

Influences de l'étendue de la zone pâteuse et de la phase d'intensification de la pression sur la microporosité de gaz dans les pièces de fonderie

Influences of solidification length and pressure intensification on gas shrinkage microporosity in casting components

■ Gaël Couturier, ESI Group

Traduction Sylvain Jacob

Introduction

Les porosités dans les pièces sont des défauts importants de par leurs effets sur les propriétés mécaniques. En particulier les porosités sont des sites d'initiation des fissures de fatigue. Par conséquent, la réduction de leur proportion et de leur taille, le contrôle de leur distribution et de leur morphologie sont cruciaux pour l'optimisation de la résistance mécanique des pièces moulées.

Comme représenté à la Fig. 1.a et 1.b, la microporosité est en général le résultat de deux mécanismes concomitants : (a) le retrait à la solidification provoque une aspiration et donc une chute de pression du liquide (courbe p_l) dans la zone pâteuse perméable (loi de Darcy), (b) les éléments gazeux présents dans le liquide étant généralement moins solubles dans la phase solide, la solidification provoque une microségrégation de gaz (courbe en trait gras) dans le liquide résiduel. Si la teneur en gaz dans la phase liquide

Introduction

Porosity in castings is a major defect since it affects the mechanical properties. In particular porosities are sites for the initiation of fatigue cracks. Therefore, the reduction of porosity fraction and size, the control of porosity distribution and morphology

are crucial for the optimization of mechanical resistance of as cast components.

As depicted in figures 1.a and 1.b, in general microporosity is the result of two concomitant mechanisms : (a) solidification shrinkage induces a suction and thus a liquid pressure drop (p_l curve) in the permeable mushy zone (Darcy's law), (b) trace gaseous elements in the liquid being generally less soluble in the solid phase, solidification induces gas microsegregation (thick curve) in the remai-

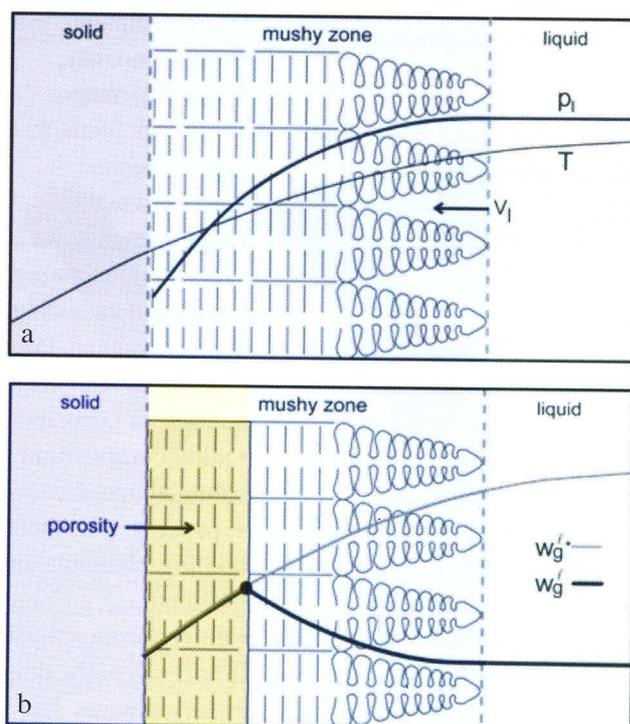


Fig.1: Concomitant mechanisms responsible for microporosity formation / Mécanismes concomitants responsables de la formation des microporosités de gaz.

atteint la limite de solubilité, limite qui diminue avec la pression et la température (courbe en trait fin), quelques micropores germeront au sein de la zone pâteuse.

Si la situation est telle que tous ces mécanismes sont concernés, la microporosité est appelée «microretassure gazeuse». La «microretassure gazeuse» ne peut pas être modélisée à l'aide des approches classiques utilisées dans les logiciels du commerce pour calculer la fraction de la microporosité liée au seul retrait rencontrée dans les zones pâteuses isolées: pour cette dernière famille de porosité, la fraction finale de porosité est localement simplement égale au volume du retrait à la solidification, car aucun flux de liquide ne peut partiellement compenser le retrait (système fermé).

