

ENCYCLOPEDIE

DE LA RECHERCHE
SUR L'ALUMINIUM
AU QUÉBEC
Journée étudiante du REGAL

ENCYCLOPEDIA

OF RESEARCH
ON ALUMINIUM
IN QUÉBEC
Regal students' day

20^e édition

20th edition

2023

ENCYCLOPÉDIE DE LA RECHERCHE SUR L'ALUMINIUM AU QUÉBEC 2023

ENCYCLOPEDIA OF RESEARCH ON ALUMINIUM IN QUEBEC 2023

Table des matières

Table of contents

Comité d'organisation/ Organizing committee.....	4
Préface / Preface.....	5
Affiches* / Posters.....	6
AXE 1 : Production de l'aluminium / Aluminium Production.....	6
AXE 2 : Transformation et applications / Transformation and applications.....	30
Remerciements / Acknowledgements.....	49

*La liste complète des affiches est disponible au début de chaque section.

Les textes et illustrations sont une reproduction fidèle et respectent en tous points les travaux des étudiants.
The texts and illustrations here in are accurate, faithful reproductions of the students' work.



Crédits photos: Christian Desjardins photographe

Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL

Université Laval
 1065, avenue de la Médecine, local 1746
 Québec (Québec) G1V 0A6
 Canada
 Téléphone : 418 656-2362
www.regal-aluminium.ca

Montage graphique / Graphic assembly
 REGAL

Infographie / Layout
 REGAL

Coordination / Coordination
 Marie-Louise Tremblay
 Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL

Tous droits réservés. Sauf à des fins de citations, toute reproduction d'un extrait quelconque de ce livre, par quelque procédé que ce soit, est strictement interdite sans la permission écrite de l'éditeur.
All rights reserved. Other than for purpose of citation, all reproduction of any part of this book, by any process is strictly forbidden without the permission of the publisher.

© Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL, 2023
 Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2023 / Copyright – Québec National Library
 Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2023 / Copyright – Canadian National Library
 ISBN : 978-2-9815930-9-2

L'organisation d'INALCO 2023 et la Journée étudiante du REGAL a été rendue possible grâce à l'implication soutenue de l'équipe d'AluQuébec et du REGAL. Nous les en remercions.

Soulignons particulièrement le travail réalisé par Mario Fafard, président du comité scientifique d'INALCO, ayant permis la présentation d'une programmation riche en contenus techniques dont a pu bénéficier l'ensemble de la communauté étudiante participante. Mario Fafard est responsable du chantier infrastructures et ouvrages d'art pour AluQuébec et membre fondateur du REGAL dont il a été le directeur durant 10 ans.

UNIVERSITÉ LAVAL	ALUQUÉBEC
Houshang Alamdari, directeur du REGAL	Yves Archambault, ingénieur sénior
Nicolas Boissonnade, cochercheur du REGAL	Véronique Auclair, directrice des communications
Mario Fafard, cochercheur du REGAL	Petrino Buzatu, ingénieur
Fariba Mousavi, étudiante au doctorat	Alain Chapdeleine, ingénieur
Pablo Rico, étudiant au doctorat	Danielle Coudé, responsable de chantiers
Cyrus Talebpour, étudiant au doctorat	Mario Fafard, consultant
Marie-Louise Tremblay, coordonnatrice du REGAL	Huguette Gagné, adjointe administrative
	Lysane Martel, directrice exécutive et affaires publiques
	Marie-Morin-Drolet, coordonnatrice de projets
	François Racine, Président-directeur général

La Journée étudiante du REGAL (JER), activité phare de la programmation du Centre, fête ses 20 ans ! Cette activité annuelle présente une vue d'ensemble de la recherche universitaire effectuée dans le domaine de l'aluminium au Québec. C'est une occasion unique où étudiants et étudiantes, chercheurs et chercheuses, professionnelles et professionnels, techniciennes et techniciens et intervenants de l'industrie se rencontrent, discutent et partagent leurs connaissances sur l'aluminium. Au fil des ans, cette journée a su devenir un événement attendu dans l'écosystème de l'aluminium au Québec où les étudiantes et étudiants sont mis en valeur.

Présenter une affiche à des tiers fait parti de l'apprentissage par la recherche pour les personnes étudiantes ; présenter en quelques minutes le fruit du travail de toute une année est tout un défi et c'est pourquoi, en 2004, la Journée étudiante du REGAL (JER) a été mise sur pied.

La direction du REGAL de l'époque ne s'attendait pas à susciter un engouement aussi marqué, non seulement de la communauté étudiantes, chercheurs et chercheurs du Centre, mais également des entreprises. L'idée de créer le présent document a d'ailleurs été suggérée par une personne de l'industrie en 2004 (merci Gilles Dufour !).

La JER s'est tenue à tour de rôle dans les différents établissements membres du REGAL. L'événement a également été jumelé à quelques reprises avec des activités nationales et internationales (COM, CIAC, ICSOBA, ICAA, colloque aluminium +). Pour l'édition 2023, le REGAL et AluQuébec, la Grappe de l'aluminium du Québec, ont uni leurs efforts pour accueillir la conférence INALCO 2023 à laquelle la JER a été jumelée. Plus de 250 personnes de 14 pays ont assisté à l'événement. Ce sont 77 conférences techniques qui ont été présentées, dont une quinzaine par la communauté étudiante du REGAL. En parallèle aux conférences techniques, 50 étudiantes et étudiants ont participé au concours d'affiches scientifiques. Cette année, 10 finalistes ont été sélectionnés pour présenter oralement leur affiche devant les congressistes d'INALCO. Un jury composé de 6 experts internationaux a évalué les présentations. Tous les finalistes ont reçu 250\$ pour leur participation. Des prix ont été remis aux 3 premières positions. Ainsi, Alyaa Bakr, Liyong Cui et Esmail Pourkoshid, tous doctorants de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), se sont vus remettre respectivement une bourse d'un montant de 3 000 \$, 2 000 \$ et 1 000 \$. Le REGAL est fier de souligner que 2 récipiendaires sur 3 sont des femmes. C'est signe que les temps changent ! Louis Ouellette s'est vu remettre le prix de 500 \$ remis à un membre de la relève (niveau baccalauréat).

L'encyclopédie de la recherche sur l'aluminium au Québec regroupe les affiches scientifiques qui ont été présentées dans le cadre du concours d'affiches. Ce recueil constitue un moyen pratique et durable pour diffuser et suivre l'évolution de la recherche universitaire et collégiale sur l'aluminium au Québec réalisée dans le cadre du regroupement stratégique REGAL, financé depuis plusieurs années par le FRQNT.

Tout ceci n'aurait toutefois pas été possible sans l'appui du Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) et des entreprises et organismes partenaires qui ont collectivement offert un support financier ayant permis, notamment, la remise de prix aux étudiants. Nous remercions Alcoa, Aluminerie Alouette, AluQuébec, le CQRDA, le CRITM, le CSMO, ELYSIS, Hatch, ICSOBA et Rio Tinto pour leur fidèle participation.

The REGAL Student Day (JER), a flagship activity of the Center's programming, has celebrated its 20th anniversary! This annual event provides an overview of the university research conducted in the field of aluminum in Quebec. It is a unique opportunity for students, researchers, professionals, technicians, and industry stakeholders to come together, discuss, and share their knowledge about aluminum. Over the years, this day has become an anticipated event in the aluminum ecosystem in Quebec, where students are highlighted.

Presenting a poster to others is part of the research learning experience for students. Presenting the culmination of a year's worth of work in just a few minutes is quite a challenge. That's why, in 2004, the REGAL Student Day (JER) was established. At the time, the REGAL management did not expect to generate such enthusiasm, not only from the student and research community at the Center but also from companies. In fact, the idea to create this document was suggested by someone from the industry in 2004 (thank you Gilles Dufour!).

The JER has been held in turn at different member institutions of REGAL. The event has also been paired with national and international activities on several occasions (COM, CIAC, ICSOBA, ICAA, aluminum+ symposium). For the 2023 edition, REGAL and AluQuébec, the Quebec aluminum cluster, have collaborated to host the INALCO 2023 conference, which was paired with the JER. More than 250 participants from 14 countries attended the event. A total of 77 technical lectures were presented, with about 15 delivered by the REGAL student community.

In addition to the technical presentations, 50 students participated in the scientific poster competition. This year, 10 finalists were selected to orally present their posters to INALCO delegates. A jury consisting of 6 international experts evaluated the presentations. All finalists received \$250 for their participation, and prizes were awarded to the top 3 positions. Alyaa Bakr, Liyong Cui, and Esmail Pourkoshid, all PhD students at Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), were awarded \$3,000, \$2,000, and \$1,000 respectively. REGAL is proud to highlight that 2 out of the 3 recipients are women, a clear sign of changing times! Louis Ouellette received the \$500 prize awarded to a member of the next generation (bachelor's level).

The Encyclopedia of Aluminium Research in Quebec brings together scientific posters that were presented as part of the poster contest. This compilation serves as a practical and enduring means to disseminate and track the progress of university and college research on aluminium in Quebec, conducted within the REGAL strategic grouping, which has been funded for several years by the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT). However, all of this would not have been possible without the support of the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT) and the partner companies and organizations that collectively provided financial support, enabling, among other things, the awarding of prizes to students. We extend our gratitude to Alcoa, Aluminerie Alouette, AluQuébec, CQRDA, CRITM, CSMO, ELYSIS, Hatch, ICSOBA, and Rio Tinto for their steadfast participation.



Houshang Alamdari
Directeur du REGAL



Mario Fafard
Directeur du comité scientifique
INALCO

Posters

AXE 1

PRODUCTION DE L'ALUMINIUM PRIMAIRE

PRIMARY ALUMINUM PRODUCTION

Axe 1 | Axis 1

Répertoire des affiches | Posters directory

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.

Students whose name is followed by an asterisk (*) are recipients of an award of excellence for their poster.

Jonathan Alarie

La conductivité thermique effective d'un radeau d'alumine au fil de son infiltration..... 8

Belkacem Amara

Effet de la température de production du biocharbon sur la qualité des anodes..... 9

Nooshin Baastani

Effet des paramètres de mélange et de pressage sur les propriétés des anodes de carbone de laboratoire à base de biomasse..... 10

Mohammadreza Basohbatnovinzad

Effet de différentes conditions de tirage sur la concentration en dioxyde de carbone dans une cuve Hall-Héroult 11

Mohamed Hassen Ben Salem

Étude de la dégradation des briques réfractaires ordinaires dans une cellule d'électrolyse d'aluminium..... 12

Mohammadhossein Dabaghi

Effet de la méthode de refroidissement sur les propriétés de l'anode crue 13

Arash Fassadi Chimeh

Modélisation mathématique de la désulfuration des gaz d'échappement des cuves d'électrolyse..... 14

Maxime Guéguen

Reproduction numérique des conditions de chauffage monotone utilisée pour la mesure des propriétés thermiques des matériaux granulaires..... 15

Lamia Haddoufi

Modélisation de la résistivité des anodes vertes pour la production d'aluminium..... 16

Amir Kafaei

Effet des vibrations sur la sédimentation des particules dans les fluides non newtoniens rhéofluidifiants..... 17

Elahe Khani

Étude de la réactivité des anodes via le développement d'une méthode d'essai au sulfate de sodium 18

Ali Kodfard

Bilan thermique des événements opérationnels affectant la dissolution locale de l'alumine dans les cuves d'électrolyse..... 19

Petre Manolescu

Surveillance en ligne des performances des cuves d'électrolyse..... 20

Louis Ouellette

Représentation tridimensionnelle des gradients thermiques autour d'un objet par combinaison de techniques tomographiques et d'imagerie Schlieren 21

Karthikeyan Rajan

Impact des caractéristiques morphologiques des particules de la chaux hydratée sur le procédé semi-sec de désulfuration à basse température 22

Omolbanin Saeidi

Caractérisation du comportement thermomécanique de l'assemblage cathodique..... 23

Bazoumana Sanogo

Étude de la couche de gelée par l'analyse des données industrielles 24

Karima Selmani Bouayoune

Mesures des émissions de perfluorocarbure lors de la production d'aluminium..... 25

Nafiseh Shadvar

Impact de l'empilement des anodes sur l'extraction du brai de l'anode pendant la cuisson26

Samuel Théberge

Étude bidimensionnelle de l'agitation de l'interface bain-métal causé par le dioxyde de carbone dans une cuve d'électrolyse de l'aluminium avec ansys fluent™27

Rohini-Nandan Tripathy

Optimisation du lit résistif pour le préchauffage des cellules d'électrolyse28

Flora Marie Aimee Tuyizere

Effet des additifs fins de coke de pétrole calciné dans le bio-brai pour les anodes en carbone29

LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE EFFECTIVE D'UN RADEAU D'ALUMINE AU FIL DE SON INFILTRATION

THE EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF AN ALUMINA RAFT DURING ITS INFILTRATION

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



RioTinto



Fonds de recherche
Nature et
technologies
Québec

Introduction

In the aluminum electrolysis process, cold alumina is injected on the surface of a cryolytic bath which rapidly agglomerates to form a floating raft of powder. While the lower part of the raft is wetted by the contact with the liquid, the upper part stays dry for a moment. The liquid infiltrates the powder due to capillary forces and wet the entire raft within a minute. This transient process results in heterogenous thermal conductivity for the raft.

The goal of this work is to obtain a transient model to estimate the rafts thermal conductivity.

This tool will provide critical information to reveal the fundamental understanding of infiltration, sintering, solidification/fusion of bath which, combined, leads to a better understanding of the alumina dissolution process.

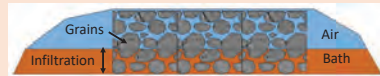


Figure 1 : Illustration of a raft floating at the bath surface

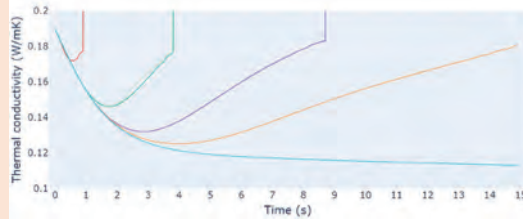


Figure 2 : Dry conductivity of the raft.

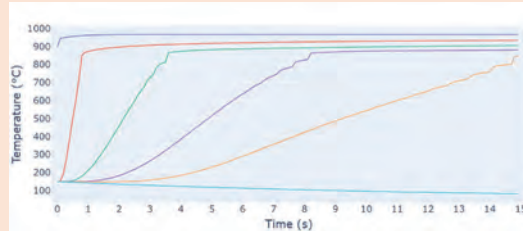


Figure 4 : Temperature of the grains in the raft over time.

Results

Figures 2 and 4 show that the effective thermal conductivity of the raft decrease in the layer in contact with the air, while the layers heated by the bath see their conductivity rise. This is due to the radiative heat transfer that overcomes the loss of conductivity of the solid. Figure 3 shows that there is a spike for the raft conductivity when the grains are in contact with the liquid (about an order of magnitude). The comparison of figures 4 and 5 show an interesting behavior, the heat flux prefers to rise in the grains first, then in the liquid, which greatly helps the uniformization of the temperature inside a layer, even before the contact with the liquid.

Conclusion

The results show that it takes a significative time before the bath reaches its liquidus temperature. Thus, this simulation suggests that dissolution and sintering occur during the first seconds of the existence of the raft and even after. This simulation will be of great importance to access the evaluation of this process in future work.

Method

The approach of the equivalent unit cell is used to find an effective conductivity in a powder bed. The model of Zehner Bauer and Schlünder, found in the VDI heat atlas [1], have been chosen for its simple, yet complete, representation of the effective conductivity. The infiltration of the raft by the liquid is computed with the help of the Washburn equation, as presented by Kirdponpattara [2]. For this simulation, the raft has been discretized in layers of size of the grain diameter, 80 μm , to ensure that a whole unit cell are present in each layer. The time step is 1 μs , which allows thermal stability of the simulation. Also, the bath properties remain constant and are deduced from known relations (see Thonstad [3]) for a typical industrial bath. A convective heat flux is provided to the raft for the whole simulation, due to the flow under the raft. The conductive heat flux is calculated from the mean temperature of the component of a layer of the raft, weighted with the heat capacity of the components. The heat flux is supposed to heat each component individually, then a second step of heat transfer between the component is considered. Finally, solidification effect of the bath is here neglected, as the enthalpie of the dissolution is not yet present. This step will be added in further work.

Model Zehner Bauer Schlünder

Role	Effective conductivity in powdered bed.
Key parameters	<ul style="list-style-type: none"> Thermal properties: <ul style="list-style-type: none"> Powder. Fluid. Structural properties of the powder (grain shape and size).

Model Washburn

Role	Infiltration estimation
Key parameters	<ul style="list-style-type: none"> Contact angle between bath and powder Properties of the bath Time

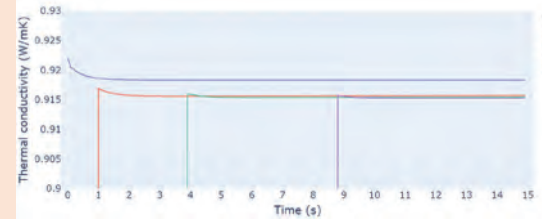


Figure 3 : Wet conductivity of the raft.

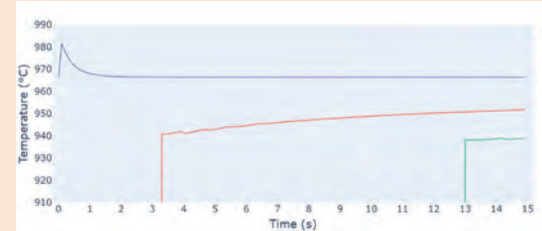


Figure 5 : Temperature of the liquid in the raft over time.

Acknowledgement

The authors want to thank Rio Tinto, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada and the Fonds de recherche Nature et technologies of Quebec for their technical and financial support for this project.

References

- Chemieingenieurwesen, V.D.-G.V.u., *VDI heat atlas*. 2010, Springer: Berlin.
- Kirdponpattara, S., M. Phisalaphong, and B.-m.-Z. Newby, *Applicability of Washburn capillary rise for determining contact angles of powders/porous materials*. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2013. **397**: p. 169-176.
- Thonstad, J., *Aluminium electrolysis : fundamentals of the Hall-Héroult process*. 3rd ed. 2001, Düsseldorf: Aluminium-Verlag, xi, 359 p.

Jonathan Alarie

Université du Québec à
Chicoutimi

L. Kiss - UQAC

L. Dion - UQAC

S. Guérard - Rio Tinto

J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

La production primaire d'aluminium est réalisée par l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolite. Pour maintenir la réaction continue d'électrolyse, une quantité constante d'alumine doit se dissoudre à la même vitesse qu'elle est consommée. Le procédé Hall-Héroult repose généralement sur l'injection d'environ 1000 g de poudre d'alumine toutes les dizaines de secondes, réparties en trois à cinq points dans la cellule. À la suite de l'injection, l'alumine s'agglomère rapidement pour former des radeaux flottants qui limitent les échanges de surface entre l'alumine et l'électrolyte, réduisant ainsi le taux de dissolution. Les radeaux se forment par une interaction complexe d'infiltration du liquide, de dégagement de gaz, ainsi que de dissolution, frittage et changement de phase de l'alumine. Les comportements associés à ces phénomènes dépendent généralement de la température locale des différentes phases en contact. Par conséquent, une formulation précise du transfert de chaleur dans le radeau créé avec de l'alumine froide est nécessaire pour comprendre les mécanismes de formation du radeau. Dans le cadre d'un travail plus vaste sur la dissolution de l'alumine, le travail présenté ici pose les bases d'une telle formulation et propose un modèle simple pour obtenir la conductivité thermique de ces radeaux dans des conditions spécifiquement définies.

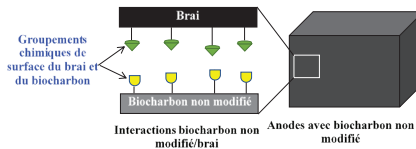
Primary aluminium production is performed with the electrolysis of dissolved alumina in cryolite. To sustain the continuous reaction of electrolysis, a constant amount of alumina needs to dissolve at the rate it is consumed. The Hall-Héroult process generally relies on the injection of about 1000 g of alumina powder for every ten few seconds, distributed at three to five points in the cell. Following the injection, the alumina rapidly agglomerates to form floating rafts that limit the exchange surface between the alumina and the electrolyte, thus limiting the dissolution rate. Rafts are formed by a complex interaction of the liquid infiltration, the gas release as well as, alumina dissolution, sintering, and phase change. All these phenomena have in common that they depend on the local temperature of the different phases in contact. Therefore, an accurate formulation of the heat transfer in the raft created with cold alumina is needed to understand the raft formation mechanisms. As part of a larger work on alumina dissolution, the work presented here sets out the basis of such a formulation and proposes a simple model to obtain the thermal conductivity of these rafts under specifically defined conditions.

EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE PRODUCTION DU BIOCHARBON SUR LA QUALITÉ DES ANODES

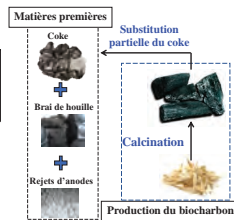
EFFECT OF BIOCOKE PRODUCTION TEMPERATURE ON ANODE QUALITY



Introduction et problématique



Faible interaction entre le biocharbon et le brai



- Variation de la qualité du coke.
- Détérioration de la qualité des anodes.
- Faibles interactions entre le biocharbon et le brai
- Modification chimique du biocharbon avec un additif afin d'augmenter le groupe fonctionnel de surface, améliorant les interactions entre le biocharbon et le brai.

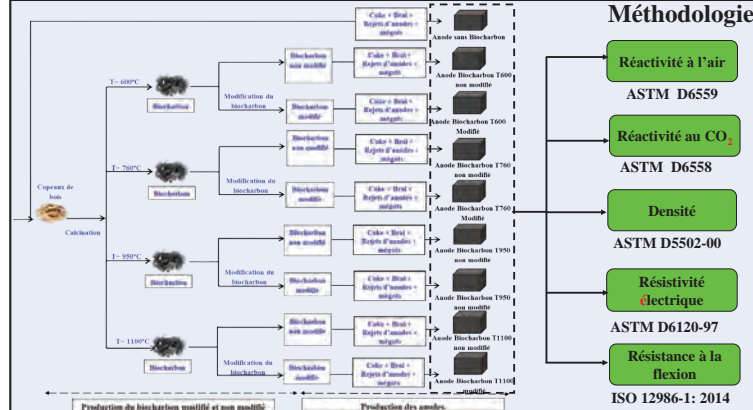
Objectif

L'objectif de ce projet est d'étudier l'impact de la température finale de production du biocharbon sur la qualité des anodes qui contiennent du biocharbon.

Sous objectifs:

- Fabrication et caractérisation des anodes qui contiennent le biocharbon modifié et non modifié produit à différentes températures.
- Déterminer l'impact de présence du biocharbon modifié dans les anodes sur leurs propriétés et comparer avec celles de l'anode standard.
- Trouver la meilleure température de production du biocharbon.

Méthodologie



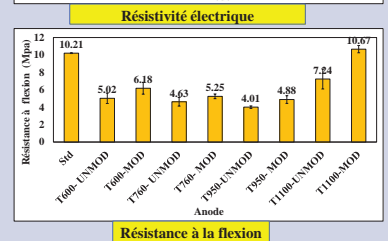
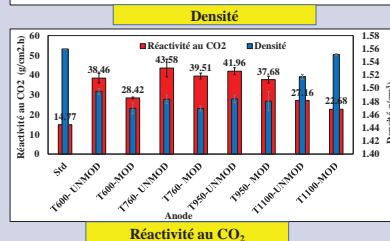
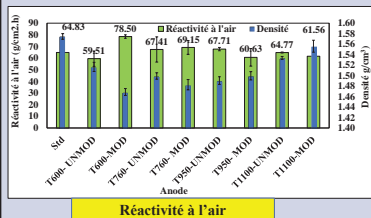
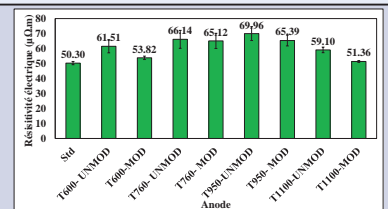
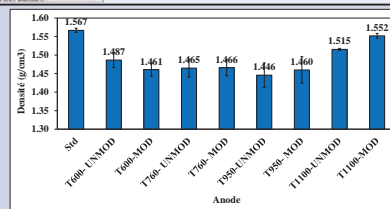
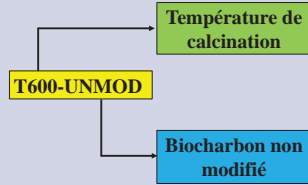
Abréviation des biocharbons modifié et non modifié

Abbréviation	Description
UNMOD	Biocharbon non modifié
MOD	Biocharbon modifié avec 3 % additif

Composition des anodes

Anode	Biocharbon (%)	Additif (%)
Std	0	0
T600- UNMOD	3	0
T600-MOD	3	3
T700- UNMOD	3	0
T700- MOD	3	3
T950-UNMOD	3	0
T950- MOD	3	3
T1100-UNMOD	3	0
T1100-MOD	3	3

Résultats et discussion



Conclusions

- ☐ Le biocharbon produit à la température de cuisson de l'anode et modifié avec 3 % d'additif a donné des anodes ayant des propriétés semblables à celles des anodes standards.
- ☐ Lorsqu'il s'agit de décider si le remplacement partiel du coke par du biocharbon est réalisable ou non, d'autres facteurs tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre due à l'utilisation de biocharbon et à la calcination de moins de coke, l'utilisation de matières premières moins coûteuses, les économies réalisées grâce à la taxe carbone, etc. doivent être pris en compte.

Remerciements

- Nous remercions:
- le CRNSG pour le soutien financier, et
 - Boisaco et Aluminerie Alouette pour les matériaux

Les anodes en carbone sont composées de coke de pétrole, de brai de houille, d'anodes recyclées et de mégots. Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, on a essayé de fabriquer des anodes avec du biocharbon. Mais, la majorité de ces efforts n'ont pas donné des résultats en raison de la détérioration de la qualité des anodes avec ce remplacement. Récemment, les chercheurs de la Chaire de recherche sur les matériaux industriels (CHIMI) de l'UQAC ont réussi à remplacer une partie du coke de pétrole par du biocharbon modifié à l'aide d'un additif. Le biocharbon est produit par la pyrolyse de copeaux de bois à une température semblable à celle de la cuisson des anodes industrielles (~ 1100 °C). Cette étude se focalise sur l'impact de la température finale de production du biocharbon sur la qualité des anodes. Le biocharbon a été produit à quatre températures différentes (600 °C, 750 °C, 950 °C et 1100 °C). Les anodes ont été fabriquées sans biocharbon (standard) et avec des biocharbons modifiés et non modifiés. Ensuite, les anodes ont été caractérisées en mesurant leurs densités, résistivités électriques, réactivités à l'air et au CO₂, ainsi que leurs résistances à la flexion.

The carbon anodes are made of petroleum coke, coal tar pitch, recycled anodes, and butts. In order to reduce greenhouse gas emissions, researchers tried to manufacture anodes using biocoal. However, the majority of these efforts did not give any result due to a deterioration of anode quality with this replacement. Recently, researchers of the Research Chair on Industrial Materials (CHIMI) of UQAC successfully replaced a portion of the petroleum coke with biocoal modified using an additive. Biocoal is produced through the pyrolysis of wood chips at a temperature similar to that used for anode baking in industry (~ 1100 °C). This study examines the impact of the final biocoal production temperature on anode quality. Biocoal was produced at four different temperatures (600 °C, 750 °C, 950 °C, and 1100 °C). Anodes were manufactured without biocoal (standard) and with modified and unmodified biocoals. Then, the anodes were characterized by measuring their density, electrical resistivity, air and CO₂ reactivity, and bending strength.

EFFET DES PARAMÈTRES DE MÉLANGE ET DE PRESSAGE SUR LES PROPRIÉTÉS DES ANODES DE CARBONE DE LABORATOIRE À BASE DE BIOMASSE

EFFECT OF MIXING AND PRESSING PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF BIOMASS-BASED LAB-SCALE CARBON ANODES



AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM ALUMINIUM PRODUCTION

1. Introduction

Biomass-driven binder is being developed as a potential replacement for coal-tar pitch (CTP) in carbon anodes for primary aluminium production. Bio-oil (BO), one of the biomass pyrolysis products, is converted to a pitch-like material via heat treatment. The resulting material, called **Biopitch (BP)** [1] [2], is applied to produce lab-scale carbon anodes. It is shown to have high wettability and adhesion with coke particles [1].

2. Objective

Improving BP-based carbon anode properties; green apparent density (GAD), baked apparent density (BAD), and specific electrical resistivity (SER) via optimization of green anode production parameters including:

- BP/CPC mass ratio (CPC: Calcined petroleum coke)
- Mixing temperature (MT)
- Mixing time (Mt)
- Pressing temperature (PT)

3. Hypothesis

Low softening point of BP may help decrease the mixing temperature.

4. Materials

CV (wt. %)	27.3 ± 1.2
Method: ASTM D4715-98	
SP (°C)	72.3 ± 1.3
Method: ISO 5940:1981	

Particle size (Us mesh)	4-8	8-14	14-30	30-50	50-100	100-200	BN: -5200
(wt. %)	21.8	10.0	11.5	12.6	9.0	10.6	24.5

T (°C): 180
Heating rate: 0.5 °C/min

5. Methodology

BP/CPC (%)	MT (°C)	Mt (min)	PT (°C)
16	160	8	130
18	170	10	140
20	180	12	150

With 4-center points
Statistical Software: Minitab

GAD
BAD
ASTM D5502-21
SER
ISO11713

Total number of anode samples: 20
 Mass of lab-scale anode: 312 g
 Baking temperature: 1100 °C

Paste-making and pressing processes [1]

6. Primary results and discussion

Fig. 1. Scatter plot chart: SER vs. BAD of 20 BP-based carbon anodes.

Green anode production parameters

Swelling Sample (1) profiled:

- BP/CPC: 20
- MT: 180°C
- Mt: 12 min
- PT: 130°C

Swelling Sample (2) profiled:

- BP/CPC: 20
- MT: 180°C
- Mt: 8 min
- PT: 150°C

Swelling Sample (3) and (4) and (5):

- BP/CPC: 20
- MT: 180°C
- Mt: 12 min
- PT: 150°C

Swelling phenomenon

Qualitative analysis:

- Observation of swelling in three outlier data
- Three outlier data; with a 20% BP/Coke mass ratio

Proposed solution:

- Application of lubricant
- Lubricity of anode mold

Fig. 2. Main effects plot: BAD vs. BP-based green anode production parameters.

Fig. 3. Baked and swollen BP-based carbon anodes - without anode mold lubrication (a) and baked BP-based carbon anodes with anode mold lubrication (b).

Fig. 4. Line chart - average degrees of positions of green BP-based carbon anode (Bentley) mold, and Top.

7. Conclusion

- Significant effects of BP/CPC mass ratio and pressing temperature on the BAD
- Based on p -value
- Samples without lubricant
- p -value of curvature; It indicates that the optimal point may be outside of the evaluated parameter values
- Parameters; including BP/CPC mass ratio, Mixing temperature, Mixing time, and Pressing temperature
- Samples without lubricant
- Positive effect of lubricant on reducing the swelling
- Anode mold lubrication

8. Future Work

- Optimization of DOE plan.
- Based on lab work and Minitab software
- Primary characterization methods: GAD, BAD, and SER

9. Bibliography

1. A. Hussein, Y. Lu, R. Mollaabbasi, J. Tessier and H. Alamdari, "Bio-pitch as a binder in carbon anodes for aluminum production: Bio-pitch properties and its interaction with coke particles." *Fuel*, vol. 275, p. 117875, 2020.
2. Y. Lu, D. Li, X. Huang, D. Picard, R. Mollaabbasi, T. Oliveier and H. Alamdari, "Synthesis and Characterization of Bio-pitch from Bio-oil." *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 8, p. 11772-11782, 2020.

Le bio-brai (BB) est un candidat pour remplacer le brai de goudron de houille (BGH) dans les anodes de carbone. Puisque le point de ramollissement (PR) du BB est inférieur à celui du BGH, la température de mélange pourrait éventuellement être abaissée, non seulement pour économiser de l'énergie thermique, mais également pour optimiser les paramètres de mélange, car la demande de brai et les autres paramètres de mélange peuvent être affectés par le faible PR. Le but de la présente étude était d'étudier l'effet des variables de mélange et de pressage sur les propriétés de l'anode. Les pâtes ont été fabriquées via quatre paramètres différents selon un plan d'expérience factoriel complet à 2 niveaux : rapport BB/Coke (16-20%, température de mélange (160-180 °C), temps de mélange (8-12 min), et température de pressage (130-150 °C). Les pâtes ont été compactées dans un moule sous une pression de 60 MPa. Les anodes vertes ont été cuites à 1100 °C. Ensuite, la densité apparente verte (DAV), la densité apparente cuite (DAC) et la résistivité électrique spécifique (RES) des échantillons cuits ont été mesurées. Des paramètres de production améliorés sont suggérés pour atteindre une GAD et une BAD élevées, ainsi qu'une SER faible.

