
Prédiction des structures de grains durant la solidification dirigée de superalliages en fonderie

Serge Fargeas – Stéphane Fréchet

Snecma Moteurs
291 avenue d'Argenteuil
92234 Gennevilliers - FRANCE
tel.33(0)1 47 60 7044 / fax : 33(0)1 47 60 72 96

RÉSUMÉ : La fonderie de SNECMA Moteurs réalise des aubes de turbine monocristallines en superalliage réfractaire par solidification dirigée. La géométrie complexe de ces pièces rend difficile la fabrication et justifie les efforts pour développer des outils de simulation. Le logiciel C.A.F.E prédit la germination puis la croissance de grains et, permet d'obtenir une grande sensibilité de la prédiction des défauts de grains en solidification dirigée. Avec un jeu de paramètres pour les lois de germination et de croissance pour les alliages utilisés en fonderie, SNECMA possède aujourd'hui un outil de simulation numérique de prédiction des structures de grains suffisamment robuste pour faciliter la mise au point et la fabrication des aubes de géométrie et de structure métallurgique complexes nécessaires aux performances des moteurs aéronautiques.

MOTS-CLÉ : solidification dirigée ; germination ; croissance ; superalliages ; simulation numérique.

1. Introduction

Les pièces les plus chaudes des moteurs aéronautiques sont les aubages situés en aval de la chambre de combustion, dans la turbine. Ces pièces sont obtenues par fonderie à cire perdue de superalliages à base nickel. Ces aubages ont des structures métallurgiques colonnaires ou monocristallines obtenues par le procédé de solidification dirigée. Ce procédé est délicat à maîtriser en particulier pour des pièces creuses et fortement tridimensionnelles.

La simulation numérique a pour objectif d'aider à la mise au point de ces pièces et de prévoir les différents défauts susceptibles d'être rencontrés, en particulier les grains parasites qui conduisent en général au rebut des pièces. La prévision de structure de grains s'appuie dans un premier temps sur un modèle physique de germination puis croissance de grains. Un calcul de la surfusion dans des éprouvettes axisymétriques en 2 dimensions a permis de valider les modèles de germination et de croissance de grains par une corrélation avec des résultats expérimentaux. En revanche, l'application de ces modèles à la complexité des calculs en 3D dans les grappes de pièces oblige à utiliser le logiciel de prédiction des structures de grains C.A.F.E.

Le logiciel C.A.F.E (Automate Cellulaire par Eléments Finis) utilise un modèle stochastique de prédiction des structures de grains au cours de la solidification développé par l'EPFL et la société CALCOM SA [1,2,3,4]. Dans le cadre de cette étude, il a été utilisé en mode post processeur, à la suite d'un calcul thermique.

Le logiciel utilise une loi de germination et une loi de croissance dont les paramètres sont à déterminer pour chaque alliage. Nous avons choisi l'alliage AM1 pour aubages de structure monocristalline.

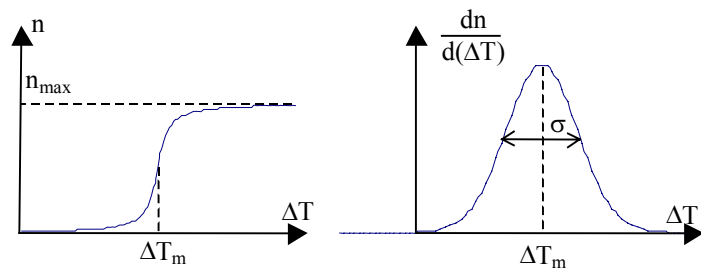
Ni	Cr	Co	Mo	Ta	W	Ti	Al	C
Base	7.5%	6.5%	2%	8%	5.5%	1.2%	5.3%	<0.01%

Tableau 1. Composition de l'alliage AM1.

2. Loi de germination :

La loi de germination prise en compte par le modèle est une distribution gaussienne dérivée de la relation entre la densité de grains et la surfusion. Les paramètres à déterminer sont le nombre de grains maximum n_{\max} , la surfusion moyenne ΔT_m , et son écart type ΔT_s (σ) (Figure 1).

Figure 1. Loi de germination utilisée dans CAFE.



