GDR « SAM »

Solidification des Alliages Métalliques

Journées Annuelles

5 – 6 décembre 2015

Amphithéâtre GreEn-ER - Campus GIANT
21 Avenue des Martyrs, Grenoble

Ces Journées du GDR SAM seront l'occasion de présenter les avancées scientifiques récentes dans le domaine de la recherche en solidification. Le panorama des Journées de 2015 a montré la fertilité de l'inspiration réciproque entre recherche académique et industrielle. Cette année, le GDR SAM se met au diapason de la ville de Grenoble qui les accueille, et propose un programme plus centré sur l'utilisation des grands instruments (rayonnement X synchrotron, micropesanteur) et de plateformes. La discussion sera ouverte sur les projets et les perspectives dans ces domaines.

Les Organisateurs :
S. AKAMATSU - silvere.akamatsu@insp.jussieu.fr
O. BUDENKOVA - olga.budenkova@simap.grenoble-inp.fr
G. CHICHIGNOUD - Guy.Chichignoud@grenoble.cnrs.fr
T. DUFFAR - thierry.duffar@grenoble-inp.fr
K. ZAIDAT - kader.zaidat@grenoble-inp.fr

Le Bureau du GDR SAM
S. AKAMATSU, INSP - silvere.akamatsu@insp.jussieu.fr
H. COMBEAU, IJL - herve.combeau@ijl.nancy-universite.fr
D. DALOZ, IJL - dominique.daloz@ijl.nancy-universite.fr
Ch.-A. GANDIN, CEMEF - Charles-Andre.GANDIN@mines-paristech.fr
P. JARRY, Constellium - philippe.jarry@constellium.com
J. LACAZE, CIRIMAT - Jacques.LACAZE@ensiacet.fr
G. REINHART, IM2NP - guillaume.reinhart@im2np.fr

GDR 3328
SOLIDIFICATION
DES ALLIAGES METALLIQUES

Lundi 5 décembre 2016 :

13h30 Introduction, *S. Akamatsu (INSP)*

14h00 Interaction particules/dendrite lors de la solidification de composites à matrice métalliques : imagerie 4D par micro- et nano-tomographie in situ, *L. Salvo (SIMAP)*

14h30 In-situ investigation of equiaxed dendrite growth in Al-based alloys employing lab-based X-radiography, *F. Kargl (DLR)*

15h00 Investigation par imagerie X in situ de la compétition de grains et de la formation des défauts pendant la croissance du silicium pour les applications photovoltaïques, *N. Mangelinck (IM2NP)*

15h30 Mushy zone solidification and Temperature Gradient Zone Melting, *G. Boussinot (Access)*

16h00 *Pause*

16h30 Transformations de phases à l'état solide dans les soudures d'alliages à durcissement structural : caractérisation et mécanismes de genèse des microstructures, *A. Deschamps (SIMAP)*

17h00 Programmes de l'ESA en science en micropesanteur, *O. Minster (ESA)*

17h30 Discussion

Dîner

Mardi 6 décembre 20016 :

8h45 Influence de la convection pendant la solidification dirigée d'alliages transparents massifs : comparaison des expériences 1g/µg dans DECLIC-DSI, *F. Mota (IM2NP)*

9h10 La fabrication additive métal : influence de la solidification rapide sur les microstructures, *M. Thomas (ONERA)*

9h40 Simulation mésoscopique de la croissance dendritique et comparaisons avec le champ de phase, *M. Zaloznik (IJL)*

10h10 Fusion et refusion VAR des alliages de zirconium pour l'industrie nucléaire, *A. Gaillac (AREVA)*

10h40 Présentations « flash »

11h00 Posters

Déjeuner

14h00 Effets d'anisotropie interfaciale et relations d'orientations dans les eutectiques lamellaires, *O. Senninger (INSP)*

14h25 De la R&D au marché: Le rôle des plateformes technologiques dans le secteur des matériaux, *P. Jeandel (Cristal-Innov)*

14h55 Fonctions de parois pour la simulation de la ségrégation solidification dirigée, *V. Botton (INSA Lyon)*