Biopitch (BP) is a candidate to replace coal-tar pitch (CTP) in carbon anodes. Since the softening point (SP) of BP is lower than CTP, the mixing temperature could possibly be lowered, not only to save thermal energy but also to optimize the mixing parameters, as the pitch demand and the other mixing parameters may be affected by the low SP. The goal of the current study was to investigate the effect of mixing and pressing variables on anode properties. The pastes were made via four different parameters according to a 2-level full factorial design of experiments: BP/Coke ratio (16-20%), mixing temperature (160-180 °C), mixing time (8-12 min), and pressing temperature (130-150 °C). The pastes were compacted in a mold at a pressure of 60 MPa. The green anodes were baked at 1100 °C. Then, the apparent green density (GAD), the apparent baked density (BAD), and the specific electrical resistivity (SER) of the baked samples were measured. Improved production parameters are suggested to achieve high GAD, BAD, and low SER.

EFFET DE DIFFÉRENTES CONDITIONS DE TIRAGE SUR LA CONCENTRATION EN DIOXYDE DE CARBONE DANS UNE CUVE HALL-HÉROULT

EFFECT OF VARIOUS DRAFT CONDITIONS ON THE GAS CONCENTRATION OF CARBON DIOXIDE IN A HALL-HEROULT CELL

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



RioTinto



Context

Electrochemical reactions that take place in the bath yield the accumulation of a liquid aluminum layer on the cathode. This process generates significant amount of greenhouse gases (CO_2, CO, SO_2 , others) which gets mixed with the cooling air supply as it is transported to the gas treatments centers for fluoride removal. Efforts are deployed on different levels to reduce GHG emissions and this study investigates the behavior affecting the CO_2 concentration specifically[1].

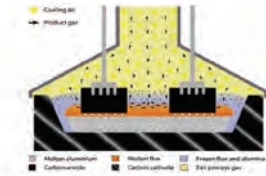


Figure 1. Cross sectional view of the current generation of cells using the Hall-Heroult process for aluminum production [2]

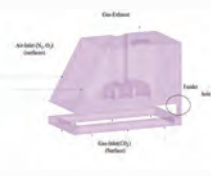


Figure 2: Geometry of cell

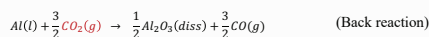
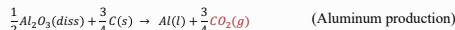
Goal of the study

The project is structured around main objectives is that Developing a numerical simulation tool to reproduce the gas flow and gas concentration adjacent to the anode , crust cavities of the cell and above the crust and Provide a gas concentration map to pinpoint the areas with the highest CO_2 concentrations.

Methodology

The airflow is simulated under various conditions using ANSYS Fluent™. This tool enables comprehensive flow simulations and can calculate carbon dioxide gas volume, concentration, and thermodynamic properties based on respective input conditions.

By using faraday law, it is possible to calculate aluminum production rate as a function of cell current, and directly the carbon dioxide production rate. Then knowing the current efficiency of the cells, we can stoichiometrically estimate the carbon monoxide generated from the back reaction. These input conditions will lead to the gas flow input set as a boundary conditions [3]. Further change in the production of carbon monoxide or dioxide are caused by the Boudouard and carbon oxidations and based on thermodynamic conditions within the model.



Additional change in the gas concentrations are caused by the external airflow driven by pressure variations and the surface area (slit) exposing the cell to the environment. The CFD software is used to implement the numerical simulation. The flow of exhaust gas in the aluminum cell is turbulent, and the $K - \epsilon$ model has a wide application in industrial flow field.

Boundary Conditions			
	Parameter	Value	Unit
Inlet	Cell Current	400	kA
	Current efficiency	93	%
	Slit width	0.5-2	cm
Outlet	Gas Exhaust Pressure	(-50)-(-5)	Pa

Table 1, characteristics of boundary condition

Equations

$$\text{Continuity} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad [4]$$

$$\text{Momentum} \quad \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad [4]$$

$$\text{Species Transport} \quad \frac{\partial (\rho \omega_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega_i \vec{u}) = -\nabla \cdot (\vec{J}_i) + R_i \quad [4]$$

$$\text{Reaction Rate} \quad k_{f,r} = A_r T^{Pr} e^{-E_a/RT} = A_b e^{\frac{-E}{RT}} P_{CO_2}^n S^{-1} \quad [5]$$

Results

In the crust cavities, the gases produced accumulates until it exits through the feeder hole leading to high concentrations of CO and CO_2 . The highest concentration of CO_2 occurs furthest from the feeder hole. Once the gas passes through the feeder hole, the concentration decreases sharply. The CO and CO_2 travel a near linear path from the feeder hole to the gas exhaust.

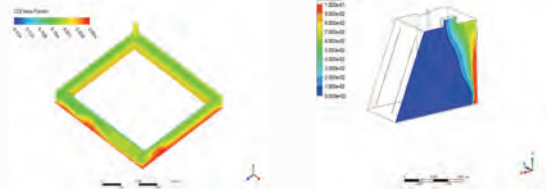


Figure 3. CO_2 gas distribution inside crust cavity

Figure 4. CO_2 gas distribution above crust

In based on validation, CO_2 Concentration at outlet must near to 12000 PPM, Mass flow rate reaches to 65 $\frac{Lit}{Sec}$

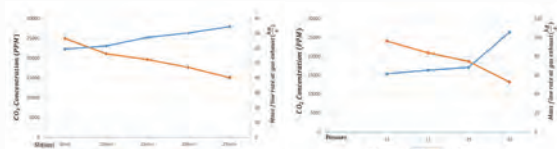


Table 2, Changes in Concentration and mass flow rate at pressure constant ($P = -10 \text{ pa}$)

Table 3, Changes in Concentration and mass flow rate at Slit constant ($P = 10 \text{ mm}$)

Conclusion

This information will prove beneficial for :

Precise the gas concentration at the feeder holes and define optimized conditions, where CO_2 could eventually be extracted and redirected to carbon sequestration to reduce global greenhouse gas emissions. Increasing Pressure in negative direction and increasing slit causes to reduce gas concentration and increase mass flow rate.

Acknowledge

The authors would be like to express their gratitude to Rio Tinto Alean and Natural Sciences and Engineering Research council Canada for their financial support.

Reference

- [1] Kai Grjotheim, Halvor Kvande (1993) "Introduction to aluminum electrolysis"
- [2] H. Björk and J. Aronsson(2010), "Process Integration and Performance of Chilled Ammonia CO_2 Capture Technology."
- [3] Sandor poncsak (2000), Formation et evolution des bulles de gas au-dessous de l'anode dans une cuve d'electrolyse d'aluminium
- [4] ANSYS, ANSYS FLUENT Theory Guide 2022 R2. 2022.
- [5] Department of Mechanical Engineering, Dalhousie University(2018), Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Third Edition

Mohammadreza Basohbatnovinzad

Université du Québec à Chicoutimi

L. Dion - UQAC

S.-O. Tremblay - UQAC

S. Guérard - Rio Tinto

J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

L'émission de dioxyde de carbone, un gaz à effet de serre, est un sous-produit inhérent du processus Hall-Héroult, largement employé pour la production d'aluminium. Les bulles créées lors de l'électrolyse s'échappent des cellules, amorçant ainsi un flux de gaz sous l'anode. Ces événements discrets entraînent des variations dans la fraction volumique et la couverture gazeuse au fond de l'anode. Le mouvement et la coalescence des bulles dans la couche de bulles influent grandement sur la dynamique générale de l'échappement de gaz. Ce flux gazeux résulte principalement de la production continue de gaz et de la différence de pression due à l'aspiration par la cellule d'électrolyse. Celle-ci impacte significativement le niveau de concentration gazeuse dans différentes parties de la cellule. Cette étude vise à examiner en détail le comportement et les caractéristiques de la concentration gazeuse dans diverses conditions de flux. Pour ce faire, nous présentons un modèle numérique utilisant ANSYS/Fluent, ainsi que le processus majeur de validation. L'étude a considéré diverses conditions, incluant la pression à l'échappement des gaz, l'entrée d'air extérieure, l'efficacité du courant et l'intensité de la cellule, afin de mieux comprendre leurs effets sur la concentration de gaz à l'intérieur de la cellule.

The emission of carbon dioxide, a greenhouse gas, is an inherent by-product of the widely employed Hall-Heroult process utilized to produce aluminum. As the bubbles formed during the electrolysis process escape from the electrolysis cells, they initiate the generation of a gas flow underneath the anode. These discrete events create a fluctuating pattern in the gas volume fraction and gas coverage of the anode bottom. The movement and coalescence of bubbles in the bubble layer have a significant impact on the overall dynamics of gas escape. This gas flow is primarily a consequence of the continuous production of gases and the pressure differential created by the suction exerted from the electrolysis cell. The latter can have a significant impact on the resulting gas concentration level in different areas of the cell. The primary goal of this investigation is to comprehensively investigate the behavior and characteristics of gas concentration under a diverse range of draft conditions. To achieve this task, a numerical model performed using ANSYS/Fluent is presented along with the main validation process considered. The research aimed to understand how gas concentration within the cell is influenced by factors like gas exhaust pressure, incoming air, current efficiency, and cell amperage.

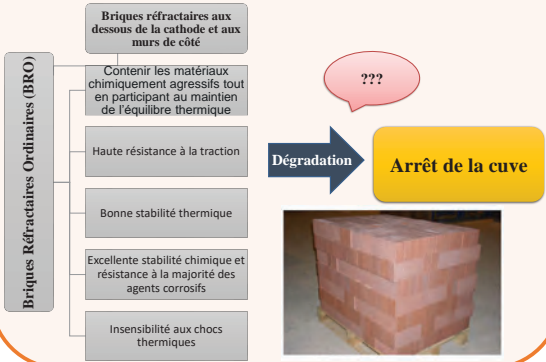
ÉTUDE DE LA DÉGRADATION DES BRIQUES RÉFRACTAIRES ORDINAIRES DANS UNE CELLULE D'ÉLECTROLYSE D'ALUMINIUM

STUDY OF THE DEGRADATION OF ORDINARY REFRACTORY BRICKS IN AN ALUMINIUM REDUCTION CELL



AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM
ALUMINIUM PRODUCTION

Introduction



* Contamination des BROs avec du bain industriel

Le test a été conçu pour exposer directement un BRO vierge au bain électrolytique. Les échantillons de BROs vierges sont installés dans un creuset en graphite rempli d'un bain électrolytique industriel, puis insérés dans une enceinte en Inconel. Cette enceinte doit être placée dans le four (Pyradia) pour maintenir le réacteur sous une atmosphère d'azote.

* Caractérisation mécanique

- Comportement à haute température
- Essai de compression
- Essai de flexion 3 points.



Problématique

- ❖ Lors d'autopsies, les observations sont:
 - Gonflement de la BRO occasionné par sa possible contamination au sodium
 - Soulèvement des cathodes
 - Déformation excessive des barres collectrices
 - Déformation excessive sur le revêtement de fond

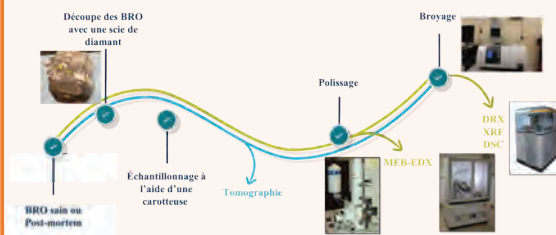
Une meilleure compréhension de l'impact global de la contamination des BRO sur le comportement de la cellule d'électrolyse est donc requise pour arriver à augmenter la durée de vie d'une cuve d'électrolyse.

Objectifs

- Identifier la nature des agents contaminants.
- Avoir une meilleure compréhension des phénomènes inhérents à la dégradation des BROs et l'impact de cette dégradation sur les propriétés thermiques et mécaniques.
- Caractériser la vitesse et la distribution de la contamination.
- Caractériser les propriétés physico-chimiques.
- Comparer les BROs contaminés en laboratoire et ceux prélevés lors d'autopsies.

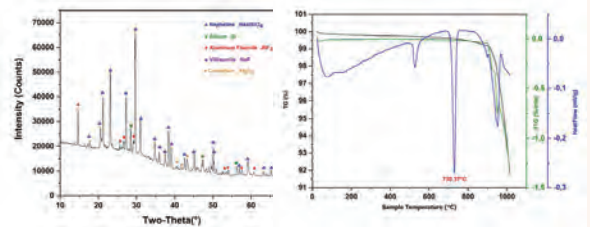
Méthodologie

* Caractérisations physico-chimiques des BROs

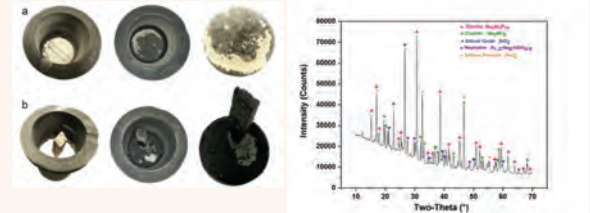


Résultats

* BROs prélevés des autopsies:



* BROs contaminés avec du bain électrolytique en laboratoire:



Une comparaison entre les BROs contaminés en laboratoire et celles obtenues lors d'autopsies révèle une similitude remarquable, non seulement au niveau de leur apparence, mais également lors de la caractérisation, avec des phases majeures identiques.

Conclusion

À travers des autopsies industrielles, des analyses chimiques et des tests en laboratoire, cette étude offre des connaissances précieuses sur les processus complexes contribuant à la détérioration des BROs. Des tests supplémentaires sont actuellement en cours pour améliorer notre compréhension du phénomène de corrosion.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'un soutien financier de la part du Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies et de l'entreprise Aluminerie Alouette Inc. Les auteurs tiennent à remercier Mr. Simon-Olivier Tremblay du CURAL pour ses contributions à l'analyse thermique et M. Dominic Dubé d'Aluminerie Alouette Inc. pour son précieux soutien lors des autopsies.

Le revêtement des cellules d'électrolyse est muni de briques réfractaires ordinaires (BRO) pour maintenir un équilibre thermique adéquat et protéger les briques isolantes des températures des attaques chimiques. Ces BROs, qui sont susceptibles de se corroder sous l'action du bain, influent sur la durée de vie de la cellule d'électrolyse. Pour mieux comprendre l'impact de cette dégradation, une campagne de prélèvement de BROs a été réalisée en cours d'autopsies sur des cellules d'électrolyse mortes à différents âges chez Aluminerie Alouette. Cela aura permis de quantifier la plage de concentration de contamination vue par les BROs via des analyses au MEB avec spectroscopie à dispersion d'énergie, fluorescence X, diffraction des rayons X et calorimétrie différentielle à balayage. Par la suite, des BROs seront contaminées avec du bain électrolytique en faisant varier le temps d'exposition et la température. Des échantillons sains et contaminés seront par la suite soumis à des essais de dilatométrie, de compression uniaxiale à haute température et triaxiale à température ambiante ainsi que des essais de caractérisation des propriétés thermophysiques. Une étude comparative entre BROs contaminés au labo et telles que recueillis en autopsie sera établie pour mieux comprendre l'historique de dégradation des BROs dans une cellule de réduction d'aluminium.

The lining of aluminum reduction cells employs layers of refractories to maintain thermal equilibrium and safeguard insulating bricks beneath from high temperatures and chemical attacks. These materials, crucial for cell longevity, are susceptible to corrosion from the electrolyte bath. This study investigates the breakdown and/or degradation of ordinary refractory bricks (ORB) located on sidewalls and beneath cathode blocks during industrial autopsies following cell failures or planned shutdowns. Characterizing the behavior evolution of ORBs contingent on their contamination level is vital. To achieve this, an analysis campaign involving contaminated ORBs was conducted during autopsies on electrolytic cells of varying ages at the Aluminerie Alouette. The campaign quantifies the contamination concentration range experienced by ORBs through Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, X-ray Fluorescence, X-ray Powder Diffraction, and Differential Scanning Calorimetry analyses. Subsequently, ORB samples will be exposed to electrolytic bath contamination at different temperatures and duration. Both uncontaminated and contaminated samples will undergo dilatometry, high-temperature uniaxial and room-temperature triaxial compression tests, alongside evaluations of the thermophysical properties. A comparative study will then juxtapose laboratory-contaminated ORBs with post-mortem ORBs acquired from autopsies. The aim is to meticulously examine the contamination history endured by ORBs within an aluminum reduction cell.

Mohamed Hassen Ben Salem
Université de Sherbrooke

G. Soucy - UdeS
D. Marceau - UQAC
A. Godefroy - Aluminerie Alouette
S. Charest - Aluminerie Alouette

EFFET DE LA MÉTHODE DE REFROIDISSEMENT SUR LES PROPRIÉTÉS DE L'ANODE CRUE EFFECT OF COOLING METHOD ON GREEN ANODE PROPERTIES

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM
ALUMINIUM PRODUCTION

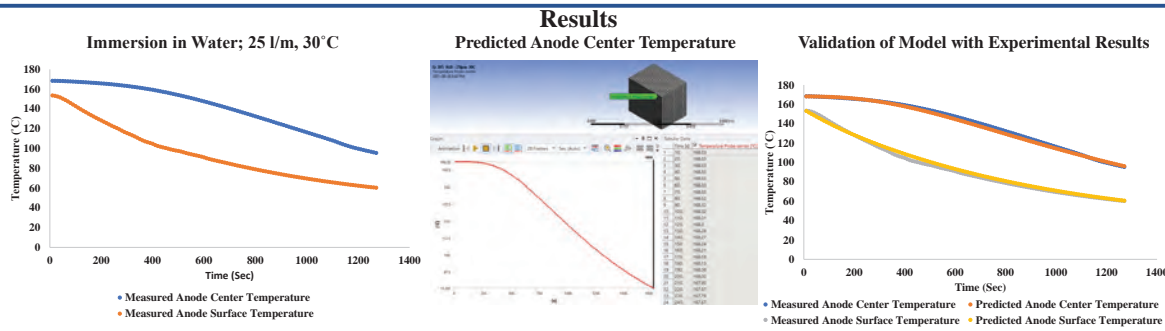
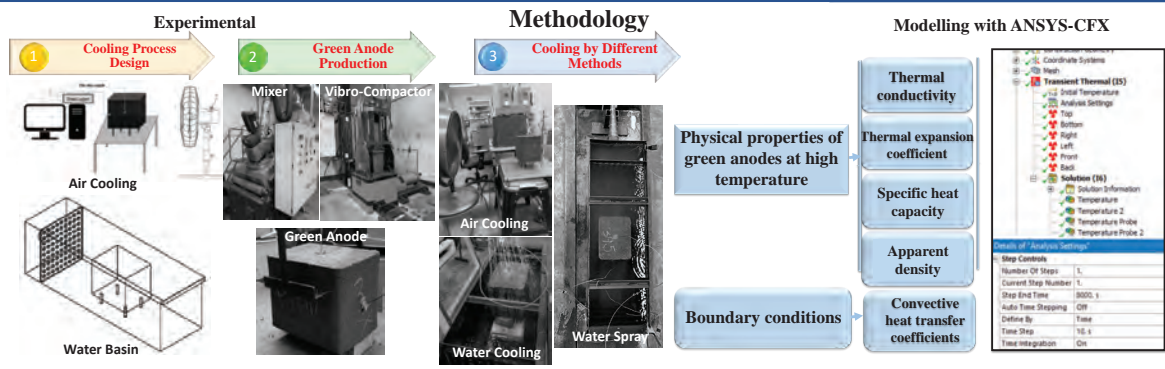
Introduction

After compaction, green anodes need to be cooled before further processing. The quality of green and baked anodes is affected by the cooling process. Cooling could be done by immersion in water, spraying water, forced or free air, or their combination for further handling. In the UQAC Carbon Laboratory, numerous green anodes were produced from the same raw materials under the same conditions; and they were cooled using different methods to determine the effect of the cooling method on the anode quality.



Objectives

- The main objective of this study is to determine the impact of the green anode cooling method on final anode properties.
- This poster presents the design of the laboratory cooling method, the cooling rate measurement, the determination of the boundary conditions, the modelling and simulation, and the model validation using the experimental data.



Conclusions

- ❑ The water immersion and spray cooling test equipment has been designed and built based on testing by flow visualization and numerical modelling.
- ❑ The center and surface anode cooling rates were measured via two thermal thermocouples. Simulations were carried out with ANSYS-Transient Thermal Analysis for the same cases. The model has been validated; and the predictions agree well with the experimental data.

Future work

Before and after baking, the SERMA technology will be utilized to measure the electrical resistivity distribution within the anodes, and the tomography will be used to analyze their cracks. The apparent densities, electrical resistivities, and the air and CO₂ reactivities of baked anodes will be measured to determine how the cooling affects the quality.

Acknowledgement

The financial support by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the University of Quebec at Chicoutimi (UQAC) is greatly appreciated.

References

- K. Fischer, M. W. Meier, and M. W. Lustenberger, "Cooling of green anodes after forming," Essential Readings in Light Metals, pp. 351-370, 2013.
- M. W. Meier, "Cracking behaviour of anodes," R & D Carbon Limited, pp. 166-293, 1996.

Mohammadhossein Dabaghi
Université du Québec à Chicoutimi

D. Kocaefe - UQAC
Y. Kocaefe - UQAC

Les anodes de carbone jouent un rôle crucial dans la production électrolytique de l'aluminium, ce qui affecte le coût et les émissions de gaz à effet de serre. Toutes les étapes du processus de production, y compris le refroidissement de l'anode verte, affectent la qualité de l'anode. Le refroidissement peut être effectué par l'immersion dans l'eau, l'eau pulvérisée, l'air libre ou forcé ou par leur combinaison. Cependant, des gradients de température élevés dans des anodes lors du refroidissement peuvent entraîner des contraintes thermiques, provoquant des fissures qui se dilatent pendant la cuisson. Le brai continue de pénétrer dans les pores du coke jusqu'à ce qu'il se solidifie après la compaction. Le refroidissement affecte considérablement ce processus. De nombreuses anodes vertes ont été produites sous les mêmes conditions et à partir des mêmes matières premières dans le laboratoire de carbone de l'UQAC et refroidies sous diverses méthodes. Des thermocouples ont été placés au centre et à la surface des anodes pour enregistrer la variation de la température en fonction du temps. Des simulations ont été effectuées avec ANSYS pour les mêmes cas. La validation du modèle thermique a été réalisée en comparant les données expérimentales avec les prédictions par le modèle.

Carbon anodes play a crucial role in the electrolytic production of aluminum, which affects the cost and greenhouse gas emissions. All steps of the production process, including the cooling of green anodes, influence anode quality. Cooling could be done by immersion in water, spraying water, forced or free air, or their combination. However, high-temperature gradients in anodes during cooling could lead to thermal stresses, causing cracks that expand during baking. The pitch continues to penetrate coke pores until it solidifies after compaction. Cooling significantly affects this process. Numerous green anodes were produced under the same conditions and from the same raw materials in the UQAC Carbon Laboratory and were cooled using different methods. Thermocouples were placed in the center and on the surface of the anodes to monitor the temperature variation with time. Simulations were carried out with ANSYS for the same cases. The thermal model was validated by comparing the experimental data with the model predictions.

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DE LA DÉSULFURISATION DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT DES CUVES D'ÉLECTROLYSE
MATHEMATICAL MODELING OF THE DESULFURIZATION OF THE EFFLUENT GASES FROM ELECTROLYSIS CELLS



AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM ALUMINIUM PRODUCTION

1. Introduction

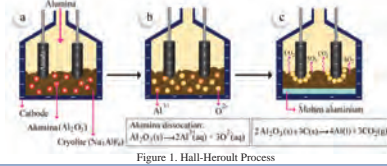
Statement of the Problem

SO₂ is removed from effluent gases containing a low concentration of SO₂ using hydrated lime particles at low temperature. The effect of the relative humidity (RH) and the particle size on the SO₂ removal efficiency is investigated.

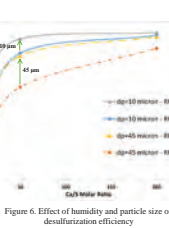
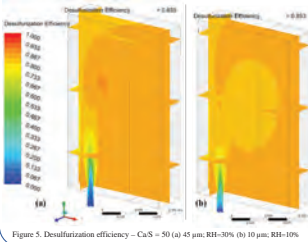
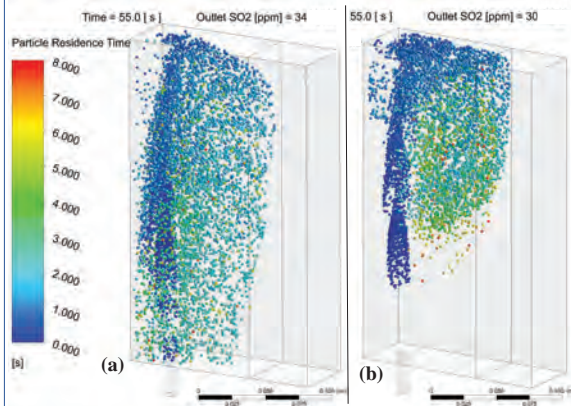
- SO₂ is emitted from the electrolysis cells (reduction process) during the electrolytic production of aluminum [1].
- Sulfur comes from anode impurities and is harmful if released to the atmosphere.
- It causes acid rain and air pollution, putting human health and wildlife at risk [2].

Objective

The objective of the project is to develop a 3D turbulent, multi-phase (gas-solid) model under isothermal (70 °C) conditions with or without humidity using a method based on Eulerian-Lagrangian approach in order to determine the desulfurization efficiency of a lab-scale reactor (scrubber).



3. Results and discussion



2. Methodology

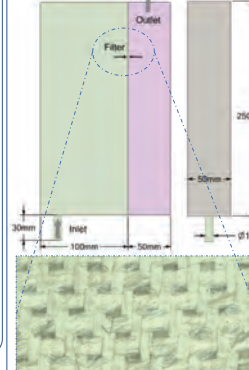
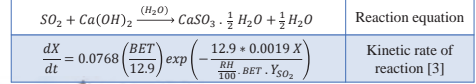


Figure 2. Scrubber geometry and filter

Table 1. Summary of operating conditions	
Mean particle diameter * (<i>d_p</i>)	10, 45 μm
Specific surface area * (BET)	38.25, 11.80 (m ² /g)
Relative Humidity (RH)	10, 30 %
SO ₂ inlet concentration	200 ppm
Inlet velocity (<i>u_g</i>)	1 m/s
Particle density (<i>ρ_p</i>)	2300 kg/m ³
Characteristic length (<i>L_g</i>)	~ 18.5 mm

- Multi-phase (Eulerian-Lagrangian)
- Turbulence model: $k - \epsilon$
- Isothermal (70 °C)
- Two-way coupling.
 - Discrete phase effects
 - Continuous phase effects
- Stokes Number (*St*) determines if the solid phase model is suitable.

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_s} = \frac{(\rho_p d_p^2 / 18\mu)}{(L_g / u_g)} \sim 0.77 \rightarrow \text{DPM model}$$

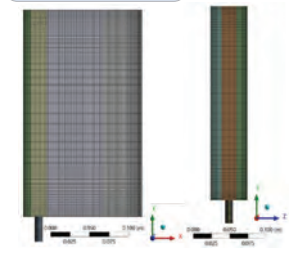


Figure 3. Meshed domain

4. Conclusions

- Particle tracking enables the model to distinguish between different types of particles – the fresh hydrated lime (Ca(OH)₂) and the desulfurization product (CaSO₃) which forms on the surface of the hydrated lime particles.
- The effect of increasing RH on desulfurization efficiency is more effective for larger particles compared to its impact on smaller particles.
- Using larger particles is less efficient, and increasing RH compensates for the larger desulfurization rate, which is useful for industries.

5. Future work

- Analyze the effect of CO₂ presence on SO₂ removal (desulfurization) efficiency.
- Study the particle deposition on the filter surface.
- Simulate the transient effects of the process.

6. References

1. A. Charette, Y. Kocaeft, D. Kocaeft, Le carbone dans l'industrie de l'aluminium, PRAL - Press Aluminium 2012.
2. X. Li, J. Han, Y. Liu, Z. Dou, T.-a. Zhang, Summary of research progress on industrial flue gas desulfurization technology, Separation and Purification Technology 281, 119849, 2022.
3. F.J. Gutiérrez Ortiz, P. Ollero, A realistic approach to modeling an induct desulfurization process based on an experimental pilot plant study, Chemical Engineering Journal, 141: p. 141-150, 2008.

Arash Fassadi Chimeh
 Université du Québec à Chicoutimi

D. Kocaeft - UQAC
Y. Kocaeft - UQAC
Y. Robert - Rio Tinto
J. Bernier - Rio Tinto

Les gaz d'échappement des cuves d'électrolyse contiennent du SO₂. Un procédé d'épuration réduirait l'impact sur l'environnement. Dans ce projet, un modèle a été développé pour la capture du SO₂ en utilisant un sorbant alcalin (chaux hydratée, Ca(OH)₂) via un procédé de désulfurisation semi-sec dans un réacteur à l'échelle de laboratoire. Le procédé semi-sec est plus avantageux pour la capture du SO₂, que les procédés humide et sec à cause des inconvénients reliés au post-traitement coûteux et/ou à l'usage du sorbant excessif. Le modèle implique un écoulement turbulent multiphasique et une équation pour la vitesse de réaction entre SO₂ et Ca(OH)₂ dans le réacteur. Une étude paramétrique a été réalisée pour analyser les effets de l'humidité et la teneur du sorbant sur le niveau de désulfurisation. Le modèle et certains résultats sont présentés dans cette affiche.

Effluent gases from the electrolysis cells contain SO₂. A SO₂ scrubbing process would reduce the environmental impact. In this project, a model was developed for SO₂ removal using an alkaline sorbent (hydrated lime, Ca(OH)₂) through a semi-dry desulfurization process in a laboratory-scale reactor. The semi-dry process is more advantageous for sulfur capture compared to dry and wet processes due to the drawbacks associated with them, including the post-treatment expenses and/or the excessive sorbent usage. The model involves a turbulent multiphase flow with a rate expression representing the SO₂-Ca(OH)₂ reaction in the reactor. A parametric study was carried out to analyze the effects of the humidity and the sorbent content on the level of desulfurization. The model and some of the results are presented in this poster.

REPRODUCTION NUMÉRIQUE DES CONDITIONS DE CHAUFFAGE MONOTONE UTILISÉE POUR LA MESURE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES MATÉRIAUX GRANULAIRES

NUMERICAL REPRODUCTION OF CONSTANT HEATING CONDITIONS USED FOR MEASURING THERMAL PROPERTIES OF GRANULAR MATERIALS

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



RioTinto

1 Introduction

La production d'aluminium avec une faible empreinte sur l'environnement est primordiale et cela passe par une meilleure compréhension du fonctionnement des cuves d'électrolyses. L'utilisation de matériaux granulaires est omniprésente notamment dans les matériaux de revêtement. Leur performance thermique a une influence sur la stabilité d'opération et les pertes thermiques.

Un montage expérimental de chauffage monotone a été développé pour déterminer les propriétés thermiques principales d'un matériau granulaire. Ce système utilise un système de chauffage radiale pour augmenter de façon constante la température d'un porte-échantillon cylindrique. Le gradient de température à l'intérieur du matériau permet d'en déterminer la diffusivité, la conductivité et la capacité thermique jusqu'à une température de 950°C. Certains matériaux de nature différentes frôlent les limitations de sensibilité de l'appareil.

Le travail présenté cherche à développer un modèle numérique pour reproduire le comportement de cet appareil et mieux comprendre la sensibilité des paramètres pouvant influencer la qualité du résultat obtenue.

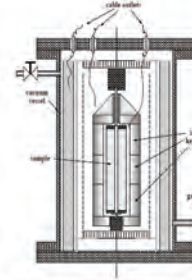


Figure 1 : Schéma du Monotone

Dans la figure ci-contre, le Monotone y est représenté dans son ensemble. Dans l'échantillon (sample), se trouve un barreau central qui sert de référence, le matériau granulaire à étudier ainsi que trois thermocouples qui servent à la mesure de la température des grains en trois points distincts.

2 Méthodologie – Modèle de DEM [1]

Le modèle numérique utilise la méthode des éléments discrets (DEM) pour simuler le matériau granulaire. Cette méthode est basée sur la seconde loi de Newton :

$$\vec{f}_{ij}^c = \vec{f}_{ij}^n + \vec{f}_{ij}^t$$

où \vec{f}_{ij}^c représente la force de collision entre deux grains, \vec{f}_{ij}^n et \vec{f}_{ij}^t représentent respectivement les composantes normale et tangentielle de cette force.

Voici les équations qui permettent de calculer ces différentes composantes :

$$\vec{f}_{ij}^n = -(k_n \delta_n) \vec{n}_{ij} - (\eta_n v_{rn}) \vec{n}_{ij} \text{ et } \vec{f}_{ij}^t = -\mu \vec{f}_{ij}^n \text{ sgn}(\delta_t) \vec{t}_{ij}$$

où k_n représente la raideur normale du ressort équivalent, η_n représente le coefficient d'amortissement normal, v_{rn} représente la vitesse relative, δ_n représente l'interpénétration entre les grains i et j , et μ représente le coefficient de friction dynamique.

Tous ces différents paramètres dépendent des propriétés physiques du matériau granulaire qui est étudié.

Pour chaque particule individuelle, un bilan de force est appliqué avec les autres particules et les parois au sein d'un voisinage défini. Cette méthode permet donc de définir l'état initial d'une simulation: il s'agit d'un arrangement aléatoire au sein des particules qui peuvent être de dimensions ou de natures différentes.



Figure 2 : Schéma granulaire obtenue via simulation

La figure ci-contre montre l'écoulement des grains lors du remplissage. On peut y voir les différentes parties du Monotone comme le barreau central, l'enceinte cylindrique et représente les grains.

