

La fusion à arc sous vide appliquée aux alliages de Zirconium dédiés aux applications nucléaires

I. CRASSOUS^a

a. Framatome, Centre Recherche Composants, Avenue Paul Girod, 73403 UGINE, FRANCE,
isabelle.crassous@framatome.com

Mots clés : Fusion VAR, Zirconium, ségrégation, simulation, instrumentation

Résumé

Le procédé de refusion à arc sous vide est particulièrement adapté pour la refusion d'alliages métalliques à haut point de fusion dédiés à des applications nécessitant une qualité élevée en matière de chimie et de structure comme le domaine du nucléaire, de l'aéronautique ou du médical. C'est dans ce cadre que le Centre de Recherche Composants de Framatome étudie ce procédé utilisé pour la production d'alliages de zirconium à haute valeur ajoutée grâce à la simulation numérique, à la mise en œuvre d'instrumentation innovante et à l'utilisation des nouvelles approches telles que l'intelligence artificielle et les Data Sciences.

1. Introduction

Framatome est un acteur international majeur de la filière nucléaire reconnu pour ses solutions innovantes et ses technologies à forte valeur ajoutée pour la conception, la construction, la maintenance et le développement du parc nucléaire mondial. L'entreprise conçoit et fabrique des composants, du combustible et offre toute une gamme de services destinés aux réacteurs. La Business Unit Combustible conçoit, fabrique et vend du combustible nucléaire pour les centrales de production d'électricité ainsi que pour les réacteurs de recherche. La Direction des Opérations Composants (DOC) maîtrise toutes les étapes de la métallurgie du zirconium, du minerai jusqu'à la réalisation de composants en alliage de zirconium : produits plats, barres et tubes destinés à la fabrication du combustible nucléaire. La DOC dispose également d'un Centre de Recherches spécialisé dans la métallurgie et les procédés de transformation des alliages métalliques destinés à l'industrie du nucléaire. Son activité principale porte sur la simulation par modélisation numérique et études expérimentales pour optimiser les procédés industriels dont la fusion à arc sous vide, le développement d'alliages et de produits nouveaux, l'élaboration d'alliages spécifiques et leur transformation thermomécaniques, la caractérisation des produits et des soudures et l'étude des propriétés en service (déformation et corrosion). Le Centre de Recherche entretient une démarche d'ouverture à travers sa participation à des instances internationales, en organisant des séminaires et des sessions de formation. Il établit également des contrats de partenariats avec des écoles et universités reconnues. Les nouvelles technologies font désormais partie intégrante des développements au CRC, avec un effort ciblé sur les jumeaux numériques et l'intelligence artificielle.

2. La fusion à arc sous vide appliqué aux alliages de Zr

2.1 Le procédé de refusion à arc

Le procédé VAR met en œuvre une électrode consommable constituée de la matière première à fondre afin d'améliorer sa propreté chimique, et d'obtenir un lingot avec une très bonne homogénéité chimique et structurale (Fig.1). Ce procédé étant sous vide, il est particulièrement adapté aux activités nécessitant des alliages métalliques liquides à haute température de très forte valeur ajoutée comme le domaine du nucléaire, de l'aéronautique ou du médical.

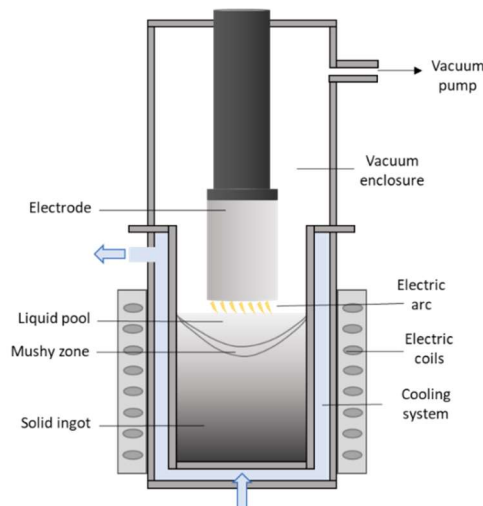


Figure 1. Illustration du procédé de refusion à arc sous vide [1].

2.2 Les phénomènes physiques mis en jeu

Les phénomènes physiques mis en jeu sont complexes et fortement couplés, ce qui rend la compréhension des mécanismes difficile. L'apport d'énergie met en jeu l'électrostatique via l'application d'un courant entre l'électrode à fondre et le lingot en cours de formation avec formation d'un plasma d'arc. Les échanges d'énergie sous forme de chaleur permettent le changement de phase solide – liquide de la matière à raffiner au bas de l'électrode. Les échanges de chaleur entre le lingot et la lingotière métallique refroidie mettent en jeu différentes interfaces et phénomènes comme la conduction, convection et rayonnement. Enfin la mécanique des fluides dans le puits de métal liquide est d'une importance capitale pour le transport de matière et donc la chimie finale du lingot après solidification. Les mouvements et vitesse de fluide sont impactés d'une part par la thermique mais également par l'électromagnétisme de la bobine de brassage. Enfin, le procédé étant sous vide et à haute température, des phénomènes de volatilisation et de condensation de différentes espèces métalliques ou non ont lieu tout au long de la fusion dans l'espace inter-électrode.

