HAL open science

AIDE AU CHOIX DE PROCEDES DE TRAITEMENT DE SURFACE :Application à l'optimisation de la durée de vie de composants mécaniques

Benoît Eynard, Jian Lu, Pascal Lafon

To cite this version:

Benoît Eynard, Jian Lu, Pascal Lafon. AIDE AU CHOIX DE PROCEDES DE TRAITEMENT DE SURFACE :Application à l'optimisation de la durée de vie de composants mécaniques. 15ième Congrés Français de Mécanique, Sep 2001, Nancy, France. hal-03620813

HAL Id: hal-03620813

https://hal.science/hal-03620813v1

Submitted on 26 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AIDE AU CHOIX DE PROCEDES DE TRAITEMENT DE SURFACE : APPLICATION A L'OPTIMISATION DE LA DUREE DE VIE DE COMPOSANTS MECANIQUES

Benoît EYNARD, Pascal LAFON, Jian LU

LASMIS – Université de technologie de Troyes

12 rue Marie Curie, BP 2060, 10010 Troyes Cedex

Résumé :

Dans un contexte de conception intégrée et afin d'optimiser la durée de vie en fatigue de composants mécaniques nous proposons d'aider au choix de traitement de surface à partir d'une cartographie de durée de vie s'appuyant sur le génie de pré-contrainte, un calcul par éléments finis et les caractéristiques du matériau employé. Cette aide à la décision utilise une architecture d'intégration de connaissances métier qui vise à capitaliser et à restituer les savoir-faire liés aux différents procédés de traitement de surface, leurs cas d'emploi et leurs paramètres techniques de mise en œuvre.

Abstract :

In order to optimise the life duration of mechanical components we present an aided decision making for the surface treatment based on an analysis of life duration using a pre-stress engineering approach, a finite elements modelling and the material characteristics. The aided decision making uses an framework of knowledge integration aiming to manage and reuse the know-how linked to several surface treatment technique, their use case and their operating parameters.

Mots clés : conception intégrée, génie de pré-contrainte, optimisation de durée de vie, intégration de connaissances

1 Introduction

Dans une logique de réduction des temps et des coûts de conception-industrialisation et d'amélioration de la qualité du produit, nous proposons de prendre en compte la définition des composants mécaniques les notions de contraintes résiduelles et de durée de vie. Afin d'améliorer le comportement en fatigue de ces composants, nous envisageons une aide au choix des procédés de traitement de surfaces et leurs paramètres associés à mettre en œuvre. Cette aide se fera d'une part sur la base de la spécification des contraintes à introduire sur le composant de façon à optimiser sa durée de vie et d'autre part sur une mémoire métier capitalisant les types de traitement admissibles et leurs caractéristiques techniques. Cette mémoire est actuellement envisagée dans le cadre d'une architecture d'intégration de connaissances métier en conception. Notre proposition d'architecture d'intégration s'inscrit plus globalement dans une philosophie d'ingénierie intégrée afin d'assister les choix des concepteurs pour prendre en compte au plus tôt les points de vues métiers et technologiques.

2 Les procédés de traitement de surface et le génie de pré-contrainte

Tout procédé de fabrication, on le sait, introduit dans une pièce mécanique des contraintes résiduelles qui vont influencer son comportement en fatigue, en rupture et même en corrosion.

Il existe peu de modes de mise en œuvre de matériaux qui n'engendrent pas un nouvel état de contraintes. Le rôle des contraintes résiduelles est donc très important pour une bonne conception d'une pièce mécanique. Depuis quelques années, les études se sont multipliées pour comprendre l'effet des contraintes résiduelles sur les performances mécaniques. Ce paragraphe tente de présenter une démarche globale de prise en compte des contraintes résiduelles dans un calcul prévisionnel de durée de vie et les possibilités de les introduire dans les bureaux d'études des industries mécaniques.

Aujourd'hui, très peu de secteurs industriels considèrent directement le paramètre « contraintes résiduelles ». Dans le cahiers des charges de mise en œuvre d'un procédé de traitement de surfaces sur une pièce mécanique, on impose des spécifications qui sont souvent étroitement liées aux contraintes résiduelles sans les citer nommément. On demande de garantir par exemple, une intensité Almen dans le cas de grenaillage, un effort de galetage, une gamme d'usinage, une épaisseur traitée minimale dans le cas de traitement thermique ou thermochimique, et enfin une tolérance maximale de dimensionnement d'une pièce usinée ou soudée. L'intégration de la notion de contraintes résiduelles au bureau d'études doit être progressive et peut être séparée en différentes phases.