3 Méthodologie – Modèle thermique [2]

Avec cet arrangement, le cycle de chauffe normal d'un essai est appliqué au matériel. Les échanges d'énergie thermique entre les particules sont basés sur l'équation suivante :

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \sum_{k=1}^N (T_j^t - T_i^t) (1 - \exp\left[-\frac{Hc}{\rho_i c_i V_i}\right] \Delta t)$$

où les exposants i et j font référence aux grains, l'exposant t représente le temps, T représente la température, Δt représente le pas de temps de calcul, Hc représente la conductance entre les grains, ρ représente la masse volumique, c représente la capacité thermique massique et V représente le volume.

La conductance est calculée à partir des propriétés physiques du matériau granulaire étudié via l'équation suivante :

$$Hc = 2 \left(\frac{3F_n r^*}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}}$$

où F_n représente la force de contact entre deux grains, r^* représente le rayon moyen et E^* le module d'Young moyen.

Avec ces deux équations, un bilan thermique de chacun des grains est calculé à chaque pas de temps. De plus, un taux de chauffe cible réel se situe entre 0,5 et 2 °C/min. Ayant donc un temps total allant jusqu'à 32 heures réelles à simuler, l'optimisation du temps de calcul est primordiale. À cette fin, le modèle numérique a été développé sur carte graphique (GPU) pour bénéficier du calcul parallèle (plusieurs calculs exécutés en simultané).

4 Conclusion et intérêt du modèle

Le modèle permettra de tracer l'évolution de la température dans tous les points du milieu choisi. Il sera possible d'en extraire de l'information pertinente pour reproduire les calculs théoriques de la méthode par chauffage monotone. L'avancée majeure de ce modèle permettra de simuler de nombreux cas distincts et de confirmer le comportement attendu dans l'appareil de mesure. L'exécution d'un plan d'expérience permettra d'observer l'influence de plusieurs paramètres différents comme la condition de chauffage, la granulométrie de notre matériau ou l'effet de la nature du matériau. Ces résultats permettront d'améliorer les paramètres d'exécution des essais réels (position des thermocouples, taux de chauffe, etc.) afin d'augmenter la précision des résultats, et en permettant d'optimiser l'utilisation du four.

Remerciements

Je tiens à remercier les partenaires pour leur confiance et leur participation financière.



Références

- [1]: Norouzi, H. R., Zarghami, R., Sotudeh-Gharebagh, R. & Mostoufi, N. Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows. Wiley
- [2]: Watson L, Vargas & J.J. McCarthy. Conductivity of granular media with stagnant interstitial fluids via thermal particle dynamics simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (2002) 4847-4856.

Maxime Guéguen

Université du Québec à Chicoutimi

L. Dion - UQAC

T. Roger - UQAC

L. Kiss - UQAC

S. Guérard - Rio Tinto

J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

L'identification des propriétés thermiques des matériaux granulaires comporte plusieurs défis dus à la nature du matériau. L'utilisation d'un four par chauffage monotone permet de mesurer à la fois la conductivité, la diffusivité et la capacité thermique de différent matériau. Néanmoins dans les plages hautes de températures, les résultats augmentent en sensibilité et le degré d'incertitude associé aux mesures obtenues devient plus important. Un modèle numérique a été créé pour mieux comprendre cette augmentation et offrir des pistes de solutions améliorant la qualité des résultats. Ce modèle se base sur une adaptation de la méthode des éléments discrets avec les équations thermiques liés aux caractères granulaires du matériau considéré. La méthode des éléments discrets présentée se base sur l'interpénétration des grains qui permet de calculer les forces d'interactions pour créer un schéma de grains. Les équations thermiques utilisées se basent elles aussi sur l'interpénétration des grains pour adapter l'interaction avec son voisinage et résoudre le bilan thermique pour l'ensemble du système. Par cette méthodologie, il est possible de considérer l'influence du gaz qui se trouve entre les particules. Il devient donc facile d'étudier la sensibilité des paramètres d'entrée, pour enfin reproduire les comportements observés avec le montage expérimental.

Identifying the thermal properties of granular materials presents several challenges due to the nature of the material (grain heterogeneity, contact resistance, impurities, etc.). The use of a monotonous heating furnace allows for the measurement of the conductivity, diffusivity, and specific heat of different materials. However, at high temperature ranges, the results become more sensitive, and the degree of uncertainty associated with the measurements obtained becomes more significant. A numerical model has been created to better understand this sensitivity increase and provide potential solutions to improve the quality of results. This model is based on an adaptation of the discrete element method with thermal equations related to the granular characteristics of the material considered. The discrete element method presented relies on the interpenetration of grains to calculate interaction forces and create a grain scheme. The thermal equations used also rely on the interpenetration of grains to adapt the interaction within their neighborhood and solve the thermal balance for the entire system. Through this methodology, it is possible to consider the influence of the gas present between the particles. Consequently, studying the sensitivity of input parameters such as particle size distribution or compound nature becomes easier, ultimately reproducing the observed behaviors with the experimental setup.



1. Contexte

- En tant que source de carbone, l'anode joue un rôle élémentaire dans le transport des électrons vers la cathode
- L'impact direct de l'anode sur le rendement global de la production d'aluminium, sa qualité influence la performance de l'électrolyse
- L'impact de la variation de la matière première sur la qualité des anodes produites

2. Problématique

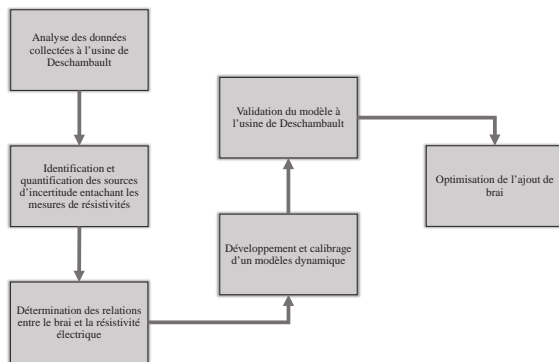
Variabilité de la matière première et manque d'information en ligne

- Difficulté d'ajustement optimal des procédés
 - Limitation de la capacité des opérateurs à ajuster les procédés de manière optimale
- Ajustement de la formulation en se basant sur l'expérience et dosage inapproprié du brai
- Fluctuations non désirées et problèmes de qualité de l'anode

3. Objectifs

- Utilisation des mesures de résistivité de l'anode verte issues d'une sonde à quatre points (4PP) pour le développement d'un modèle dynamique reliant ces résistivités à la formulation de l'anode
- Utilisation du modèle dans la conception d'un schéma de contrôle automatique ajustant le brai dans la formulation de l'anode

4. Méthodologie



6. Conclusion et travaux à venir

Des relations linéaires et quadratiques statistiquement significatives ont été observées au cours de certaines expériences, ce qui ouvre la voie à l'élaboration d'un modèle dynamique reliant ces résistivités à la formulation de l'anode

Pendant, les prochaines pistes à investiguer seront de

- Analyser les incertitudes pour pouvoir tirer des relations significatives apparentes entre le brai et résistivité électrique
- Réaliser plus d'expériences avec des plages de variation de brai plus grandes
- Analyser les sources de variabilités et concevoir un modèle complet

Remerciements

Les auteurs aimeraient remercier Alcoa Corporation Canada et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour leur soutien financier, ainsi que le Centre de recherche sur l'aluminium - REGAL pour son support

5. Analyse et discussion de données

- Les données de résistivité des anodes vertes sont obtenues à partir des expériences d'optimisation du taux de brai à l'usine de l'aluminerie Alcoa à Deschambault
- La prise des mesures de résistivité est réalisée à l'aide du 4PP

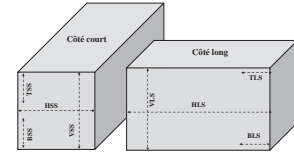


Figure 1: Schéma illustratif de la position des sondes de mesure du 4PP sur l'anode

Résultats

- Utilisation des méthodes statistiques pour déduire des relations entre le brai et la résistivité électrique

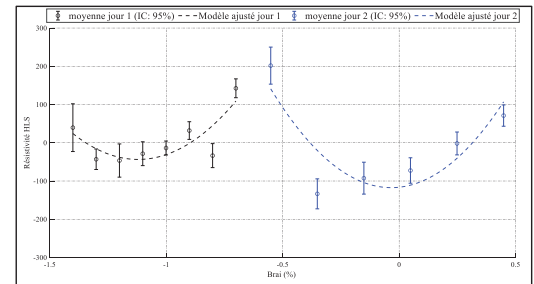


Figure 2: Mesures de résistivité avec la sonde 4PP positionnée horizontalement du côté long

Observations

- Les résistivités fluctuent beaucoup à cause de la variabilité de la matière première et des conditions d'opération du procédé
- Explorer la manière dont la courbe varie et déterminer quel côté de l'optimum elle représente
- Les plages de brai balayées et le nombre d'anodes produites par niveau ont un impact significatif sur les résultats
- Difficulté de caractériser une courbe de brai complète montrant l'augmentation de résistivité des deux côtés de l'optimum

Lamia Haddoufi
Université Laval

E. Poulin - UL
C. Duchesne - UL
J. Lauzon-Gauthier
Alcoa

La production d'anodes de carbone rencontre d'importants obstacles liés à la variabilité de la matière première et au manque d'informations en ligne relatives aux attributs de qualité finaux des anodes. Par conséquent, les opérateurs doivent ajuster fréquemment la formulation de la pâte d'anodes en se basant sur leurs expériences pour guider leurs décisions. Toutefois, ces ajustements peuvent aboutir à un dosage inapproprié du brai et à la production d'anodes de qualité inférieure. Pour remédier à ce problème, des études ont démontré que les mesures de résistivité des anodes vertes obtenue par une sonde à 4 points (4PP) pourraient être utilisées pour la mise en œuvre de stratégies de contrôle et d'optimisation du procédé. Le projet vise donc à utiliser les informations issues du 4PP pour développer un modèle dynamique reliant les résistivités des anodes vertes à la formulation de l'anode, et l'ajout de brai en particulier. Ce modèle servira à concevoir un schéma de contrôle automatique ajustant le brai dans la formulation de l'anode verte pour atteindre la demande optimale et la maintenir malgré les diverses perturbations.

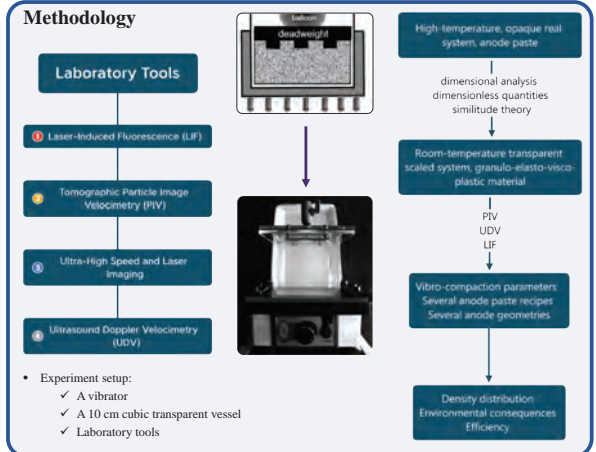
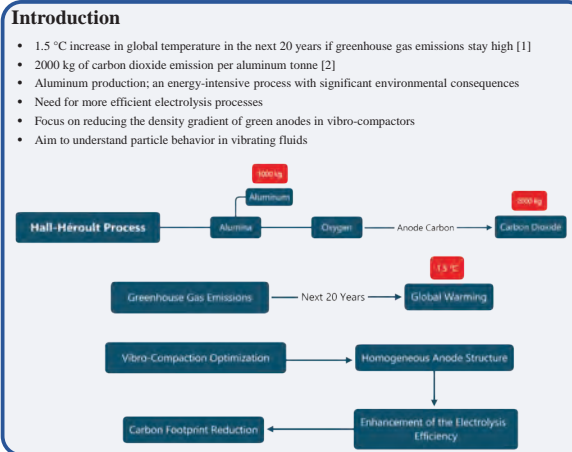
The production of carbon anodes faces significant challenges due to the variability of raw materials and the absence of real-time information about the final quality attributes of the anodes. Hence, operators need to frequently adjust the anode paste formulation relying on their experience to guide their decisions. However, these adjustments can lead to improper pitch dosing and inferior anode quality. To address this issue, studies have demonstrated that green anode resistivity measurements obtained through a 4-point probe (4PP) could be used for the implementation of process control and optimization strategies. The project aims to use 4PP information in order to develop a dynamic model relating green anode resistivities to anode formulation, and pitch ratio in particular. This model will later be used to design an automatic control scheme that adjusts the pitch in the green anode formulation to achieve the optimal pitch demand (OPD) and to maintain it despite various disturbances.

EFFET DES VIBRATIONS SUR LA SÉDIMENTATION DES PARTICULES DANS LES FLUIDES NON NEWTONIENS RHÉOFLUIDIFIANTS

EFFECT OF VIBRATION ON PARTICLE SETTLING IN SHEAR-THINNING NON-NEWTONIAN FLUIDS

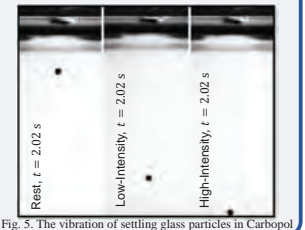
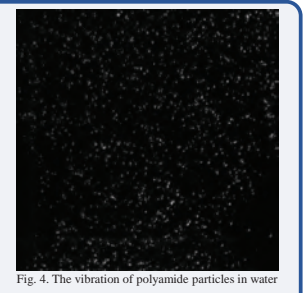
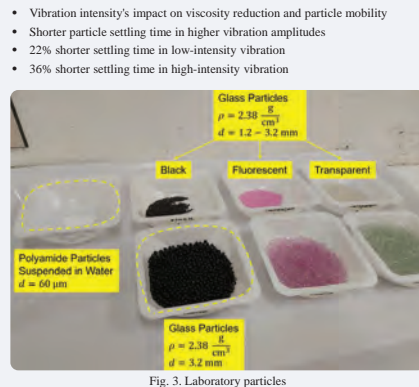
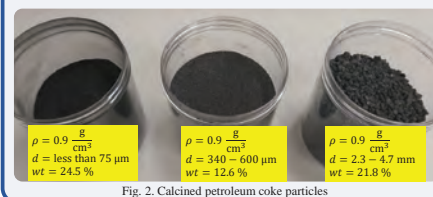
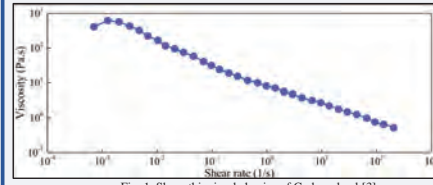


AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM ALUMINIUM PRODUCTION



Results

Particles			Fluid		Settling Time (s)		
Type	Diameter (µm)	Density (g/cm³)	Type	Density (g/cm³)	Rest	Low-Intensity Vibration	High-intensity Vibration
Glass (black)	3200	2.38	Carbopol	0.998	3.14	2.46	2.02
Polyamide	60	Equal to Water	Water	0.996	Aquatic Suspension		



Bibliography

- V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, and P. R. Shukla. Global Warming of 1.5° C. IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5° C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Cambridge University Press, 2022.
- D. Brough and H. Jouhara. The aluminum industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. International Journal of Thermofluids. 2020;1-2.
- P. Menon, Y. Y. Teo, and M. Misran. Effect of Diethylaminoethyl-dextran Coated Liposomes on the Rheological Properties of Carbopol Gel. Applied Rheology. 2018;28(6).

Amir Kafei
Université Laval

L. Gosselin - UL
S.-M. Taghavi - UL

Le vibrocompactage de la pâte d'anode génère des gradients de densité qui compromettent les performances de la cellule. Étant donné que de nombreuses particules de coke vibrent dans le braise à ce stade, notre objectif est d'analyser le comportement des particules dans divers fluides soumis à vibration. L'étude se concentre sur l'impact de l'amplitude de vibration sur la sédimentation de particules de verre de 3,2 mm de diamètre avec une densité de 2,38 g/cm³ dans le gel Carbopol. Nous avons examiné trois cas : sans vibration, vibration à 9 Hz à faible intensité et à haute intensité. Les temps de sédimentation ont réduit de 22 % et 36 % respectivement en cas de faible et haute intensité par rapport à l'absence de vibration. La raison sous-jacente est que la viscosité des fluides non newtoniens, comme le gel Carbopol, diminue sous l'effet de la vibration, réduisant la force de traînée selon la loi de Stokes et accélérant la sédimentation. Ces données seront utilisées pour étudier le comportement des particules dans un fluide simulant la pâte d'anode, à différentes durées, fréquences et amplitudes de vibration. L'objectif est d'optimiser la production d'aluminium en produisant des anodes à densité plus uniforme

Vibro-compaction of anode paste generates density gradients that compromise cell performance. Given that in this stage, numerous coke particles vibrate within the pitch, we aim to understand particle behavior in various vibrating fluids, primarily focusing on the effect of vibration amplitude on the settling time of 3.2 mm diameter glass particles with a 2.38 g/cm³ density in the Carbopol gel. To do this, we compared three cases: one without vibration and two with 9 Hz vibration, the amplitude being twice as large in the high-intensity case. The settling time decreased by about 22 % and 36 % in low-intensity and high-intensity vibration cases, respectively, compared to no vibration. The underlying reason is that the viscosity of shear-thinning non-Newtonian fluids, such as Carbopol gels, decreases when subjected to vibration. This reduces the drag force acting on suspended particles according to Stokes' law, allowing the particles to settle faster through the liquid. Moving forward, we will use these insights to analyze the behavior of particles in a fluid that represents the rheological characteristics of anode paste across a range of vibration times, frequencies, and amplitudes to improve aluminum production efficiency by producing anodes with more uniform density distributions.

1. Introduction

Carbon consumption in aluminum production exceeds expectations due to anode reactivity with CO_2 and O_2 . Accordingly, evaluating anode reactivity is one of the practical tests. A reactivity test based on a sodium sulfate bath could simulate pot conditions to assess the reactivity of the portion of the anode immersed in the bath by overcoming the hurdles encountered with molten cryolite bath tests such as electrical current.

2. Objective

- Designing and developing a sodium sulfate test to assess the anode reactivity

3. Methodology

- Temperature: 1000 °C [1]
- Time of exposure: 30 min [1]
- Sample: 35 mm x 20 mm [1]
- Evaluation: Weight ratio of residual to the original specimen in percent

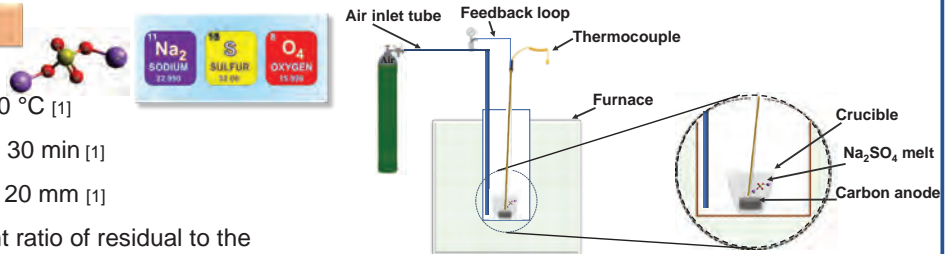


Fig 1. Experimental arrangement for sodium sulfate test.

4. Discussion

How much C is consumed by which reaction?

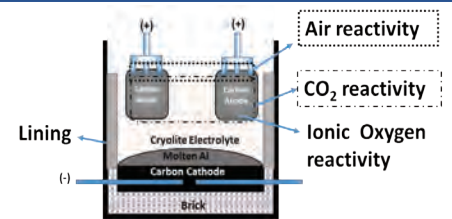
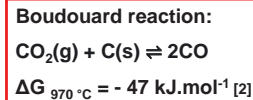
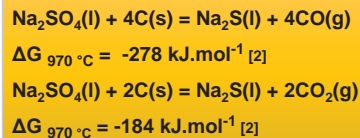


Fig 2. Carbon consumption in an aluminum reduction cell, adapted from [3].

5. Next steps

- Build the setup
- Evaluation of the sensitivity of the sodium sulfate test
- Study of the thermodynamics of the reactions

6. References

- [1] Wilkening, S. (1994). Why the Sodium Sulfate Reactivity Test?. *Light Metals* 1994, 643-652.
 [2] Ambrová, M., et al (2023). Influence of the Sulfur Species on the Current Efficiency and Carbon Consumption in the Aluminum Electrolysis Process. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1-11.
 [3] Feng, L. C., et al., (2014). Exploring Cu₂O/Cu cermet as a partially inert anode to produce aluminum in a sustainable way. *J. alloys and compounds*, 610, 214-223.

Elahe Khani
Université Laval

S. Laliberté-Riverin - UL

G. Gauvin - UL

J. Lauzon-Gauthier - Alcoa

H. Alamdari - UL

In aluminum production, carbon consumption due to anode reactivity, especially with gaseous species such as CO_2 and O_2 , exceeds theoretical expectations. Accordingly, air and CO_2 reactivities have been developed as standard test methods; however, there is a significant difference between the test and the electrolytic cell conditions that impacts the results. Currently, a proper test method is needed to provide logical and robust correlations between test results and net carbon consumption of anodes in electrolytic cells, with more similarity between tests and electrolytic cell conditions. This study focuses on the development of an experimental test revisiting an existing reactivity method based on a sodium sulfate bath to simulate an electrolysis bath to assess the reactivity of the anode, in particular the part of the anode immersed in the bath. Studying sodium sulfate reactivity has advantages, such as overcoming obstacles encountered when testing in a molten cryolite bath, for example, the need for an electric current.

BILAN THERMIQUE DES ÉVÉNEMENTS OPÉRATIONNELS AFFECTANT LA DISSOLUTION LOCALE DE L'ALUMINE DANS LES CUVES D'ÉLECTROLYSE

THERMAL BALANCE OF OPERATIONAL EVENTS AFFECTING LOCAL ALUMINA DISSOLUTION IN ELECTROLYSIS CELLS

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

CUR
1970
ALUMINIUM

RioTinto

AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM
ALUMINIUM PRODUCTION

1 Introduction

- Reducing the green house gas emissions (GHG) and energy consumption in the aluminum smelters, requires comprehensive monitoring, control and understanding of heat balance in all areas of the cell due to the delicate equilibrium.
- Precise transient investigation of the heat disruption sources is necessary:
 - Alumina Feeding
 - Anode Effects
 - Anode changing process
 - ...
- The goal of the project is to introduce a new mathematical model to investigate the local phenomena around the feeder area that will affect the thermal balance of the cell.

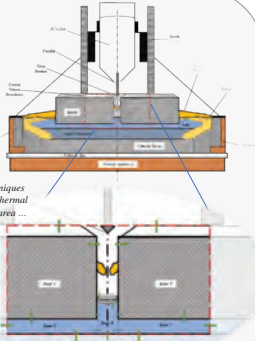


Figure 1: Schematic of the electrolysis cell and the intended control volume.

2 Methodology

- A thermal balance equation system has been developed for 13 zones, consisting of 4 anodes and 9 bath regions, along with one alumina raft [1, 2].
- The surrounding temperatures from adjacent bath regions, outside the control volume, or ambient air are considered with a constant temperature.
- An implicit finite volume method has been used to solve the equation system for every timestep ($\Delta t = 1s$ and 14 unknown temperatures).

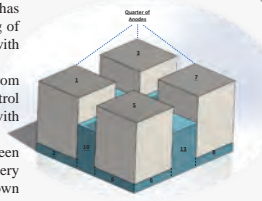


Figure 2: 3D view of the intended zones in the control volume.

Phenomena	Heat Terms and Equations	Zones Where Applied
Internal Energy	$Q_{conv} = \rho_a \cdot C_{p_a} \left(\frac{T_a^t - T_a^{t-dt}}{dt} \right)$	All zones
Convection (between two dissimilar material)	$Q_{conv} = h_{\alpha\beta} \cdot A_{\alpha\beta} \cdot (T_\beta^t - T_\alpha^t)$	(Bath-Anodes), (Bath-Ambient), (Bath-Raft), (Bath-BMI), (Anode-Ambient), (Raft-Ambient)
Conduction (between bath zones)	$Q_{cond} = K_{\alpha\beta} \cdot A_{\alpha\beta} \cdot \left(\frac{T_\beta^t - T_\alpha^t}{dl} \right)$	(Bath - Bath)

* The indices α and β denote the adjacent regions

Table 1: Governing equations in each zones for writing the thermal balance in the cell.

Parameters	values	Parameters	values
T_a, T_b, T_s, T_r	968 °C	Anode	
$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}$	967 °C	ρ_{Al}	1650 Kg.m ⁻³
T_{amb}	965 °C	C_{p_a}	800 J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹
T_m	965 °C	ρ_a	54 µl.m
T_{14}	150 °C	X, Y, Z	Based on Industry
Molten Cryolite (bath regions)		Convection Coefficient	
h_b	1500 W.m ⁻² .K ⁻¹	h_{an}	1500 W.m ⁻² .K ⁻¹
C_{p_b}	1900 J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹	h_r	1100 W.m ⁻² .K ⁻¹
ρ_{b0}	2070 Kg.m ⁻³	h_{bam}	100 to 200 W.m ⁻² .K ⁻¹
ρ_b	473485 µl.cm	h_{rat}	300 W.m ⁻² .K ⁻¹
Alumina		$h_{raft,an}$	100 to 200 W.m ⁻² .K ⁻¹
$C_{p_{raft}}$	1200 J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹	h_{ram}	40 W.m ⁻² .K ⁻¹
ρ_{raft}	2250 Kg.m ⁻³	h_{diss}	1225500 J.kg ⁻¹
T_{amb}	727 °C	References:	[3,4,5]

Table 2: Variables that had been used in the model.

3 Results & Discussion

- The model effectively demonstrates variations in the temperature pattern within the bath under normal operation condition and in steady state (Figure 4)
- T_2 and T_4 are in the same initial values in beginning. But after stabilization, and due to the MHD flow, T_2 operates with a lower concentration of alumina, which leads to localised thermal events and greater variation of its overall temperature.
- The model clearly illustrates changes in the temperature profile of the anodes (Figure 5). In this case, temperature fluctuation of anode one is higher than the anode three due to the stronger low voltage anode effects (LVAE) that are happening in this zone.
- The effect of the alumina feeding has been illustrate also in Figure 6.
- The system's equilibrium can reach an average temperature in the bath regions between 980 and 986 °C. This observation is consistent with the findings in the referenced literature [1,2], primarily because there were no anode replacement processes within the control volume during the 200 hour simulation, which would otherwise have caused a temperature decrease.

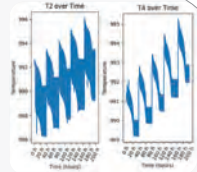


Figure 4: Temperature variation of zones 2 and 4

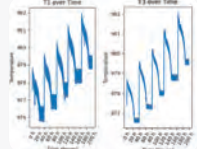


Figure 5: Temperature variation of zones 1 and 3

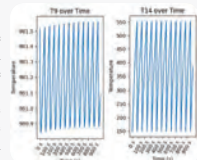


Figure 6: Alumina feeding impact on zone 9 and the temperature evolution of alumina raft in the first 1000 seconds after stabilization

4 Conclusion

- It has been observed that the model effectively demonstrates the system's ability to detect heterogeneous and transient thermal behavior in the different regions of the cell, caused by perturbations.
- The effect of the low voltage anode effects (LVAE), current redistribution due to the anode changing process in the entire cell and the alumina feeding has been demonstrated.
- The alumina feeding process regularly increase the temperature of zone 9 and other zones in under feeding. However, due to the observations, if the system incorporates all operational factors, this increase will be blended with other prevailing trends, eventually reaching a stable state over the entire life cycle of aluminum production.

5 Future Work

- Refine the model to consider the effect of alumina raft movements in the dissolution process and anode changing in the control volume.
- Perform a thorough sensitivity analysis of all thermal operational events, with different levels of magnitude.
- Generate the thermal response of the cell following a superposition of thermal events over a complete anodic cycle.

6 References

- Wong, C.-J., et al., *Discretized thermal model of Hall-Héroult cells for monitoring and control*. IFAC-Papers OnLine, 2021, 54(1): p. 67-72.
- Wong, C.-J., et al. Study of heat distribution due to ACD variations for anode setting. In Light Metals 2020. 2020. Springer.
- Kovacs, A., et al. A heat and mass transfer problem for the dissolution of an alumina particle in a cryolite bath. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 162, p. 120232.
- Hulse, K.L. and R. Carbon, *Anode manufacture: raw materials, formulation and processing parameters*. 2000: R & D Carbon Limited.
- Zhao, R., *Analysis, simulation and optimization of ventilation of aluminum smelting cells and potrooms for waste heat recovery*. 2015, Université Laval.

Un défi majeur de l'électrolyse de l'aluminium est l'incorporation d'une grande quantité d'alumine au sein de l'électrolyte. La recherche présentée mettra en évidence les phénomènes localisés qui affectent l'équilibre énergétique de la cellule, notamment dans la région proche des alimentateurs d'alumine. Les équations connexes, les conditions frontières et les valeurs initiales seront également présentées en raison de leur influence sur les résultats finaux. L'étude examinera l'effet des injections d'alumine en comparant l'évolution lors de stratégies de suralimentation et de sous-alimentation spécifiques. Les conséquences et l'impact potentiel de ces différentes stratégies opérationnelles sont présentés en mettant l'accent sur les déséquilibres thermiques. Cela fournira des informations essentielles pour identifier la fréquence et la durée des événements où la capacité de la cellule à dissoudre l'alumine est irrégulière. Pendant ces occurrences, la cuve sera encore plus sensible aux variations thermiques externes, telles que le changement d'anode ou la récupération de métal. Les résultats de cette étude ouvriront la voie à des recommandations pour l'industrie afin d'améliorer la stabilité thermique de la cellule. En fin de compte, des solutions novatrices telles que les jumeaux numériques peuvent être proposés pour maintenir des conditions de fonctionnement optimales et améliorer la compétitivité des conceptions de nouvelles cuves.

A major challenge of aluminium electrolysis is to incorporate a large amount of alumina into the electrolyte. The research presented will highlight the localized phenomena which affect the energy balance of the cell, particularly in the region close to the alumina feeders. The related equations with the boundary conditions and initial values are also presented due to the utmost importance of these hypotheses on the final results. The study presented will investigate the effect of alumina injections by comparing their evolution during specific overfeeding and underfeeding strategies. The consequences and potential impact of these different operations strategies are presented with emphasis on the thermal imbalance that is generated over time. This will provide critical information to pinpoint the frequency and duration of events where the cell's ability to dissolve alumina is irregular. During these occurrences, the cell will be even more sensitive to external thermal variations, such as anode change or metal tapping. The outcome of this study will pave the way towards recommendations to the industry to improve the thermal stability of the cell. In the end, novel solutions such as digital twins may be proposed to maintain optimal working conditions and improve the competitiveness of newer cell designs.

Ali Kodfard
Université du Québec à
Chicoutimi

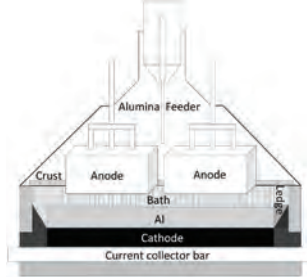
L. Dion - UQAC
T. Roger - UQAC

S. Guéard - Rio Tinto
J.-F. Bilodeau - Rio Tinto



1. Introduction

Aluminum reduction process is complex. A multitude of process parameters interplay affect the overall performance of the cell. Process upsets within the potline can lead to weakening the protective layer of the cells and result in tap-outs.



Manual interventions are required to regain control of an unstable cell. Often reactive actions in response to a certain process condition. The proposed method aims to detect anomalies beforehand and allow for proactive actions to be taken.

2. Methodology

Data modelling method: Principal Component Analysis (PCA)

Group of variables	Number of variables
Descriptive variables	3
Independent variables	2
Process controller	32
Measurements	12
Manual interventions	4
Calculations	5
Lagging process variables	6

Data collection

- Daily averages
- 3-month period of good operating conditions

Data cleaning

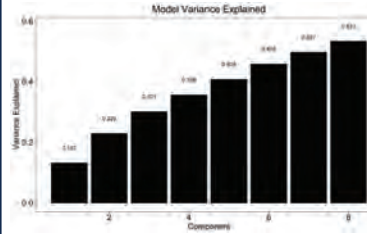
- Bad cells and early operation cells (<60 days) were removed from the dataset
- Outliers investigated and removed where possible

Data transformation

- Imputation of missing values
- Interpolation of trace elements

3. Results - modelling

PCA model with 8 components and $R^2 = 53.3\%$



From the PCA model 2 monitoring metrics can be calculated.

SPE

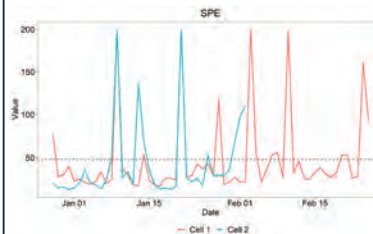
Squared prediction error
 Represents the variables' correlation structure compared to the model

Hotelling's T²

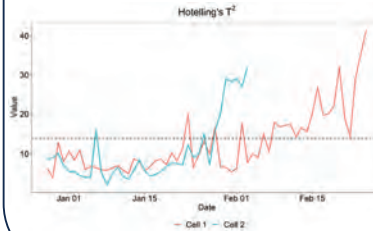
Represents the magnitude of the variables

Pot tap-out on Feb 2 & Feb 26

The SPE is shown to oscillate around the upper limit (dashed line) prior to the tap-out



The magnitude of the variables is shown to increase on the T² plot. The positive slope of the T² can be used to trigger alarms.