3. Vers une meilleure compréhension du procédé

Voici quelques exemples d'études réalisées dans les dernières années afin de progresser sur la compréhension des phénomènes mis en jeu qui couple systématiquement une approche numérique et une validation expérimentale utilisant des instrumentations innovantes développées à façon pour ce procédé.

2.1 L'arc électrique

L'arc électrique qui se crée entre le bas de l'électrode et le lingot en cours de formation est à la base du procédé. Il conditionne en effet la fusion de l'électrode et le transfert d'énergie. La conception des fours et les hautes températures mises en jeu rendent particulièrement difficile la visualisation de l'arc et l'étude de son comportement. Néanmoins des observations réalisées dans les années 1980 [2,3] et plus récemment en France [4,5] sur un four industriel de Framatome pour une refusions de Zr avec des vidéos rapides synchronisées avec l'enregistrement haute fréquence de la tension d'arc ont permis de mieux comprendre le comportement de l'arc sous forme diffuse avec une multitude de spots cathodiques (Fig. 2) et le comportement des courts-circuits (drip-shorts) liés au transfert de gouttes de métal liquide entre l'électrode et le lingot (Fig.3).

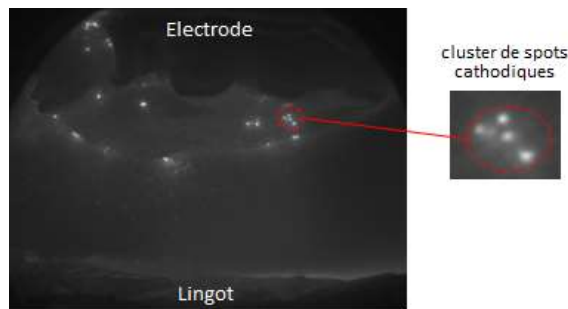


Figure 2. Image en vidéo rapide (5700 images/s, temps d'exposition 10 μs) de l'arc électrique pendant une refusion de Ti – TIMET [6].

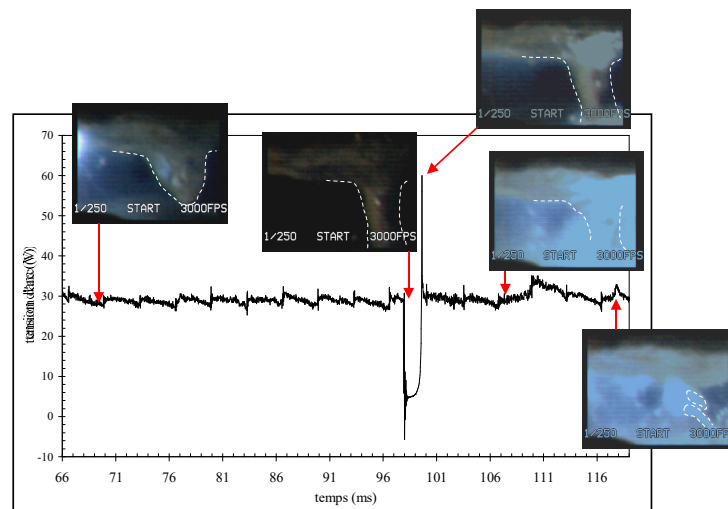


Figure 2. Exemple de signature électrique d'un drip-short, avec acquisitions vidéo synchronisées [6]

Ces observations sont précieuses afin de faire évoluer les modèles de simulation de comportement de l'arc nécessaires pour progresser sur la compréhension des phénomènes mis en jeu dans la zone de plasma d'arc [7].

2.2 Le brassage électromagnétique

Le champ magnétique appliqué via une bobine externe dite de brassage exerce une influence non seulement sur le contrôle du comportement de l'arc mais également sur l'écoulement puisqu'il est à l'origine des forces de Lorentz dans la phase de métal liquide (Fig. 3). Framatome a développé un modèle complet de cette bobine de brassage d'un four typique industriel afin d'optimiser le brassage en cours de fusion qui est de premier ordre sur la ségrégation finale du lingot [8,9,10]. Des mesures

expérimentales pour différentes intensités de brassage ont été réalisées sur four industriel afin de mesurer le champ magnétique pour vérifier la validité du modèle. Les comparaisons (Fig. 4) montrent une très bonne corrélation entre ces mesures et les estimations du modèle avec un écart moyen de l'ordre de 7%.