3. Loi de croissance :

Dans le domaine de solidification des superalliages, la cinétique de croissance du front liquide-solide dépend de la surfusion à la pointe des dendrites. Le modèle K.G.T (Kurz, Giovanola, Trivedi) [5] permet de calculer cette surfusion pour des alliages binaires en fonction de la vitesse de solidification à la pointe des dendrites V , du gradient thermique G au niveau du front de solidification. Ce modèle est applicable aux superalliages multicomposés en considérant les coefficients \bar{C} , \bar{m} et \bar{k} du diagramme de phase pseudo-binaire : \bar{C} est la concentration moyenne, \bar{m} est la pente du liquidus et \bar{k} est le coefficient de partage, dans l'alliage pseudo-binaire.



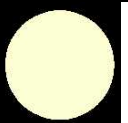
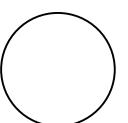
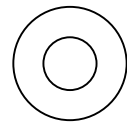
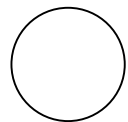
Dans le logiciel CAFE, l'évolution de la croissance des dendrites en fonction de la surfusion donnée par le modèle K.G.T est décrite par une fonction polynomiale simple du type : $V = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3$ avec V en m/s et ΔT en °C.

4. Paramètres des lois de germination et de croissance de l'AM1

Les paramètres de germination de l'alliage AM1 sont déterminés par méthode inverse en comparant les résultats expérimentaux sur éprouvettes axisymétriques et les calculs numériques correspondants. Les valeurs ainsi obtenues sont : $n_{\max} = 10^9$, $\Delta T_m = 15.4 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T_s = 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pour la loi de croissance, une base de données thermodynamique (Thermocalc [6]) permet de calculer les coefficients \bar{C} , \bar{m} et \bar{k} du diagramme de phase pseudo-binaire. A partir du modèle K.G.T, le logiciel CAFE calcule alors les paramètres a_2 et a_3 . Pour l'alliage AM1, les paramètres sont : $a_2=3.5.10^{-6}$ et $a_3=1.5.10^{-6}$.

Ce jeu de valeurs permet un bon accord entre la base expérimentale et la simulation numérique. La figure 2 montre que le calcul est capable de prévoir la microstructure de la collerette et les distances de propagation du grain dans celle-ci en fonction des conditions de coulée (vitesse de tirage ou mise en grappe).

	Vitesse de tirage	1 à 4 mm/min	6 mm/min	6 mm/min + artifice
CALCUL	Aspect de la collerette			
	Extension du grain dans la plateforme	50 mm	23 mm	50 mm
EXPERIENCE	Aspect de la collerette			
	Extension du grain dans la plateforme	50 mm	18 mm	50 mm

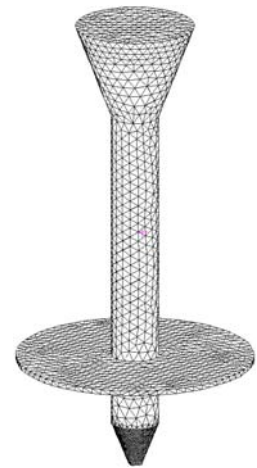


Figure 2. Comparaison calculs/expérience sur des éprouvettes à collerette dont le maillage utilisé pour les calculs est représenté à droite.

5. Validation de CAFE et des paramètres de germination et croissance

Une comparaison de calculs numériques avec des expériences sur éprouvettes d'études et sur grappes de pièces en conditions industrielles a permis de conforter les paramètres de germination et de croissance des grains pour l'alliage AM1

Dans le premier cas, il s'agit de la solidification dirigée d'une éprouvette en AM1 de structure colonnaire. Les conditions sont suffisamment extrêmes pour incurver le front de solidification, favoriser la croissance des grains périphériques et provoquer une germination parasite en avant du front de solidification. La simulation rend bien compte de ces phénomènes.

Le calcul numérique prédit également la germination et la croissance d'un grain parasite lors de la solidification dirigée d'une grappe d'aubes monocristallines en AM1 en conditions industrielles.

La compétition de deux grains d'orientations cristallographiques différentes mais proche de l'axe de solidification (001) est reproduite avec fidélité dans le cas d'une plaque de faible épaisseur.