Type de pièce	**Type de sollicitation**	**Augmentation de la durée de vie (en %)**
Axes	Flexion alternée	400 à 1 900
Arbres	Torsion	700
Arbres de boîte de vitesse	Essais de durée de vie en service	80
Vilebrequins	Essais de durée de vie en service	3 000 mais très variable
Bielles d'avion	Traction - compression	105
Bielles de moteur	Traction - compression	45
Ressorts à came	Sollicitation dynamique	100 à 340
Ressorts hélicoïdaux	Durée de vie en service	3 500
Barres de torsion	Sollicitation dynamique	140 à 600
Arbre de cardan	Flexion alternée	350
Roue dentée	Essais de durée de vie	130
Chaîne de char	Essais de durée de vie	1 100
Soudure	Essais de durée de vie	200
Soupape	Essais de durée de vie	700
Culbuteur	Essais de durée de vie	320

Tableau 1 : *Augmentation de la durée de vie en fatigue de différents composants mécaniques grâce au grenaillage*

2.1 Démarche de prise en compte des contraintes résiduelles

Dans la première phase de l'intégration, nous pouvons utiliser une notion semi-quantitative pour évaluer l'augmentation des performances en terme de durée de vie ou de limite d'endurance. Quelques exemples peuvent être présentés. Le tableau 1 montre un exemple de l'efficacité du grenaillage pour augmenter la durée de vie de différents types de pièces mécaniques et la figure 1 montre le rôle bénéfique d'un traitement de galetage sur la limite d'endurance en fatigue de vilebrequins en fonte GS.

La figure 2 montre, quant à elle, un exemple de comparaison horizontale des gains qu'on peut espérer au niveau limite d'endurance en fatigue grâce aux différents traitements de surface. Les résultats présentés ici ne sont pas du tout exhaustifs et sont tirés d'une bibliographie limitée. Cependant, il ne faut pas considérer cette figure comme une référence, car les géométries des éprouvettes sont différentes pour chaque type de traitement. Dans

certains cas, ce paramètre peut jouer considérablement sur le gain obtenu. Chaque secteur industriel se doit de réaliser ce type de comparaison pour les traitements et les matériaux qu'ils utilisent afin d'aider les ingénieurs à mieux définir les procédés à mettre en œuvre pour améliorer la durée des composants.

La seconde phase consiste à faire la prévision de la durée de vie en utilisant les critères de fatigue multi-axiale. La troisième phase consiste à combiner les logiciels de prévision de contraintes résiduelles et de la résistance à la fatigue pour optimiser l'état des contraintes résiduelles vis-à-vis de la sollicitation de fonctionnement de la pièce mécanique.