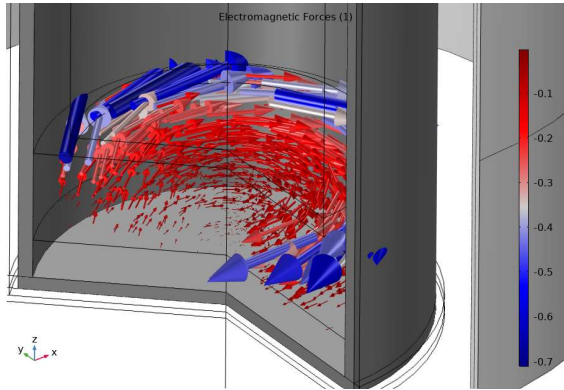


Figure 3. Normes adimensionnée du champ des force de Lorentz (couleur) et Forces de Lorentz (flèches)

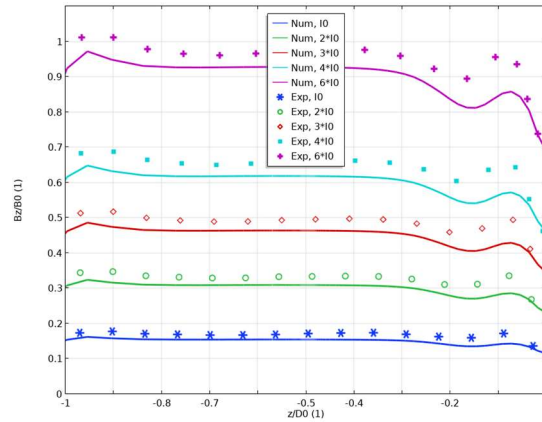
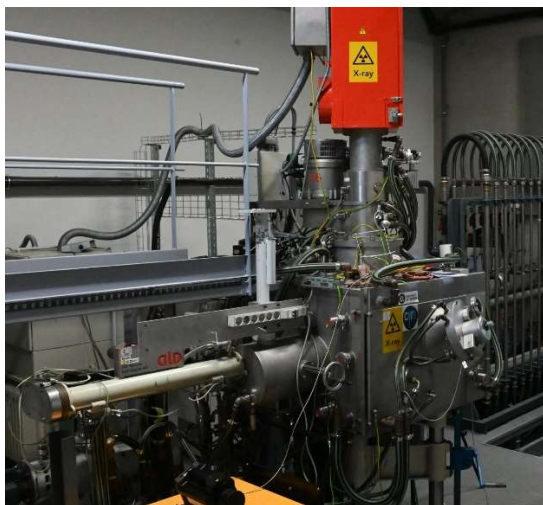


Figure 4. Comparaison entre les mesures expérimentales et les résultats de calcul du champ magnétique suivant l'axe vertical z dans un four VAR industriel [10].

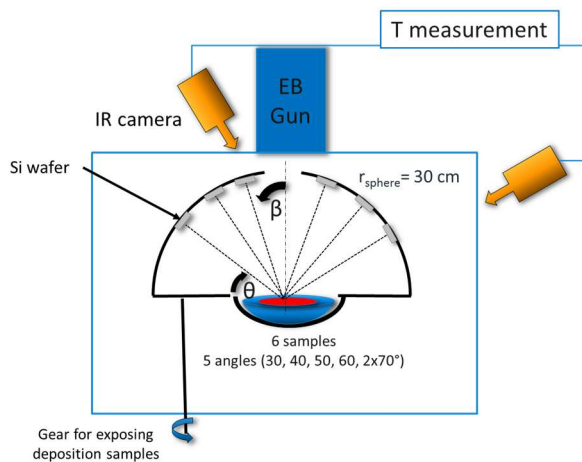
2.3 - L'évaporation et la condensation en cours de fusion

L'intérêt du procédé VAR réside dans la mise sous vide lors de la fusion, assurant la volatilisation des espèces au cours de la fusion, vecteur de purification de la matière. Cependant, certaines espèces métalliques sont capables de se volatiliser et de se condenser à proximité immédiate sur les parois internes du creuset conduisant à un ré-enrichissement du puits liquide en tête du lingot en croissance. C'est pourquoi des travaux alliant simulation numérique et expérimentation sur un four à bombardement électronique de laboratoire ont été menées ces dernières années en collaboration avec l'Institut Jean Lamour de Nancy [11, 12].

Les flux d'évaporation des éléments métalliques volatiles présents dans un alliage de Zr ont été évalués dans une atmosphère à faible pression d'argon (10^{-2} Pa) à l'aide d'un modèle en éléments finis et d'un dispositif expérimental innovant (fig.5).