15h20 Conclusion

Participants

ABIKCHI	Meriem	Manoir	meriem.abikchi@manoir.eu.com
ABOU-KHALIL	Lara	IM2NP	lara.aboukhalil@im2np.fr
AKAMATSU	Silvère	INSP	akamatsu@insp.jussieu.fr
ANDREAU	Olivier	PIMM	andreau.olivier@gmail.com
ANTONI-ZDZIOBEK	Annie	SIMAP	aantoni@simap.grenoble-inp.fr
BARBERIS	Pierre	AREVA	pierre.barberis@areva.com
BARSUK	Daria	SIMAP	daria.barsuk@simap.grenoble-inp.fr
BOTTIN-ROUSSEAU	Sabine	INSP	bottin@insp.jussieu.fr
BOTTON	Valéry	INSA-LMFA	valery.botton@insa-lyon.fr
BOUSSINOT	Guillaume	Access	guillaume.boussinot@gmail.com
BUDENKOVA	Olga	SIMAP	olga.budenkova@simap.grenoble-inp.fr
CAMEL	Denis	CEA	CAMEL@chartreuse.cea.fr
CARCEY-COLLET	Dominique	AREVA	dominique.carceycollet@areva.com
CHEN	Qiang	CEMEF	qiang.chen@mines-paristech.fr
CHERIF	Maya	SIMAP	maya.cherif@simap.grenoble-inp.fr
CHICHIGNOUD	Guy	SIMAP	Guy.Chichignoud@grenoble.cnrs.fr
CISTERNAS	Martin	IJL	martin.cisternas-fernandez@univ-lorraine.fr
COSTES	Frédéric	Transvalor	frederic.costes@transvalor.com
DE TERRIS	Thibaut	PIMM	thibaut.de_terris@ensam.eu
DELAROCHE	Christophe	CNES	Christophe.Delaroche@cnes.fr
DESCHAMPS	Alexis	SIMAP	alexis.deschamps@simap.grenoble-inp.fr
DESCOTES	Vincent	APERAM	vincent.descotes@aperam.com
DEVILLE-CAVELLIN	Christian	UGITECH	deville-cavellin@ugitech.com
DOS SANTOS	Alexis	EC-Lille	alexis_dossantos@orange.fr
DUFFAR	Thierry	SIMAP	thierry.duffar@grenoble-inp.fr
EL GHANI	Nouhayla	INSA-LMFA	nouhayla.el-ghani@insa-lyon.fr
FLEURISSON	Romain	CEMEF	romain.fleurisson@mines-paristech.fr
GAILLAC	Alexis	AREVA	alexis.gaillac@areva.com
GANDIN	Charles-André	CEMEF	Charles-Andre.GANDIN@mines-paristech.fr
GENESSON	Marvin	IJL	marvin.gennesson@gmail.com
GUÉRIN	Pascal	AREVA	pascal.guerin@areva.com
GUERNAOUI	Sofiane	IJL	soufiane.guernaoui@univ-lorraine.fr
GUILLEMOT	Gildas	CEMEF	gildas.guillemot@mines-paristech.fr
HAMZAOUI	Idir	INSA-LMFA	hamzaouiidir@gmail.com
HENRY	Daniel	INSA-LMFA	daniel.henry@ec-lyon.fr
JARRY	Philippe	Constellium	philippe.jarry@constellium.com
JEANDEL	Patricia	Cristal-Innov	patricia.jeandel@cristalinnov.com