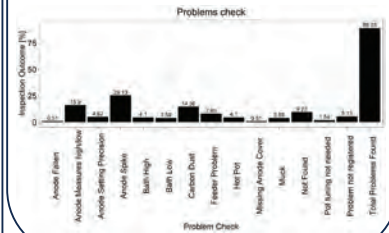


4. Results - operations

A ranking system was put in place based on the T² metric to rank the problematic cells in order of priority.

Operators investigated 217 of the top 10 ranking problem pots over a period of a month.

In 89 % of the cases, the problem was identified, enabling corrective action. In 9% of cases the problem was not identified, while no intervention was required for the remaining cases.



5. Conclusion

A continuous monitoring multivariate analysis of reduction cell performance was set up using commercially available tools such as Azure Databricks and PowerBI.

The tool showed good results with respect to anomaly detection.

Benefits

- Ranking system for problem pots:
- Establish the priority for the operators in a standardized fashion
 - High rate of true positive detections.
 - Possibility of taking proactive action within the potline

6. Future work

- Add missing data capabilities.
- Package expansion to include other multivariate analysis methods.
- Analysis of data collected at a higher frequency than daily averages.

7. Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the financial support of the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC), Fonds de Recherche en Québec – Nature et Technologies (FRQNT), Alcoa and the Aluminum Research Centre – REGAL.

Dans la production d'aluminium, la stabilité des cuves est un élément clé. Quand il y a un problème avec une des cuves, les opérateurs doivent réagir de façon rapide et efficace. À l'usine il y a des rapports pour l'identification des cuves problématiques, cependant ils sont bâtis sur l'analyse univariée des données. Dans le procédé d'aluminium il y a beaucoup des paramètres qui peuvent affecter la stabilité des cuves, alors une analyse des données multivariée en temps réel, a été mis en place à l'usine, dans le but d'améliorer l'identification des cuves problématiques. Dans 89% des cas détectés par l'analyse multivariée la problématique a été identifiée.

In aluminum smelting cell operating stability is a key element. To achieve it, the floor operators have to quickly react when a cell strays off course. Several reports are in place at the plant to highlight the critical cells which require manual intervention, based on univariate analysis. Due to the abundance of variables that affect process stability, an online mul-tivariate analysis report was put in place to improve the critical cell determination while also giving insights into what causes the problem. It was shown that in 89% of the cases the problem was found within the cells deemed critical by the multivariate report.

Petre Manolescu

Université Laval
 Alcoa
 Reykjavik University

C. Duchesne - UL

G. Saevarsdottir - Reykjavik University

J. Lauzon-Gauthier - Alcoa

REPRÉSENTATION TRIDIMENSIONNELLE DES GRADIENTS THERMIQUES AUTOUR D'UN OBJET PAR COMBINAISON DE TECHNIQUES TOMOGRAPHIQUES ET D'IMAGERIE SCHLIEREN

TRIDIMENSIONAL REPRESENTATION OF THERMAL GRADIENTS SURROUNDING AN OBJECT BY COMBINING TOMOGRAPHY AND SCHLIEREN IMAGERY

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



RioTinto



Introduction

L'objectif du projet est de développer une **méthode optique** permettant de mesurer **quantitativement** de manière **non-intrusive** les **gradients de température ou de concentration** dans un fluide transparent. Une telle méthode permettra d'approfondir notre compréhension des mécanismes de transferts thermiques et chimiques dans les cuves d'électrolyse par la réalisation d'expérience via des montages analogues. [1]

L'imagerie schlieren est utilisée en combinaison avec une technique tomographique afin de réaliser une reconstruction tridimensionnelle de l'indice de réfraction dans le milieu, affecté par la température ou la concentration.

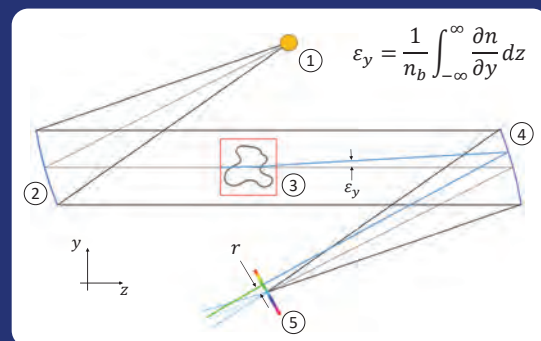
Pour valider l'efficacité de l'algorithme de tomographie, un montage a été réalisé avec un cylindre métallique asymétrique chauffé permettant l'acquisition de mesure par imagerie Schlieren et une reconstruction des gradients de température dans la zone avoisinante du cylindre.

Imagerie schlieren

L'imagerie schlieren est une méthode optique généralement qualitative permettant la visualisation des gradients d'indice de réfraction dans un milieu transparent. L'indice de réfraction d'un milieu est généralement influencé par sa température et la concentration des composés qui y sont présents.

La lumière provenant d'une source lumineuse (1) est collimatée par un miroir (2). La lumière travers ensuite la zone d'observation (3), avant de frapper un second miroir qui converge les rayons lumineux non divergés vers un point focal, placé sur le plan du filtre (5).

Les rayons rencontrant une variation d'indice de réfraction dans la zone d'observation sont réfractés selon un angle ε_y . Les rayons traversent ainsi le plan du filtre à une distance radiale r du point focal et la couleur résultante du rayon lumineux sera influencé par cette position.



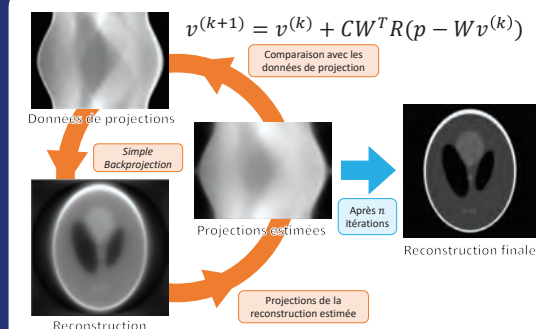
Pour obtenir des résultats quantitatifs, une métrique connue au sein du dégradé de couleurs doit être utilisé. Un filtre a été conçu de manière avoir un Hue, une caractéristique de la couleur dans le système HSV (Hue, Saturation et Value), qui varie de façon constante sur toute sa largeur. En mesurant le Hue du rayon lumineux on peut savoir à quelle distance radiale r celui-ci a frappé le filtre.

Il est fabriqué en transférant une image générée numériquement du dégradé désiré sur du film photographique.



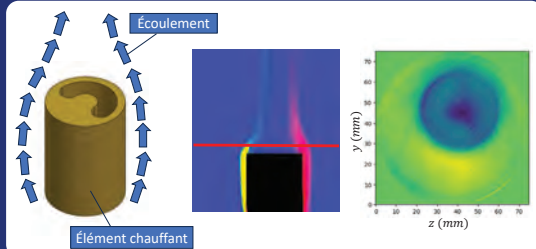
Tomographie

La tomographie est une méthode permettant la reconstruction d'un volume à partir de ses projections. SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*) est la technique tomographique itérative qui a été choisie pour mener à une reconstruction réussie.



Résultats

Un bloc de laiton chauffé par un élément chauffant a été placé sur une table rotative, permettant de prendre plusieurs projections sous des angles précisément identifiés. Les données obtenues ont permis la reconstruction tomographique de l'écoulement au-dessus du bloc où il est possible d'identifier l'hétérogénéité du profil.



Conclusion

La méthode développée a permis de mesurer un écoulement sensible. La combinaison de l'imagerie schlieren par filtre de couleur avec la méthode SIRT donne des résultats concluants, et ce, malgré la complexité liée à l'utilisation du filtre.

Cette méthode pourra être utilisée dans un montage analogue à une cuve d'électrolyse afin de mieux comprendre les phénomènes thermiques et chimiques qui y surviennent.

Remerciements

L'auteur tient à remercier les partenaires suivants pour leur contributions techniques et monétaires.



RioTinto

Références

- [1] Bouvais, A., Dion, L., Roger, T. Experimental Study and Visualization of the Thermal and Dissolution Flux Using Schlieren Methods to Improve the Understanding of the Kinetics of Alumina Dissolution in Cryolitic Melts

L'utilisation d'un capteur intrusif, tels un thermocouple ou une sonde de pH pour mesurer les propriétés d'un fluide, peut constituer une source de perturbation de l'écoulement. L'imagerie schlieren est une méthode non-intrusive qui utilise les gradients d'indice de réfraction provenant d'un milieu transparent afin d'en déterminer la température ou la composition. Généralement, l'imagerie schlieren est utilisée pour l'observation qualitative des flux et l'observation des couches limites. Afin d'obtenir des résultats quantitatifs, l'imagerie schlieren avec filtre de dégradé de couleur peut être utilisée pour mesurer précisément l'angle de déflexion des rayons lumineux passant à travers le milieu. En prenant des mesures de déflexion sous plusieurs angles de vue, une reconstruction 3D de l'indice de réfraction peut être réalisée par tomographie. Une fois la reconstruction complétée illustrant les indices de réfraction spécifique du milieu observé; les équations d'états connues de ce milieu permettent d'en déterminer les gradients de température ou de composition. Un montage a été développé et une validation expérimentale du concept a été accomplie. Les données obtenues ont permis la reconstruction 3D du phénomène étudié. Ces travaux permettront subséquemment d'étudier plus précisément les échanges thermiques et chimiques de modèle analogues qui permettront de mieux comprendre le processus de production d'aluminium primaire.

The use of an intrusive sensor, such as a thermocouple or a pH probe to measure fluid properties, can be a source of perturbations of the flow. Schlieren imaging is a non-intrusive method using refractive index gradients from a transparent media to determine temperature or composition. Generally, Schlieren imaging is used for qualitative flow visualization and boundary layer observation. To obtain quantitative results, rainbow filter schlieren imaging can be used to precisely measure deflection angles of light rays going through the media. By taking deflection angles measurements from multiple points of view, a 3D reconstruction of the refractive index can be achieved by tomography. Once the reconstruction is completed illustrating specific refractive indexes from the observed media, known state equations of the media allow determination of temperature or composition gradients. A setup was developed, and an experimental validation of the concept was achieved. The data obtained allowed the 3D reconstruction of the studied phenomenon. This work will subsequently allow the study with a better precision of thermal and chemical exchanges of analogous models allowing the further understanding of the primary aluminum production process.

Prix de la relève
Next generation Award

Louis Ouellette
Université du Québec à
Chicoutimi

L. Dion - UQAC
T. Roger - UQAC

IMPACT DES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES PARTICULES DE LA CHAUX HYDRATÉE SUR LE PROCÉDÉ SEMI-SEC DE DÉSULFURISATION À BASSE TEMPÉRATURE

IMPACT OF THE MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HYDRATED LIME PARTICLES ON THE SEMI-DRY DESULFURIZATION PROCESS AT LOW TEMPERATURE



AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM ALUMINIUM PRODUCTION

Introduction

Background

- Sulfur dioxide (SO₂) and hydrofluoric acid (HF) are the two of the major contaminants of the effluent gases coming from the electrolysis cells in the aluminium smelters.
- Carbon anodes contain 0.7 wt.% to 3.5 wt.% sulfur. Sulfur from anodes is transformed initially under the reductant conditions of the pot to carbonyl sulfide (COS). But COS is rapidly oxidized to SO₂ in the pot gas treatment center.
- Alumina, containing hydroxyl groups (OH-) and adsorbed moisture, is the main hydrogen sources contributing to the formation of HF and emissions from the cell.
- SO₂ could significantly affect both health and environment.

Statement of the problem

- Removing SO₂ present in low concentrations in the effluent gas may be necessary under certain regulation and site-specific constraints in aluminium smelters.
- Due to the complexity of the reaction kinetics, the conversion of lime (Ca(OH)₂) to gypsum (CaSO₄·H₂O) is still not well understood.
- The role of humidity on the desulfurization efficiency as well as on the final product formation is important.

Objective

The objective of the project is to study the desulfurization of effluent gases containing low concentration of SO₂ at low temperatures via a semi-dry process using hydrated lime [Ca(OH)₂].

Specific objectives are :

- To study the effect of SO₂ concentration and humidity on the desulfurization efficiency
- To quantify the chemical compounds forming using XPS analysis.

Experimental procedure

Schematics of the SO₂ reactor system

Materials	Average particle size	Reaction conditions	
		Dry (0 %)	RH (~17%)
Lime 1	45 µm	100 °C	100 °C
Lime 2	10 µm	SO ₂ : 160 ppm	SO ₂ : 160 ppm

Reactions were carried out using two hydrated lime materials with two different particle sizes.

Results and discussion

Materials	Average particle size	BET surface area (m ² /g)		Pore volume (cm ³ /g)	
		Before reaction	After reaction	Before reaction	After reaction
Lime 1	45 µm	11.81	9.63	0.102	0.086
Lime 2	10 µm	38.25	14.46	0.185	0.101

SEM morphological analysis of (a and c) unreacted lime, (b and d) lime reacted with gas containing 160 ppm SO₂ (RH ~17 %).

Summary of Sulfur 2p spectra.		
Materials	S 2p peak area	
Chemical species	SO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻
Binding energy (eV)	166.9 and 168	168.5 and 169.6
Lime 1	60.1	39.9
Lime 2	75.9	24.1

Summary of Calcium 2p spectra.		
Materials	Ca 2p peak area	
Chemical species	Ca(SO ₃) ₂	CaSO ₄
Binding energy (eV)	347.8 & 350.9	347.3 & 346.9
Lime 1	20.9	44.1
Lime 2	52.0	40.2

XPS analysis of lime 1 and 2 (a and b) S 2p spectra (c and d) Ca 2p spectra (e and f) O 1s spectra for experiments with gas containing an inlet SO₂ concentration of 160 ppm with RH ~ 17%.

(a and c) BET results of unreacted and reacted lime (gas containing 160 ppm SO₂ at ~17% relative humidity) and (b and d) corresponding pore size distributions.

Conclusions

Materials	O 1s peak area		
	Ca(SO ₃) ₂	Ca(SO ₄) ₂	Ca-S-O ₂
Binding energy (eV)	531.2	531.5	532.5
Lime 1	14.0	22.0	63.9
Lime 2	31.3	68.4	0.3

Summary of Oxygen 1s spectra.

Evolution of outlet SO₂ concentration as a function of time under dry and humidified conditions (a) lime 1 (b) lime 2 (c) comparison of lime at RH ~17% (inlet SO₂ concentration: 160 ppm).

Possible reactions

$$SO_2(g) + H_2O(g) \rightarrow H_2SO_3(g)$$

$$H_2SO_3(g) \leftrightarrow 2H^+(g) + SO_3^{2-}(g)$$

$$Ca(OH)_2(s) + SO_2(g) \rightarrow CaSO_3(s) + H_2O(g)$$

$$Ca(OH)_2(s) + SO_3(g) \rightarrow CaSO_4(s) + H_2O(g)$$

- The hydrated lime with an average particle size of about 10 µm was more efficient in removing SO₂ from the gas.
- The relative humidity increases the rate of reaction taking place between SO₂ and hydrated lime.
- When there was no humidity, the reaction between SO₂ and lime was quite low irrespective of particle size, morphological and surface properties of lime.
- BET analysis showed that the adsorption of SO₂ molecules prompt the formation of products which affect the surface structure, resulting in lower surface area and pore size distribution values.
- The chemical species formed at their respective binding energy values indicated that the product contains more CaSO₃ than CaSO₄ for both limes.
- In the case of lime 1, some CaO was observed in the product. It was quite low for lime 2.
- Thus, the surface and morphological properties of sorbent materials could significantly affect the desulfurization reactions.

Acknowledgements

The financial and/or technical support of the NSERC, Rio Tinto, Graymont, CQRDA (MEI), University Research Centre on Aluminium (CURAL), the University of Quebec at Chicoutimi (UQAC), and Aluminium Research Center (REGAL) is greatly appreciated.

References

- John F Moulder et al., Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy, 1993, 1-260.
- Frank Ruhland et al., Chemical Eng. Science, 1991, 46, 939-947.
- D. Ram babu et al., Ind. Eng. Chem. Fund, 1984, 23, 370-373.
- Chiung-Fang Liu et al., Ind. Eng. Chem. Res, 2010, 49, 9052-9057.

Karthikeyan Rajan
 Université du Québec à Chicoutimi

D. Kocaefe - UQAC
Y. Kocaere - UQAC
J. Bernier - Rio Tinto
Y. Robert - Rio Tinto
Y. Dargis - Graymont

Afin de minimiser l'échappement des composés sulfureux (comme SO₂ et SO₃) durant la production d'aluminium, un procédé semi-sec de désulfurisation a été implémenté. Dans ce procédé, la chaux hydratée (Ca(OH)₂) a été utilisée comme sorbant pour capturer le SO₂ à des basses concentrations des gaz d'échappement. Cette étude vise à explorer l'impact des propriétés surfaciques, la morphologie et la taille des particules sur la réaction entre la chaux hydratée et SO₂ en présence de l'humidité. Les résultats ont démontré que le procédé semi-sec de désulfurisation a occasionné une réaction forte entre Ca(OH)₂ et SO₂, produisant des produits CaSO₃/CaSO₄. On a trouvé que la taille des particules est un facteur déterminant qui influe le taux de conversion. Afin d'étudier davantage ces faits, une analyse de la spectroscopie photoélectronique à rayons X a été réalisée, fournissant un aperçu des changements dans la composition chimique des produits finaux et complétant l'étude sur l'influence de la taille des particules et de la surface spécifique de la chaux hydratée sur la réaction.

To minimize the release of sulfur-containing compounds (such as SO₂ and SO₃) during aluminum production, a semi-dry desulfurization process was implemented. In this process, hydrated lime (Ca(OH)₂) was utilized as a sorbent to capture SO₂ at low concentrations from the effluent gases. This study aimed to explore the impact of surface properties, morphology, and particle size on the reaction between hydrated lime and SO₂ in the presence of humidity. The findings showed that the semi-dry desulfurization process led to a strong reaction between Ca(OH)₂ and SO₂, resulting in the formation of products CaSO₃/CaSO₄. The size of the particles was found to be a crucial factor influencing the extent of conversion. To further investigate these effects, X-ray photoelectron spectroscopy analysis was conducted, providing insight into the changes in the chemical composition of the final products and complementing the investigation on the influence of particle size and surface area of hydrated lime on the reaction.



Introduction & Problematic

The electrical contact resistance (ECR) at the cast iron/carbon interface is the major part of the electrical resistance of the cathode assembly in an electrolysis cell. Depending on the contact temperature and pressure at the interface, the ECR is indirectly dependent on the initial air-gap at the interface and its evolution due to various deformation mechanisms appearing in the cathode assembly during its life including the preheating phase [1,2]. Autopsy on end-of-life cells revealed significant deformation in the collector bar, indicating the presence of persistent deformations like creep and potential yielding during cells lifespan. The accurate representation of the cathode assembly's behaviour in simulation tools is essential for investigating a realistic behaviour of cell during the preheating and operation.

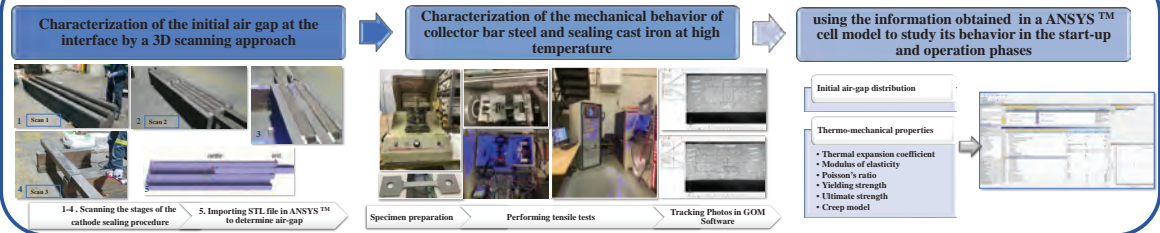


Deformation of the collector bar after service life [3]

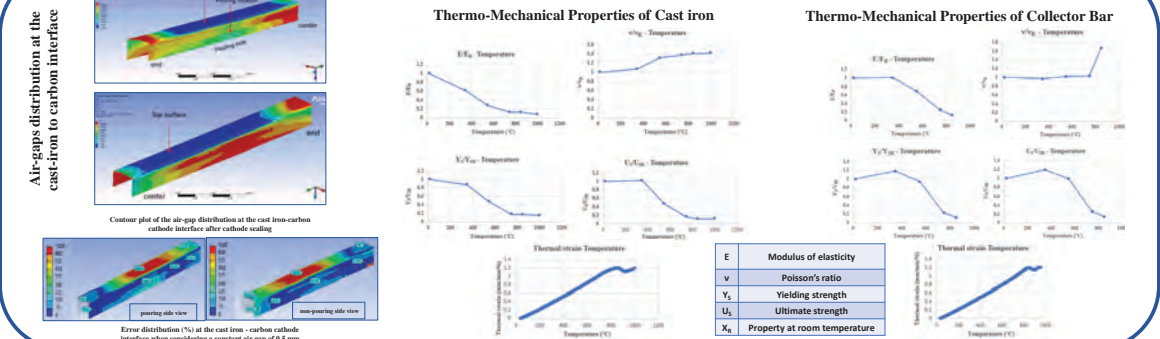
Objective

- ❖ The main objective of this project is to determine the thermomechanical behaviour of the collector bar assembly.
- ❖ More specifically, the project focus on:
 - The characterisation of the initial air-gaps distribution at the cast iron/carbon cathode interface.
 - The characterisation of the mechanical properties of the A1006 and cast iron at high temperature.

Methodology



Some Results



Conclusion

- ❖ Different stages of the cathode sealing process were scanned. The STL file extracted from 3D scan was imported into the ANSYS™ software, enabling the establishment of the air gap distribution. Comparison of the highly asymmetry obtained air-gap distribution with the fixed air gap commonly used for simulations showed a significant error region.
- ❖ steel and cast iron specimens were prepared in accordance with the requirements for the digital image correlation (DIC) technique at elevated temperatures. Tensile tests were performed on Gleeble 3800 coupled with DIC equipment. The obtained results revealed that the mechanical properties of both materials are highly dependent on temperature.

Ongoing Works

- ❖ The identification of proper creep model properties for A1006 collector bar steel and sealing cast iron.
- ❖ Using obtained results into an 1/4 cell ANSYS™ model to study cell's behavior during various phase.

Acknowledgements

The financial support of the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies, Aluminum Research Center – REGAL and Aluminerie Alouette Inc. is greatly appreciated.

References:

[1] A. O. Tezel, "Investigation of Carbon Block/Cast Iron/Collector Bar Interfaces in Aluminum Electrolysis," NTNU, 2012.
 [2] W. Haupin and H. Kvyand, "Thermodynamics of Electrochemical Reduction of Alumina. n Light Metals: Aluminum Reduction Technology," Volume, vol. 2, pp.
 [3] F. R. Fakoya, "A study on the deformation behaviour of the cathode collector bar at high temperature and low levels," 2014.

La résistance électrique de l'ensemble cathodique représente 8% de la tension de fonctionnement (4.2V) d'une cellule d'électrolyse de 400kA et ce, principalement associée à la résistance de contact électrique (RCE) à l'interface fonte/carbone (IFC). Dépendante de la température et de la pression de contact à l'interface, la RCE dépend indirectement de l'espace d'air initial à l'IFC et de son évolution provoquée par les différents mécanismes de déformation en présence dans l'assemblage cathodique. Outre l'évolution des déformations instantanée apparaissant durant l'augmentation de la température de l'assemblage cathodique lors de la mise en opération, des déformations en fluage apparaissent dans l'acier de la barre collectrice et la fonte de scellement tout au long de la vie de la cellule. Ces déformations différées auront pour effet de réduire les pressions de contact à l'IFC et donc, d'augmenter la RCE. Dans cette étude, on propose de caractériser l'espace d'air à l'IFC est caractérisé par scan 3D ainsi que le comportement mécanique à haute température (incluant le fluage) de l'acier de la barre collectrice et de la fonte de scellement. Finalement, l'ensemble de ces informations seront utilisées dans un modèle 1/4 de cuve pour l'étude de son comportement en phase de préchauffage et en opération.

The electrical resistance of the cathode assembly represents 8% of the operating voltage (4.2V) of a 400kA electrolysis cell and this, mainly associated with the electrical contact resistance (ECR) at the cast iron/carbon interface (CCI). Depending on the temperature and the contact pressure at the interface, the ECR depends indirectly on the initial air gap at CCI and its evolution caused by the different deformation mechanisms present in the cathode assembly. In addition to the evolution of the instantaneous deformations appearing as the temperature of the cathode assembly increases during the commissioning, creep deformations appear in the collector bar steel and the sealing cast iron throughout the cell life. These delayed deformations will have the effect of reducing the contact pressures at the CCI and thus increasing the ECR. In this study, we propose to characterize the air gap at the CCI characterized by 3D scan as well as the mechanical behavior at high temperature (including creep) of the collector bar steel and the sealing cast iron. Finally, all of this information will be used in a 1/4 cell model to study its behavior in the preheating phase and operation.

Omolbanin Saiedi
UQAC

D. Marceau - UQAC

S.-O. Tremblay - UQAC

M. Rachik - UTC

A. Godefroy - Aluminerie

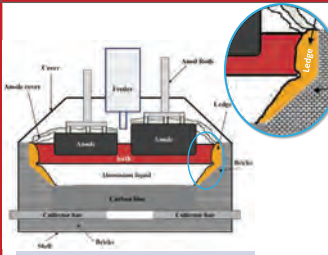
Alouette

S. Charest - Aluminerie

Alouette



1 - CONTEXT AND STATEMENT OF PROBLEM



Heat balance in Aluminium Electrolysis Cell (AEC) is a very sensitive aspect of process control and optimization and represents an important factor to achieve optimum operation

Its dynamic is strongly correlated with the behaviour of the **frozen bath layer** covering the sidewalls called the **side ledge**.

AEC performance and cell life expectancy are influenced by side ledge thickness and its profile

Side ledge has threefold [1] role in alumina reduction process :

- protects sidewall against bath and metal (protective)
- maintains thermal stability of AEC
- ensures the vertical flow of electrical current

HOWEVER ...

- Heat balance is complex due to periodic disturbances: anode effects, energy shortage, anode change, alumina feedings, metal tapping.
- These events cause variations in the **side ledge thickness** and profile which affects the heat balance.
- Side ledge behaviour is still not fully understood**, due to its difficult accessibility and complex behavior.
 - complex chemical environment
 - strong corrosivity of the electrolyte
 - high temperature environment
 - multivariate coupling and nonlinearities

2 - OBJECTIVES OF THE PROJECT

- New approach to study transient behaviour of side ledge
- Quantify disturbances impact on AEC
- Predict thermal events before they occur in AEC
- Predict ledge thickness and its profile

3 - METHODOLOGY

Data acquisition from cells A ✓
Temperature measurements
Shell, Bath, Anode, Gas, current, voltage

Data analysis B (on going)

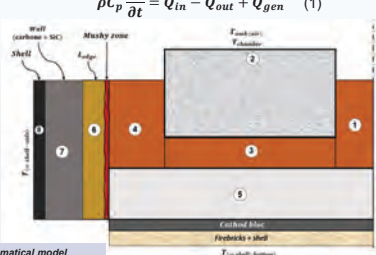
Prediction model C (on going)

COUPLING E

Ledge transient responses
Prediction of thickness and profile of side ledge

Mathematical Model D (On going)

A thermal based-resistance model is developed
General equation (finite volume)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{gen} \quad (1)$$


Control volumes

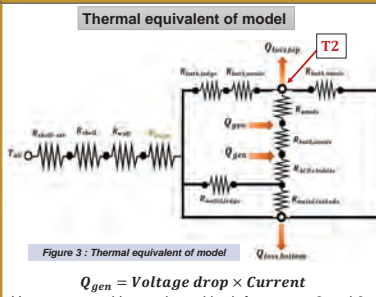
- Zones 1, 3 & 4 : bath
- Zone 2 : anode
- Zone 5 : liquid aluminium
- Zone 6 : ledge
- Zone 7 : sidewall
- Zone 8 : Steel-shell

Assumption

- Conduction between 1, 3 and 4
- Conduction between bath and metal
- Ledge thickness is uniform in bath and metal

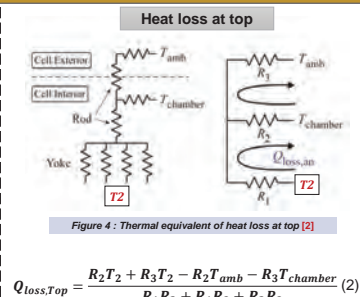
4 - ON GOING WORK : MATHEMATICAL MODEL

Thermal equivalent of model



$Q_{gen} = \text{Voltage drop} \times \text{Current}$
Heat generated in anode and bath from zone 2 and 3.

Heat loss at top



$Q_{loss,Top} = \frac{R_2 T_2 + R_3 T_2 - R_2 T_{amb} - R_3 T_{chamber}}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \quad (2)$

Heat loss at bottom

$$Q_{loss,bottom} = \frac{T_5 - T_{air,bottom}}{R_{metal,cathode} + R_{cathode} + R_{bricks} + R_{shell} + R_{shell-air}} \quad (3)$$

Ledge computation

The ledge thickness is

$$t_{ledge}^{t+1} = t_{ledge}^t + \Delta t_{ledge} \quad (4)$$

$$\Delta t_{ledge} = \frac{Q_{in,ledge} - Q_{out,ledge}}{-\Delta H_f \cdot \rho_{ledge} \cdot A_{ledge}} \quad (5)$$

Where

- ΔH_f : enthalpy heat of fusion of bath
- ρ_{ledge} : density of ledge
- A_{ledge} : section of ledge

5 - CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS

- A thermal based-model represents a good strategy to predict ledge thickness as it requires less computational resources. This is relevant for in-time process monitoring and to estimate the consequence of harmful events
- The work presented is designed to allow for the coupling of a finite volume model to industrial measurements for predictive purposes.

6 - ACKNOWLEDGEMENTS

The authors want to thank Rio Tinto and the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada for the financial and technical support of this project.

7 - REFERENCES

- Dassylva-Raymond, V., Prédiction de l'efficacité de courant du procédé Hall-Héroult. 2009, Université du Québec à Chicoutimi; [Chicoutimi].
- Wong, C.-J., et al., Discretized Thermal Model of Hall-Héroult Cells for Monitoring and Control, IFAC-PapersOnLine, 2021. 54(11): p. 67-72.

Bazoumana Sanogo
Université du Québec à Chicoutimi

L. Dion - UQAC
S. Gaboury - UQAC
S. Guérard - Rio Tinto
J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

Dans une cuve d'électrolyse d'aluminium, la balance thermique représente un facteur important pour tendre vers un fonctionnement optimal. La couche de bain gelée qui protège les parois est un élément intrinsèque de cet équilibre et la présence de divergence de comportement peut fortement influencer la durée de vie de la cuve, ses performances énergétiques, et le contrôle et l'optimisation de son procédé. Le comportement de la gelée reste encore non maîtrisé à cause de l'accessibilité au milieu difficile et de sa composition complexe. Ce travail présente une approche innovatrice qui permettra d'étudier l'évolution transitoire de cette couche protectrice. À partir d'un échantillonnage étendu de données industrielles, un modèle numérique sera couplé à un modèle prédictif de la position de l'isotherme constituant la limite de la gelée. Ce système facilitera la compréhension des phénomènes transitoires via une estimation plus précise de la position de la gelée en temps réels. Ce couplage permettra également la quantification des effets localisés provenant d'événements discrets qui influence la température du bain, le profil de la gelée et la distribution de la chaleur. Dans le contexte 4.0 actuelle, cette méthode représente un outil viable pour le contrôle et l'optimisation énergétique en temps réel du procédé d'électrolyse.

In an aluminum electrolytic cell, the thermal balance is an important factor to lean towards optimum operation. The ledge thickness protecting the sidewalls is a key element of that equilibrium and the occurrence of divergence in its behavior may strongly influence the cell life, its energy performance, and the efficiency of the control, and optimization of the process. Despite the existence of numerous studies, the behavior of the ledge is still not fully understood, due to its difficult accessibility and complex composition. This work presents a novel approach for the transient study of the side ledge. Based on an extensive industrial data set, a numerical model will be coupled to a predictive model designed to detect the position of the isotherm constituting the ledge boundary. It will also facilitate understanding of the transient phenomena occurring in the cell by having a more precise width of the side ledge in real time. In addition, this coupling will enable the quantification of localized effects on bath temperature, ledge profile and heat distribution caused by discrete events. In the context of industry 4.0, this concept represents a viable tool for real-time energy control and optimization of the electrolysis process.



Introduction

- The production of aluminum requires a constant supply of dissolved alumina.
- A deficiency of alumina leads to the generation of perfluorocarbons (PFCs), particularly CF_4 and C_2F_6 .
- Monitoring PFCs at the end of process diagnostics offers an opportunity to enhance control and efficiency while, significantly, reducing greenhouse gas emissions
- An analytical approach based on statistical analysis will provide realistic solutions to reduce these PFC emissions.