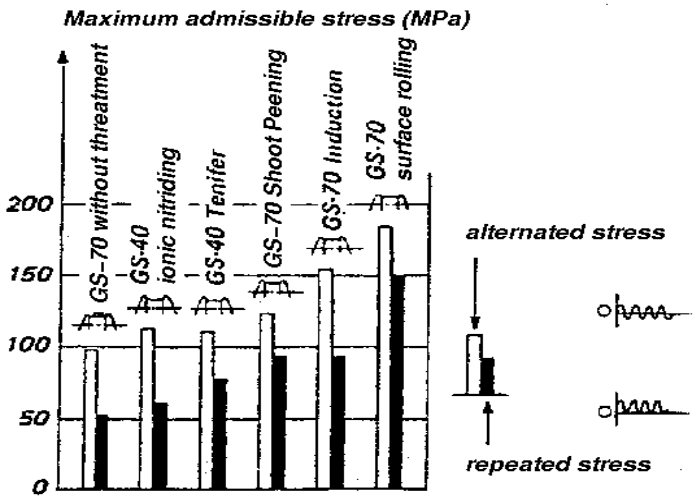

FIG. 1 *: Efficacité du galetage pour augmenter la limite d'endurance*

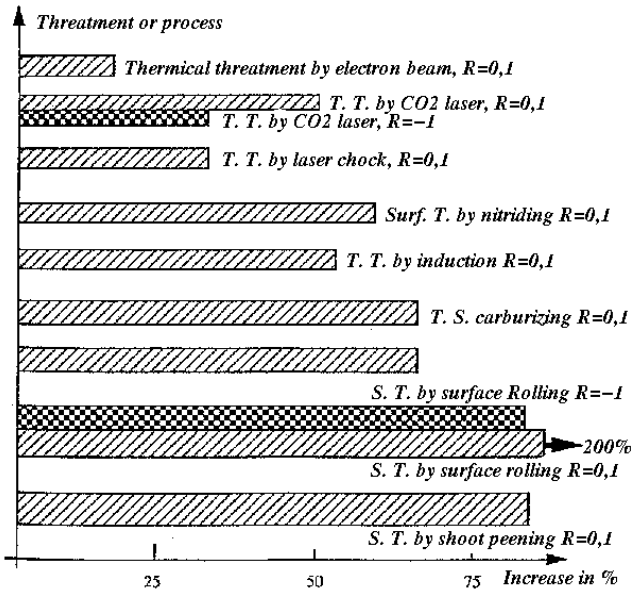

FIG. 2. : *Effet bénéfique de différents traitements de surface sur la limite d'endurance (gain maximal rapporté dans la littérature)*

2.2 Application aux procédés de traitement thermique

Aujourd'hui, la plupart des procédés de précontraintes ont déjà fait l'objet d'une étude de simulation. Dans un proche avenir, la prise en compte des contraintes résiduelles sera de plus en plus présente dans l'industrie. Les récents développements montrent qu'il est désormais possible de prédire les contraintes résiduelles admissibles et les traitements thermiques assortis Akrache (1998) et Rasouli Yazdi (1998). Il est donc possible de prévoir dans quelles

zones les précontraintes seront nécessaires et dans quelle condition du procédé. La figure 3 montre un exemple de cartographie de contraintes résiduelles nécessaires pour une sollicitation en flexion alternée et une durée de vie à 10^6 cycles. On voit que les contraintes résiduelles de compression sont nécessaires uniquement dans des zones avec des concentrations de contraintes. Grâce à ce type d'outil d'aide à la conception, il est donc envisageable de faire le choix du procédé et des paramètres associés en fonction des critères technico-économiques.

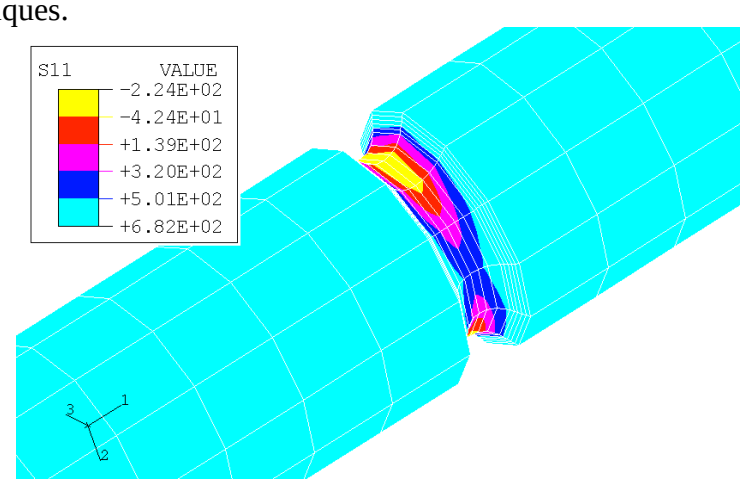

FIG. 3 *:Cartographie des contraintes résiduelles admissibles pour une flexion alternée*