JOURDAN	Julien	TIMET	julien.jourdan@timet.com
KARGL	Florian	DLR	Florian.Kargl@dlr.de
KENNEDY	Jacob	IJL	jacob-roman.kennedy@univ-lorraine.fr
LACAZE	Jacques	CIRIMAT	jacques.lacaze@ensiacet.fr
LHUISSIER	Pierre	SIMAP	pierre.lhuissier@simap.grenoble-inp.fr
LI	Zaidao	EC-Lille	lizaidao@gmail.com
LIONET	Marie	UGITECH	Marie.Lionet@ugitech.com
MANGELINCK-NOEL	Nathalie	IM2NP	nathalie.mangelinck@im2np.fr
MASSAUD	Mostafa	ICB	massaud78@gmail.com
MASSON	Jean-Marcel	CTIF	masson@ctif.com
MINSTER	Olivier	ESA	Olivier.Minster@esa.int
MONIZ	Liliana	CDM	liliana.moniz_da_silva_sancho@mines-paristech.fr
MOTA	Fatima	IM2NP	fatima.lisboa-mota@im2np.fr
MOUDJED	Brahim	INSA-LMFA	brahim.moudjed@yahoo.fr
NGUYEN-THI	Henri	IM2NP	henri.nguyen-thi@im2np.fr
NOURI	Ahmed	SIMAP	ahmed.nouri@simap.grenoble-inp.fr
NUTA	Ioana	SIMAP	ioana.nuta@simap.grenoble-inp.fr
OLMEDILLA	Antonio	IJL	antonio.olmedilla@univ-lorraine.fr
OUDOT	Benoit	CEA	benoit.oudot@cea.fr
PARK	Joon Hyuk	IJL	jhp@ualberta.ca
PINEAU	Adrian	CEMEF	adrian.pineau@mines-paristech.fr
RADI	Kaoutar	SIMAP	Kaoutar.Radi@simap.grenoble-inp.fr
RAME	Jérémy	SAFRAN	jeremy.rame@safrangroup.com
REILLY	Nicole		nicole.reilly@univ-lorraine.fr
REINHART	Guillaume	IM2NP	guillaume.reinhart@im2np.fr
SALVO	Luc	SIMAP	luc.salvo@simap.grenoble-inp.fr
SENNINGER	Oriane	INSP	oriane.senninger@insp.jussieu.fr
SOUKHAL	Bachira	Univ. Alger	soukhal.bachira@yahoo.fr
STUCKY	Michel	CTIF	stucky_mi@ctif.com
TANDJAOUI	Amina	EC-Lille	amina.tandjaoui@ec-lille.fr
TASSIN	Catherine	SIMAP	catherine.tassin@simap.grenoble-inp.fr
TAVERNIER	Virgile	INSA-LMFA	virgile.tavernier@insa-lyon.fr
THOMAS	Marc	ONERA	Marc.Thomas@onera.fr
WAZ	Emmanuel	Constellium	emmanuel.waz@constellium.com

RESUMES

Interaction particules/dendrite lors de la solidification de composites à matrice métalliques : imagerie 4D par micro-tomographie et nano-tomographie in situ

R. Daudin[1], S. Terzi[2], J.Villanova[2], E. Boller[2], P. Lhuissier[1], M. Scheel[2,3], L. Salvo[1]
[1] SIMaP – CNRS – Univ. Grenoble Alpes – F38000 -France
[2] ESRF – F38000 – Grenoble France
[3] SOLEIL - 91190 Saint Aubin, France

L'apparition de nouvelles techniques de solidification utilisant des champs externes, comme l'utilisation des ultrasons, permet de produire de nouveaux composites contenant des particules céramiques sub-micrométriques en empêchant leur agglomération naturelle dans le liquide. Cependant, la compréhension d'un tel traitement nécessite des informations expérimentales sur l'interaction entre les particules et le front de solidification (incorporation dans le solide, engloutissement, poussée, piégeage, etc.). La diversité de ces mécanismes a été principalement étudiée théoriquement et la comparaison avec les données expérimentales est souvent limitée à des expériences en 2D et en solidification dirigée. Cependant, la plupart des alliages commerciaux se solidifient avec une structure dendritique ou globulaire et la complexité du front de particules / solidification ne peut pas être entièrement comprise en exploitant des données provenant d'expériences se concentrant uniquement sur une croissance planaire. De plus, bien que la solidification assistée par ultrasons d'alliages non renforcés soit bien documentée, on connaît moins l'impact de la dispersion des particules qui peuvent influencer les mécanismes de croissance des dendrites et donc la microstructure finale. Des simulations numériques ont montré que les particules influent sur la morphologie des dendrites, et des expériences sur des alliages transparents ont été réalisées, mais aucune donnée expérimentale sur les métaux n'a été rapportée. Nous présenterons un aperçu de plusieurs ensembles de données expérimentales obtenues à l'aide de la tomographie synchrotron rapide 4D in situ, à l'échelle micro et aussi nano. Ces données soulignent la nécessité de la visualisation in situ en trois dimensions et fournissent des informations intéressantes pour comprendre la solidification dendritique complexe des alliages à base de Mg et d'Al, en présence de particules de céramique, traitées avec ou sans champs externes et jusqu'à l'échelle submicronique. Les interactions entre les particules et les fronts de solidification sont étudiées dans différents scénarii (agrégats, microparticules isolées, taux de refroidissement élevés, avec ou sans champs externes, etc ...) avec un cas spécifique révélant l'impact de la distribution des particules sur les morphologies des dendrites dans un alliage à base d'Al.

