la figure 4b. La figure 5 illustre d'une part une cartographie 3D des cinq rainures après inversion informatique des données et d'autre part le profil 2D associé à cette cartographie tridimensionnelle.

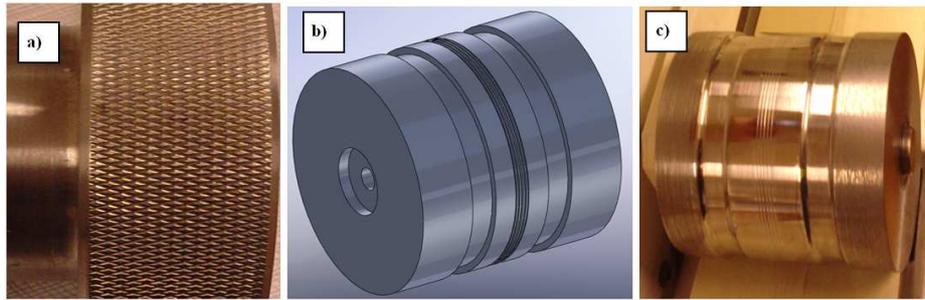


FIG. 4 – (a) rouleau en acier avec motif croisé obtenu par matage, (b) CAO du rouleau à cinq rainures et (c) rouleau en acier obtenu par usinage par enlèvement de copeaux.

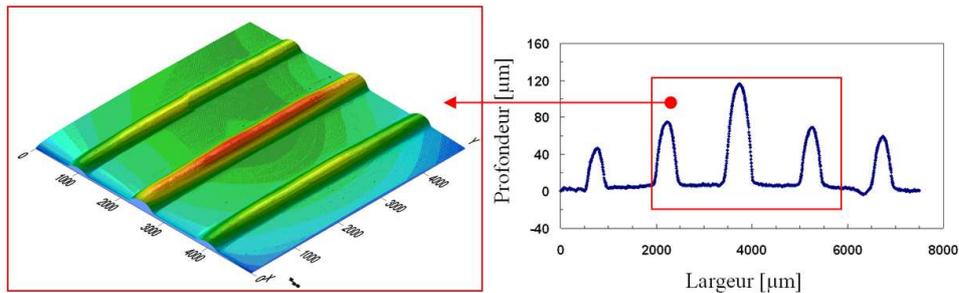


FIG. 5 – (a) Cartographe 3D d'une partie de l'empreinte du rouleau (donnée inversées), (b) profil 2D des rainures du rouleau dédiées au roll embossing.

3 Résultats et discussions

3.1 Motif avec stries croisées

La qualité des empreintes obtenue par réplcation est déterminée grâce à des observations comparatives illustrées en figure 6. Ces observations représentent les motifs de réplcation des empreintes du rouleau croisé pour deux polymères et sont obtenues à 180°C. On peut noter que le remplissage à l'aide du POM conduit à une réplique quasi équivalente à celui du moule. Cette analyse comparative permet de plus, d'expliquer les difficultés à remplir des cavités pour certains polymères.

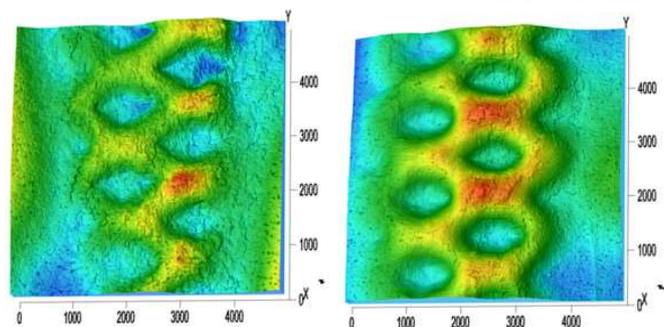


FIG. 6 – Cartographies 3D des répliques obtenues à 180°C avec différents polymères : (a) PP et (b) POM.