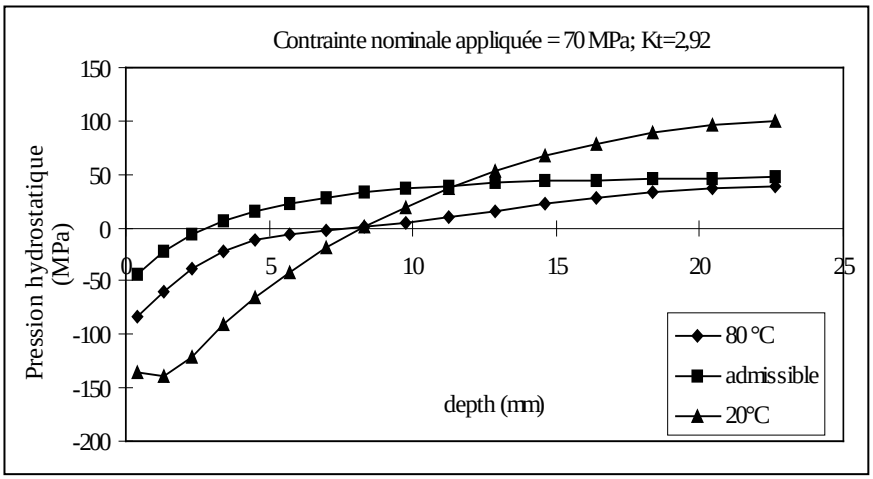

FIG. 4. *Exemple de validation de traitement thermique en fonction de la simulation des contraintes résiduelles admissibles*

La figure 4 montre une comparaison entre la distribution des contraintes résiduelles admissibles et les contraintes résiduelles stabilisées issues du traitement thermique et d'une sollicitation cyclique. Dans ce cas, le niveau de contraintes résiduelles doit être inférieur à la prévision en tout point de structure. Une traitement thermique de trempe de l'aluminium à 20°C va induire des contraintes résiduelles de traction supérieure au niveau exigé par le calcul au cœur de la pièce traité. La durée de vie en fatigue sera ainsi inférieure à celle prévue par le cahier des charges. Grâce à la simulation numérique, nous démontrons que le niveau des contraintes résiduelles est satisfaisant grâce à un traitement de trempe à 80°C.

2.3 Apports du génie de précontrainte

Il est désormais possible de prévoir la tenue en fatigue des matériaux en prenant en compte les contraintes résiduelles. Il est aujourd'hui raisonnable de prévoir l'introduction progressive de la notion de contraintes résiduelles au niveau de la définition et de

l'industrialisation des pièces mécaniques. Les calculs préalables de simulation de comportement permettent un gain de temps important avec la diminution du nombre d'essais expérimentaux. Ces essais sont souvent très longs et coûteux mais s'avèrent indispensables. Le problème de la prise en compte des contraintes résiduelles au niveau de la conception sera de plus en plus critique dans le futur avec l'avènement de nouveaux matériaux (multi-matériaux, …) et de nouveaux traitements (traitements combinés).

On peut dire qu'un véritable **génie de précontrainte** des matériaux à l'image du béton précontraint est en cours de développement pour la prise en compte des contraintes résiduelles dans l'amélioration de la durée de vie des composants mécaniques.

3 L'optimisation de la durée de vie en fatigue

Nous proposons un outil adapté aux bureaux d'études pour estimer la durée de vie des composants mécaniques, dans le cas général de sollicitations multi-axiales en phase ou hors phase. Cet outil s'appui sur un logiciel de CFAO industriel, et nécessite entre autres un modèle géométrique paramétré du composant à étudier. Le calcul des durées de vie en fatigue est effectué à partir des contraintes mécaniques calculées dans le composant par éléments finis. Ce calcul intègre l'utilisation des critères de fatigue multi-axiale de Crossland, de Sines, de Dang Van et de Lu (Akrache *et al* (1999)). Il nécessite également la connaissance de deux courbes de Wöhler du matériau du composant. Ce calcul fournit la cartographie des durées de vie sur le composant, il permet également d'obtenir la cartographie des contraintes résiduelles permettant d'attendre un niveau de durée de vie donné.

Cet outil intègre un processus d'optimisation visant à diminuer la masse du composant tout en respectant les limites imposées par la durée de vie minimale et les contraintes maximales de Von Mises. Ce problème d'optimisation se formule comme un problème mathématique d'optimisation de plusieurs variables avec des fonctions contraintes.

Ici, les variables sont identifiées aux paramètres du modèle géométrique et la fonction objectif au volume du modèle géométrique. Les fonctions contraintes sont identifiées aux contraintes mécaniques et à la durée de vie minimale dans le composant, sur lesquelles on impose une valeur limite. Dans ce problème les fonctions contraintes et objectif ne sont pas définies explicitement puisque les contraintes mécaniques résultent d'un calcul par éléments finis. De la même façon, le volume du modèle géométrique est obtenu par une fonctionnalité du modeleur géométrique. Chaque nouvelle valeur des paramètres du modèle géométrique (donc des variables du problème d'optimisation) nécessite un remaillage du modèle géométrique du composant et un calcul par éléments finis. De la même façon, l'algorithme d'optimisation nécessitant le calcul des gradients, ceux-ci seront évalués par différence finie.