In-situ investigation of equiaxed dendrite growth in Al-based alloys employing lab-based X-radiography

F. Kargl[1], M. Becker, S. Klein
[1] DLR, Cologne, Allemagne

In recent years X-radiography using synchrotron radiation as well as lab-based microfocus X-ray sources became a powerful tool to in real-time investigate microstructure evolution during solidification. Here we present X-radiography data on equiaxed dendrite growth in Al-based alloys. To this end ~200µm thin cylindrical samples have been processed in an isothermal furnace. The dendrite growth process was monitored in real-time using the X-radiography facility X-RISE. The X-ray beam was aligned parallel to the gravitational force to suppress buoyancy-driven fluid flow within the sample. For comparison with dendrite growth models dendrite tip velocities were determined as a function of undercooling. Furthermore, we present a calibration method that enabled us to determine solute concentrations ahead of the dendrite tip serving as input parameter

in growth models. Our data on Al-Ge alloys shows excellent agreement with the McFadden-Browne (MFB) model an extension to the standard Lipton-Glicksman-Kurz (LGK) model for dendrite growth.

Investigation par imagerie X *in situ* de la compétition des grains et de la formation des défauts pendant la croissance du silicium pour les applications photovoltaïques

N. Mangelinck-Noël[1],
[1] IM2NP, Univ. Aix-Marseille, Marseille, France

Dans le but de réduire les coûts des procédés d'élaboration et de conserver le meilleur rendement photovoltaïque, une partie des recherches actuelles concernant les panneaux solaires PV à base de silicium se focalisent sur l'optimisation de la phase de croissance du silicium. En effet, il reste indispensable d'améliorer la qualité cristalline du lingot final. Trois technologies alternatives ont été récemment proposées pour maîtriser la germination des grains et des défauts tels que les dislocations. Toutes ces techniques partagent deux défis principaux: le contrôle de la structure de grains finale et la réduction de la densité de dislocations. L'analyse *post-mortem* des lingots solidifiés ne permet pas de remonter à la compréhension des mécanismes qui se produisent durant la cristallisation. Dans ce contexte, nous caractérisons la cristallisation du silicium par de l'imagerie X *in situ* pendant la croissance. Les expériences sont basées sur la solidification dirigée dans le dispositif GaTSBI (GaTSBI device: **G**rowth at high **T**emperature observed by X-ray **S**ynchrotron **B**eam **I**maging) qui permet l'utilisation de l'imagerie X synchrotron. Deux techniques d'imagerie sont utilisées alternativement pendant une expérience de solidification : radiographie X et imagerie en diffraction de Bragg (aussi appelée topographie X). La technique de radiographie X permet d'obtenir l'information sur la morphologie et la cinétique de l'interface solide/liquide. La technique d'imagerie en diffraction de Bragg apporte des informations complémentaires et essentielles concernant la morphologie des grains, leur qualité cristalline, les macles, les champs de déformation dans les grains et ceux dus à la présence de dislocations. Les résultats présentés concernent les mécanismes fondamentaux de croissance du silicium à partir de germes monocristallins. Nous étudions en particulier la germination et les mécanismes de compétition de grains, la formation des macles et l'interaction entre les défauts structuraux tels que les dislocations et les joints de grains particuliers.

Mushy zone solidification and Temperature Gradient Zone Melting

G. Boussinot[1] M. Apel
[1] Access e.V., Intzestr. 5, D-52072 Aachen, Allemagne

The solidification paths in most industrial alloys usually involve dendritic growth leaving a complex mushy zone behind the growth front. While the dendritic growth is well documented since alerady a long time, the solidification of the mushy zone has recently received an increasing attention due to the development of in-situ techniques using X-rays. In particular, it has been pointed out that the Temperature Gradient Zone Melting (TGZM) process is a key ingredient in understanding the route to equilibrium of the mushy zone in a directionally solidified alloy. We performed phase-field simulations of the directional solidification of an Al-Cu alloy, followed by the mushy zone solidification in a static temperature gradient. Our simulations allow us not only to compare with available experimental data, but also to go beyond the experimental accuracy. Especially, we study in details the micro-segregation pattern in the solid, and we analyze the role of TGZM in the development of this pattern.