Objectives

- Understanding the signals from continuous monitoring of PFC emissions in electrolysis cells
- Assessing the precision of a CF_4 concentration measurement device called Neo Monitor.
- Implement an advanced analytical approach to identify trend variations in the data
- Define an optimal segmentation strategy to group signals with similarities
- Develop and optimize a specific algorithm for signal segmentation, based on criteria such as detection time and detection amplitude
- Conduct a more in-depth analysis of the correlations between electrolysis cell indicators and data to anticipate and reduce PFC production

Methodology

Data collection

Generate a database using the Neo Monitor monitoring device for continuous measurement

Data preprocessing

-Filter aberrant data
-Ensure data is properly calibrated and detect device malfunctions

Trend analysis

Identify moving averages crossovers to estimate trend variations over time¹
-Statistical analysis of trends

Segmentation algorithm

-Define an optimal segmentation strategy based on the results of trend analysis²
-Identify trend crossovers to segment the signal into characteristic parts (clusters)
-Calculate amplitudes and dispersions within each cluster
-Analysis in-depth of correlations between cell indicators and PFC emissions

Results interpretation

-Interpret the results of the analysis based on the time of trend variation and the detected amplitude
-Identify, based on the in-depth correlation analysis, the factors that influence PFC emissions

Results

➤ Using different moving averages, the segmentation into clusters, characterizing signal parts, changes for the same analysis period

➤ By comparing the figures, the variation in amplitudes in the CF_4 signals changes slightly.

ANALYSE_MOBILE	TimeStamp	CF4	DIFF_MOY_MOB_5_15
5-15	2023-02-03 01:02:00	354,31	-1,61
5-15	2023-02-03 01:30:00	333,26	2,06
5-15	2023-02-03 01:54:00	332,59	-12,14
5-15	2023-02-03 02:56:00	79,08	40,79
5-15	2023-02-03 03:24:00	127,50	-0,07
5-15	2023-02-03 03:42:00	146,94	2,10
5-15	2023-02-03 04:10:00	168,08	-0,40
5-15	2023-02-03 04:12:00	196,28	1,46
5-15	2023-02-03 04:14:00	150,65	-13,73

ANALYSE_MOBILE	TimeStamp	CF4	DIFF_MOY_MOB_5_40
5-40	2023-02-03 00:04:00	134,56	70,38
5-40	2023-02-03 01:54:00	332,59	-22,14
5-40	2023-02-03 03:02:00	207,48	174,04
5-40	2023-02-03 04:16:00	137,65	-21,11
5-40	2023-02-03 06:24:00	83,01	6,31
5-40	2023-02-03 06:48:00	-5,77	-43,38
5-40	2023-02-03 07:14:00	102,00	65,42
5-40	2023-02-03 07:28:00	54,68	5,16
5-40	2023-02-03 07:52:00	19,47	47,52

Table 1. Calculation of sign change using 5 and 15-day moving averages (differences between moving averages) - Day 3 of February 2023

Table 2. Calculation of sign change using 5 and 40-day moving averages (differences between moving averages) - Day 3 of February 2023.

- Comparing the tables, the amplitudes of differences between moving averages during sign changes vary depending on the parameters of the moving averages. This can reflect the algorithm's sensitivity to variations in these parameters
- These variations in segmentation can influence the interpretation of correlations between cell indicators and PFC emissions.

Conclusions

- The use of the moving averages strategy to estimate trend variations in signals is an interesting approach for data analysis and the detection of significant events.
- The results demonstrate that an optimization process for algorithm parameters is necessary to refine the segmentation process and find the right balance between the number of generated clusters and their relevance.
- An optimized signal segmentation algorithm will facilitate the analysis of continuous CF_4 monitoring results to find concrete connections with process parameters

Acknowledgments

We would like to thank:

- Mitacs-Élévation, the Government of Canada, and the Government of Quebec through the Ministry of Economy and Innovation (MEI) for their financial support
- Rio Tinto company for their partnership

References

1. 7 Popular Technical Indicators and How to Use Them to Increase Your Trading Profits, Harry Nicholls. An overview Apr 8, 2018. Available online: <https://harrynicholls.medium.com/7-popular-technical-indicators-and-how-to-use-them-to-increase-your-trading-profits-7038eb8d05> (accessed on August 2023)
2. Cluster-based genetic segmentation of time series with DWT, Vincent S. Tieng, Chun-Hao Chen, Pai-Chieh Huang, Tsung-Pei Hong, Department of Computer Science and Information Engineering, National Cheng-Kung University, Tainan 701, Taiwan, ROC; Pattern Recognition Letters 30 (2009) 1190–1197

Les perfluorocarbures (PFC) sont des gaz à effet de serre générés périodiquement lors de la production d'aluminium lors d'événements appelés effets anodiques. Malgré le fait que deux gaz sont produits lors de ces occurrences (CF_4 et C_2F_6), les émissions de CF_4 sont dominantes dans un rapport de 10:1. Le but du travail présenté est de quantifier la précision et le comportement d'un dispositif de surveillance innovant pour la mesure continue des émissions de PFC dans les cellules d'électrolyse. Ce dispositif de haute précision utilise un laser à cascade quantique pour évaluer la concentration de CF_4 à travers le gaz. Pour faciliter l'interprétation, l'analyse des données utilise d'abord une stratégie de croisement de moyennes mobiles pour estimer la variation de tendance et définir la stratégie de segmentation optimale pour une meilleure analyse du signal. Un algorithme a été développé et optimisé pour cette segmentation. Le temps de détection et l'amplitude de détection ont été utilisés comme indicateurs pour l'optimisation des paramètres de l'algorithme. Enfin, les données segmentées seront couplées aux conditions de processus correspondantes pour une analyse plus approfondie des corrélations entre les indicateurs de la cellule et les émissions de PFC.

Perfluorocarbons (PFCs) are greenhouse gases generated periodically during aluminum production during specific events called anodic effects. While two main components are usually generated (CF_4 and C_2F_6) during these events, CF_4 emissions are dominant in a 10:1 ratio. The purpose of the work presented is to quantify the accuracy and behavior of an innovative monitoring device for continuous measurement of PFC emissions in electrolysis cells. This high-precision device uses a quantum cascade laser technology to evaluate the concentration of CF_4 across the gas flow. In order to interpret the data logically, the data analysis first uses a moving average crossover strategy for the estimation of the trend variation and defining the optimal segmentation strategy for proper analysis of the signal. For this purpose, an algorithm has been developed and optimized for this segmentation. Detection time and an amplitude of detection were used as metrics for the optimization of the algorithm's parameters. Ultimately, the segmented data will be coupled with the corresponding process conditions for a deeper analysis of the correlations between cell indicators and PFC emissions.

Karima Selmani Bouayoune
Université du Québec à Chicoutimi

L. Dion- UQAC
T. Roger - UQAC
J. Bernier- Rio Tinto
A. Gosselin- Rio Tinto
J. Boulanger- Rio Tinto
E. Gonzalez - Rio Tinto



Introduction

Carbon anode is an integral part of aluminium smelter, consisting of mainly calcined petroleum coke, coal-tar-pitch (CTP), and recycled anode butts. Raw materials are mixed and pressed in vibro-compactors, followed by baking in furnaces under the coverage of packing coke. During baking, the anodes are vertically stacked, while they occasionally stick together or packing coke particles adhere on the anode surfaces. This phenomenon, known as "anode sticking", is a serious industrial challenge contributing to:

- Requiring additional operator interventions
- Necessitating specific safety consideration
- Increasing anode losses due to discarding
- Raising overall production costs

Packing coke particles sticking on the surface of baked anodes

Objective & Hypothesis

Main Objective:

- Identify the main reasons leading to the anode sticking problem

Hypothesis:

- Pitch squeezing out of bottom anodes due to mechanical stress exerted by top anodes

Sub-objective:

- Evaluate pitch distribution in the anodes using an appropriate tracer
- Investigate the possibility of pitch extracting from the anodes due to various compressive stresses

Pitch Optimization

Pitch/Coke (P/C): Pitch mass in 100 g of coke
Pitch/Anode (P/A): Weight percentage of pitch in green anode

(P/C) (1/100)	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
(P/A) (%)	12.3	13.0	13.8	14.5	15.3	16.0	16.7	17.4	18.0	18.7

Green and baked densities at various pitch/coke ratios

Pitch Marker

Three oxides:

- ZnO
- FeO
- Bi₂O₃

Sample	Coking value (%)
Primary CTP	58.3 ± 0.3
CTP-Bi ₂ O ₃	59.0 ± 0.5

Bismuth oxide (Bi₂O₃) was selected as a proper pitch indicator.

Anode Characterization

XRF elemental composition in three positions of green and baked anodes

Bismuth distributes homogeneously in green anode, whereas its concentration increases from the center toward the edge of all baked anodes.

a) SEM image of baked anode. b) EDS spectra of Spot 2

Chemical reaction of Bi₂O₃ above its melting point (850 °C):

$$\text{Bi}_2\text{O}_3 (s) + 3\text{C} (s) = 2\text{Bi} (l) + 3\text{CO} (g) \quad \Delta G = -404.7 \text{ KJ}$$

$$\text{Bi}_2\text{O}_3 (s) + 1.5\text{C} (s) = 2\text{Bi} (l) + 1.5\text{CO}_2 (g) \quad \Delta G = -345.8 \text{ KJ}$$

Mechanical Stress

Baking lab-scale anodes made with optimized pitch having 1 wt. % Bi₂O₃ with various uniaxial compressive stress:

Top anode: $\sigma_1 = 0 \text{ kPa}$
Middle anode: $\sigma_2 = 25 \text{ kPa}$
Bottom anode: $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$

Schematic of baking setup with steel bars based on industrial furnace

Conclusion

- Pitch marker development was determined as a helpful method in tracing pitch distribution.
- Compacting anode paste to form green anode has no effect on pitch distribution.
- Baking process generally contributes to moving pitch toward anode surfaces, probably due to internal pressure.
- The influence of different compressive stresses on pitch squeezing was not straightforward owing to bismuth distribution

Future Work

- Investigate the interaction of pitch ratio, compressive stress, and heating rate on the anode sticking
- Determine a more stable pitch marker during baking
- Correlate severe sticking conditions to the pitch squeezing issue

Acknowledgement

The authors would like to thank Alcoa Corporation as well as the Natural and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for their technical and financial support.

References

- Hulse, Kirstine Louise. "Raw materials, formulation and processing parameters." *R&D Carbon Ltd., Switzerland* (2000).
- Hussein, Asem. Bio-pitch as a potential binder in carbon anodes for aluminum production. 2021.
- Barry, Thiemo Saidou. Effet de l'empilement des anodes de carbone pendant la cuisson sur leur densification et sur leur résistivité électrique. 2020.
- Lauzon-Gauthier, Julien. "Monitoring of a carbon anode paste manufacturing process using machine vision and latent variable methods/Julien Lauzon-Gauthier." 2015.

Finaliste
Finalist

Nafiseh Shadvar
Université Laval

G. Gauvin- UL
S. Laliberté-Riverin- UL
J. Lauzon-Gauthier - Alcoa
H. Alamdari - UL

Le processus de cuisson fait partie intégrante de la production d'anodes de carbone pour les alumineries, contribuant aux évolutions microstructurales les plus importantes dans la structure de l'anode. Cependant, ce processus est parfois confronté à certains défis : après la cuisson, les anodes se collent les unes aux autres ou du coke de remplissage adhère aux surfaces de l'anodes, un phénomène nommé le «collage d'anode». Étant donné que trois anodes sont empilées verticalement dans les fours, l'une des raisons possibles est l'éjection du brai des anodes inférieures pendant la cuisson sous l'effet de la contrainte mécanique générée par les anodes supérieures. Ce travail visait à vérifier l'écoulement du brai en suivant sa distribution dans l'anode à l'aide d'un traceur. Des anodes de laboratoire ont été fabriquées avec un contenu en brai optimisé et 1 % massique de Bi₂O₃ comme indicateur sélectionné. Les anodes ont été cuites sous des contraintes de compression de 0 kPa, 25 kPa et 50 kPa, correspondant aux contraintes exercées sur différentes positions verticales dans le four industriel. L'analyse XRF des anodes a révélé une distribution homogène du brai dans les anodes vertes, tandis que le brai a eu tendance à s'extraire de toutes les anodes cuites. L'impact des contraintes n'était toutefois pas simple en raison de l'évaporation de Bi pendant la cuisson.

The baking process is an integral part of carbon anode production for aluminium smelters, contributing to the most important microstructural evolution in the anode structure. However, this process occasionally faces some challenges while after baking, either anodes stick together or surrounded packing coke adheres to the anode surfaces, a phenomenon known as "Anode sticking". Given that three anodes are stacked in industrial furnaces, one possible reason is pitch squeezing out of the bottom anodes during baking owing to the mechanical stress generated by the top ones. This work aimed to verify pitch outflow by tracking its distribution in the anode using a tracer. Lab-scale anodes were fabricated with an optimized pitch ratio containing 1 wt. % Bi₂O₃ as a selected indicator. The anodes were then baked under compressive stresses of 0 kPa, 25 kPa, and 50 kPa, corresponding to the stresses exerted on different vertical positions in the industrial furnace. XRF analysis of the anode cross-sections revealed homogenous pitch distribution in green anodes, whereas pitch had a tendency to extract from all baked anodes. The impact of stresses, however, was not straightforward due to Bi evaporation during baking.

ÉTUDE BIDIMENSIONNELLE DE L'AGITATION DE L'INTERFACE BAIN-MÉTAL CAUSÉ PAR LE DIOXYDE DE CARBONE DANS UNE CUVE D'ÉLECTROLYSE DE L'ALUMINIUM AVEC ANSYS FLUENT™

TWO DIMENSIONAL STUDY OF THE BATH METAL INTERFACE AGITATION CAUSED BY CARBON DIOXIDE IN AN ALUMINUM ELECTROLYSIS CELL WITH ANSYS FLUENT™

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



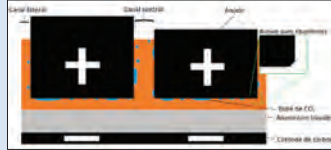
RioTinto



1 Introduction

L'aluminium primaire est produit industriellement à l'aide du procédé Hall-Héroult dans lequel l'alumine (Al_2O_3) est réduite pour donner de l'aluminium. Lors de cette réaction, l'oxygène de l'alumine réagit avec le carbone des anodes pour produire du CO_2 sous les anodes. La couche de gaz ainsi formée a notamment comme effet d'isoler électriquement le passage du courant et de produire du brassage dans la cuve [1, 2].

Sachant que la production et l'écoulement des bulles ont des impacts importants sur l'équilibre des cuves d'électrolyse, il est primordial d'avoir une bonne compréhension de ce phénomène pour optimiser le procédé. Les travaux présentés cherchent à mieux comprendre la déformation de l'interface bain-métal consécutive du mouvement causé par ces bulles de CO_2 .



2 Objectif

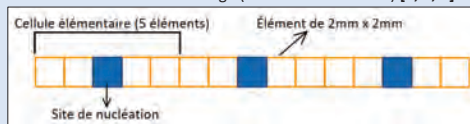
Développement d'un modèle de simulation en 2D d'une cuve d'électrolyse pour comprendre les impacts de trois paramètres d'entrée sur la déformation de l'interface bain-métal (IBM).

- Distance anode cathode (ACD)
- Largeur du canal central
- Présence ou absence de chanfreins

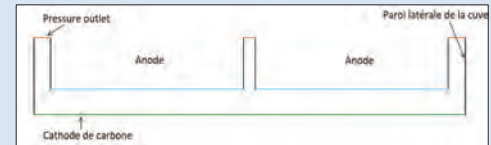
Ce travail est une étude de concept qui sera suivi par la mise en place d'un modèle 3D plus représentatif de la réalité industrielle.

3 Méthodologie

Le logiciel commercial ANSYS FLUENT™ est utilisé pour simuler la production et l'écoulement des bulles de CO_2 avec la méthode Volume of Fluids (VOF). Une «User-Defined Function» (UDF) permet de calculer localement la génération de bulles de CO_2 sous les anodes en fonction du courant électrique qui y circule. Pour ce faire, la surface inférieure de l'anode est divisée en cellules élémentaires de 1 cm de large (5 éléments de 2 mm) [3, 4, 5].

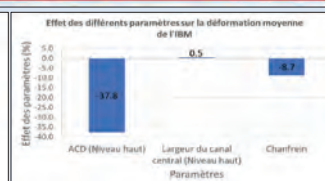
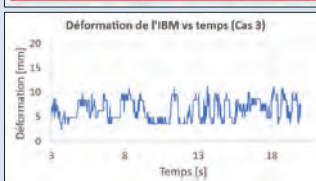
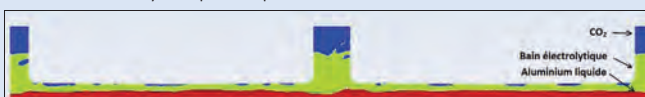


Le modèle qui a été fait présente une coupe latérale en deux dimensions d'une cuve. Le CO_2 qui est produit s'échappe librement par les «pression outlet». Un voltage de 0 V est imposé sous les anodes, et une densité de courant $0,6 A/cm^2$ est imposée à la cathode.



5 Résultats

Les résultats de chaque simulation sont extraits sous un format vidéo et un code Python permet d'en faire l'analyse vidéo. Le point le plus haut de l'IBM est identifié pour chaque pas de temps retenue. Puis, la moyenne de l'amplitude de la déformation est calculée dans le but de faire l'analyse du plan d'expérience.



Les résultats indiquent que l'ACD est le contributeur le plus important qui affecte la déformation de l'IBM causée par le mouvement des bulles. Une diminution de 37,8 % de l'amplitude de la déformation est mesurée lorsque l'ACD augmente de 20 mm. La présence de chanfrein permet de réduire la déformation de l'IBM d'environ 8,7 % alors que la largeur du couloir central est négligeable.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Rio Tinto et le CRSNG pour leur support financier.



4 Plan d'expérience

Un plan d'expérience de Taguchi à 3 facteurs a été utilisé pour déterminer une relation linéaire entre les paramètres d'entrée et la déformation moyenne de l'IBM.

Paramètre d'entrée	Niveau bas	Niveau haut
Distance anode-cathode (cm)	4	6
Largeur du canal central (cm)	8	20
Présence de chanfrein	Pas de chanfrein	Présence de chanfrein

6 Conclusion

Ces travaux ont permis de démontrer la pertinence de étudier les phénomènes de brassage causé par les bulles au moyen d'une méthode numérique.

Certains facteurs ont été identifiés comme ayant une influence considérable sur la déformation de l'IBM, notamment l'ACD et la présence de chanfreins anodiques.

Les travaux de recherches futurs déploieront un modèle tridimensionnel permettant d'offrir des solutions réalistes pour améliorer les performances de l'industrie.

Références

1. Kai Gjoelheim, Halvor Kvande, *Introduction to Aluminium Electrolysis: Understanding the Hall-Héroult Process*, Beuth Verlag GmbH, 1993, 268 pages.
2. Jonas Théron, *Aluminium Electrolysis: Fundamentals of the Hall-Héroult Process*, Aluminium-Verlag, 2001, 359 pages.
3. Sándor Ponceák et al., *Formation et évolution des bulles de gaz au-dessous de l'anode dans une cuve d'électrolyse d'aluminium*, PhD Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, Québec, Canada, 2000.
4. László I. Kiss and Sándor Ponceák, *Effect of the bubble growth mechanism on the spectrum of voltage fluctuations in the reduction cell*, *Light Metals* 2002, 217-224.
5. László I. Kiss, Sándor Ponceák, and Jacques Antille, *Simulation of the bubble layer in aluminum electrolysis cells*, *Light Metals* 2005, 559-564.

Samuel Théberge

Université du Québec à
Chicoutimi

L. Dion - UQAC

L. Kiss - UQAC

T. Roger - UQAC

S.-O. Tremblay - UQAC

S. Guérard - Rio Tinto

J.-F. Bilodeau - Rio Tinto

Une compréhension approfondie de la déformation spatiotemporelle de l'interface bain-métal (IBM) est primordiale pour être en mesure de réduire l'instabilité dans les cuves d'électrolyse. Dans cette optique, des simulations en deux dimensions de l'écoulement de bulle de dioxyde de carbone (CO_2) dans une cuve d'électrolyse de l'aluminium ont été réalisées à l'aide du logiciel ANSYS FLUENT. Le modèle calcule la quantité de courant qui circule localement sous des anodes et en calcule la quantité de CO_2 qui y est localement produite. Ce modèle de CFD bidimensionnel a permis de mieux comprendre l'écoulement de bulles dans la cuve et plus spécifiquement son effet sur l'interface bain-métal. Ce modèle est une première itération qui permettra par la suite d'évoluer vers un modèle tridimensionnel permettant d'évaluer précisément l'effet de chaque facteur sur la perturbation de l'IBM. Les travaux présentés étudient l'influence des perturbations causées par une diminution de la distance anode-cathode (ACD). La réduction de l'ACD démontre un comportement non-linéaire qui augmente considérablement l'instabilité de l'IBM au fur et à mesure que l'espace est réduit. Les résultats indiquent également que l'ACD a un effet négligeable sur le brassage du bain pouvant servir à mieux distribuer l'alumine.

A thorough understanding of the spatiotemporal deformation of the bath-metal interface (BMI) is essential to reduce instability in electrolytic cells. For this reason, two-dimensional simulations of carbon dioxide bubble flow in an aluminum electrolysis cell were carried out using ANSYS FLUENT software. The model calculates the amount of current circulating locally under each anode in order to determine the amount of CO_2 produced. This two-dimensional CFD model gives the opportunity to better understand the flow of bubbles in the electrolysis cell, and more specifically its effect on the bath-metal interface (BMI). This model is a first iteration that will later evolve into a three-dimensional model with the aim of providing more precise knowledge of the effect of each factor on the BMI deformation. The present work examines the influence of disturbances caused by a decrease in the anode-cathode distance (ACD). The reduction of the ACD demonstrates a nonlinear behavior that significantly increases the instability of the interfacial boundary movement (IBM) as the space is reduced. The results also indicate that the ACD has a negligible effect on the bath mixing areas which could have been beneficial to better distribute the alumina.

OPTIMISATION DU LIT RÉSISTIF POUR LE PRÉCHAUFFAGE DES CELLULES D'ÉLECTROLYSE OPTIMIZATION OF THE RESISTIVE-BED FOR PREHEATING OF ELECTROLYSIS CELLS

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



Fonds de recherche
Nature et
technologies
Québec

1- Introduction & Problem Statement

Fig. 1.1 A schematic of an electrolysis cell.

Electrical Cell Preheating
A mixture of coke and graphite (resistive bed) are distributed on the graphitized cathode in a pattern and then all the anodes are placed on it to pass the electric current as shown in Fig. 1.2. This process generates enormous heat due to Joule's effect, which preheats both the anodes and the cathode before the cell start-up. Bath is generated by adding of solid crushed bath on the cathode (dry start-up). Due to easier and cost effective method, cell electrical preheating is preferred by aluminium industries. The importance of start-up in cell life is indicated in Fig. 1.4.

Fig. 1.2 A resistive bed for electrical cell preheating.

Fig. 1.3 Final cathode surface temperature distribution after preheating.

Encountered Problems in Cells

- ✓ Frozen bath on peripheral cathode surface due to lower temperature in peripheral zone as illustrated in Fig. 1.3
- ✓ Higher instability in cells after start-up and early-life period
- ✓ Deposition on the corners for a long period of time (specially in low-energy-operating cells)
- ✓ Premature cathode bottom failure

2- Objectives

Determination of the optimal operational conditions to obtain the best preheating

It must have proper preheating of the 'Whole-Cathode' by reduction in thermal stress, heating rate and maximize the baking level of ramming paste

Increase in cell lifespan & Reduction in production cost and negative impact on environment

3- Methodology

A Study on the cell preheating & cathode behaviour

B Identification of Key Performance Indicators for cell preheating

C Characterization of material - coke & graphite mixture

4- Preliminary Results & Interpretation

- ✓ The behaviour of modern cells (operated/controlled with very good process parameters) specially cathode deposition in early life period are studied and also thermal behaviour of graphitized cathode are studied during preheating and start-up
- ✓ The deposition of frozen bath on the cathode corner surface is considered as a result of insufficient temperature attained after the completion of preheating process

Fig. 4.1 Quarter cell model

- ✓ The preheating process is simulated in a transient with strongly coupled T-E ¼ cell model, (Fig. 4.1)
- ✓ Several resistive bed patterns are developed based on the heat flux compensation from the cathode during preheating
- ✓ Pattern-1 is created with uniform pattern density, whereas in Pattern-2 it is kept non-uniform

Fig. 4.2 Temp. measurement locations in central channel

Fig. 4.3 Cathode surface temperature distribution

Shifting of initial bath melting zone is obtained in both the new patterns, which will avoid corner freezing indicated in Fig. 4.3.

Fig. 4.4 Initial 20-hr cathode surface temperature evolution

- ✓ Heating rate for initial 20 h is considered, as when the first bath melts in 21 h disturbs the electrical current path, hence making heating rate non-uniform and very slow afterwards
- ✓ Fig. 4.4 Shows reduced heating rate for both the new patterns, which is desired for a better preheating
- ✓ A moderate heating rate is desired, as it reduces the development of thermal gradients and enough to heat up the cathode

Fig. 4.5 Ramming paste baking level

The temperature for baking level of ramming paste is considered as 700 °C, due to its typical characteristic behaviour.

Table-1 Performance indicators for preheating

Performance Indicators	Pattern-0	Pattern-1	Pattern-2
Cathode surface for frozen bath melting (90% after preheating)	39	36	36
Average cathode surface temperature	872	865	854
Coefficient of variation of the cathode surface temperature (after preheating)	0.169	0.146	0.165
Average heating rate during first 20 h of preheating	950	862	871
Heating rate during first 20 h of preheating	37.8	34.9	33.5
Coefficient of variation of the peak current	0.26	0.43	0.39
Baking level of peripheral ramming paste	69	73	72
Baking level of peripheral ramming paste	28	33	30
Area obtained based on the new patterns	0.664	0.690	0.878

- ✓ All the performance indicators for the monitoring preheating are identified and listed. From the model their values are calculated and are presented in the Table-1
- ✓ Key performance indicators are separated and assigned with weighted value (See Table-2) to compare the results for all the patterns studied
- ✓ On the basis of the score obtained for KPIs, the best resistive bed pattern is chosen
- ✓ Preheating time for both the new patterns are expected to be a little longer (illustrated in Fig. 4.6) and it is due to reduced heating rate as mentioned already)

Table-2 Key Performance Indicators for preheating

Key Performance Indicators	Physics	Weight	Units	Range Values					
				Min.	Max.	<=	>=	Dev.	
% of cathode surface for bath melting (90%) after preheating	Thermal	0.15	%	0	0	0	0	50	10
Coefficient of variation of the cathode surface temperature	Thermal	0.20	(-)	0	0	0.15	0.05	0	0
Coefficient of variation of the anodic current distribution	Electrical	0.10	(-)	0	0	0.25	0.15	0	0
Baking level of total ramming paste	Chemical	0.15	%	0	0	0	0	75	10
Average heating rate during first 20h of preheating	Chemical	0.20	°C/h	30	40	0	0	0	0
Baking level of peripheral ramming paste	Chemical	0.20	%	0	0	0	0	70	10

Fig. 4.6 Evolution of cathode surface temp. and preheating time extension for P-2

5- Conclusion

- ✓ Both the new patterns show better results in heating rate and baking level of ramming paste with other parameters in the acceptable limits
- ✓ Pattern-2 has an advantage over pattern-1 due to higher level of peripheral ramming paste baking. (Fig. 4.5 & Table-1)
- ✓ Pattern-2 is suitable for the preheating for the low-energy operating cells and managing the anode current distribution is crucial in order to have a good cell preheating [4]
- ✓ The main significance of these new patterns is the initiation of bath melting at periphery rather than the center of the cell

6- Smelter Benefits

Cell Start-Up & Operation

- ✓ Frozen bath free cathode after start-up
- ✓ Smooth start-up & early life

Cost & Environment

- ✓ Increment in cell cathode life
- ✓ Reduction of spend pot linings
- ✓ Premature cathode bottom failure prevention

Fig. 6.1 An operational electrolysis cell

7- Works In Progress

- ✓ T-M effect will be studied by extending the model to T-E-M model
- ✓ Mechanical performance indicators will be added to the current list with its due weightage
- ✓ Preheating performance will be determined in terms of parameters associated with thermal, electrical, mechanical and chemical
- ✓ Material characterization: thermal & electrical properties of the coke & graphite mixture will be determined under varying temperature and pressure
- ✓ Trial on industrial electrolysis cells will be carried out for verification and smelter implementation

8- Acknowledgements

The financial support of the Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies, Aluminium Research Center - REGAL and Aluminerie Alouette Inc. is greatly appreciated.

9- References

[1] Settle M., Oye H., 3rd Edition, 2010, Cathodes in Aluminium Electrolysis. Aluminium Verlag, Germany.
 [2] Rohini-Nandan Tripathy, Daniel Marceau, Simon-Olivier Tremblay, Antoine Godfrey & Sébastien Charest, "Thermochemical Analysis of Lining Bed Patterns during Preheating phase." TMS Light Metals 2024 (to be published).
 [3] Simon-Olivier Tremblay, Daniel Marceau, Rohini-Nandan Tripathy, Antoine Godfrey, Dayu Kocafee, Sébastien Charest, & Jules Cost, "Numerical Investigation of Thermal, Electrical and Mechanical Behaviour of Aluminium Cell during preheating phase." TMS Light Metals 2023, pp. 765-772.
 [4] Keith A. Ryan, "Cell preheating start-up and early operation." TMS Light Metals 2008, pp. 1007-1011.

AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM ALUMINIUM PRODUCTION

Rohini-Nandan Tripathy
Université du Québec à Chicoutimi

D. Marceau- UQAC

S.-O. Tremblay- UQAC

D. Kocafee - UQAC

A. Godefroy- Aluminerie

Alouette

S. Charest - Aluminerie

Alouette

Le préchauffage des cellules d'électrolyse peut être réalisé par différentes techniques. Cependant, et pour des raisons économiques, l'industrie de l'aluminium préfère généralement opter pour une approche électrique en utilisant un lit résistif composé de coke et/ou de graphite. Lors de cette étape, la cellule d'électrolyse subit d'importants changements de nature électrique, thermique, chimique et mécanique. Elle doit donc être réalisée de façon minutieuse afin de minimiser l'impact de ces changements sur le démarrage ainsi que sur la durée de vie de la cellule d'électrolyse. L'objectif premier de ce travail est de déterminer les meilleurs paramètres susceptibles de mener à un préchauffage de qualité. Dans un premier temps, les propriétés thermiques et électriques du mélange coke/graphite seront déterminées en fonction de la température et du niveau de confinement, et ce, pour différents ratios de composition. Les propriétés obtenues seront par la suite utilisées dans un modèle ¼ de cuve développée à l'aide du logiciel ANSYS™ WB. L'impact de différentes configurations de lit résistifs sera par la suite étudié et la qualité du préchauffage déterminée via l'exploitation d'indicateurs de performance préalablement déterminés. Les résultats ainsi obtenus fourniront des informations cruciales pour l'obtention d'un préchauffage optimal.

The preheating of the electrolysis cells can be carried out by different techniques. However, for economic reasons, the aluminum industry generally prefers to opt for an electrical approach using a resistive bed composed of coke and/or gra-phite. During this stage, the electrolysis cell undergoes significant electrical, thermal, chemical and mechanical changes. It must therefore be carried out meticulously in order to minimize the impact of these changes on the start-up as well as on the life of the electrolysis cell. The primary objective of this work is to determine the best parameters likely to lead to quality preheating. First, the thermal and electrical properties of the coke/graphite mixture will be determined as a function of the temperature and the level of confinement, for different composition ratios. The properties obtained will then be used in a ¼ cell model developed using the ANSYS™ WB software. The impact of different resistive bed configurations will then be studied, and the quality of preheating determined through the use of previously determined performance indicators. The results thus obtained will provide crucial information for obtaining an optimal preheating.

EFFET DES ADDITIFS FINS DE COKE DE PÉTROLE CALCINÉ DANS LE BIO-BRAI POUR LES ANODES EN CARBONE

EFFECT OF FINE CALCINED PETROLEUM COKE ADDITIVES TO BIO-PITCH FOR CARBON ANODES



AXE 1 : PRODUCTION DE L'ALUMINIUM ALUMINIUM PRODUCTION

1. Introduction & problematic:

- Coal-tar pitch (CTP) releases polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) during anode baking, which are carcinogenic.
- Bio-pitch (BP), a solid carbonaceous material extracted from biomass oil, has demonstrated interesting properties and low emissions of PAHs to become a sustainable binder.
- BP's high mass loss during anode baking causes important shrinkage and porosity in the baked anode.
- In past experiments, a hybrid bio-binder (HBB) was developed by pyrolysis of bio-oil in air up to 180 °C with 0.5 °C/min heating rate, and 1 h soaking time. The aim was to increase the coking value of BP by adding fine calcined petroleum coke (fine CPC), which was achieved with a softening point lower than that of CTP.
- The viscosity was measured and the chemical composition was analyzed with X-ray fluorescence spectroscopy (XRF).

2. Objectives:

- To determine the rheological properties of the HBB.
- To determine the chemical composition of the HBB.

3. Materials & Methodology:

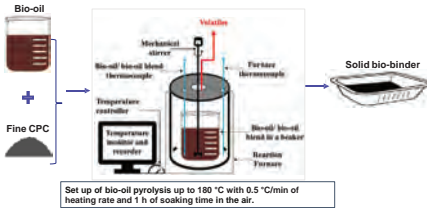
3.1. Hybrid bio-binder (HBB) production

Table 1: Properties of the bio-oil (Pyrovac Inc.)