Nouveau modèle

En conséquence, la prévision de la porosité n'est en général pas si simple. C'est la raison qui a conduit CALCOM-ESI (membre d'ESI Group) et l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (en collaboration avec plusieurs fonderies importantes) au développement d'un modèle numérique de microporosité basé sur les mécanismes précédemment décrits [1]. Ce modèle a été récemment étendu à tous les alliages industriels (Al, Fe, Cu, Mg, Ni, Ti [2]) afin de prédire toutes les familles de porosité dans des situations géométriques complexes :

- microretassure gazeuse,
- microretassure,
- macroretassure,
- retassure axiale.

Ce travail conduit à un logiciel adapté aux besoins du client pour tous les procédés de moulage:

- moulage par gravité,
- moulage sous pression,
- moulage en cire perdue,
- coulée continue, etc.

Ce module avancé de porosité (APM) permet de prédire l'influence de divers paramètres sur la localisation et l'importance de la porosité:

- composition de l'alliage (la solubilité des gaz est influencée par les teneurs en éléments d'alliages),
- paramètres du procédé (localisation des attaques, des masselottes, des canaux de refroidissement et des refroidisseurs, propriétés thermiques du moule, etc.),
- propriétés thermo-physiques des alliages (caractéristiques thermiques, viscosité à l'état liquide, masse volumique),
- teneurs et propriétés thermodynamiques des gaz dans l'alliage considéré,

ning liquid part. If the gas concentration in the liquid phase reaches the gas solubility limit decreasing with liquid pressure and temperature (thin curve), some micropores nucleate deeply in the mushy zone.

If the situation is such that all these mechanisms are involved, the microporosity is called gas shrinkage microporosity. Gas shrinkage microporosity can not be modelled with the traditional approaches used in commercial softwares to calculate the fraction of pure shrinkage microporosity encountered in closed mushy zones: for this last porosity family, the final porosity fraction is locally simply equal to the solidification shrinkage volume, because no liquid flux can partially compensate the shrinkage (closed system).

New model

As a consequence, the prediction of porosity is not straightforward in general. This is the reason that conducted CALCOM-ESI and the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL) (in collaboration with several leading casting industries) to the development of a microporosity numerical model based on the previously described mechanisms (see the original scientific paper[1]).

This model has been recently extended to all kind of industrial alloys (Al, Fe, Cu, Mg, Ni, Ti base alloys. See scientific paper [2]) in order to predict all porosity families in complex geometrical situations:

- gas-shrinkage microporosity,
- pure-shrinkage microporosity,
- macroporosity,
- pipe-shrinkage.

This work leads to a software customized for all casting processes:

- gravity casting,
- high pressure die casting,
- investment casting,
- continuous casting, etc.

This Advanced Porosity Module (APM) can predict the influence of various parameters on the location and amount of porosity:

- alloy composition (gas solubility is influenced by the solute element concentrations),
- process parameters (locations of gatings, risers, cooling channels and chills, thermal properties of the mold etc...),
- alloy thermo-physical properties (thermal properties, liquid viscosity, density),
- gas contents and gas thermodynamic properties in the considered alloy,
- mushy zone microstructure (influenced by some pre-

- microstructure de la zone pâteuse (influencée par certains des paramètres mentionnés précédemment),
- zone pâteuse – morphologie et topologie de la phase liquide (ex: étendue de la zone pâteuse),
- pression de compaction (en troisième phase).

Cet article illustre les possibilités de ce module APM en terme de prévision de la microretassure gazeuse. Les influences des deux paramètres précédemment mentionnés sont indiquées dans les deux chapitres suivants. Dans le premier, l'effet de l'étendue de la zone pâteuse est étudié dans le cas d'une aube de turbine (courtoisie de la Sté SALUT, Russie). Dans le second, l'effet sur la microretassure d'une pression appliquée est illustré dans le cas d'une pièce coulée sous pression (courtoisie d'INJECTA Druckguss, Suisse).