Transformations de phases à l'état solide dans les soudures d'alliages à durcissement structural : caractérisation et mécanismes de genèse des microstructures

A. Deschamps[1], Frédéric De Geuser[1]
[1] SIMAP, Grenoble, France

Les alliages à durcissement structural, c'est-à-dire durcis par précipitation nanométrique, sont largement utilisés dans le domaine du transport (automobile et plus encore aéronautique). Leur soudage reste délicat, car l'obtention des propriétés mécaniques recherchées nécessite des microstructures de précipitation homogènes tributaires de traitement thermiques maîtrisés, bien difficile à obtenir en tout point après soudage. La compréhension, et par suite l'optimisation du coupe matériau / procédé de soudage / conditions de soudage et de traitement thermique éventuel, passe par une étude fine des processus de transformations de phases lors de traitements non-isothermes.
Dans cette présentation, nous verrons comment l'utilisation de techniques de diffusion des rayons X i-situ permet de mieux comprendre l'évolution de la précipitation lors de traitements thermiques non isothermes, et comment la même technique appliquée en cartographie permet de caractériser la distribution spatiale des précipités dans les différentes zones de soudures. L'ensemble des deux permettra d'envisager des pistes d'optimisation.
Les matériaux abordés seront différents alliages d'aluminium, soudés par faisceau d'électrons ou par voie solide (FSW).

Programmes de l'ESA en sciences en micropesanteur

O. Minster[1]
[1] ESTEC, ESA, Noordwijk, Pays-Bas

Materials sciences have always been a prominent topic of programmes of research in space run by space agencies worldwide over the last few decades. ESA has made significant contributions in the field and is still very active. Investigating the physics of solidification by providing reference experimental data acquired in well controlled diffusive conditions to support the development and validation of numerical models, as well as measuring the thermo-physical properties of the molten materials as a function of temperature are the two main objectives of the current programme. The main solidification features (columnar, equiaxed, eutectic, peritectic, nucleation and solidification from under-cooled melts) are addressed in the programme. Furthermore, links to industry researchers have been assertively promoted and developed to ascertain that any valuable knowledge finds its way to where it can be best employed.
Some instruments are regularly flown on parabolic flights or sounding rockets. Several facilities for directional solidification experiments were developed and deployed on the ISS. These include the Materials Sciences Laboratory with two high-temperature Bridgman-type furnaces (Low Gradient Furnace and Solidification and Quenching Furnace), a Bridgman type set-up for processing transparent model materials amenable to direct optical observation (Transparent Alloys) and an ElectroMagnetic Levitator. International teams of scientist including theorists, numericists and experimenters are cooperating in the different projects that utilise these different instruments. The presentation will cover the range of topics and capabilities, and clarify how interested scientists can join teams and contribute to further advancing this research.

Influence de la convection pendant la solidification dirigée d'alliages transparents massifs : comparaison des expériences 1g/µg dans DECLIC-DSI

F.L. Mota[1], B. Billia[1], J. Pereda[1], J.-M. Debierre[1], R. Guérin[1], Y. Song[2], A. Karma[2], R. Trivedi[3], et N. Bergeon[1]

[1] IM2NP, Aix-Marseille Université & CNRS UMR 7334, Marseille, France

[2] Physics Department, Northeastern University, Boston, USA

[3] Department of Materials Science & Engineering, Iowa State University, USA

Pour étudier des réseaux étendus 3D et s'affranchir des effets de la convection, dominants sur terre, des conditions de gravité réduite sont nécessaires. Dans le cadre d'un projet CNES-NASA, nous avons participé au développement de l'Instrument DECLIC et de son insert de solidification dirigée (DSI) dédié à l'étude in situ de la formation des microstructures colonnaires 3D sur des analogues transparents. Les expériences spatiales se sont enchaînées à bord de la Station Spatiale Internationale entre décembre 2009 et mars 2011. L'instrument a ensuite été utilisé au sol pour mettre en évidence sur le même échantillon les effets convectifs. L'évolution de l'espacement primaire, ainsi que le mouvement de l'interface (recul du front) seront détaillées pour des conditions purement diffusives et convecto-diffusives. En particulier, l'analyse du recul du front nous a permis de mettre en évidence des phénomènes de macroségrégation axiale du soluté pour les expériences terrestres mais également, de façon plus surprenante, pour certaines expériences spatiales. Compte-tenu du niveau effectif de gravité dans ISS, une analyse en ordre de grandeur nous a permis d'expliquer que ce phénomène, lié à un brassage convectif, peut effectivement devenir important suivant les paramètres de croissance.