La figure 7 illustre le résultat de la réplcation d'un réseau de stries croisées, obtenu sur un substrat en polypropylène à différents températures. Il apparaît donc que la valeur de température de mise en forme influence sensiblement le taux de remplissage des cavités du. Cette observation est corrélée à la viscosité du polymère, qui varie fortement avec la température. Un bon choix de la température de mise en forme du polymère, s'avère être d'une importance cruciale pour l'obtention de motifs de qualité et précises.

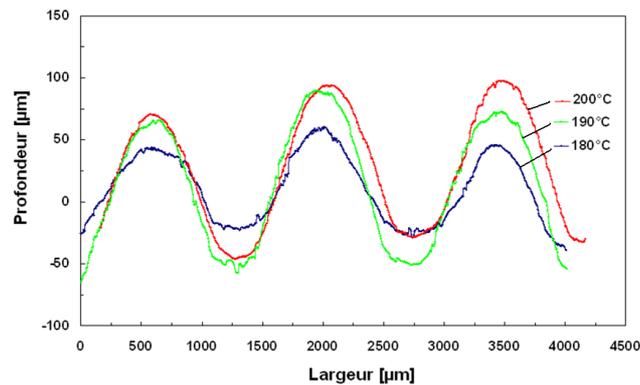


FIG. 7 – Profils 2D des répliques en polypropylène obtenues à différentes températures

Les cartographies de la figure 8 illustrent l'influence de la température de mise en forme sur le remplissage des cavités du rouleau obtenues à deux températures différentes : (a) 180°C et (b) 210°C. On remarque que le remplissage est fortement sensible à la valeur de la température de mise en forme et que le fait d'augmenter la température aboutit à des taux de remplissage très élevés. On a également bien constaté que les micro-détails présents sur les parois du rouleau sont bien reproduits sur les faciès des répliques réalisées par R2R.

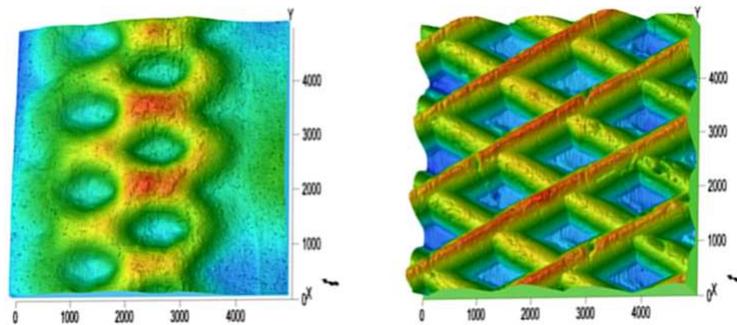


FIG. 8 – Cartographie 3D des répliques obtenues sur un substrat en polypropylène à différentes températures.

3.2 Motif avec cinq rainures

La même démarche expérimentale comparative a été conduite sur la réplcation de rainures dont la forme est précisée en figure 5b. Les cartographies 3D de la figure 9 représentent les données comparatives descriptives des mesures enregistrées sur des répliques obtenues avec deux polymères différents à 220°C. Après plusieurs essais de réplcation, on a constaté que le remplissage des cavités est très sensible à la taille des empreintes et à la viscosité du polymère.

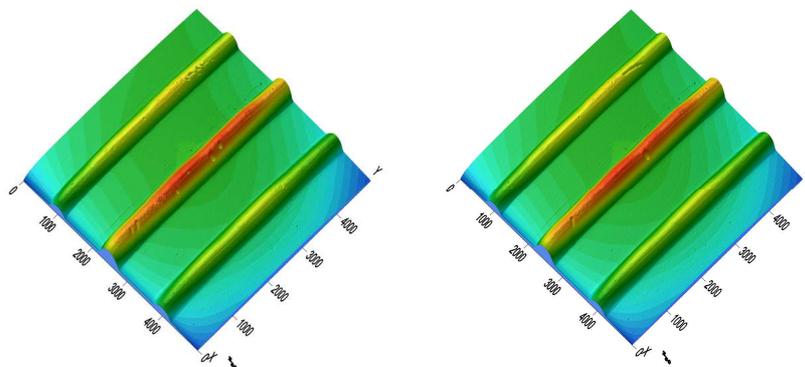


FIG. 9 – Cartographie 3D des répliques obtenues à 220°C sur différents substrats thermoplastiques.