(a)



(b)

Figure 5. a) Four BE de laboratoire avec un canon BE vertical 100 kW, b) Schéma du montage expérimental avec les wafers de condensation [11]

La loi d'évaporation de Knudsen modélise bien l'expansion de la vapeur dans les conditions expérimentales avec un écoulement moléculaire libre pour les faibles taux d'évaporation de l'alliage Zr. Les valeurs des coefficients de recondensation exprimées par la loi de Hertz-Langmuir-Knudsen montrent que le flux de recondensation de Zr à la surface du liquide est négligeable dans des conditions usuelles ($P_{Ar}=10^{-2}$ Pa) mais que sa valeur augmente jusqu'à 54% pour une pression d'argon de 5 Pa. Les approches expérimentales et numériques se sont avérées efficaces, ce qui permet de les appliquer en toute confiance pour étudier l'évaporation des alliages métalliques à haute température dans des modèles du procédé plus complexes.

3. Conclusion

Le procédé de fusion à arc sous vide utilisé pour la production d'alliages de Zr à haute valeur ajoutée dédiés aux applications nucléaires est largement étudié par le Centre de Recherche Composants grâce à approche pluridisciplinaire comprenant : la simulation numérique du procédé, la mise en œuvre d'instrumentation innovante. Les différents travaux permettent d'améliorer la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu et donc d'optimiser les gammes opératoires industrielles. A noter également que l'utilisation des nouvelles approches telles que l'intelligence artificielle et les Data Sciences sont également déployées afin d'acquérir une maîtrise accrue des effets du procédé sur la qualité et les propriétés du produit final.

Remerciements

Les travaux en simulation numérique et les diverses instrumentations innovantes présentés ici ont été largement supportés par l'Institut Jean Lamour de Nancy avec de nombreux travaux de doctorats dans le cadre d'un consortium qui existe depuis plus de 20 ans. La société SIMTEC, spécialisée en simulation numérique, a est également impliquée dans le développement de différents modèles du procédé de refusion.

Références

- ¹ I. Crassous, *SOLAR calculation of the capacity of the security system to ensure the extraction of heat during Vacuum Arc Remelting* Proceedings LMPC Birmingham (2019), p 37- p 46
- ² F.J. Zanner, L.A. Bertram, C. Adasczik et T. O'Brien - *Observations of melt rate as a function of arc power, CO pressure, and electrode gap during vacuum consumable arc remelting of Inconel 718*. Metallurgical Transactions B, 15, p. 117 (1984).
- ³ F.J. Zanner, R. Williamson, W. Hareland et L. Bertram - *Behavior and structure of metal vapor arc plasma between molten electrodes*. Journal of Vacuum Science and Technology A, 6, p. 2062 (1988).
- ⁴ P. Chapelle, J.P. Bellot, A. Jardy, T. Czerwiec, X. Robbe, B. Champin et D. Ablitzer - *An experimental study of the electric arc during vacuum arc remelting*. High Temperature Material Processes, 4, p. 493 (2000).
- ⁵ P. Chapelle, C. Noel, A. Risacher, J. Jourdan, A. Jardy et J. Jourdan - *Optical investigation of the behavior of the electric arc and the metal transfer during vacuum remelting of a Ti alloy*. Journal of Materials Processing Technology, 214, p. 2268 (2014).
- ⁶ A. Jardy, I. Crassous, S. Charmond, V. Descotes, S. Hans, Y. Millet - *Procédé de refusion à arc sous vide*. Techniques de l'ingénieur 42367210-m7822 (2022).
- ⁷ P.-O. Delzant, P. Chapelle, A. Jardy, A. Matveichev, and Y. Millet, 'Impact of a Transient and Asymmetrical Distribution of the Electric Arc on the Solidification Conditions of the Ingot in the VAR Process', *Metals*, vol. 12, no. 3, Art. no. 3, Mar. 2022, doi: 10.3390/met12030500
- ⁸ A. Jardy ; F. Leclerc, M. Revil-Baudard, P. Guerin, H. Combeau, V. Rebeyrolle – *Journal of ASTM International* al.7 (2010) 1-17
- ⁹ P.O. Delzant, B. Baque, P. Chapelle, A. Jardy, *Metallurgical and Materials Transactions B*, (2018), vol. 49, n° 3, pp. 958-968
- ¹⁰ V. Bruyère, P. Namy, I. Crassous, F. Alex, C. Deville-Cavellin "Modeling of the Magnetic Field in a Vacuum Arc Remelting furnace using the COMSOL Multiphysics® simulation software" Technical paper and conference - Conference COMSOL 2020 Europe, Grenoble
- ¹¹ T. Poullain, JP. Bellot, J. Jourdan, I. Crassous, A. Jardy, *Vacuum evaporation and expansion of pure metals at high temperature: Application to titanium and zirconium – Vacuum* 203 (2022) 111209
- ¹² T. Poullain – *Etude numérique et expérimentale de l'évaporation sous vide d'alliages métalliques : application à la refusion VAR de Zircaloy-4* - Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine soutenue le 6 décembre 2022