La fabrication additive métal : influence de la solidification rapide sur les microstructures

M. Thomas[1]

[1] ONERA, Châtillon, France

La fabrication additive métal favorise l'obtention de microstructures fortement hors-d'équilibre en raison des conditions de solidification rapide et de cyclage thermique lors des mises en couches successives. En effet, l'interaction laser-matière est de courte durée en raison des vitesses de balayage importantes ce qui induit une rapidité des phénomènes de fusion de la poudre suivie de la solidification. S'agissant d'un processus très local, des gradients thermiques très élevés vont apparaître entre le bain liquide et la matière solide environnante malgré les échanges de chaleur et le brassage dans le bain liquide. La forte dissipation de la chaleur au cours de la solidification peut induire des vitesses de refroidissement de l'ordre de 10^4 à 10^5 K/s. Il peut être avantageux de profiter de ces conditions de solidification et de refroidissement particulières pour l'obtention de microstructures plus fines en taille de grains, pour la rétention à température ambiante de phases métastables, pour l'extension du domaine de solubilité de certains éléments ou bien pour l'affinement des précipités, et également pour une homogénéité chimique améliorée avec une réduction des ségrégations chimiques par rapport à la fonderie. Suivant les cas, il peut être recommandé d'effectuer des post-traitements thermiques pour stabiliser ces microstructures particulières et également pour les optimiser en vue d'améliorer les propriétés mécaniques. Un certain nombre d'exemples provenant de notre propre expérience mais aussi de la littérature seront donc proposés pour un ensemble de matériaux métalliques afin de montrer l'impact sur la microstructure et aussi sur les propriétés mécaniques de ces conditions de solidification rapide.

Simulation mésoscopique de la croissance dendritique et comparaisons avec le champ de phase

M. Zaloznik[1], Alexandre Viardin[2], Youssef Souhar[1], Markus Apel[2], Hervé Combeau[1]
[1] Institut Jean Lamour, CNRS – Université de Lorraine, Dép. SI2M, F-54042 Nancy CEDEX, France
[2] Access e.V., Intzestr. 5, D-52072 Aachen, Allemagne

Integrated computational materials engineering (ICME) aims at predicting the link between the process conditions and the final mechanical properties of the product. Multiscale modeling of solidification patterns is crucial in an ICME methodology for cast products. Macroscopic modeling at the process scale, widely used in the industry, lacks an accurate representation of the microstructure. Direct modeling of microstructures is possible with phase field methods, which can accurately predict the strongly coupled phenomena of microstructure formation. Phase field methods are well developed and widely applied, however, due to the calculation time they remain limited to scales of a few grains. The mesoscopic envelope model of dendritic solidification can describe microstructure patterns on the scale of up to 100 dendritic grains. It can thus provide a link between the microstructure and the process scale. In the mesoscopic model, the shape of the dendritic structure is approximated by its envelope. The growth of the envelope is given by analytical models that give the growth velocity as a function of the undercooling of the liquid ahead of the envelope. We present a comparison of mesoscopic and phase field simulations of dendritic solidification in alloys. The objective is to validate mesoscopic simulations of β(Ti) dendrite growth during directional solidification of the binary alloy Ti-45at.%Al under the influence of natural convection in hypergravity. In a first stage, comparisons are performed for columnar and equiaxed dendritic solidification under the influence of diffusive interactions between grains. In a second stage, predictions of the interaction of microstructure growth and fluid flow are compared.

Fusion et refusion VAR des alliages de zirconium pour l'industrie nucléaire

A. Gaillac[1]
[1] AREVA NP, Ugine, France

L'élaboration des lingots d'alliages de zirconium est l'un des procédés clés dans la gamme de fabrication des assemblages de combustible nucléaire. Il détermine en effet en grande partie la chimie des lingots produits, et ainsi le comportement en réacteur des crayons de combustible. Le procédé VAR (Vacuum Arc Remelting) permet d'atteindre la qualité de lingot attendue, que ce soit pour le bon déroulement des opérations ultérieures (état de surface et microstructure adaptée au forgeage, filage et laminage) ou le comportement des produits finis (homogénéité de composition chimique). Mais cette qualité est dépendante des paramètres de fusion utilisés (nombre de fusions, vitesse de fusion, brassage électromagnétique, …), qu'il convient donc d'optimiser en fonction de l'alliage fondu et de la qualité attendue.
Pour cela, le logiciel SOLAR, développé par l'IJL (Université de Lorraine) dans le cadre d'un consortium avec des industriels (Aubert & Duval, Timet, Aperam et Areva NP) est utilisé pour simuler le procédé VAR. L'analyse croisée de simulations numériques et d'essais expérimentaux a permis de préciser et de valider les phénomènes physiques ainsi que les données d'entrée (propriétés de l'alliage et des éléments d'addition, conditions aux limites) à prendre en compte dans le modèle. Ainsi, la simulation du procédé VAR a pu être exploitée pour traiter certaines problématiques industrielles, telles que la micro et macro-ségrégation des éléments d'addition, la dissolution de particules à haut point de fusion, le dégazage de certains éléments volatiles et la maîtrise de l'état de surface des lingots et de la position de la retassure.