A titre de comparaison, il est possible d'analyser les formes de profil 2D extraits de l'empreinte des répliques comme illustré sur la Fig. 10. Les observations montrent que l'amélioration de la qualité de la réplication est liée à l'augmentation de la température pendant le processus de réplication. Les résultats indiquent que plus la température de mise en forme augmente, plus le taux de remplissage augmente dans les cavités du rouleau, permettant ainsi d'obtenir des répliques de forme géométriques conformes à l'original. Cette constatation est liée à la variation de la fluidité du polymère dont la viscosité varie en fonction de la température.

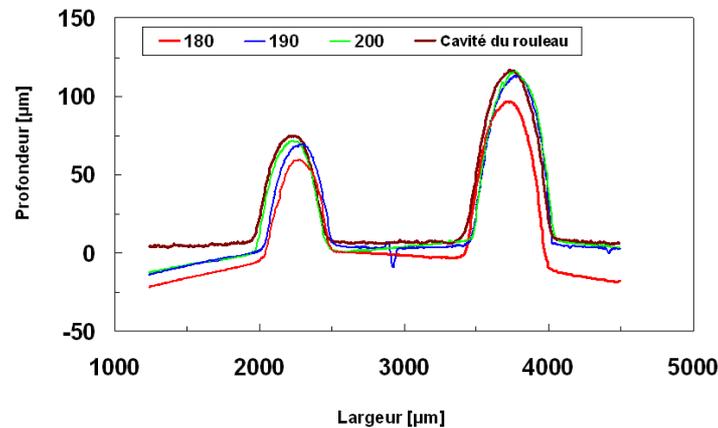


FIG. 10 – Profil 2D des répliques en POM obtenues à différentes températures.

4 Conclusions

L'objectif principal des développements expérimentaux réalisés était de montrer la possibilité de réaliser en continue des empreintes micro-structurées avec une précision quantifiée et une bonne répétabilité. Cet objectif a été atteint grâce à une caractérisation des propriétés rhéologiques et thermo-physiques des polymères employés. Les résultats obtenus montrent les possibilités de réaliser en continue, par le procédé de roll embossing des répliques qui reproduisent bien la forme des empreintes imprimées par le rouleau, dans le cadre d'un processus de formage suivant un protocole bien établi et validé. Cette étude conduit aux conclusions suivantes :

- Les expériences et caractérisations rhéologiques réalisées dans la plage de mise en forme du procédé sur deux grades distincts de polymères thermoplastiques ont révélé le rôle primordial de la fluidité des polymères sur la qualité de réplication. Le choix d'un matériau et des conditions de transformation conditionne largement la possibilité et la cinétique de remplissage des empreintes de moule.
- Les évolutions du taux de remplissage des microcavités par rapport aux données quantifiant le moule sont très dépendantes des caractéristiques rhéologiques des polymères employées, ainsi que les conditions de mise en forme imposées, ainsi qu'aux géométries et volumes des cavités du moule.

Cette étude a permis de montrer que le procédé R2R correspond à une technologie performante et bien adaptée pour réaliser les motifs de taille micrométrique voir nanométrique.

References

- [1] Li Y., Li L., Khalil K.A., Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels , Journal of Materials Processing Technology, 183, 432-439, 2007.
- [2] Sahli M., Millot C., Roques-Carmes C., Khan Malek C., Barriere T. and Gelin J.C., Quality assessment of polymer replication by hot embossing and micro-injection moulding processes using scanning mechanical microscopy, Journal of Materials Processing Technology, 209, 5851-5861, 2009.
- [3] Kalima V., Pietarinen J., Siitonen S., Immonen J., Suvanto M., Kuittinen M., Mönkkönen K. and Pakkanen T.T., Transparent thermoplastics: Replication of diffractive optical elements using micro-injection molding, Optical Materials, 30, 285-291, 2007.
- [4] M. Sahli, J-C Gelin, T. Barrière, "Numerical modelling of the polymers replication in micro-cavities by the roll embossing process", International Journal of Material forming, 2, 607-610, 2010.

[