Chemical element	Wet basis (wt.%)	Dry basis (normalize d from 82 to 100%)	Water content (wt.%)
C	60	73.2	
O	38.5	17.6	
H	8.6	8	18
S	0.5	0.6	
N	0.5	0.6	

Fine calcined petroleum coke particles (Fine CPC) from Alcoa corporation:

- Particle size with a Blaine Number (BN) 5000.
- Total mass of hybrid bio-oil mixture: 950 g
- Fine CPC mass in the hybrid bio-oil mixture: 0 wt.%, 5.0 wt.%, 10 wt.%, 18 wt.%, 25 wt.%, and 30 wt.%
- ¹N (Blaine Number) is a parameter defining particles' specific surface area.



3.2. Hybrid bio-binder (HBB) characterization



Viscosity

- Discovery Hybrid Rheometer (DHR-3, TA Instruments, New Castle, USA).
- Temperature: 145 °C, 155 °C, 165 °C, and 178 °C.
- Shear rates of (1-100) s⁻¹.



XRF

- Chemical composition
- X-ray fluorescence (XRF) - ZSX Primus II (Rigaku, Japan)
- Mainly determine S content and detection of C, O, S, N, Si, Ca, Fe, Ni, P, and K.

4. Results:

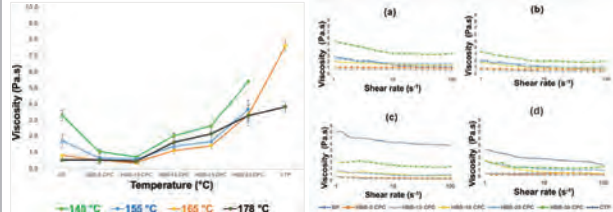


Figure 1: Viscosity of bio-binder and CTP samples at 145 °C, 155 °C, 165 °C, and 178 °C.

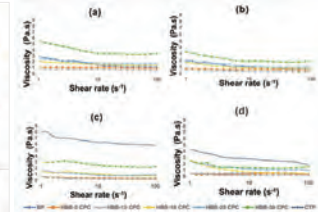


Figure 2: viscosity versus shear rate of samples at (a) 145 °C, (b) 155 °C, (c) 165 °C, and (d) 178 °C.

Table 2: Chemical composition of fine CPC and BP with XRF

Element	Fine CPC	BP
C (wt.%)	97.76	63.63
O (wt.%)	N.D.	35.96
N (wt.%)	N.D.	1.07
S (wt.%)	2.06	0.02
Fe (ppm)	608	130
Ca (ppm)	320	29
Si (ppm)	672	34
K (ppm)	N.D.	19
P (ppm)	N.D.	N.D.

¹N.D.: Not detected

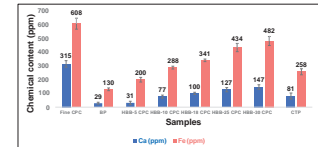


Figure 3: Ca and Fe composition of samples with XRF

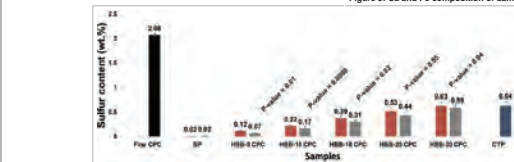


Figure 4: Sulfur content in hybrid bio-oil mixture and in solid samples with XRF.

1. Observations:

- In Figure 1, BP and all HBB samples have a lower viscosity than CTP between (145–178) °C. The viscosity decreases when fine CPC between (0–10) wt.% is added in HBB. However, there is a slight increase of viscosity when fine CPC additives are highly increased above 10 wt.%. HBB-30 CPC sample has a higher viscosity than all HBB samples.
- In Figure 2, there is a shear thinning behavior between 1 s⁻¹ and 10 s⁻¹ for HBB viscosity, especially with a high amount of fine CPC (18-30) wt.%. The Newtonian fluid behavior is observed beyond 10 s⁻¹ with an increase in shear rate. Shear thinning behavior of CTP at all shear rates between 165 °C and 178 °C.
- In Table 2, there is no K and P in fine CPC. There is no P in BP and the amount of S and K in BP is insignificant.
- In Figure 3, Ca and Fe content increases in HBB with increase in fine CPC. The content of Ca and Fe in HBB-10 CPC is comparable to that of CTP.
- The absence or small amount of some impurities such as K, P, Ca and Fe contribute to reducing their reactive effects in the Al electrolysis cell. For example, the presence of P in the Al electrolysis cell reduces the current efficiency.
- In Figure 4, S content in HBB is mainly from fine CPC and it increases with fine CPC addition in HBB. The S content is lower in BP and HBB than in CTP.
- In Figure 4, S content decreases in HBB with fine CPC at each fraction after pyrolysis. A high decrease in S content is observed at (18-25) wt. %.

2. Discussions:

- Petroleum coke was oxy-cracked into activated carbon in the presence of alkali medium at (170-230) °C temperature [1][2]. The release of S resulted into formation of sites where activation can occur [2].
- It is hypothesized that the fine CPC is activated by bio-oil during pyrolysis, thus losing some mass and active sites. This could enable fine CPC to enhance the quality of HBB in terms of carbon content.
- At low temperatures less than 200 °C, sulfur reacts into sulfur oxides in the presence of O₂ and H₂O [3][4].
- In Figure 1, a low viscosity of all HBB, in comparison to the CTP may be due to the chemical interactions that happened between both raw materials.
- In Figure 4, the decrease of S in HBB after pyrolysis may be due to the oxidation of S in the presence of O₂ and H₂O. As result, S is released in form of SO₂. This may be one of the evidences of fine CPC activation.

6. Conclusion:

- BP and HBB have a lower viscosity than that of CPC.
- Viscosity reduces in HBB with low amount of fine CPC and increases with addition of high amount of fine CPC.
- The carbon content in fine CPC is higher than that in BP.
- S content in BP and HBB is lower than that in CTP.
- S content in HBB decreases compared to theoretical S content in hybrid bio-oil mixture.

7. Future work:

- To verify hypotheses in the discussions section, the following is planned:
 - Further investigation of the phenomenon of fine CPC activation as a driving force for fine CPC and BP interactions in HBB.
 - Investigation of the impact of fine CPC on the HBB molecular structure.

- 8. References:** [1] A.D. Manasrah, N.N. Nassar, C.O. Lante, Fuel 215 (2018) 865-878. [2] S.H. Lee, C.S. Choi, Fuel Processing Technology 64 (2000) 141-153. [3] H. Al-Haj Ibrahim, Petrochemical Science 6 (2019). [4] N. Kadata, Y. Ii, M. Nakamura, M. Niwa, Journal of the Japan Petroleum Institute 46 (2003) 392-395.

- 9. Acknowledgements:** REGAL, Alcoa corporation, and Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

Flora Marie Aimee
Tuyizere
Université Laval

G. Gauvin - UL

S. Laliberté-Riverin - UL

J. Lauzon-Gauthier - Alcoa

T. Ollevier - UL

H. Alamdari - UL

Pendant la cuisson des anodes, le brai de goudron de houille (BGH) libère des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont cancérigènes. Le bio-brai (BB), un matériau carboné solide extrait de l'huile de biomasse, a démontré des propriétés intéressantes et de faibles émissions de HAP pour devenir un brai durable pour les anodes de carbone. Cependant, la perte de masse élevée du BB pendant la cuisson entraîne une contraction et une porosité importantes dans l'anode cuite. Lors d'expériences antérieures, un bio-brai hybride (BBH) a été développé par pyrolyse de bio-huile dans l'air jusqu'à 180 °C avec une vitesse de chauffage de 0,5 °C/min et une durée de maintien de 1 h. L'objectif était d'augmenter la valeur de cokéfaction du BB en ajoutant du coke de pétrole calciné fin, ce qui a été réalisé. Cette étude vise à déterminer les propriétés rhéologiques et la composition chimique du même BBH par spectroscopie de fluorescence X. La viscosité de BBH diminue par l'ajout de coke fin entre (5-18 %) en masse, par rapport au BB. Le soufre diminue dans le BBH après la pyrolyse par rapport au soufre contenu dans le coke et le BB avant le mélange. Ces résultats indiquent une interaction possible entre le coke fin et la bio-huile pendant la pyrolyse, ce qui pourrait contribuer à l'amélioration du BB.

Coal-tar pitch (CTP) releases polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) during anode baking, which are carcinogenic. Bio-pitch (BP), a solid carbonaceous material extracted from biomass oil, has demonstrated interesting properties and low PAHs emissions to become a sustainable binder for carbon anode. However, high mass loss of BP during baking causes important shrinkage and porosity in the baked anode. In past experiments, a hybrid bio-binder (HBB) was developed by heating bio-oil in air up to 180 °C with 0.5 °C/min heating rate, and 1 h soaking time. The aim was to increase the coking value of BP by adding fine calcined petroleum coke (fine CPC), which was achieved. This study aims to determine the rheological properties and the chemical composition of the same HBB with X-ray fluorescence spectroscopy. The HBB viscosity decreases by adding fine CPC between (5-18) wt.%, compared to BP. Sulfur in fine CPC and HBB decreases after pyrolysis compared to sulfur in fine CPC and BP before mixture. These results indicate possible interaction of fine CPC and bio-oil during pyrolysis which could contribute to BP improvement.

Posters

AXE 2

TRANSFORMATIONS ET APPLICATIONS

TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

Axe 2 | Axis 2

Répertoire des affiches | Posters directory

Les étudiants dont le nom est suivi d'un astérisque (*) sont récipiendaires d'un prix d'excellence pour leur affiche.

Students whose name is followed by an asterisk (*) are recipients of an award of excellence for their poster.

Ahmed Y. Algendy

Impact de la température de laminage à chaud sur les propriétés mécaniques et l'évolution microstructurale de AA5083 avec microalliage Sc et Zr 32

Alyaa Bakr*

Alliage Al-Sc-Zr dilué pour retarder le grossissement des grains dans les alliages 1 xxx destinés aux échangeurs de chaleur brasés 33

Bienvenu Boli

Etude expérimentale et numérique d'un nouveau goujon hybride bois/aluminium pour des assemblages hybrides bois/aluminium..... 34

Sanaz Chehrazadi

Conception et optimisation des sections de membrures en aluminium pour des pylônes efficaces de lignes de transport d'énergie électrique à 120 - 160 kV 35

Liyang Cui*

Propriétés mécaniques améliorées à température élevée des alliages Al-Cu laminés à chaud - Effet de l'addition de zirconium et de l'homogénéisation 36

Ali Elasheri

Effet des additions combinées de Mn et de Zr sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages 6xxx Extrudés 37

Abhishek Ghosh

Comportement de déformation à chaud et cartes de traitement de l'alliage Al Mg Si Zr Mn 38

Peng Hu

Le comportement de fatigue thermomécanique hors phase des alliages Al 9Si 3.5Cu 39

Mohammad Khoshghadam Pireyousefan

L'effet du recuit sur la microstructure, les propriétés mécaniques et la conductivité électrique des câbles conducteurs en Al-Si hypoeutectiques 40

Eric Kojo Kweitsu

Un bref examen de la superplasticité des alliages d'aluminium 41

Louis Lecointre

Étude du soudage par friction malaxage avec outil à double épaulement de l'aluminium 42

Fatim Zahra Moufakkir

Modèle thermodynamique et d'équilibre de phases pour des flux salins utilisés pour le traitement des métaux et le recyclage des alliages d'aluminium..... 43

Esmail Pourkhorshid*

Étude de l'impact de la modification du Mn sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'alliage AlSi10Mg fabriqué par fusion laser sélective: conditions telles qu'assemblées et T6..... 44

Quan Shao

Effet de l'ajout de scandium et des traitements thermomécaniques sur les propriétés électriques, mécaniques et de résistance thermique des alliages conducteurs de base Al Zr 45

Sandrine A. Tcheuhebou Tina

Dépendance du coefficient de frottement par rapport aux conditions de coupe lors du tournage orthogonal de AA 7075 T 6 46

Kenza Marianne Sipereh Tinguery

Développement des paramètres de soudage par friction malaxage d'alliage extrudé aa6061-t6 à l'aide d'un pion à double épaulement. 47

Mahmoud Trimech

Comportement en fatigue des joints bout à bout- par recouvrement soudés par friction malaxage dans les profils extrudés pour application dans les platelages des ponts routiers en aluminium.....48

IMPACT DE LA TEMPÉRATURE DE LAMINAGE À CHAUD SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET L'ÉVOLUTION MICROSTRUCTURALE DE AA5083 AVEC MICROALLIAGE Sc ET Zr

IMPACT OF HOT ROLLING TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF AA5083 WITH Sc AND Zr MICROALLOYING



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

Introduction

Al-Mg-Mn alloys¹

- Moderated to High Strength
- Excellent Corrosion Resistance
- Higher Formability and Workability
- Good Weldability and Toughness

DC-Casting, Homogenization, deformation

Homogenization²

- Reduces element microsegregation and improve formability
- Precipitates dispersed particles, **preserving the grain structure**

Deformation³

Above the recrystallization temperature → Affect the microstructure and alloy properties

❖ Rolling temperature, rolling pass, reduction rate..... etc., control the alloy performance. Among these parameters, **the effect of the temperature** is more significant compared to the other parameters.

1. J.R. Davis, Light Metals and alloys, (2001) p 351-416.
2. Ahmed Y. Algendy - Kun Liu, Paul Rometsch, Nick Parson, X-Grant Chen, Materials Science and Engineering A, (2016), A555, 147950.
3. Hirsch, Aluminum Sheet Fabrication and Processing, Fundamentals of Aluminum Metallurgy: Production, Processing and Applications, Woodhead Publishing Ltd., Aachen, UK, 2010

Objective

The general objective of this study is to understand the influence of the hot rolling temperature on the mechanical properties and microstructural evolution of AA5083 Al-Mg-Mn alloys micro-alloyed with Sc and Zr.

Experimental work

- DC cast ingot**
Typical AA5083 alloy
0.1Sc, 0.08Zr

Test sample with dimensions of 190 mm x 48 mm x 16 mm
- Thermomechanical process**

Fig.2 Thermomechanical processing route of AA5083 alloy sheets
- Material characterization**
 - Tensile testing**
Initial strain rate 0.015 mm/mm/min
 - Microstructure**
OM, SEM-EBSD, TEM

Results and discussion

1. Effect of hot rolling temperature on the Mechanical properties

Fig. 3 Effects of hot rolling temperature on the tensile properties a) Typical true stress-strain curves of the experimental alloys, and b) data concerning the tensile properties.

- The tensile properties significantly increased by lowering the hot-rolling temperature from 500°C to 400°C
- YS_{HT} sample** reaches 450 MPa (As-rolled) and 291 MPa (Annealed), representing 20% and 39% improvement relative to HHRT.
- The **total elongation** decreased by lowering the rolling temperature.

2. Effect of hot rolling temperature on the dispersed particles

Fig. 7 (a, c, e) Bright-field TEM shows the evolution of Mn-dispersoids and (b, d, f) Dark-field TEM displays Al₃(Sc,Zr) dispersoids in various conditions (a,b) As homogenized, (c,d) annealed LHRT, and (e,f) Annealed HHRT.

3. Grain structure evolution during thermomechanical process

Fig. 4 Polarized light OM micrographs show the grain structure during the thermomechanical process (a, c, e) LHRT and (b, d, f) HHRT. **Barker's solution (17 Volt, 90 sec)**

- LHRT samples show a fibrous structure in hot-rolling and annealed conditions
- HHRT samples show a mixture of recrystallized and deformed grains in hot-rolling and annealed conditions

Table 1 The quantitative analysis of dispersed particles in homogenized and annealed condition

	Mn dispersoids		Al ₃ (Sc,Zr) precipitates	
	\bar{D}_v (nm)	N_d (m ⁻³) × 10 ¹⁹	\bar{D}_v (nm)	N_d (m ⁻³) × 10 ²¹
As-homo	74.5±2	7.6±0.9	13.5±0.8	5.1±0.1
LHRT	79.9±4.8	4.8±1.9	13.4±1.3	5±0.6
HHRT	162.6±10.1	0.7±1.5	24.6±0.9	1.1±0.9

After Annealing

- Mn-dispersoids and Al₃(Sc, Zr) precipitates are thermally stable after LHRT.
- Both particles underwent coarsening by increasing the rolling temperature (HHRT).
- $(N_{d_{Mn}} \text{ and } Al_3(Sc,Zr))_{LHRT} > (N_{d_{Mn}} \text{ and } Al_3(Sc,Zr))_{HHRT}$

Conclusions

- By lowering the hot rolling temperature to (400-425 °C), the Yield Strength (YS) of the sheet metal greatly improved by 20% (as-rolled) and 39% (annealed) relative to HHRT (500-525 °C).
- The size and distribution of Mn-and Al₃(Sc,Zr) dispersoids strongly depend on the hot rolling temperature. No remarkable change observed in the particle size for samples subjected to LHRT. In contrast, by increasing the rolling temperature, the precipitate size increased by (118.3%-Mn-dispersoid and 83.7% Al₃(Sc,Zr)), and the density decreased by (91%-Mn-dispersoid and 78.4% Al₃(Sc,Zr)) relatives to the heat-treated samples.
- EBSD results demonstrated that the hot rolling temperature plays a vital role in the degree of recrystallization. LHRT samples show a significant recrystallization resistance in a hot and cold deformation owing to the higher density of dispersed particles.
- These findings indicate that optimizing the hot rolling temperature offers a strategic approach for tailoring the properties of the AA5083 alloy for specific engineering applications.

Ahmed Y. Algendy
Université du Québec à Chicoutimi

P. Rometsch - Rio Tinto
X-G. Chen - UQAC

L'impact de la température de laminage à chaud sur l'évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques de l'alliage AA5083 contenant Sc et Zr a été étudié. Les résultats ont révélé que les échantillons soumis à de basses températures de laminage à chaud (LHRT) présentent des propriétés de traction améliorées par rapport aux échantillons déformés à des températures de laminage à chaud élevées (HHRT). Plus précisément, le YS des échantillons de LHRT atteint 450 MPa (H18-temper) et 291 MPa (O-temper), représentant une amélioration de 20% et 39% par rapport aux échantillons de HHRT, respectivement. La température de laminage a un impact profond sur les caractéristiques de la particule dispersée et la résistance à la recrystallisation. En augmentant la température de laminage à chaud, la taille des dispersoïdes Mn et des précipités Al₃(Sc,Zr) a augmenté de 118% et 82,5%, respectivement, tandis que les densités ont diminué de 91% et 78%. Inversement, le taux de grossissement des particules dispersées a été considérablement réduit en abaissant la température de laminage, ce qui a amélioré la résistance à la recrystallisation. Ces résultats indiquent que l'optimisation de la température de laminage peut contrôler efficacement la performance mécanique et la stabilité microstructurale de l'alliage AA5083. Cela offre une approche stratégique pour adapter les propriétés de l'alliage AA5083 pour des applications d'ingénierie spécifiques.

The impact of hot rolling temperature on the evolution of microstructure and mechanical properties of AA5083 alloy containing Sc and Zr was studied. The results revealed that samples subjected to low hot rolling temperatures (LHRT) exhibit enhanced tensile properties compared to samples deformed at high hot rolling temperatures (HHRT). Specifically, the yield strength (YS) of LHRT samples reaches 450 MPa (H18-temper) and 291 MPa (O-temper), representing 20% and 39% improvement relative to HHRT samples, respectively. The rolling temperature has a profound impact on the dispersed particle's characteristics and recrystallization resistance. By increasing the hot rolling temperature, the size of Mn-dispersoids and Al₃(Sc,Zr) precipitates increased by 118% and 82.5%, respectively, while density decreased by 91% and 78%. Conversely, the coarsening rate of dispersed particles was significantly reduced by lowering the rolling temperature, resulting in an enhanced recrystallization resistance. These findings indicate that optimizing the rolling temperature can effectively control the mechanical performance and microstructural stability of the AA5083 alloy. This offers a strategic approach for tailoring the properties of the AA5083 alloy for specific engineering applications.

ALLIAGE Al-Sc-Zr DILUÉ POUR RETARDER LE GROSSISSEMENT DES GRAINS DANS LES ALLIAGES 1xxx DESTINÉS AUX ÉCHANGEURS DE CHALEUR BRASÉS
A DILUTE Al-Sc-Zr ALLOY FOR THE RETARDATION OF GRAIN COARSENING IN 1xxx ALLOYS DESIGNED FOR BRAZED HEAT EXCHANGERS



Introduction and Background

1. Why Aluminum for heat exchangers?

- Light weight
- High heat transfer capabilities
- Easily fabricated
- Resistance to corrosion

2. Why multi port extruded (MPE) tubes?



Fig.1 Aluminum Microchannel heat exchanger

Fig.2 Cross-section of MPE

Increase surface area to volume ratio → Enhance heat transfer capabilities

3. Challenges in a brazed heat exchanger?



Fig.3 Microstructure of micro channel tubes after extrusion, rolling and brazing

Abnormal grain size
↓
Degradation of mechanical properties



Fig.4 MPE tube failure

4. Why Dilute Al-Sc-Zr alloys?

- Anti -Recrystallization effect
- Strengthening effect
- Grain Refining
- Good Corrosion Resistance
- Stability at high Temperatures

Objective

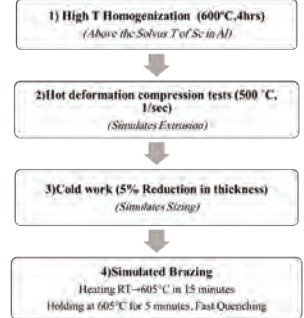
Study the effect of microalloying additions of Sc and Zr on the microstructure and property evolution of a 1xxx base AA for brazed heat exchangers.

Strategy and workflow

Experimental alloys

Alloy	Element ,wt.%					
	Si	Fe	Ti	Sc	Zr	Al
Base Alloy	0.1	0.17	0.02	-	-	Bal.
Al-(0.07Sc-0.09Zr)	0.1	0.19	0.02	0.07	0.09	Bal.

Workflow



Gleeble™ 3800 thermomechanical testing unit

Used to simulate the Manufacturing process of the heat exchanger tubes

EBSD Maps

To investigate the evolution of microstructures

Conclusions

- ❖ Dilute Al-Sc-Zr alloy showed more resistance towards dynamic softening during hot deformation.
- ❖ Base alloy (without Sc or Zr additions) suffered severe grain coarsening after brazing.
- ❖ Improved control on the brazed microstructure after the Sc and Zr microalloying additions.

Planned work

Investigate the performance of extruded multi ports having the same chemical compositions and thermal history of the experimental alloys.

References

1. Ding Tang, Xiaohui Fan, Wenli Fang, Dayong Li, Yinghong Peng, Huamiao Wang. Microstructure and mechanical properties development of micro channel tubes in extrusion, rolling and brazing. Materials Characterization, Volume 142, 2018.
2. H. B. S. Miller. "Instability and Failure in Aluminum Multi-Channel Tubing," no. March, p. 75, 2006.
3. Williams, Cory R. "The Effects of Scandium and Zirconium Additions on Aluminum Mechanical Properties, Post-Braze Grain Structure, and Extrusion." (2012).
4. https://www.hydro.com/en/aluminium/industries/hvacr/micro-channel-heat-exchangers/

Key Findings

1. Initial Microstructures

Al-0.07Sc-0.09Zr alloy exhibits coarser grain size

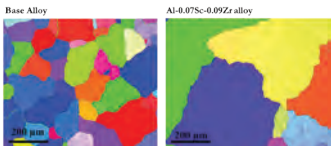
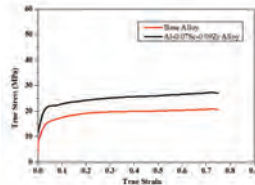


Fig.5 EBSD maps for the as homogenized microstructures

2. Flow Curves



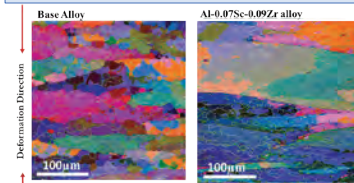
Al-0.07Sc-0.09Zr alloy showed higher flow stress due to the Sc and Zr solute strengthening

Base Alloy	Al-0.07Sc-0.09Zr
20.6	27.1

Fig.6 Flow Curves after hot deformation at 500C, 1/sec.

3. Microstructure Evolution during hot deformation

Dynamic recovery was restricted after the micro alloying with Sc and Zr



Alloy	%LAGB (<15°)	%HAGB Mean misorientation angle, °
Base	47	15.7
Al-0.07Sc-0.09Zr	80	10.8

Fig.7 EBSD Maps after hot def at 500C, 1/sec and analysis of misorientation angle distribution.

4. Post Brazed Microstructures

- ❖ Base alloy suffered from abnormal grain growth
- ❖ Suppression of abnormal grain growth after the Sc and Zr micro additions



Fig.8 EBSD maps after 5% cold work and simulated brazing

Base Alloy	Al-0.07Sc-0.09Zr
436	120

Premier prix
First Award

Alyaa Bakr

Université du Québec à Chicoutimi

P. Rometsch - Rio Tinto
X-G. Chen - UQAC

Les échangeurs de chaleur en aluminium brasé en aluminium jouent un rôle important dans la réduction des émissions et la réduction des coûts dans les systèmes de réfrigération et de climatisation. La fabrication industrielle d'Al tubes consiste en homogénéisation, extrusion, dimensionnement et brasage. Dimensionnement et brasage pourraient entraîner des grains anormalement grossiers qui ont des impacts négatifs sur les performances de l'échangeur de chaleur en service. L'un des nombreux effets bénéfiques de l'addition de Sc aux alliages d'Al est son effet retardateur sur la croissance des grains. Dans ce travail, un alliage dilué Al-(0.07Sc-0.09Zr) a été évalué en ce qui concerne la déformation à chaud et la structure des grains après brasage, et comparé à un alliage de base AA1xxx. Après déformation à chaud, la microstructure de l'alliage Al-(0.07Sc-0.09Zr) a montré une amélioration de la résistance à la reprise dynamique par rapport à l'alliage de base AA1xxx. Après le brasage à haute température simulé, l'alliage de base AA1xxx a souffert d'une microstructure fortement grossière. L'Al-(0.07Sc-0.09Zr) présentait une microstructure recristallisée et aucun grain très grossier n'a été observé, ce qui indique une amélioration de la résistance au grossissement des grains due aux ajouts de micro alliage de Sc et de Zr.

Brazed aluminum heat exchangers have an important role in the emission reduction and cost saving in refrigeration and air-conditioning systems. The industrial manufacture route of Al tubes consists of homogenization, extrusion, sizing, and brazing. The combination of sizing and brazing could result in abnormally coarsened grains that have negative impacts on the in-service performance of the heat exchanger. One of the numerous beneficial effects from the Sc addition to Al alloys is its retardation effect on grain growth. In this work, a diluted Al-(0.07Sc-0.09Zr) alloy was assessed with respect to the hot deformation and the post-brazing grain structure, and compared to a base AA1xxx alloy. After hot deformation, the microstructure of the Al-(0.07Sc-0.09Zr) alloys showed an improvement in the resistance of dynamic recovery compared to the base AA1xxx alloy. After the simulated high-temperature brazing the base AA1xxx alloy suffered from a severe grain coarsened microstructure. The Al-(0.07Sc-0.09Zr) exhibited a recrystallized microstructure, and no severely coarsened grains were observed, indicating an improvement in the resistance of grain coarsening due to the microalloying additions of Sc and Zr.

ETUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE D'UN NOUVEAU GOUJON HYBRIDE BOIS/ALUMINIUM POUR DES ASSEMBLAGES HYBRIDES BOIS/ALUMINIUM

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EVALUATION OF THE STRUCTURAL PERFORMANCE OF A NOVEL HYBRID DENSIFIED WOOD FILLED-ALUMINIUM TUBE DOWEL FOR STRUCTURAL TIMBER CONNECTIONS



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

Finaliste
Finalist

Bienvenu Boli
Université Laval

M.-G. Tétrault - UL
M. Oudjene - UL
D. Coutellier - Université
Polytechnique Hauts-de-
France
H. Naceur - Université
Polytechnique Hauts-de-
France

La performance structurelle d'un nouveau goujon hybride bois-aluminium, constitué d'un tube en aluminium rempli de bois densifié, pour les assemblages bois a été étudié expérimentalement et numériquement pour la première fois. Des essais de flexion 3 points ont été réalisés sur les goujons en bois densifié et les goujons hybrides en bois-aluminium afin d'évaluer leurs caractéristiques mécaniques en termes de résistance, de rigidité, de ductilité et des modes de rupture. Le goujon hybride bois-aluminium développé a été utilisé et testé comme connecteur dans un assemblage bois intégrant une platine d'aluminium comme élément central de l'assemblage, afin d'évaluer ses caractéristiques mécaniques sous un chargement en double cisaillement. Les résultats des essais sur les assemblages avec les connecteurs hybrides bois-aluminium, exprimés en termes de courbes force-déplacement et de modes de rupture, ont été analysés et comparés par rapport à un assemblage avec des goujons conventionnels en acier. Un modèle éléments finis des assemblages a été réalisé à l'aide du logiciel LS-DYNA afin de simuler et prédire le comportement mécanique de ces structures hybrides en identifiant les paramètres matériaux nécessaires au modèle numérique, dans le but d'optimiser la conception du goujon hybride bois-aluminium. Les résultats obtenus démontrent que les goujons hybrides bois-aluminium peuvent être des substituts potentiels aux goujons conventionnels en acier.

1-INTRODUCTION

Context of the research

- In the design of modern timber structures, the connections are commonly made of steel dowels or bolts and slotted-in steel plates. Connections using steel dowels are generally recognized, on one hand, as dissipative zones and, on another hand, the weakest points of timber structures and the large majority of collapses originate at connections. Slotted-in steel dowelled connection type, when designed appropriately, is recognized to behave in a ductile manner, which is preferred than brittle failure, and to exhibit high strength, ductility and stiffness.
- Driven by expanded environmentally-friendly, by durable resources and advocates for sustainable development policies, several exploratory studies have been undertaken in the last decade to investigate the structural performance of non-metallic timber connections including GFPR or CFRP glued rods, FRP dowels, welded beech wood dowels, wood dowels combined with densified veneer wood plates and more recently densified wood dowels (DWD) combined or not with internal densified wood plate.
- Recent studies have shown that densified wood dowels (DWD) are potential candidates to substitute conventional steel dowels for structural timber joints in terms of load-carrying capacity, in addition to delay the brittle failure of timber members. However such connections suffer from a lack of ductility, which is of primary importance in the context of structural uses, by comparison to the steel dowels.

In this regard, an experimental campaign has been undertaken, at the Laval University, to explore a novel way to overcome the lack of ductility of DWD using aluminum tubes filled with DWD and thus creating a novel hybrid densified wood-filled aluminium tube dowel (DWFAT)

Objectives of the research

- Evaluate, for the first time, the structural performance of slotted-in aluminum plate timber connections assembled using novel hybrid dowels made of aluminum tubes filled with densified wood.
- Develop and validate a comprehensive and predictive finite element model to assess the different failure mechanisms and understand the experimental work done with the ultimate objective to optimize the geometrical parameters, namely the thickness of the aluminum tube and material properties, to reach the appropriate performance level to substitute for traditional steel dowels.

2-MATERIALS AND METHODS

- Bending tests have been conducted on both DWD and DWFAT dowels
- Slotted-in aluminum plate timber connections are assembled using either conventional steel or DWFAT dowels (hybrid dowels) have also been undertaken.

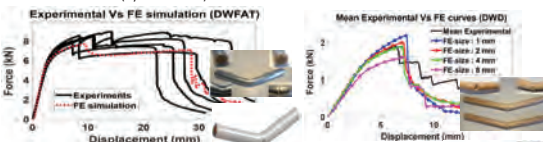


Fig 1 : Identification - Comparison between numerical and experimental results from DWFAT dowels

Fig 2 : Identification - Comparison between numerical and experimental results from DWD dowels

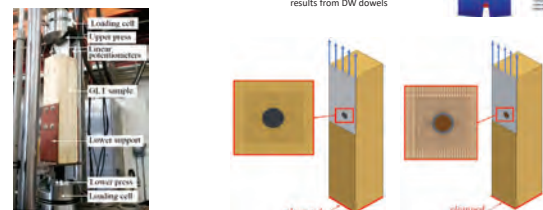


Fig 3 : Experimental setup of the tensile test on slotted-in aluminum plate timber connection

Fig 4 : FE model : (a) with steel dowels, (b) with DWFAT dowels

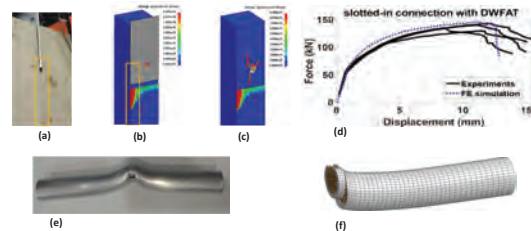


Figure 6 : (a) experimental failure modes, (b) and (c) Numerical failure modes, (d) Load-slip curves, (e) experimental plastic hinge of the DWFAT dowel and (f) numerical plastic hinge of the DWFAT dowel

- Influence of some material and geometrical parameters of the DWFAT dowel on the mechanical characteristics of the slotted-in aluminum plate timber connection

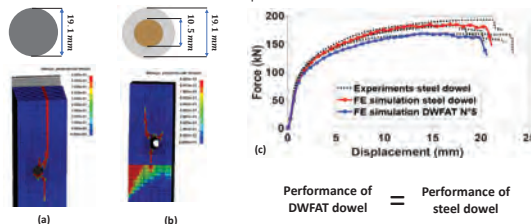


Figure 7 : Influence of the aluminum tube thickness on the load-slip responses : (a) Failure from connections made with steel dowel, (b) Failure from connections made with DWFAT dowel and (c) Comparison of the load-slip curves

3-RESULTS

- The results are analyzed in terms of the global responses expressed as load-slip curves and failure modes

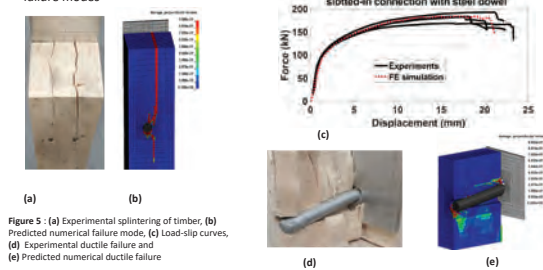


Figure 5 : (a) Experimental splintering of timber, (b) Predicted numerical failure mode, (c) Load-slip curves, (d) Experimental ductile failure and (e) Predicted numerical ductile failure

4-CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

- The numerical model predictions are in good agreement with the experimental observations in terms of the load-displacement responses and the fracture pattern.
- Experimental and numerical results have shown that the use of the DWFAT dowels in timber connection can prevent (or delay) brittle failure of the timber members and can substitute steel dowels.
- The optimization of the geometrical and properties of the hybrid dowel could allow to obtain performances comparable, or even better, than that of steel dowel.
- Also, the performance of connections made with DWFAT dowels under fire exposure is a good and interesting perspective,

Acknowledgements

The financial supports of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC/CRSNG) and "La région Hauts-de-France" are gratefully acknowledged.