Effets d'anisotropie interfaciale et relations d'orientations dans les eutectiques lamellaires

O. Senninger[1], S. Bottin-Rousseau[1], G. Faivre[1] et S. Akamatsu [1]
[1] INSP, UPMC, CNRS, Paris, France

The dependence of eutectic growth microstructures on the physical properties of the solidfying alloy is a long-standing research subject. The most obvious example of such interest is certainly the famous Jackson-Hunt theory of regular eutectic growth in nonfaceted eutectic binary alloys. This theory, and most fundamental research work on this subject since then, assumed a fully isotropic system, thus ignoring the possible influence of an anisotropy of the free energy of the (solid-solid) interphase boundaries (crystallographic effect). However, it is known experimentally that the detailed morphological features of, e.g., lamellar-eutectic microstructures can be markedly eutectic-grain dependent. How does a lamellar-eutectic microstructure depend on the relative orientation between the crystals of the two solid phases? How does the microstructure within a given eutectic grain evolve as a function of the orientation of the grain with respect to the main solidification growth axis ? Those are (some of) the questions considered in this study. We performed thin-sample directional solidification experiments, with real-time optical observation of the coupled growth front pattern, of the eutectic In-In2Bi eutectic alloy. We considered eutectic grains presenting a clear crystallographic effect (tilted lamellae growing as being "locked" onto a given direction), and essentially uniform crystal orientations of both pahses, determined by x-ray diffraction measurements (pole figures). This allowed us to bring clear evidence of the existence of two special orientation relationships between the two eutectic solids. We observed that the lamellar-locking plane, in both cases, is not necessarily well aligned with a coincidence crystallographic plane. Moreover, as it could be expected, our results confirm that eutectic grains that present a regular microstructure do not exhibit a special orientation relationship.

Plateforme technologique : passer de la R&D au marché Application aux cristaux et matériaux piézoélectriques

K. Lebbou[1], H. Cabane[2], P. Veber[3], T. Duffar[4], P. Jeandel[2]
[1] ILM - Institut Lumière Matière - Université Claude Bernard Lyon 1
[2] Plateforme Cristal innov – UCBL / Savoie
[3] ICMCB – Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux
[4] SIMaP – Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés - Grenoble INP

La vision des matériaux dans les programmes de recherche (ANR – H2020) évoluent vers une orientation fonctionnelle. Les procédés, tant de synthèse que de mise en œuvre, sont également mis en avant, notamment dans une perspective du « renouveau industriel ». Dans ce contexte, la possibilité de poursuivre des travaux de R&D vers des TRL 5-6 devient déterminant pour obtenir des financements. Cependant, les moyens à mettre en œuvre lors du développement d'une ligne pilote pour la synthèse ou la solidification des matériaux représentent parfois le premier verrou technologique… Des outils dédiés tels que des plateformes technologiques offrent un environnement tout à fait adapté pour faciliter cette étape. Leur positionnement se situe à l'interface entre les travaux réalisés en laboratoire et le lancement de l'industrialisation, avec un objectif principal : offrir des ressources et un environnement à l'état de l'art visant à faciliter et accélérer l'innovation co(é)llaborative dans les matériaux. Exemple de success story : le renouveau industriel dans les cristaux et matériaux piézoélectriques. la R&D sur les matériaux piézoélectriques retrouve actuellement de la vigueur, tirée par des exigences fonctionnelles qui dépassent les limites des cristaux et céramiques facilement disponibles sur le marché, y compris en terme d'exigences règlementaires. Les échanges réguliers entre les différents acteurs d'une plateforme technologique (académiques, ingénieurs, industriels, réseaux…) permettent d'identifier des spécifications non satisfaites chez les industriels, d'une part, et les principales équipes de recherche capables de lever les verrous scientifiques et technologiques, d'autre part. Sur la base de ces éléments, le conseil

scientifique de la PTF met en oeuvre une feuille de route avec les acteurs de la communauté des matériaux cristallins, afin d'initier des projets collaboratifs s'inscrivant dans une stratégie globale et bénéficiant de l'environnement de la plateforme pour avancer dans les TRL (matériaux et procédés)