Moulage en cire perdue et étendue de la zone de solidification

Dans le premier exemple, la solidification d'une aube de turbine de 35 cm en alliage base Ni a été simulée sous 2 configurations. Dans la configuration de référence, le refroidissement de la pièce est homogène ou uniforme. Dans le second cas, une solidification dirigée optimisée a été appliquée afin de réduire l'étendue de la zone pâteuse (Fig. 2 et 3). L'étendue de la zone de solidification est indiquée Fig. 3 pour les deux configurations du refroidissement. La chute de pression est vraiment significative pour les fractions solides élevées; c'est la raison pour laquelle seule la fraction solide supérieure à 85% est reportée en Fig. 3. La loi de Darcy est une relation linéaire entre la vitesse du liquide et le gradient local de pression liquide dans l'intervalle de solidification. L'intégration du bilan massique de l'alliage couplé à la loi de Darcy dans la zone pâteuse fait que la pression

viously mentioned parameters),

- mushy zone – liquid pocket topology and morphology (ex: mushy zone length),
- intensification pressure (third phase),

This e-tip is the opportunity to illustrate the APM capabilities in term of prediction of gas-shrinkage microporosity. The influences of two previously mentioned parameters are shown in the next two sections. In a first section, the effect of the mushy zone length is studied in a real turbine blade geometry (courtesy of SALUT, Russia). In a second section the effect of the applied pressure on gas shrinkage microporosity is illustrated in an HPDC industrial component (courtesy of INJECTA Druckguss, Switzerland).

Solidification length investment casting

In the first example, a 35cm Ni base turbine blade is solidified. In the reference case the cooling is homogeneous or uniform around the part. In the second case, an optimized directional cooling condition has been applied in order to decrease the mushy zone length (see figure 2-3) The solidification length is revealed in figure 3 for both cooling configurations. The pressure drop is really significant for high solid fractions; this is the reason why only solid fraction exceeding 85% is displayed in figure 3. The Darcy's law is a linear relationship between the liquid velocity and the liquid pressure gradient locally in the semi solid part. The integration of the alloy mass balance coupled to the Darcy's law along the mushy zone makes the liquid pressure at the root of

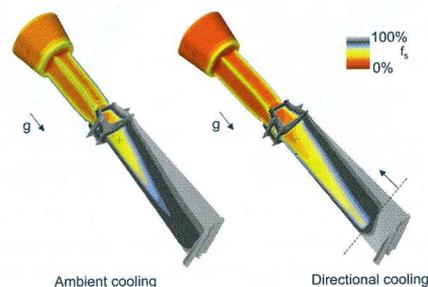


Fig. 2: Simulation de la solidification d'une aube de turbine (courtoisie de SALUT). A gauche, le refroidissement est uniforme, à droite, une solidification dirigée est appliquée. / Simulation of a solidification turbine blade (courtesy of SALUT). In the left figure, the cooling is uniform, whereas in the right figure, a controlled directional solidification is employed.

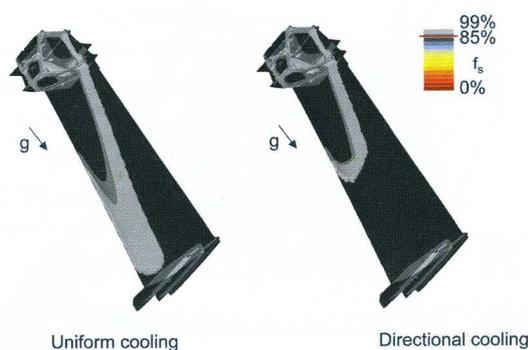


Fig. 3: Snapshot of the simulation of a solidifying blade (courtesy of SALUT). Only solid fraction in-between 85% and 99% is represented. In the left figure, the cooling is uniform, whereas in the right figure, a controlled solidification is employed / Visualisation de la simulation d'une aube en cours de solidification (courtoisie de SALUT). La fraction solide entre 85% et 99% est seule représentée. A gauche, le refroidissement est uniforme, à droite, une solidification dirigée est appliquée.

liquide dans la zone partiellement solidifiée décroît de manière parabolique, avec une augmentation de l'étendue de la zone de solidification pour une vitesse de refroidissement donnée. Une valeur élevée de la microretassure gazeuse est ainsi attendue dans le cas de zones pâteuses étendues. Comme observé à la Fig. 4, cela est exactement prédit par le Module Avancé de Porosité : en l'absence de solidification dirigée (images de gauche), comme la zone pâteuse est étendue, la porosité est élevée à l'extrémité de l'aube de turbine (1.4%), alors que la solidification dirigée (images de droite) réduit drastiquement la porosité en raison d'une étendue de solidification réduite.