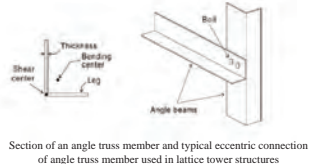
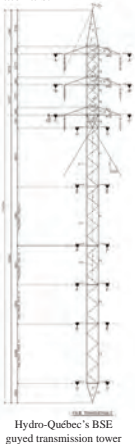
Structural performance of a novel hybrid dowel, made of densified wood filled aluminium tube, for structural timber joints was investigated experimentally and numerically, for the first time. Three-point bending tests have been conducted on both hybrid densified wood filled aluminium tube dowels and densified wood dowels in order to evaluate their strength and stiffness characteristics as well as their ductility and failure modes. The developed hybrid densified wood filled aluminium tube dowels were, then, used and tested in the context of slotted-in aluminium plate timber connections and the obtained load-slip curves as well as the failure modes were analyzed and compared to their equivalent connections made with conventional steel dowels. In addition, a comprehensive and predictive finite element model, using LS-Dyna software, has been developed to thoroughly investigate the basic mechanisms and optimize the design of the hybrid densified wood filled aluminium tube dowels. The results showed that this hybrid densified wood filled aluminium tube dowels can be a potential substitute for conventional steel dowels.

CONCEPTION ET OPTIMISATION DES SECTIONS DE MEMBRURES EN ALUMINIUM POUR DES PYLÔNES EFFICACES DE LIGNES DE TRANSPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À 120-160 kV DESIGN AND OPTIMIZATION OF ALUMINIUM MEMBER'S SECTIONS FOR BUILDING EFFICIENT 120-160 kV POWER TRANSMISSION TOWERS



Context and problematic

- ❖ The use of aluminum in civil engineering applications has increased significantly over the past decades. This is mainly attributed to its high resistance in corrosive environments and the reduction of the structures' weight compared with traditional materials.
- ❖ Transmission line construction and maintenance costs have increased significantly over the past few decades and there is therefore a need to develop new concepts for designing durable, easy-to-assemble, lightweight structures.
- ❖ Optimization provides efficient tools for reducing the construction costs of aluminum transmission towers as there is a meaningful difference between the price of aluminum and other materials such as steel, concrete, or wood.
- ❖ Angle sections are the most common sections used for steel transmission towers due to their facility of erection. Using aluminum extrusion with concentric connections could help using this material efficiently.



Objectives

- ❖ **Main objective:** Develop a new generation of transmission tower made of aluminum for a guyed transmission tower for 120-160 kV lines.
- ❖ **Specific objective:**
 - ❖ Develop various aluminum extruded sections to evaluate the capacity of each shape of sections and compare the results
 - ❖ Develop a classical method for the optimization process to evaluate various aluminum extruded sections' capacity and compare the results
 - ❖ Provide power line owners and engineers with optimum design of sections and geometry to reach cost-effective aluminum powerlines

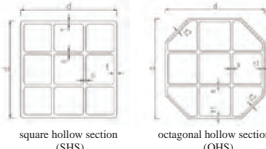
Methodology

- Phase 1:** Develop the overall structural concept of an aluminum lattice tower:
 1. This concept should take advantage of the fact that aluminum can be easily extruded in multiple shapes.
 2. It should be as easy to assemble as steel lattice tower.
- Phase 2:** Study extruded square hollow sections for the members as an initial hypothesis and then extend to octagonal with and without stiffeners
- Phase 3:** Perform optimization study:
 1. Perform an optimization study on the extruded sections to be used and on the overall geometry of the tower
- Phase 4:** Design gusset plates and the redundant members based on the internal forces of the sections



Single and assembled modular section example

Phase 2: Study extruded square hollow sections for the members as an initial hypothesis and then extend to octagonal with and without stiffeners

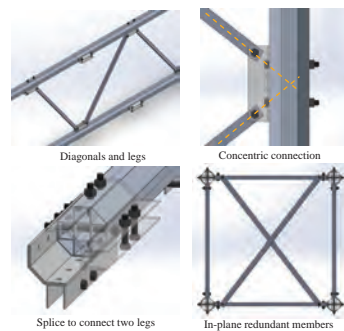


square hollow section (SHS) octagonal hollow section (OHS)

Phase 3: Perform optimization study: 1. Perform an optimization study on the extruded sections to be used and on the overall geometry of the tower

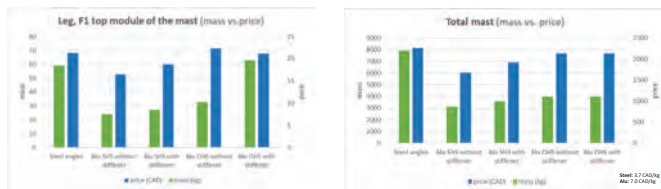
2. Apply the classical design process to the tower and find proper extruded sections of the members
3. Evaluate the resistance under various load cases applicable to the study case based on ASCE10-15 and CSA-S157-17 standards
4. Choose optimized sections

Phase 4: Design gusset plates and the redundant members based on the internal forces of the sections



Results

- ❖ Compare the results of aluminum tower using various extrusions with HQ steel design using angles



- 1 The optimization study demonstrated that it is possible to design aluminum towers that can compete with steel structures from an economic standpoint.
- 2 In all cases, the mass of the aluminum members was almost half compared to steel.

Conclusion

- ❖ For SHS: the total mass of the mast considering the legs and diagonals yields an aluminum-to-steel mass ratios of 39% for the unstiffened leg case, and 45% for the stiffened leg case. The corresponding aluminum-to-steel price ratios are 74% and 85%, for the unstiffened and stiffened legs, respectively.
- ❖ For OHS: the total mass of the mast considering the legs and diagonals yields an aluminum-to-steel mass ratios of 50% for the unstiffened leg case, and 50% for the stiffened leg case.
- ❖ As in the case of the legs, the scenario where leg members are stiffened is more advantageous from a robustness point of view because the stiffeners strengthen the members locally, making them less prone to local damage during transportation and construction. Internal leg stiffeners are also a feature that benefits our new prototype connection.

Sanaz Chehrazad
Université de Sherbrooke

C.-P. Lamarche - UdeS
S. Langlois - UdeS
A. Desrochers - UdeS
S. Talatahari - University of Technology Sidney

L'utilisation de l'aluminium dans les applications du génie civil a augmenté de manière significative au cours des dernières décennies. L'aluminium est un matériau durable, léger et recyclable qui peut offrir des solutions structurelles alternatives pour la construction de pylônes de transport d'énergie électrique. Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire de développer des éléments structuraux qui tirent parti des propriétés spécifiques du matériau. Cet article présente une étude d'optimisation de section d'un pylône en treillis existante en acier pour moyenne tension (120-160 kV) appartenant à Hydro-Québec, en envisageant l'utilisation de différentes sections en aluminium extrudé. Les sections en aluminium optimisées proposées sont comparées aux sections en acier du pylône existant. Un modèle structural en éléments finis, basé sur SAP2000 et couplé à une routine d'optimisation Matlab, est utilisé pour optimiser les sections en aluminium. Les normes ASCE10-15 et CSA-S157-17R22 sont utilisées pour imposer les contraintes de conception afin de sélectionner les sections tubulaires carrées et octogonales en aluminium optimisées, avec ou sans raidisseurs. Cette étude propose des formes de sections optimisées adaptées à la construction de pylônes à treillis en aluminium pour le transport d'énergie. L'étude révèle que le prototype de pylône en aluminium proposé est deux fois plus léger que son homologue en acier et a un coût semblable.

The use of aluminium in civil engineering applications has increased significantly over the past decades. Aluminium is a durable, lightweight, and recyclable material that can provide alternative structural solutions for building power transmission towers. In order to achieve this objective, it is necessary to develop structural members that take advantage of specific properties of the material. This paper presents a section optimization study of an existing medium-voltage steel 120-160 kV lattice tower owned by Hydro-Québec, considering the use of various extruded aluminium sections. The proposed optimized aluminium sections are compared with the steel sections of the existing tower. A SAP2000 structural finite element stick model of the tower coupled to a Matlab optimization routine is used to optimize the aluminium sections. ASCE10-15 and CSA-S157-17R22 standards are used to impose the design constraints for selecting the optimized aluminium square and octagonal hollow sections, with and without stiffeners. This study proposes optimized section shapes suitable for constructing aluminium lattice transmission towers. The study reveals that the proposed aluminium tower prototype is twice as light as its steel counterpart and similar in cost.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES AMÉLIORÉES À TEMPÉRATURE ÉLEVÉE DES ALLIAGES Al-Cu LAMINÉS À CHAUD - EFFET DE L'ADDITION DE ZIRCONIUM ET DE L'HOMOGÉNÉISATION
 ENHANCED ELEVATED-TEMPERATURE MECHANICAL PROPERTIES OF HOT-ROLLED Al-Cu ALLOYS - EFFECT OF ZIRCONIUM ADDITION AND HOMOGENIZATION



Introduction

The development of lightweight alloys for high-temperature applications is always a pursuit of material scientists.

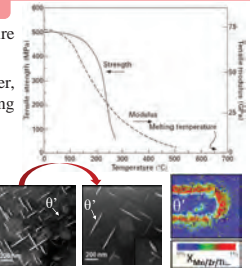
Al alloys have the great advantage of low density. However, their mechanical behavior can drop quickly with rising temperatures.

Why? Precipitates coarsen fast under high temperature.

How to improve? 1. Stabilizing the existing precipitates. 2. Introducing more precipitates.

What may influence the strengthening effect?

Deformation (rolling) + Heat-treatment procedures



Objectives

1. Innovatively introduce the hot rolling process and observe the microstructure evolution.
2. Investigate the effect of different homogenizations and Zr addition.
3. Study the mechanical properties and thermal stability of the alloys at both 20 and 300 °C.

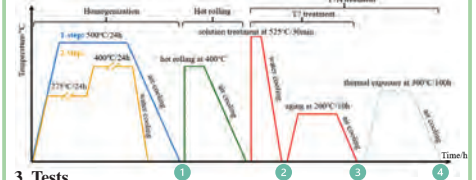
Experiments

1. Alloy preparation

Table 1. Chemical compositions of the experimental alloys (wt%).

Alloy	Cu	Mn	Fe	Mg	Si	Ti	Zr	Al
B (base)	4.88	0.45	0.10	0.27	0.11	0.21	-	Bal.
Z (Zr-containing)	4.48	0.40	0.09	0.16	0.09	0.19	0.18	Bal.

2. Treatments



3. Tests

Microstructure analysis: SEM, EBSD, TEM.

Mechanical properties: Tensile tests.

Results

1 Post-homogenization

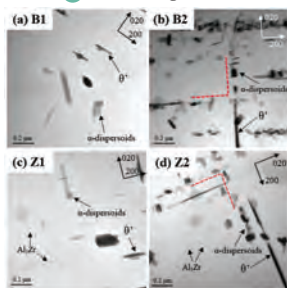


Fig. 1 TEM images of alloys after homogenizations.

2 Post-rolling

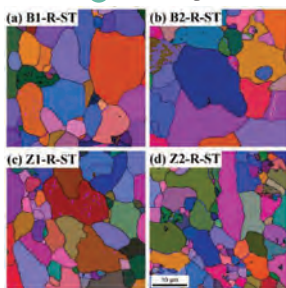


Fig. 2 EBSD orientation maps of alloys after rolling (R) and solution treatment (ST).

3 After T7 treatment

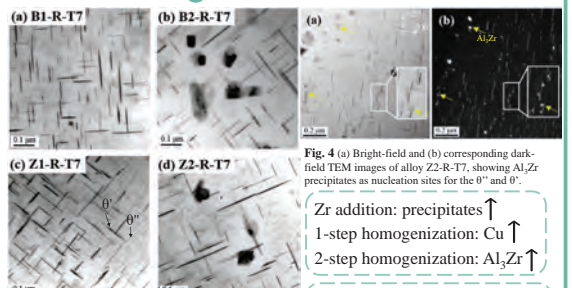


Fig. 3 TEM images of alloys after T7 treatment.

Fig. 4 (a) Bright-field and (b) corresponding dark-field TEM images of alloy Z2-R-T7, showing Al₃Zr precipitates as nucleation sites for the θ' and θ''.

Zr addition: precipitates ↑
 1-step homogenization: Cu ↑
 2-step homogenization: Al₃Zr ↑

Al₃Zr:
 1. recrystallization resistance ↑
 2. nucleation sites for θ''/θ' ↑

4 After T7A treatment

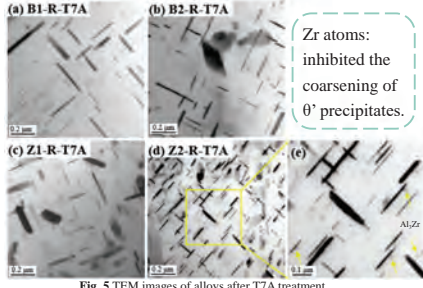


Fig. 5 TEM images of alloys after T7A treatment.

Zr atoms: inhibited the coarsening of θ' precipitates.

Strengthening mechanisms

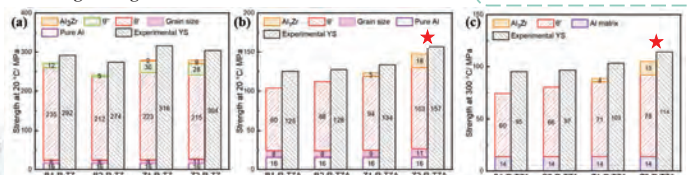


Fig. 6 Theoretical and experimental yield strength (YS) of the (a) T7- and (b) T7A-treated alloys at 20 °C and (c) T7A-treated alloys at 300 °C.

Primary strengthening sources: θ' and Al₃Zr precipitates.

Zr addition and 2-step homogenization provided a higher precipitation strengthening.

Conclusions

1. The innovative 2-step homogenization promoted the formation of Al₃Zr, which provided nucleation sites for θ''/θ' precipitates, increasing their number density.
2. The Zr addition inhibited the coarsening of θ' precipitates and increased the thermal stability of the microstructure during thermal exposure.
3. Alloy Z2-R-T7A exhibited the highest YS of 157 and 114 MPa at 20 °C and 300 °C, respectively, which were 26% and 20% higher than that of alloy B1-R-T7A.
4. The theoretical YS analysis disclosed the main strengthening mechanisms: precipitation strengthening from the θ' and Al₃Zr precipitates.

Les alliages Al-Cu sont des candidats prometteurs pour les applications à températures élevées. Cependant, les études sur les alliages Al-Cu subissant une déformation sévère à températures élevées sont limitées. L'évolution microstructurale et les propriétés mécaniques des alliages Al-Cu 2022 laminés à chaud ont été systématiquement étudiées afin d'explorer les effets de l'addition de Zr et de différentes homogénéisations. L'homogénéisation en deux étapes a favorisé une distribution plus dense et plus fine des particules Al₃Zr, fournissant des sites hétérogènes de nucléation pour les précipités θ''/θ' lors du traitement T7, augmentant leur densité. Les alliages contenant du Zr ont présenté une résistance plus élevée après traitement T7 par rapport aux alliages de base. Les alliages contenant du Zr exposés à 300 °C pendant 100 h ont encore présenté une résistance supérieure. Parmi eux, l'alliage contenant du Zr avec une homogénéisation en deux étapes a montré la limite d'élasticité la plus élevée, atteignant 157 MPa à 20 °C et 114 MPa à 300 °C, ce qui était de 26% et 20% supérieur à celle de l'alliage de base avec une homogénéisation conventionnelle en une étape. Les mécanismes de renforcement des alliages ont été analysés quantitativement, et les valeurs prédites ont bien concordé avec les mesures expérimentales.

Al-Cu alloys are promising candidates for elevated-temperature applications. However, the studies on Al-Cu alloys with severe deformation at elevated temperatures are limited. In this work, the microstructural evolution and mechanical properties of hot-rolled Al-Cu 2022 alloys were systematically investigated to explore the effects of Zr addition and different homogenization procedures. Two-step low-temperature homogenization promoted a denser and finer distribution of Al₃Zr particles in the Zr-containing alloy, which provided heterogeneous nucleation sites for θ''/θ' precipitates during the T7 treatment, increasing their number density. The Zr-containing T7-treated alloy exhibited a higher tensile strength than the base alloy. The Zr-containing alloy thermally exposed at 300 °C for 100 h still exhibited a higher tensile strength than the base alloy at both room and elevated temperatures. The Zr-containing alloy with two-step homogenization showed the highest yield strength of 157 and 114 MPa at 20 and 300 °C, respectively, which was 26% and 20% higher than that of the base alloy with conventional one-step homogenization. The strengthening mechanisms of the T7/T7A-treated alloys were quantitatively analyzed based on their microstructural characteristics. The predicted yield strengths agreed well with the experimentally measured values.

Deuxième prix
 Second Award

Liyang Cui

Université du Québec à Chicoutimi

Z. Zhang - UQAC

K. Liu - UQAC

X-G. Chen - UQAC

EFFET DES ADDITIONS COMBINÉES DE Mn ET DE Zr SUR LA MICROSTRUCTURE ET LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ALLIAGES 6xxx EXTRUDÉS

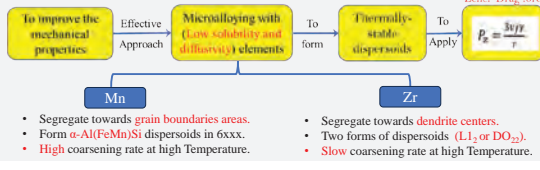
EFFECT OF COMBINED ADDITIONS OF Mn AND Zr ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF EXTRUDED 6xxx ALLOYS



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

1. Introduction

Al-Mg-Si (6xxx) extrusions are excellent candidates for automotive applications, particularly for **safety parts in the front section** (Bumpers and Crash Can), where both strength and toughness need to be improved.



3. Objective

Investigating the effects of the combined additions of Mn and Zr on microstructural evolution, tensile and bending properties of 6xxx extruded alloys.

4. Results & Discussion

After Homogenization

- The combined additions of Mn and Zr resulted in an **increased total number density of dispersoids** with **restricted growth** at high temperature

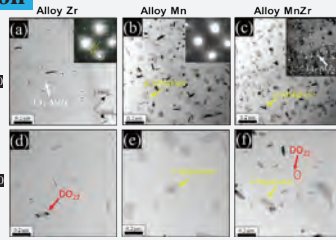
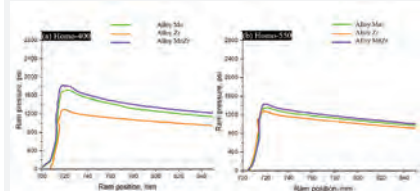


Fig.2 TEM Micrographs of the evolution of dispersoids in the studied alloys after different Homogenization.

Extrusion Pressure



- The **Mn-containing** alloys homogenized at **400 °C** required **higher** extrusion pressure.

Recrystallization

- Alloy **MnZr** exhibited **superior recrystallization** resistance with a high fraction of **deformed** structure.

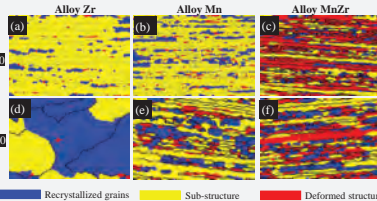


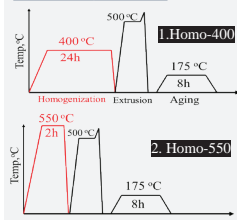
Fig.4 EBSD maps showing the evolution of grain structure of the different alloys with different homogenization conditions.

2. Experimental work

Table 1. The chemical compositions of the DC-cast materials (wt%).

Alloys	Mg	Si	Mn	Zr	Ti	Fe
Mn	0.68	1.02	0.47	---	0.033	0.20
Zr	0.73	0.94	---	0.14	0.054	0.20
MnZr	0.69	0.97	0.52	0.14	0.02	0.19

Processing Routes



Mechanical Properties

- Tensile test (ASTM E8/E8M-16)
- Three-point bending test (VDA 238-100)

Microstructure

- Transmission electron microscopy (TEM)
- Electron backscatter diffraction (EBSD)

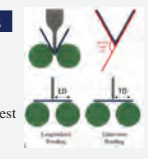


Fig.1 VDA bending angle (α) and the bending directions

Tensile Properties

- Alloy **Zr** exhibited the **lowest tensile** properties in the T5 condition.
- Comparable tensile values of Mn-containing alloys.

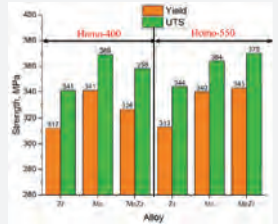


Fig.5 Effect of the alloying additions and homogenization treatments on the tensile properties

Bendability

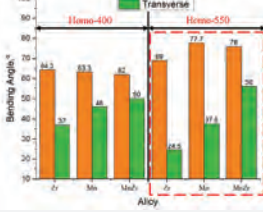
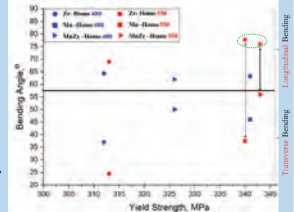


Fig.6 Effect of the alloying additions and homogenization treatments on the Bendability in longitudinal and transverse directions

- Higher Longitudinal bendability was achieved for all alloys after homogenization at 550 °C.
- Alloy **MnZr** showed the highest bendability in transverse direction leading to **less bending anisotropy**.

5. Conclusions

- The combined additions of Mn and Zr produced a higher total number density of dispersoids even at high temperature homogenization, leading to higher resistance to plastic deformation and better recrystallization resistance during extrusion.
- Considering the tensile properties, and longitudinal and transverse bending properties, the best performance was achieved by the **alloy MnZr** homogenized at 550 °C.



L'effet des additions combinées de Mn et de Zr sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages 6xxx extrudés a été examiné. Deux protocoles d'homogénéisation (400°C pendant 24h et 550°C pendant 2h) ont été réalisés avant l'extrusion à 500°C et un vieillissement à 175°C durant 8h. Les tests de traction et de flexion ont mesuré les propriétés mécaniques, tandis que le TEM et l'EBSD ont servi à caractériser la microstructure. Par rapport à l'addition seule de Mn, la présence combinée des dispersoïdes de Mn et de Zr, plus fins, a montré une meilleure résistance à la recrystallisation. Toutefois, des propriétés de traction similaires ont été constatées dans la condition T5, quelles que soient les conditions d'homogénéisation, en raison de l'effet marqué du durcissement par précipitation. De plus, une nette amélioration de l'anisotropie à la flexion a été remarquée avec les additions combinées de Mn et Zr. En particulier, l'alliage avec Mn et Zr, homogénéisé à 550°C puis extrudé à 500°C, a présenté la meilleure combinaison de limite élastique et de capacité de pliage, en raison d'une densité plus élevée de dispersoïdes, d'une épaisseur de grain périphérique plus fine et d'une structure de grain plus fibreuse.

The influence of the combined additions of Mn and Zr on the microstructure and mechanical properties of extruded 6xxx alloys was investigated. Two homogenization treatments (400°C/24h and 550°C/2h) were applied followed by the extrusion at 500°C and aging at 175°C for 8h. The mechanical properties were evaluated using tensile and bending tests, while TEM and EBSD were used for microstructure characterization. The results showed that compared to an individual addition of Mn, the coexistence of the finer Mn and Zr-bearing dispersoids resulted in higher recrystallization resistance. However, comparable tensile properties were observed in the T5 condition, regardless of the homogenization conditions owing to the significant impact of precipitation hardening. Meanwhile, a significant improvement in the bending anisotropy was noticed after the combined addition of Mn and Zr. Notably, the alloy with the combined addition of Zr and Mn homogenized at 550 °C and extruded at 500 °C, exhibited the best combination of yield strength and bendability, owing to a higher dispersoid number density, smaller peripheral coarse grain thickness, and more fibrous grain structure.

Finaliste
Finalist

Ali Elasheri
Université du Québec à Chicoutimi

X-G. Chen - UQAC
N. Parson - Rio Tinto



1. Introduction

- The 6xxx (Al-Mg-Si) alloys are extensively used in automobile and aerospace industries due to their high strength-to-weight ratio.
- Thermo-mechanical processing is recognized as the preferred approach to enhance workability and achieve favorable mechanical properties.
- The dynamic materials model is a practical method for evaluating hot workability and can provide insights into the mechanism of microstructural evolution and flow instabilities.



2. Objectives

- To examine the hot deformation behaviour of Al-Mg-Si-Zr-Mn alloy under different deformation temperatures and strain rates.
- To correlate the processing maps (power dissipation map + instability map) with microstructural evolution to optimize hot deformation conditions.
- To understand the distributions of stress and strain in compressed samples by Finite element method (FEM).

3. Methodology

Alloy Composition (wt%)

Elements name	Mg	Si	Fe	Ti	Zr	Mn	Al
Al-Mg-Si-Zr-Mn	0.81	1.05	0.18	0.15	0.15	0.5	Balance

Heat treatment: Homogenization at 500°C for 24 h before compression test.

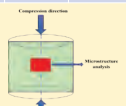
Sample dimension: 10 mm diameter and 15 mm length.

Hot compression test temperatures: 400, 450, 500, and 550°C.

Strain rate: 0.001, 0.01, 0.1, 1 s⁻¹

Microstructural characterization: OM, EBSD, TEM.

Simulation: FEM software Deform-3D™, coefficient of friction 0.12, anvils speed 0.25 mm/sec.



4. Results and discussion

4.1 Flow stress behavior

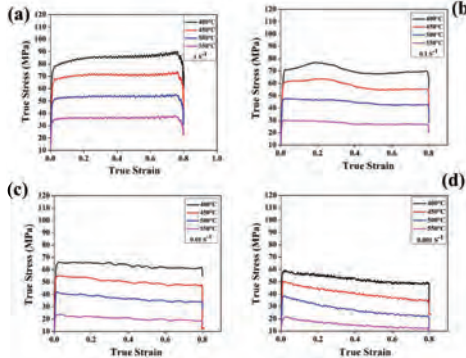


Fig.1 True stress-true strain curves of Al-Mg-Si-Zr-Mn alloy deformed at the temperatures of (a) 400 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C, and (d) 550 °C.

4.2 Power dissipation map

Based on stress-strain curves, strain rate sensitivity ($m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}$) was calculated and implemented in the Prasad model⁴

$$\text{Power dissipation efficiency (\%)} = \frac{2m}{m+1}$$

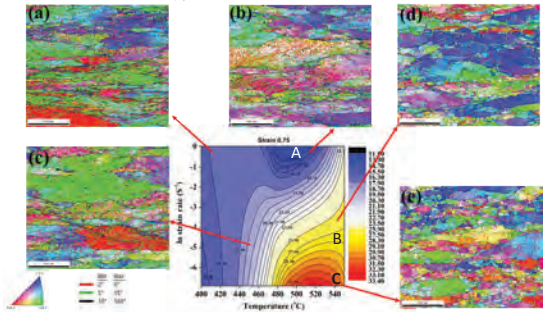


Fig.2 Microstructure of the investigated alloy under different hot deformation conditions: (a) 400°C at 1 s⁻¹, (b) 500°C at 1 s⁻¹, (c) 450°C at 0.01 s⁻¹, (d) 550°C at 0.01 s⁻¹, (e) 550°C at 0.001 s⁻¹.

4.3 Establishment of processing maps

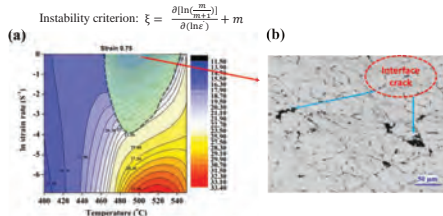


Fig.3 The processing map for Al-Mg-Si-Zr-Mn alloy at a strain of (a) 0.75 and (b) the formation of interface crack at 500°C and at a strain rate of 1 s⁻¹.

4.4 FEM simulation for different hot deformation conditions

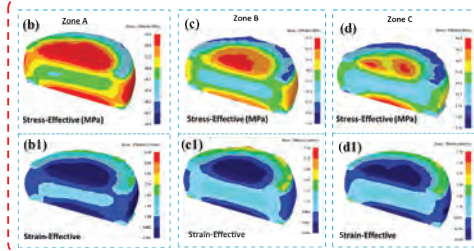


Fig.4 The power dissipation map at a strain of 0.75 (Fig. 2), along with its corresponding distributions for effective stress (b-c) and strain fields (b1-c1), within zones A (500°C at 1 s⁻¹), B (550°C at 0.01 s⁻¹), and C (550°C at 0.001 s⁻¹).

4.5 Interaction between second phase particles and dislocations

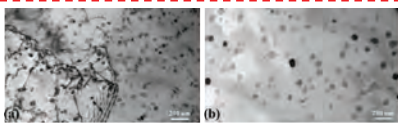


Fig.5 TEM images under different conditions: (a) 500°C at 1 s⁻¹ and (b) 500°C at 0.001 s⁻¹.

5. Conclusions

- The processing map revealed an optimal hot working range of 480°C to 550°C at strain rates ranging from 0.1 s⁻¹ to 0.001 s⁻¹.
- The power dissipation map revealed that the safe domains predominantly consisted of a combination of dynamically recovered and dynamically recrystallized grains.
- The FEM results revealed a non-uniform distribution of stress and strain fields. Additionally, the FEM simulation indicated that regions with higher power dissipation (such as 550°C at 0.001 s⁻¹) led to lower plastic strain, demonstrating higher plasticity in these zones.

⁴Y.V.R.K. Prasad et al. Modeling of dynamic material behavior: Forging of Ti-6242, Metallurgical Transactions A (1984) 1883–1892.

Abhishek Ghosh
Université du Québec à Chicoutimi

A. Elasheri - UQAC
X-G. Chen - UQAC
N. Parson - Rio Tinto

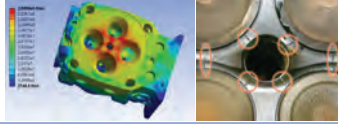
Des tests de compression isotherme de l'alliage homogénéisé Al-Mg-Si-Zr-Mn ont été réalisés sur un simulateur thermomécanique Gleeble 3800 allant de 400 °C à 550 °C et des vitesses de déformation variant de 1 s⁻¹ à 0,001 s⁻¹. L'équation constitutive hyperbolique-sinusoidale a été utilisée pour trouver les constantes du matériau et l'énergie moyenne d'activation de déformation à chaud $Q = 274$ kJ/mol a été obtenue. De plus, la carte de traitement a été construite sur la base du modèle de matériau dynamique et des critères de Prasad, révélant une plage de travail à chaud optimale de 480°C à 550°C à des vitesses de déformation allant de 0,1 s⁻¹ à 0,001 s⁻¹. La carte de dissipation de puissance a révélé que les domaines sûrs consistaient principalement en une combinaison de grains récupérés dynamiquement et recristallisés dynamiquement. Les résultats de la simulation par éléments finis (FEM) ont révélé une distribution non uniforme des champs de contraintes et de déformations, les valeurs effectives les plus élevées étant concentrées au centre des spécimens. De plus, la simulation FEM a indiqué que les régions présentant une dissipation de puissance plus élevée (telles que 550 °C à 0,001 s⁻¹) entraînaient une déformation plastique plus faible, démontrant une plasticité plus élevée dans ces zones.