Pour résoudre ce problème d'optimisation nous avons développer un algorithme de type « gradient réduit généralisé » Akrache R, Lafon P *et al* (1999). Les opérations de calculs par éléments finis (y compris le remaillage) sont prises en charge automatiquement le logiciel de CFAO. Le code d'optimisation « pilote » alors le logiciel CFAO en tâche de fond grâce à des fichiers de macro commandes modifié de façon adéquate par le code d'optimisation.

4 Perspectives d'aide au choix de procédés grâce à une architecture d'intégration de connaissances métier

Pour proposer une aide aux concepteurs dans le choix de traitement de surfaces, il est nécessaire de disposer d'une architecture d'intégration de connaissances métier qui capitalisera les données et informations relatives au différents procédés de traitement utilisables. Dans Eynard *et al.* (2000), nous avons présenter notre projet d'architecture d'intégration qui pour vocation de fédérer les connaissances issues de différent métier du

génie mécanique pour améliorer l'efficacité du processus de conception intégrée. Notre architecture se veut modulaire afin de prendre en compte de multiples savoir-faire techniques. Actuellement une base de connaissance existe pour l'aide au choix de procédés et de qualité d'usinage. Nous envisageons donc d'étendre cette aide en prenant en compte les techniques de traitement de surface (grenaillage, galetage, traitement thermique, …) et leur paramètres associés. De là, nous nous intéressons plus particulièrement aux de aspects requête et de restitution des caractéristiques du traitement à réaliser en fonction du résultat de l'optimisation de la durée de vie et des spécifications en terme d'application de contraintes résiduelles.

La requête s'appuiera sur un mécanisme de recherche multi-critères qui identifiera les divers procédés répondant aux données saisies par l'utilisateur ou issues par la cartographie de contraintes. A partir des critères déterminés le moteur d'inférence sélectionnera les procédés admissibles et les restituera au concepteur. Il obtiendra une liste de procédés susceptibles d'appliquer les contraintes résiduelles nécessaires. Après sélection du procédé suivant des critères technico-économiques (machines à disposition, sous-traitance du traitement, …), les paramètres de mise en œuvre seront détaillés.

6 Conclusion

Nous avons donc présenté une démarche globale d'aide au choix de procédés de traitement de surface tenant compte de l'influence des contraintes résiduelles dans le comportement mécanique des pièces. Cette démarche commence par le choix d'un procédé de traitement et par une évaluation semi-quantitative des performances attendues en terme de durée de vie. La base de connaissance fournissant une aide précieuse dans ce choix, ainsi dans le choix des paramètres associés au procédé. Grâce aux outils de simulation développés, il est alors possible de quantifier précisément le gain obtenu et d'optimiser forme du composant afin d'en réduire la masse.

L'intérêt de ce type de démarche est de pouvoir être généralisée à d'autres procédés , comme par exemple les procédés de mise en forme des métaux par déformations plastiques.

Références

Akrache, R. (1998), *Calcul de la durée de vie en fatigue des structures 3D par la méthode des éléments finis*. Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne, (France).

Akrache, R., Lafon, P., Lu, J., (1999), Outil intégré d'optimisation de la durée de vie en en fatigue pour la conception mécanique, *18èmes Journées de Printemps Dimensionnement en Fatigue des Structures – Démarche et Outils*, Paris, (France).

Akrache, R., Lu, J. (1999), 3D calculation of high cycle fatigue life under out-of-phase multiaxial loading, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, vol 22, p527-534.*

Eynard B., Belloy Ph., Lafon P., (2000), Towards an Integration of Knowledge in Mechanical Engineering, *3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Montréal, Québec, (Canada).

Rao Singiresu S. (1996) *Engineering optimization, theory and practice*, Wiley-interscience, New York.

Rasouli Yazdi, S., (1998), *Optimisation du traitement thermique des structures en aluminium pour augmenter la durée de vie en fatigue*, Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne (France).