Troisième phase en moulage sous pression

Dans le deuxième exemple, l'effet de compaction en 3^{ème} phase sur la porosité finale dans une pièce moulée sous pression est illustré. La géométrie de la pièce et du moule est représentée à la Fig. 5. Comme la limite de solubilité des gaz augmente avec la pression dans le liquide, on peut prévoir une diminution de la microretassure gazeuse lorsque la pression appliquée augmente. Comme observé à la Fig. 6, cet effet est parfaitement reproduit par le module APM: la microporosité a totalement disparu pour une pression égale à 400 bars. Dans ce cas, la porosité résiduelle seulement due au retrait apparaît dans les zones pâteuses isolées. Une augmentation de la pression appliquée ne réduira pas cette microporosité de retrait, car les zones isolées ne peuvent plus être alimentées par le liquide. La corrélation

the partially solidified zone decrease in a parabolic way with an increasing solidification length for a given cooling rate. A large amount of gas shrinkage microporosity is thus expected for long mushy zones. As observed in figure 4, it is exactly what is predicted with the Advanced Porosity Module: in the absence of directional cooling condition (left figures), as the mushy zone is long the porosity fraction is high at the extremity of the turbine blade (1.4%), whereas the directional solidification solution (right figures) drastically reduces the porosity fraction because the solidification length is limited.

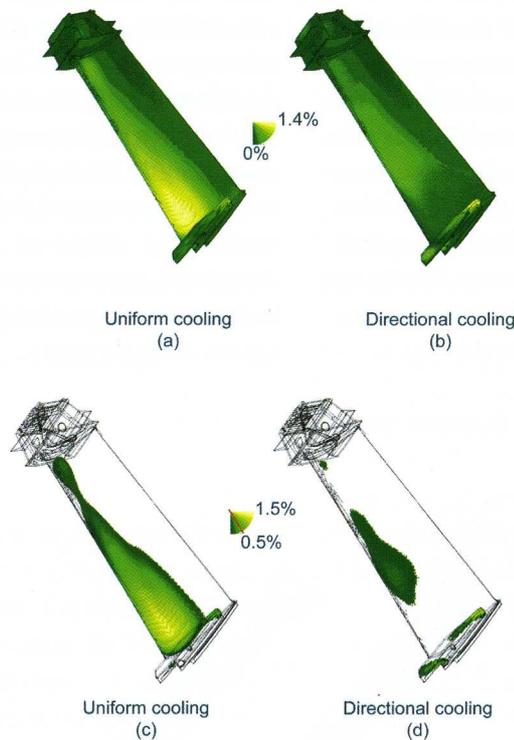


Fig. 4: Final porosity fraction in a turbine blade calculated by the Advanced Porosity Module. In the left figures the cooling is uniform, whereas in the right figures a controlled directional solidification is employed. The porosity is represented at the surface of the casting (a, b) and then with a cut off value showing the porosity above 0.5% (c, d) / Porosité finale dans une aube de turbine calculée par le Module Avancé de Porosité. A gauche, le refroidissement est uniforme, à droite, une solidification dirigée est appliquée. La porosité est représentée en surface de la pièce (a, b) et avec une valeur seuil montrant la porosité en volume supérieure à 0.5% (c, d).

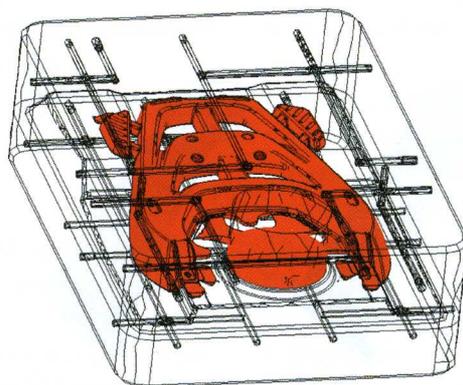


Fig. 5. HPDC component in its mold (Courtesy of INJECTA) / Pièce moulée sous pression et moule (courtoisie d'INJECTA).

Third phase effect high pressure die casting

In the second example, the effect of the pressure intensification during the third stage on the final porosity fraction and location in an HPDC part is illustrated. The geometry of the component in the mold is represented in figure 5. As the gas solubility limit increases with the liquid pressure, it is expected a decrease of the gas shrinkage microporosity fraction when the applied pressure is raised. As observed in figure 6, this effect is perfectly reproduced by the APM: the gas shrinkage microporosity has totally disappeared at

400 bar. In the 400 bar case, the remaining porosity is pure shrinkage microporosity appearing in closed mushy zones. An increase of the applied pressure will not reduce the pure shrinkage microporosity, because closed mushy zones can not anymore be

entre zones pâteuses isolées et microporosité de retrait est représentée à la Fig. 7. Afin d'éliminer ces microporosités, il serait nécessaire de modifier les conditions de refroidissement et/ou d'utiliser des squeeze pins.

