

Abstract

Friction, lubrication, and wear are responsible for significant energy losses across transportation, industrial, and utility sectors. In metal forming, controlling friction is essential both for reducing energy consumption and for improving the manufacturability of challenging components. For example, in deep drawing, a widely used sheet metal forming process where the punch gradually pulls a blank sheet into the die cavity, friction must not be too high, to allow material flow, but also not too low, to prevent defects such as wrinkling. Achieving optimal friction not only enhances formability but also extends tool life and reduces production costs. Since friction arises at the contact interface, understanding the tribological behavior in such interfaces is crucial for optimizing forming processes.

However, investigating tribology in this context is particularly challenging, as it constitutes a multiscale and multiphysics problem. Real surfaces are rough, and contact occurs only at the asperity summits at smaller scales. Moreover, when considering mixed lubrication regimes, commonly used in sheet metal forming, and wear particles generated during the process, the situation becomes even more complex due to the interplay between surface roughness, lubricant availability, and wear debris. While empirical approaches have enabled a certain degree of process optimization, their predictive capability remains limited, and experiments alone are costly. This motivates the development of robust multiscale, physics-based numerical tools that can capture the frictional behavior during the forming process while accounting for the relevant mesoscale physics.

This thesis develops a hierarchical multiscale numerical framework to model the friction coefficient. At the macroscale, a one-dimensional finite-element strip-draw model is used to predict the global frictional response of the deformable sheet during sliding, while the local friction at the contact interface is informed by mesoscale simulation results. At the mesoscale, a coupled discrete-element and boundary-element approach resolves the load sharing between rough surfaces and rigid oblate-spheroidal wear particles, while also capturing the evolution of the deformable surface during sliding. Another mesoscale model is developed to account for the effects of discrete lubricant droplets and trapped lubricant pockets. Using these models, the local friction coefficient at the mesoscale can be determined as a function of macroscopic normal pressure, sliding velocity, and surface topography. In this way, the framework effectively closes the loop between scales.

The proposed model accurately reproduces experimental strip-draw tests on aluminum sheets provided by Novelis, capturing key trends such as the decrease of friction with increasing normal pressure and the influence of tool-pad geometry. This framework establishes a predictive methodology for friction in mixed-lubrication regimes, offering both theoretical insights into multiscale tribology and practical guidelines for optimizing forming processes.

Keywords: *Tribology, multiscale modeling, friction, partial lubrication, third-body particles, rough surfaces, boundary element method*

Résumé

La friction, la lubrification et l'usure sont responsables de pertes énergétiques considérables dans les secteurs du transport, de l'industrie et des services publics. En mise en forme des métaux, le contrôle de la friction est essentiel à la fois pour réduire la consommation d'énergie et pour améliorer la fabricabilité des composants complexes. Par exemple, lors de l'emboutissage profond, un procédé largement utilisé où le poinçon tire progressivement une tôle dans la matrice, la friction ne doit être ni trop élevée, afin de permettre l'écoulement du matériau, ni trop faible, afin d'éviter des défauts tels que le plissement. L'obtention d'une friction optimale améliore non seulement la formabilité, mais prolonge également la durée de vie des outils et réduit les coûts de production. Puisque la friction naît à l'interface de contact, la compréhension du comportement tribologique dans de telles interfaces est cruciale pour optimiser les procédés de mise en forme.

Cependant, l'étude de la tribologie dans ce contexte est particulièrement complexe, car elle constitue un problème multi-échelles et multiphysique. Les surfaces réelles sont rugueuses et le contact ne se produit qu'aux sommets des aspérités à petite échelle. De plus, en considérant les régimes de lubrification mixte, couramment utilisés lors de l'emboutissage des tôles, ainsi que les particules d'usure générées au cours du procédé, la situation devient encore plus complexe en raison de l'interaction entre la rugosité de surface, la disponibilité du lubrifiant et les débris d'usure. Bien que les approches empiriques aient permis un certain degré d'optimisation des procédés, leur capacité prédictive demeure limitée et les expérimentations seules sont coûteuses. Cela motive le développement d'outils numériques robustes, multi-échelles et fondés sur la physique, capables de reproduire le comportement frictionnel pendant le procédé de mise en forme tout en tenant compte de la physique pertinente à l'échelle mésoscopique.

Cette thèse développe un cadre numérique hiérarchique multi-échelles pour modéliser le coefficient de friction. À l'échelle macroscopique, un modèle éléments finis unidimensionnel de type *strip-draw* est utilisé pour prédire la réponse frictionnelle globale de la tôle déformable lors du glissement, tandis que la friction locale à l'interface de contact est informée par les résultats des simulations mésoscopiques. À l'échelle mésoscopique, une approche couplée éléments discrets-éléments de frontière résout le partage de charge entre surfaces rugueuses et particules d'usure rigides de forme oblate-sphéroïdale, tout en capturant l'évolution de la surface déformable au cours du glissement. Un autre modèle mésoscopique est également développé pour prendre en compte les effets de gouttelettes de lubrifiant discrètes et de poches de lubrifiant piégées. Grâce à ces modèles, le coefficient de friction local à l'échelle mésoscopique est déterminé en fonction de la pression normale macroscopique, de la vitesse de glissement et de la topographie de surface. De cette manière, le cadre proposé ferme efficacement la boucle entre les échelles.

Le modèle proposé reproduit avec précision les essais expérimentaux de type *strip-draw* réalisés sur des tôles d'aluminium fournies par Novelis, en capturant des tendances clés telles que la diminution du coefficient de frottement avec

l'augmentation de la pression normale ainsi que l'influence de la géométrie de l'outil et du patin. Ce cadre établit une méthodologie prédictive du frottement en régime de lubrification mixte, offrant à la fois des éclairages théoriques sur la tribologie multi-échelle et des lignes directrices pratiques pour l'optimisation des procédés de mise en forme.

Ce projet a été financé par Innosuisse (Agence suisse pour l'innovation) sous le numéro de subvention 100.777 IP-ENG.

Mots-clés : *Tribologie, modélisation multi-échelles, frottement, lubrification partielle, particules de troisième corps, surfaces rugueuses, méthode des éléments aux frontières*