

Simulation des déformations de pièces mécaniques induites par des traitements de surface thermo-chimiques et mécaniques

L. BARRALLIER, R. KUBLER

Arts et Métiers Sciences et Technologies, Aix en Provence, Laboratoire MSMP

laurent.barrallier@ensam.eu

regis.kubler@ensam.eu

Mots clés : contraintes résiduelles, nitruration, grenailage, déformation et distorsion

Résumé

Les traitements de surface génèrent des déformations libres de contraintes d'origine thermique, thermo-chimique ou mécanique via des transformations de phase ou de la plasticité. Ces déformations libres de contrainte incompatibles sont accommodées par des déformations élastiques générant des champs de contraintes résiduelles. Dans le cas de géométries non massives (plaque, tôle, voile), les champs de contraintes résiduelles se rééquilibrent en partie en induisant une déformée des pièces. En partant des équations de la mécanique et du concept de « déformation libre de contraintes », cette étude présente des applications dans le cadre du traitement thermo-chimique de nitruration et du grenailage de précontrainte.

1. Principes généraux

La maîtrise des déformations élastiques des pièces lors d'un traitement de surface passe par le calcul des contraintes résiduelles (CR). Ces CR prennent leur origine dans une déformation libre de contrainte incompatible $\underline{\varepsilon}^*$.

Dans un cadre HPP, la déformation totale $\underline{\varepsilon}$ se décompose additivement, avec la déformation élastique $\underline{\varepsilon}^e$:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^* \quad \text{Eq. (1)}$$

Dans le cadre d'un massif semi infini élastique isotrope (E, ν) et d'un traitement de surface uniforme générant un gradient selon la profondeur z , l'équation de compatibilité locale des déformations permet de calculer la déformation libre de contrainte incompatible à partir des profils de contraintes résiduelles $\sigma(z)$ déterminées expérimentalement, telle que :

$$\underline{\varepsilon}^*(z) = \frac{\nu-1}{E} \underline{\sigma}(z) \quad \text{Eq. (2)}$$

Cette étude présente des applications de calcul de profil de contraintes et de déformées de pièces dans le cadre de deux traitements de surface : 1. La nitruration où $\underline{\varepsilon}^*$ est d'origine thermo-chimique considérant des cinétiques de transformations de phase dans une microstructure multiphasée, 2. Le grenailage de précontrainte où $\underline{\varepsilon}^*$ est d'origine mécanique avec de la déformation plastique.

Pour le calcul de la déformée de structures, les champs mécaniques doivent s'équilibrer dans la structure en respectant l'équilibre des efforts généralisés pouvant se calculer analytiquement ou numériquement par méthode éléments finis.

2. Applications à deux types de traitements de surface

La modélisation mécanique du traitement thermo-chimique de nitruration procède par un calcul des cinétiques de transformations et des variations de volume induites dans les précipités créés. Une modélisation mécanique multi-échelle permet de calculer les champs mécaniques dans chaque phase

φ_i à chaque profondeur z du traitement en tenant compte des cinétiques de transformation. Le trajet du chargement mécanique (déformation libre de contrainte de transformation, de dilatation...) influence alors les champs mécaniques finaux macroscopiques (tenseur des contraintes $\underline{\hat{\sigma}}$) et les déformations et distorsions induites. La figure 1.a présente des résultats issus de l'implémentation de ce type d'approche dans le logiciel Forge[®] de Transvalor sur une dent d'engrenage.

Le grenailage de précontrainte conventionnel est réalisé par impacts successifs de grenaille à la surface du matériau à une vitesse donnée avec un taux de recouvrement. Après impact, un gradient de déformation plastique ($\varepsilon^* = \varepsilon^p$) génère des contraintes résiduelles de compression, mais aussi des déformées résiduelles dans le cas d'une structure mince (cas du peenforming de tôles).

Le cas de génération d'un champ de contrainte sur une plaque mince d'épaisseur 2 mm est présenté sur la figure 1. Une pseudo contrainte σ_0 est calculée à partir du profil de contrainte expérimental $\sigma(z)$ (Eq. (3)) et initialisée dans le logiciel éléments finis Abaqus.

$$\sigma_0(z) = \frac{1-\nu}{1+\nu} \sigma(z) \tag{Eq. (3)}$$

La contrainte se redistribue dans la plaque mince pour obtenir un état autoéquilibré de contraintes et une déformée résiduelle (Fig. 1.b). Le résultat par éléments finis se compare à un calcul analytique.

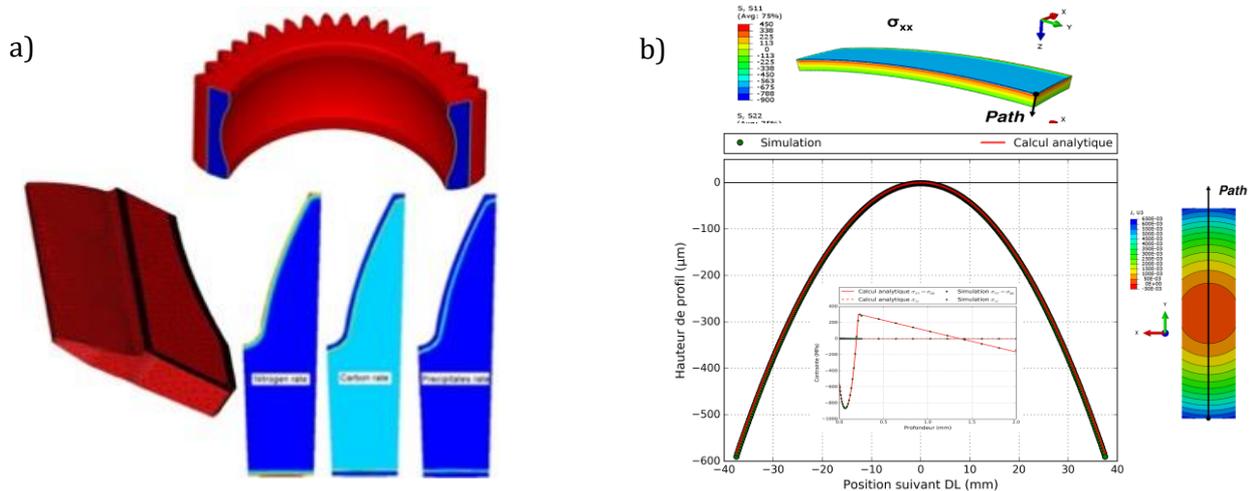


Figure 1 (a) Cas de la nitruration, implémentation dans Forge[®] de Transvalor sur une dent d'engrenage. (b) Cas de la plaque mince grenillée d'épaisseur 2 mm [2] : Introduction de la pseudo contrainte σ_0 et rééquilibrage de la contrainte dans la structure, déformée résiduelle.

3. Conclusion

Les techniques de modélisation des contraintes résiduelles après traitement de surface sont aussi utilisées pour modéliser les déformées des structures minces. Il s'agit de bien connaître la déformation libre de contraintes et de l'appliquer en respectant la compatibilité locale de la déformation totale et l'équilibre des efforts généralisés sur la structure. Pour prendre en compte les séquences des traitements de surface, des méthodes adaptées doivent encore être développées.

Références

[1] Laurent Barrallier, Sébastien Jégou. Nitruration des aciers de construction : génération des contraintes résiduelles. Contraintes résiduelles - A3TS, Feb 2017, Paris Saclay, France.
 [2] Maxime Gelineau. Etude de l'impact du grenailage sur des composants mécaniques industriels à géométrie complexe. Thèse, Arts et Métiers ParisTech, 2018.