Conclusion

Un modèle tenant compte de tous les mécanismes physiques et thermodynamiques de formation des porosités dans les pièces moulées a été mis au point. Ces développements ont conduit à introduire un nouveau module dans le logiciel de fonderie ProCAST de la société ESI Group: le module avancé de porosité (APM). Ce module permet en particulier la prévision de la microretassure gazeuse qui ne peut pas être modélisée avec les approches traditionnelles faisant intervenir seulement le retrait à la solidification. ■

Bibliographie

- [1] Ch. Pequet, M. Gremaud, and M. Rappaz, "Modelling of microporosity, macroporosity, and pipe-shrinkage formation during the solidification of alloys using a mushy-zone refinement method: applications to aluminium alloys", *Met. Mater. Trans.*, 33A (2002) 2095.
- [2] G. Couturier, M. Rappaz. "Modeling of porosity formation in multicomponent alloys in the presence of several dissolved gases and volatile solute elements", TMS, Symposium on Simulation of Aluminium Shape Casting Processing (2006).

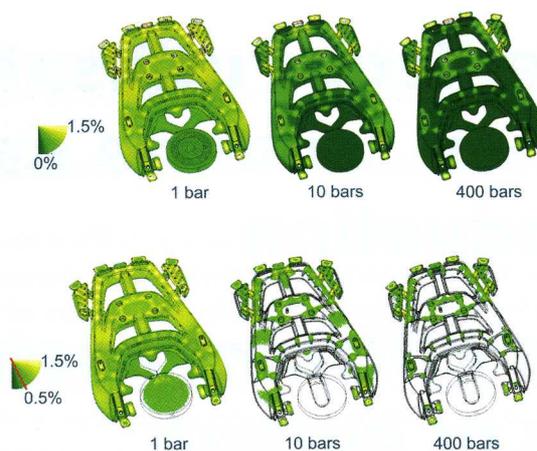


Fig. 6. Final microporosity fraction in the component for different third stage applied pressures. The porosity is represented at the surface of the casting (upper figures) and then with a cut off value showing the porosity above 0.5% (lower figures) / Microporosité finale dans la pièce pour différentes pressions appliquées en 3ème phase. La porosité est représentée en surface de pièce (images du haut) et avec une valeur seuil montrant la porosité supérieure à 0.5% en volume (images du bas).

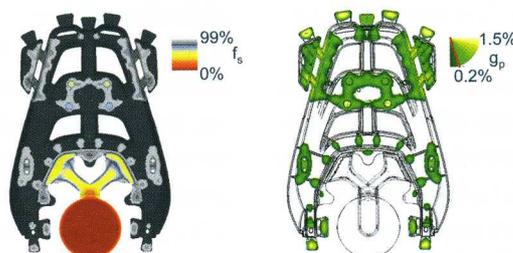


Fig. 7. Correlation between closed mushy zones (left) and pure shrinkage microporosity (right) in the 400 bar case / Corrélation entre les zones pâteuses isolées (à gauche) et la microporosité de retrait (à droite) pour une pression en 3ème phase de 400 bars.

feed by liquid. The correlation between closed mushy zones and pure shrinkage microporosity is represented in figure 7. In order to remove these remaining shrinkage microporosities, it would be necessary to modify the cooling conditions and/or to use pin squeeze.

Conclusion

A model taking into account all the physics and thermodynamics of porosity formation in castings has been developed. These developments lead to a new module in the ProCAST software: The Advanced Porosity Module (APM). In particular, this module allows the prediction of the gas shrinkage microporosity that can not be modelled with traditional shrinkage approaches. ■



KONRAD RUMP INSTALLATIONS DE GRENAILLAGE :

- Grenailleuses à tapis,
- Grenailleuses à voie suspendue,
- Grenailleuses en auge,
- Grenailleuses à rouleaux.

Contact :

FDC FRANCE

1 rue Albert Einstein
56700 HENNEBONT
Tél. 02 97 05 38 56 / Fax 02 97 05 38 57
Email : fdc.france@wanadoo.fr