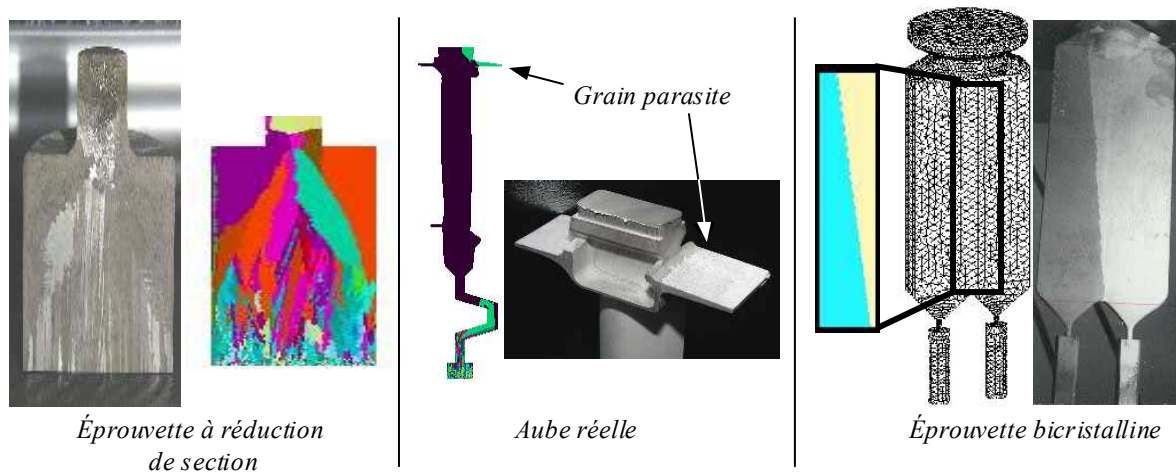


Figure 3. Comparaisons calcul/expérience.

Cet outil est une aide précieuse pour la mise au point et la fabrication de pièces monocristallines par solidification dirigée. Il prédit l'apparition des grains parasites mais surtout donne les conditions de solidification pour les éviter.

6. conclusion

Les aubes de turbine en superalliage réfractaire pour turboréacteurs sont obtenues par fonderie à cire perdue par le procédé de solidification dirigée. La géométrie complexe des pièces rend ce procédé délicat à maîtriser. Aussi pour aider à la mise au point de ces pièces, des outils de simulation numérique sont développés.

Le logiciel C.A.F.E prédit la croissance de grains et permet d'obtenir une grande sensibilité de la prédiction des défauts de grains en solidification dirigée dans le cas de calculs en 3 dimensions.

Avec un jeu de paramètres pour les lois de germination et de croissance de l'alliage AM1 (alliage utilisé pour la fabrication de pièces monocristallines), un bon accord est trouvé entre les cas expérimentaux et la simulation numérique. La localisation des sites de germination des grains parasites et leur croissance, les arrêts des grains, la germination en avant du front de solidification, la taille et le nombre de grains sont bien décrits par le calcul numérique.

SNECMA possède et maîtrise aujourd'hui un outil de simulation numérique de prédiction des structures de grains utilisable pour la mise au point et la fabrication de d'aubes de géométrie et de structure métallurgique complexes nécessaires aux performances des moteurs aéronautiques.

Bibliographie

- [1] Desbiolles J.L., Gandin C.A., Joyeux J.F., Rappaz M., Thevoz P., A 3D CAFE model for the prediction of solidification grain structures ; rapport interne ; Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Calcom ; 1996
- [2] Gandin C.A., Stochastic modelling of dendritic grain structures, la revue de la métallurgie décembre 2001, pp 1073-1077
- [3] Desbiolles J.L., Gandin C.A., Joyeux J.F., Rappaz M., Thevoz P., 3D modelling of grain structure formation during solidification, *Super computer review*, n°8, novembre 1996, pp 11-15.
- [4] Gandin C.A., Modélisation stochastique de la solidification : formation de structures des grains dendritiques, Thèse de doctorat n°. 1322, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1994.
- [5] Kurz W , Giovanola B , Trivedi R, Theory of microstructural development during rapid solidification , *Acta metall* , voln°34 , 1986 , pp823-830
- [6] Dupin N , Contribution à l'évaluation thermodynamique des alliages polyconstitués à base nickel , Thèse de doctorat , laboratoire de thermodynamique et de physico-chimie métallurgiques de grenoble , 1992.