AaP	Sujet	matériau	Procédé	Applica.	Principaux acteurs nationaux	Utilisat° PTF
H2020	Modelisat°	piezo	Cz et synthèse hydrothermale		SIMaP Grenoble - Inopro (PME)	Validat° des modèles
Rapid	Haute T°	LGT	Cz	SAW	ILM Lyon–FEMTO Besançon –Indus	Co-dev du procédé
Rapid		AlN	Couche	BAW	SIMaP (Grenoble) – Rakon (indus)	comparatif procédés AlN
ANR	Sans Pb	Subs PZT	flux	Ultra Son	ICMCBordeaux - indus	Scale-up procédé
PEA	Hte Qté	Quartz	Hydrothe	OUS	CNES – ISA Lyon	Dév. Procédé et caract
LabCom	multifonct	Oxydes/ Si	MBE	SAW	INL Lyon – Frecinisys (indus)	Préparat° substrats
FUI	Mise en œuvre	Quartz	Techno collect.	Inertiel	En montage	

personne à contacter : Patricia Jeandel - patricia.jeandel@cristalinnov.com

Vers des fonctions de parois pour la modélisation de la ségrégation d'impuretés en croissance front plan

M. Chatelain[1], V. Botton[2,3], M. Albaric[1], D. Pelletier[1], D. Henry[2], S. Millet[2], J.P. Garandet[1]
[1] INES, Univ. Grenoble Alpes, F-73375 Le Bourget du Lac, France
CEA, LITEN, Department of Solar Technologies, F-73375 Le Bourget du Lac, France
[2] LMFA, CNRS/Université de Lyon, École Centrale de Lyon/Université Lyon 1/INSA de Lyon, ECL, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully
[3] INSA Euromed, Université Euro-Méditerranéenne de Fès, Morocco

Nous présenterons une approche développée durant la thèse de Marc Chatelain concernant la possibilité de mettre au point des fonctions de parois solutales pour la ségrégation d'impuretés en croissance front plan. Une des difficultés majeures dans la simulation des procédés de cristallisation ou de purification du silicium photovoltaïque est due à leur nature intrinsèquement multi-physique et multi-échelle : le problème de la ségrégation d'impuretés se joue dans une couche limite dont l'épaisseur est de quelques microns alors que le problème thermique se joue à l'échelle du creuset voire du four, c'est à dire quelques dizaines de centimètres. La finesse de la couche limite solutale impose des maillages localement extrêmement fins, alors que la taille du domaine de calcul doit englober le creuset. On s'intéresse ici à la possibilité de prendre en compte de manière semi-analytique le transport de soluté dans la couche limite solutale. C'est donc une approche analogue à celle des fonctions de parois hydrodynamiques couramment utilisées dans les logiciels de mécanique des fluides numérique pour prendre en compte les couche limites turbulentes en maximisant toutefois la taille des mailles près des parois. On se base sur une description de la couche limite solutale par analyse d'échelles proposée par Garandet et al. initialement dans des régimes laminaires (convection naturelle dans des cavités de petite dimension, années 90), plus récemment pour des régimes turbulents (convection forcée dans des cavités de dimension décimétrique). Cette approche est améliorée pour mieux prendre en compte le transport turbulent de soluté dans la couche limite hydrodynamique et sa sous-couche visqueuse. Le modèle développé est testé sur une configuration canonique de cavité entraînée ce qui permet de faire une étude paramétrique : régimes laminaire à turbulent, influence de la vitesse de solidification, de la diffusivité des impuretés, etc. Une procédure est mise au point pour calculer la composition d'un lingot qui serait fabriqué dans cette configuration idéale. On montre que le modèle prédit de manière assez satisfaisante la composition du lingot sans nécessairement mailler finement la couche limite solutale. Cette approche est donc prometteuse mais les difficultés qu'il reste à résoudre ne seront pas occultées.