Isothermal compression tests of homogenized Al-Mg-Si-Zr-Mn alloy were carried out on a Gleeble 3800 thermomechanical simulator ranging from 400 °C to 550 °C and strain rates varying from 1 s⁻¹ to 0.001 s⁻¹. The hyperbolic-sine constitutive equation was used to find the material constants, and the average hot deformation activation energy $Q = 274$ kJ/mol was obtained. Moreover, the processing map was constructed based on the dynamic material model and Prasad's criteria, revealing an optimal hot working range of 480°C to 550°C at strain rates ranging from 0.1 s⁻¹ to 0.001 s⁻¹. The power dissipation map revealed that the safe domains predominantly consisted of a combination of dynamically recovered and dynamic recrystallized grains. The finite element simulation (FEM) results revealed a non-uniform distribution of stress and strain fields, with the highest effective values concentrated at the center of the specimens. Additionally, the FEM simulation indicated that regions with higher power dissipation (such as 550°C at 0.001 s⁻¹) led to lower plastic strain, demonstrating higher plasticity in these zones.



1. Introduction

Al-Si-Cu cast alloys have been widely used as combustion engine components (e.g., pistons and cylinder heads) due to their good wear resistance, low thermal expansion coefficient, and high strength-to-weight ratio. During the engine service process, these structural materials always undergoes cyclic thermal and mechanical stresses/strains, hence, the out-of-phase thermomechanical fatigue (OP-TMF) is the main form of the failure. It is necessary to investigate their OP-TMF behavior and then find the improvement approaches.



2. Objectives

- Investigate the OP-TMF behavior of the Al-9Si-3.5Cu alloy within the temperature range of 60 to 300 °C.
- Reveal microstructure evolution and the fatigue damage characteristics.

3. Experimental Procedures

1) Materials

Table 1 Chemical composition of tested alloy (wt.%).

Element	Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	V	Zr	Sr	Al
Content	0.09	8.6	3.43	0.14	0.15	0.12	0.13	0.13	0.012	Bal.

T7 heat treatment:

Solid solution: 503 °C/5 h Ageing: 210 °C/5 h

2) Microstructure characterization

OM, SEM, TEM

3) Strain-controlled OP-TMF test (Gleeble™ 3800)

Temperature range: 60-300 °C

Heating and cooling rate: 5 °C/s

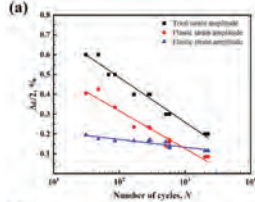
Strain amplitude: 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, and 0.6%



Fig. 1 Geometry and dimensions of OP-TMF specimens.

4. Results

1) Fatigue behavior



- The plastic deformation dominates the OP-TMF.
- Cyclic softening occurred under the OP-TMF loading.

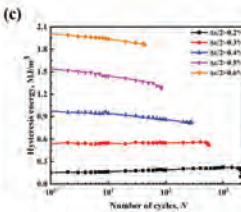
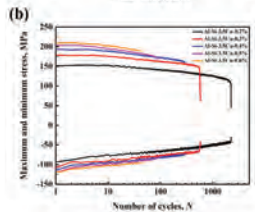


Fig. 2 (a) The strain amplitudes versus OP-TMF life, (b) the maximum and minimum stress and (c) the hysteresis energy evolution under TMF loading.

2) Fracture damage characteristics

□ Near fracture surface

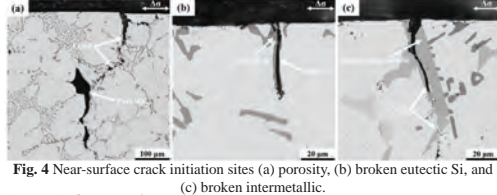


Fig. 4 Near-surface crack initiation sites (a) porosity, (b) broken eutectic Si, and (c) broken intermetallic.

□ Internal of the specimens

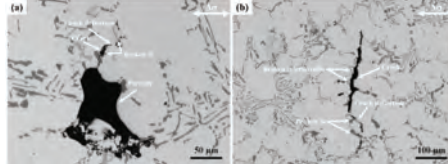


Fig. 5 Internal crack initiation sites (a) porosity, (b) broken eutectic Si and intermetallic.

- Crack initiation sites:
 - Primary source: casting defects
 - Additional source: brittle phases

3) Precipitate evolution

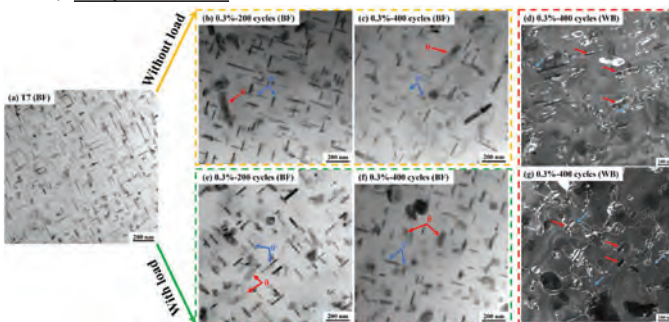


Fig. 3 The TEM images viewed along <001>_{Al} of tested samples at different conditions.

Table 2 Quantitative results of θ' phase.

State	Length, nm	Thickness, nm	Number density, nm ⁻³	Volume fraction, %
T7	61.4	7.6	1.4×10 ⁻⁶	3.2
200 cycles without load	91.0	17.1	2.3×10 ⁻⁷	2.5
200 cycles with load	75.6	19.3	2.0×10 ⁻⁷	1.7
400 cycles without load	91.5	17.1	1.5×10 ⁻⁷	1.6
400 cycles with load	84.7	21.5	1.3×10 ⁻⁷	1.5

5. Conclusions

- Cyclic softening occurred in all investigated strain amplitudes due to the coarsening of θ'-Al₂Cu precipitates.
- The initiation of cracks at multiple points: casting defects and brittle phases.
- Two improvement approaches can be proposed:
 - Optimization of the casting process to minimize cast defects.
 - Enhancement of thermal resistance properties.

Peng Hu

Université du Québec à Chicoutimi

K. Liu - UQAC

X-G. Chen - UQAC

L. Pan - Rio Tinto

Les alliages moulés Al-Si-Cu sont largement utilisés dans les composants des moteurs à combustion tels que les culasses. Cependant, leurs potentiels d'application sont fortement entravés par la fatigue thermomécanique (TMF), l'une des défaillances les plus néfastes des pièces essentielles des moteurs. Dans cette étude, le comportement de fatigue thermomécanique hors phase (OP-TMF) de Al-9Si-3.5Cu a été examiné avec des amplitudes de contrainte variant de 0,2 à 0,6 % et des cycles de température s'étalant de 60 à 300 °C. Les résultats montrent une diminution évidente de la durée de vie de la TMF avec l'augmentation des amplitudes de contrainte. Sous la charge de TMF, on observe un adoucissement cyclique de la contrainte pour toutes les amplitudes examinées, résultant du grossissement des θ'-Al₂Cu. Les analyses de fracture révèlent l'amorçage de fissures à plusieurs points. À noter, les sites d'amorçage de fissures principaux sont les défauts de moulage en surface tels que la porosité. De plus, certaines phases cassantes (comme Si et les intermétalliques) agissent comme des sites d'amorçage de fissures supplémentaires. Les résultats expérimentaux suggèrent deux méthodes pour améliorer la TMF: 1. optimisation du processus de moulage pour réduire les défauts de coulée; 2. renforcement des propriétés de résistance thermique.

Al-Si-Cu cast alloys have been widely used as combustion engine components such as cylinder heads. However, their application potential is significantly hampered by thermomechanical fatigue (TMF), one of the most detrimental failures of essential engine parts. In this study, the out-of-phase TMF (OP-TMF) behavior of Al-9Si-3.5Cu cast alloys was systematically investigated under various strain amplitudes ranging from 0.2% to 0.6% and temperature cycles spanning 60 °C to 300 °C. The results reveal an obvious decrement in TMF lifetime with increasing strain amplitudes. Under the TMF loading, cyclic stress softening occurred in all investigated strain amplitudes, resulting from the coarsening of θ'-Al₂Cu precipitates. The fracture analyses reveal the initiation of cracks at multiple points. Notably, the primary crack initiation sites are near-surface cast defects such as porosity. Additionally, certain brittle phases (e.g., Si and intermetallics) act as additional crack initiation sites. Based on the experimental results, two methods to enhance the high-temperature TMF of aluminum alloys can be proposed: 1. optimization of the casting process to minimize cast defects; 2. enhancement of thermal resistance properties.

UN BREF EXAMEN DE LA SUPERPLASTICITÉ DES ALLIAGES D'ALUMINIUM
A SHORT REVIEW ON SUPERPLASTICITY OF ALUMINIUM ALLOYS

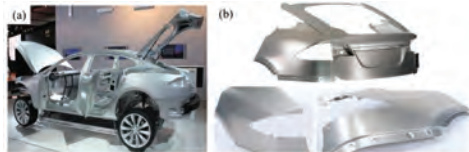
UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS
TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

Background

Superplastic Al-alloys exhibit excellent formability (tensile elongation > 300%). As a result, they are attractive for forming intricately shaped automobile body panels using simple and cost-effective forming processes.



(a) Aluminum auto-body (a) Model by Tesla¹ (b) Actual parts produced by VERBOM²

Introduction

Industrial Problems

- Low-strain rate-superplasticity of Al-alloys leads to slow forming process of automobile body panels.
- Loss of formability in Al-Mg 5xxx superplastic alloys results in cracks formation in automobile panels during High-Speed blow forming (HSBF).

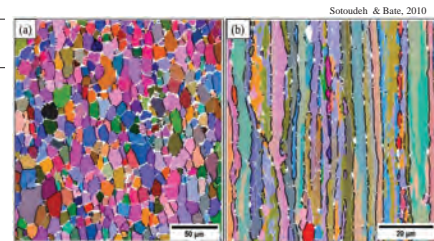
Aim

This review examines the superplastic behavior of Al alloys, focusing on their underlying mechanisms. It briefly discusses high-speed blow forming, a fast superplastic forming process. The global objective is to gain insight into developing novel superplastic Al-Mg 5xxx alloys.

Literature Review

Superplastic Aluminum Alloys

Alloys	Temp. (°C)	Strain rate/s	Elongation (%)	m-value	Ref.
AA2004 (Al-6Cu-0.4Zr)	450	1×10^{-3}	1200	0.60	[3]
AA7475 (Al-5.5Zn-0.5Mg-1.5Cu-0.2Cr)	516	2×10^{-4}	1000	0.85	[3]
Al-3.9Zn-4.1Mg-2.8Ni-0.25Zr	440	1×10^{-2}	1200	0.47	[4]
Al-3.7Zn-4.2Mg-0.15Sc-0.20Zr	420	2×10^{-3}	800	0.47	[4]
Al-Zn-Mg-0.1Sc-0.1Zr	500	5×10^{-3}	1080	0.5	[5]
Al-4.8Mg-0.6Mn-0.2Cr	545	4×10^{-3}	300	0.65	[6]
Al-(6.5-7.8)Mg-0.7Mn-0.2Cr	519-527	4×10^{-3}	430	0.65	[6]
Al-Mg-Fe-Ni-Sc-Zr	460	1×10^{-2}	750	0.49	[7]
Al-Mg-Fe-Ni-Sc-Zr	460	1×10^{-1}	535	0.46	[7]



Microstructures of Al-alloys produced via (a) Discontinuous and (b) Continuous Recrystallization

Demand for high-strain-rate superplastic Al-Alloys for fast forming of automobile body panels.

Mechanisms of Superplasticity in Al alloys

Grain Boundary Sliding (GBS) - EL > 400%

- Fine grain structure (> 10 μm) and High m-value > 0.4
- Low strain rate and High Temperature (> 0.5 Tm)

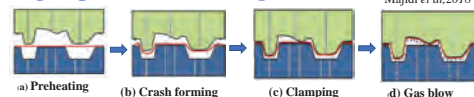
Solute Drag Creep - EL = 100 - 400%

- High strain rate and High m-value < 0.3

Diffusion creep - EL = 100 - 200%

- Stress induced diffusion

High-Speed Blow Forming (HSBF)



HSBF is 30 times faster compared to superplastic forming

Conclusion

- The superplastic response of Al alloys is greatly influenced by microstructure of the alloy prior to superplastic deformation and how the microstructure evolves during the forming process.
- Grain boundary sliding (GBS) is the dominate mechanism in Al alloys, which exhibit high superplasticity. Al-Mg 5xxx alloys show limited superplasticity due to weak GBS. The weak GBS is due to the formation of Al-Mg clusters at grain boundaries.

Future Work

- Developing novel superplastic Al-Mg 5xxx alloys tailored for HSBF by exploiting dynamic recrystallization via microalloying with Sc, Zr and Er

References

- https://www.greencomposites.com/news/1077672_2012-tesla-model-s-is-aluminum-its-secret-weapon
- https://www.verbom.com
- Gracia R. Superplastic forming of aluminum alloys. Superplast. Form. Adv. Met. Mater. Woodhead Publishing Limited, 2011, p. 247-71.
- Yakovleva OA, Mikhailovskaya A V, Machugovskiy AG, Cheverkin V V, Potnyoy VK. Superplastic deformation mechanisms in high magnesium containing aluminum alloy. *Met. Sci Eng.* 2016; Volume 55B, Part 2: 1528-1529.
- Duan Y, Xu G, Zhou L, Xiao D, Dong Y, Yin Z, et al. Achieving high superplasticity of a traditional thermal-mechanical processed non-superplastic Al-Zn-Mg alloy sheet by low Sc addition. *J Alloy Compd.* 2015; Volume 55B, Part 2: 1564-1573.
- Mikhailovskaya A V, Yakovleva OA, Goltsov IS, Potnyoy VK. Superplastic deformation mechanisms in fine-grained Al-Mg based alloys. *Met. Sci Eng. A.* 2015; Volume 627, Part 1: 31-41.
- Kulshil AA, Mikhailovskaya A V, Kozov AD, Rohman O V, Potnyoy VK. Al-Mg-Fe-Ni based alloy for high strain rate superplastic forming. *Met. Sci Eng. A.* 2018; Volume 718, Part 1: 190-7.
- Alabot E, Kozov P, Barba D, Dragovicki K, Reed RC. On the mechanisms of superplasticity in Ti-6Al-4V. *Acta Mater.* 2006; Volume 105, Part 4: 49-63.
- Sotoudeh S, Bate PS. Diffusion creep and superplasticity in aluminum alloys. *Acta Mater.* 2008; Volume 56, Part 1: 199-20.
- Majidi O, Jafari M, Bombardieri N. Finite element simulation of high-speed blow forming of an automotive component. *Metals (Basel)* . 2018; Volume 8. https://doi.org/10

Les alliages d'aluminium superplastique (Al) peuvent être utilisés dans les processus de formage pour fabriquer des composants géométriques complexes pour une large gamme d'applications dans l'industrie automobile, où un poids léger et une rigidité élevée sont nécessaires. Ces alliages présentent un allongement de traction extrême de plus de 300 % à une température homologue élevée et un taux de déformation faible approprié. La superplasticité se produit dans les alliages d'Al par les mécanismes de glissement de frontière de grain, de fluage de traînée de soluté et de fluage de diffusion. Le glissement des limites des grains conduit généralement à une superplasticité étendue. L'activation du glissement de limite de grain dépend de la taille du grain, de la sensibilité du taux de déformation, de la température de déformation et de la composition chimique de l'alliage. Une compréhension complète des facteurs d'influence sur la superplasticité des alliages Al est la clé du développement de nouveaux alliages Al superplastiques. Cette revue discute le comportement superplastique de plusieurs alliages d'Al, en se concentrant particulièrement sur les alliages d'Al-Mg 5xxx. Il met en évidence les mécanismes qui régissent la superplasticité des alliages Al à faible et élevé taux de déformation. Les facteurs qui influencent la superplasticité sont analysés.

Superplastic aluminum (Al) alloys can be used in the forming processes to fabricate complex geometry components for a wide range of applications in the automobile industry, where lightweight and high stiffness are needed. Those alloys exhibit extreme tensile elongation of more than 300 % at high homologous temperature and appropriate low strain rate. Superplasticity occurs in Al alloys by the mechanisms of grain boundary sliding, solute drag creep and diffusion creep. Grain boundary sliding usually leads to extensive superplasticity. Activation of grain boundary sliding depends on grain size, strain rate sensitivity, deformation temperature and alloy chemical composition. A complete understanding of influencing factors on Al alloy superplasticity is the key to developing novel superplastic Al alloys. This review discusses the superplastic behavior of several Al alloys, especially focusing on Al-Mg 5xxx alloys. It highlights the mechanisms that govern superplasticity of Al alloys at low and high strain rate. The factors which influence superplasticity are analyzed. As practice industrial applications, high cycle time superplastic forming operations such as the quick plastic forming, and the high-speed blow forming are briefly discussed.

ÉTUDE DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE AVEC OUTIL À DOUBLE-ÉPAULEMENT DE L'ALUMINIUM

STUDY OF FRICTION STIR BELDING WITH BOBBIN TOOL OF ALUMINIUM

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi



Introduction et Problématique

Le soudage par friction malaxage avec outil à double-épaulement (BT-FSW) est une variante du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) conventionnel et permet une pénétration complète du pion et une seconde source de chaleur grâce à l'épaulement inférieur supplémentaire, impliquant une distribution de chaleur plus homogène dans l'épaisseur des pièces à souder. Il permet également un meilleur maintien des pièces et s'adapte à des géométries d'assemblages particulières telles que les gouttières en I¹. Les études menées sur le BT-FSW ont été relativement peu fréquentes et le procédé doit être développé pour le promouvoir comme une variante prometteuse du FSW dans l'industrie de production.

Quels sont les phénomènes physiques et mécaniques se déroulant dans le matériau lors du procédé de BT-FSW et quels sont leurs impacts sur les propriétés de la soudure ?

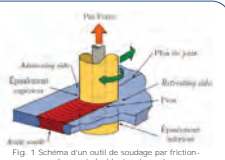


Fig 1 Schéma d'un outil de soudage par friction-malaxage à double-épaulement

Objectifs

L'objectif principal est de développer un modèle prédictif des propriétés des soudures d'aluminium par BT-FSW. Les sous-objectifs sont les suivants :

- Étudier l'impact des paramètres de soudage sur les soudures d'aluminium par BT-FSW par des techniques de caractérisation ;
- Optimiser les paramètres pour obtenir les meilleures soudures possibles ;
- Simulations mathématiques pour prédire les propriétés de soudure et valider leur fiabilité.



Fig 2 Exemple de Bobbin-Tool

Méthodologie

Pour les expériences, l'alliage 6061-T6 est utilisé car ses propriétés sont bien connues. Des paramètres de soudage initiaux sont définis, pour de premiers essais, puis sont modifiés (vitesses de soudage et géométrie de l'outil) pour déterminer leur impact sur les propriétés des soudures. Pour caractériser ces dernières, des analyses sont effectuées pour chaque configuration de paramètres appliqués². Les simulations mathématiques sont réalisées à partir de formules trouvées dans la littérature et des propriétés de l'alliage.

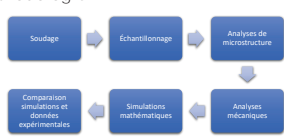


Fig 3 Organigramme de la méthodologie appliquée pour chaque configuration de paramètres

Simulations mathématiques

Des estimations mathématiques des résistances des soudures σ_y sont faites à partir des données du matériau de base et des résultats des analyses. Des formules de durcissement sont additionnées avec la limite d'élasticité initiale σ_0 :

$$\sigma_y = \sigma_0 + \Delta\sigma_{disloc} + \sum_{i=1}^{n_{prec}} \Delta\sigma_{prec} + \sum_{j=1}^{n_{ZM}} \Delta\sigma_{ZM} + \Delta\sigma_{ZAT}$$

Avec les durcissements implicites par les dislocations $\Delta\sigma_{disloc}$, les précipités $\Delta\sigma_{prec}$, les solutions solides $\Delta\sigma_{SS}$ et les joints de grains $\Delta\sigma_{GB}$ ³, à prendre en compte dans les différentes zones de soudure : Zone Malaxée (ZM), Zone Affectée Thermo-mécaniquement (ZATM) et Zone Affectée Thermiquement (ZAT). Les calculs sont comparés avec les résultats expérimentaux pour la validation du modèle. Ce dernier est à développer avec un maximum de facteurs pour une simulation complète du procédé à partir des seuls paramètres de soudage⁴.

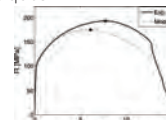


Fig 4 Comparaison de courbes simulées et expérimentales de traction d'alliage 6005A-T6 soude par BT-FSW

Résultats expérimentaux

Essais de soudage



Fig 5 Surface de soudure d'aluminium 6061-T6 par BT-FSW

- Essais de soudage réalisés avec mesures de température dans la soudure et dans l'épaulement supérieur ;
- Variations des paramètres de procédé : vitesses de rotation et d'avance et géométrie de l'outil ;
- Étude des effets de la variation des paramètres du procédé sur l'aspect externe de la soudure et la température dans le matériau.

Analyses EBSD

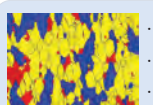


Fig 6 Image EBSD de la ZM d'une soudure d'aluminium 6061-T6 par BT-FSW

- Grains plus petits dans la ZM et homogènes, permettant de caractériser une taille moyenne ;
- Grains plus gros à de moins grandes vitesses, jouant sur la dureté ;
- Grains beaucoup plus grands et très allongés dans la ZAT, taille inhomogène ;
- Zone d'analyse pas assez large pour caractériser entièrement les grains dans la ZAT.

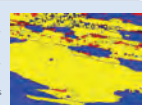


Fig 7 Image EBSD de la ZAT d'une soudure d'aluminium 6061-T6 par BT-FSW

Analyses MEB et DSC

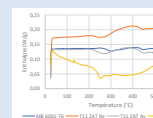


Fig 8 Courbes d'analyses DSC de l'aluminium de base 6061-T6 et des zones de soudure par BT-FSW

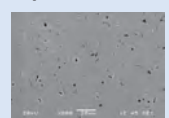


Fig 9 Image MEB de la surface de l'aluminium de base 6061-T6



Fig 10 Image MEB de la ZM d'une soudure d'aluminium 6061-T6 par BT-FSW

- Les deux techniques d'analyse se complètent pour caractériser les phases présentes dans le métal ;
- Analyses MEB : observation des phases présentes, identification par EDS et détermination de leur taille et de leur densité ;
- Analyses DSC : identification des phases se formant dans les différentes zones de soudure, de leur proportion relative et de leur influence sur la dureté des zones de soudure ;
- Pente de la courbe d'analyse DSC affectée par les conditions d'analyse et les impuretés, rendant la comparaison des courbes et des conditions de soudage difficiles, d'autres analyses sont en cours.

Microscopie optique

- Observation de la surface polie des échantillons de soudure ;
- Différentes phases présentes dans la microstructure ;
- Différentes zones de soudure repérées par attaque chimique au réactif Keller pour faire apparaître les grains ;
- Attaques chimiques à améliorer pour mieux voir les grains et caractériser leur taille et leur forme ;
- Attaques avec nouveaux réactifs à venir.



Fig 11 Image par microscopie optique de l'interface entre la ZM et la ZATM d'une soudure d'aluminium 6061-T6 par BT-FSW

Microdureté

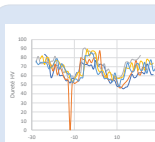


Fig 12 Profils de dureté d'échantillons d'aluminium 6061-T6 soudés par BT-FSW avec différents paramètres

- Profils de microdureté sur la longueur des soudures pour différencier les niveaux de dureté des différentes zones de soudure ;
- Influence des paramètres sur la largeur des zones et leur niveau de dureté ;
- Plus la vitesse d'avance est faible, plus la ZM est large mais de dureté plus faible ;
- Largeur très différente entre les deux outils, influence par la microstructure et devrait influencer la résistance de la soudure.

Essais de traction et ARAMIS

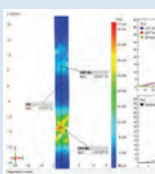


Fig 13 Analyse Aramis d'une éprouvette de soudure d'aluminium 6061-T6 par BT-FSW avec les surfaces de déformation, des points de déformation et la déformation le long d'une section verticale

- Observation des déformations locales hétérogènes de la surface et étude du comportement mécanique du matériau dans les différentes zones de soudure ;
- Faible influence des paramètres de soudage sur la résistance à la traction, qui est largement inférieure à celle du métal de base pour la plupart des essais ;
- Rupture par striction dans la ZAT côté Recul ;
- Soudures fragilisées à de faibles vitesses de soudage causant à de très faibles déformations, avec une rupture plus proche du centre de la soudure ;
- Corrélation entre microstructure et propriétés mécaniques devant être approfondies pour comprendre ce phénomène.

Conclusion et perspectives

Les paramètres de soudage ont un impact sur la microstructure de la soudure par BT-FSW. Ils jouent notamment sur le profil de dureté, la taille des grains dans les zones de soudure et la largeur de ces dernières, et sur la proportion de phase dans les différentes zones. De nombreuses analyses doivent encore être réalisées et améliorées pour caractériser l'ensemble des échantillons soudés et établir une corrélation entre les paramètres et la microstructure obtenue, de même qu'une corrélation entre la microstructure et les résultats des essais de traction. Ces derniers ne sont pas grandement influencés par les paramètres de soudage au premier abord, mais le comportement de la soudure notamment les déformations locales sont impactées. Les corrélations permettront d'initier puis de développer le modèle prédictif. Une amélioration doit être apportée à la caractérisation des grains, notamment dans la ZAT et la ZATM avec un développement des attaques chimiques, et à la caractérisation des précipitations. La caractérisation de l'écrouissage dans les soudures est toujours manquante également.

Références

- [1] Le soudage par friction malaxage: principes et applications. L. St-Georges, L. Kiss, édition « Les Presses de l'Aluminium »
- [2] Effect of an improved pin design on weld formability and mechanical properties of adjustable-gap bobbin-tool friction stir welded Al-Cu aluminum alloy joints. Di Wu, "Journal of Manufacturing Processes"
- [3] Effects of natural aging and pre-annealing on the strength and electrical conductivity in Al-Mg-Si AA6022 conductor alloys. S. N. Khanghori, M. Javidani, A. Maltas, X. G. Chen, "Materials Science and Engineering, A"
- [4] Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloys: Process, microstructure and properties. A. Simar et al., "Materials Today: Proceeding"

Louis Lecointre
Université du Québec à
Chicoutimi

L. St-Georges - UQAC
K. Ba - UQAC
A. Maltas - UQAC

Le soudage par friction malaxage avec outil à double-épaulement (BT-FSW) est une variante du procédé de soudage par friction malaxage conventionnel (FSW) avec une géométrie d'outil particulière comprenant un épaulement supplémentaire prenant appui sur la surface inférieure des pièces à assembler. Cela permet un apport de chaleur supplémentaire, un flux de chaleur plus homogène dans l'épaisseur de soudure et une pénétration complète du pion. Il s'adapte également mieux à des géométries d'assemblages particulières. Il s'agit d'un procédé récent considéré comme une « technologie verte » pour son efficacité énergétique, mais qui comprend de nombreux paramètres et dont la compréhension de l'impact de ces derniers et des phénomènes physiques en cours de soudage reste à développer pour optimiser la qualité de la soudure et promouvoir le procédé. Les soudures par BT-FSW ont en effet une microstructure particulière qui rend leur optimisation difficile. Des essais seront réalisés avec différents paramètres, de manière à caractériser les soudures d'aluminium en fonction par différentes techniques d'analyse. L'objectif est de prédire les propriétés de la soudure et d'établir des modèles prédictifs dont la fiabilité sera évaluée pour optimiser les paramètres de soudage et améliorer les performances du BT-FSW.

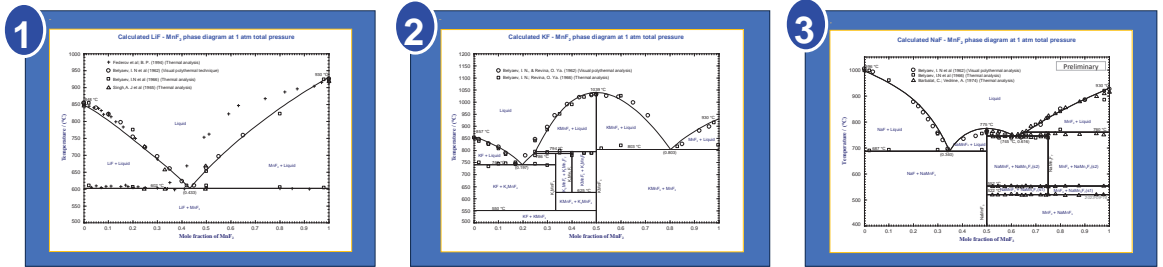
Bobbin-tool Friction Stir Welding (BT-FSW) is a variant process of Friction Stir Welding with particular tool configuration, composed of an additional shoulder taking support on the lower surface of base metal. It enables additional heat input, more homogeneous heat flow in the thickness direction and complete penetration of the pin. It is also more convenient for some assembly configurations. However, the process involves numerous parameters and BT-FSW welds have particular microstructure and the optimization is consequently difficult. BT-FSW tests were realized with different tools and parameters especially rotation and advance speeds on aluminum sheets. Then the samples were analyzed to determine the impact of welding parameters on physical and mechanical properties of the weld and to optimize this one and get closer to the properties of base metal. From these analyses, predictive models of weld properties with welding parameters will be established in order to define suitable parameters depending on wished results and to upgrade BT-FSW.

MODÈLE THERMODYNAMIQUE D'ÉQUILIBRE DE PHASES POUR DES FLUX SALINS UTILISÉS POUR LE TRAITEMENT DES MÉTAUX ET LE RECYCLAGE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM THERMODYNAMIC AND PHASE EQUILIBRIUM MODEL FOR SALT FLUXES USED FOR METAL PROCESSING AND ALUMINUM ALLOY RECYCLING



Summary

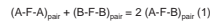
This project aims to enhance the processing of manganese-based aluminum metal alloys by developing a thermodynamic model for the MnF₂-based salt flux LiF-NaF-KF-MgF₂-CaF₂-MnF₂. The primary objective is to gain a deeper understanding of the potential chemical transfer of manganese between the liquid metal phase and the salt flux, with the flexibility to either eliminate or recycle it as needed. This approach is of paramount importance as it allows for a comparison with other manganese extraction techniques from aluminum and offers solutions to overcome their limitations, such as the dilution of recycled aluminum with primary aluminum, the high energy consumption of electrorefining separation¹, and the restricted quantity in the manganese removal process through magnesium addition². This work represents a significant advancement in the aluminum recycling industry by providing a simpler and more cost-effective solution. Using a methodology based on the CALPHAD approach (CALCulation of PHASE Diagram), the available experimental data from the literature, and the FactSage thermochemical software, this project aims to efficiently model binary, ternary, and quaternary subsystems based on MnF₂ and ultimately calibrate the thermodynamic model. The chloride-based salt system LiCl-NaCl-KCl-MgCl₂-CaCl₂-MnCl₂ has already been modeled and was integrated into the FactSage software salt database. Within the scope of this project, the focus is placed on MnF₂-based fluorinated salts. It is noteworthy that the potential future combination of the models for the fluoride and chloride salt systems constitutes a work of considerable importance, thereby opening up promising new avenues.



MODEL FOR THE LIQUID PHASE

The Modified Quasichemical Model is employed to describe the behavior of the liquid solution. This model takes into account short-range ordering between nearest-neighbours on a lattice or sublattice. Short-range ordering is treated by considering the relative numbers of second-nearest-neighbour cation-cation pairs with the sole anion being F⁻.

The model parameters are determined by the Gibbs free energy changes (ΔG_{AB}^0) for a series of pair exchange reactions, as exemplified by the reaction:



In this reaction, A and B represent distinct cations. As ΔG_{AB}^0 becomes increasingly negative, reaction (1) is shifted to the right, leading to a prevalence of (A-F-B) pairs, and consequently more short-range-ordering in the liquid solution.

The Gibbs free energy of the solution can be expressed as follows:

$$G = \sum_i n_i g_i^0 - T \cdot \Delta S^{config} + \sum_{i,j} n_{ij} (\Delta G_{ij}^0 / 2)$$

Here, n_i and g_i^0 refer to the number of moles and molar Gibbs free energy of the individual components, respectively. ΔS^{config} is an approximate expression for the configurational entropy of mixing, which arises from the random mixing of (i-j) cation-cation pairs, and n_{ij} represents the number of moles of (i-j) cation-cation pairs.

ENTHALPY OF MIXING

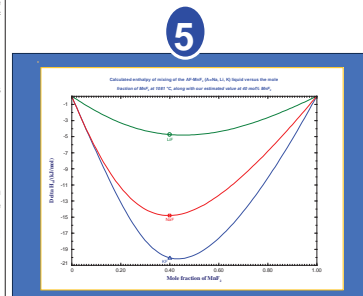
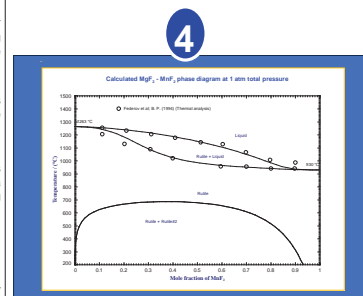
There are no reported measurements of the enthalpy of the liquid, but it is possible to estimate it using Ostwald's technique³. According to Ostwald, the enthalpy of mixing of a family of alkali-alkaline-earth halide solutions varies essentially linearly with the size parameter δ_{12} where:

$$\delta_{12} = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2}$$

In this expression, d_1 and d_2 represent the characteristic cation-anion distances in both salts; these are obtained from the sum of ionic radii. The latter values are taken for an octahedral geometry from Shannon's compilation⁴. The δ_{12} parameter as a function of ionic radii is thus defined as:

$$\delta_{12} = \frac{r_A^2 - r_B^2}{(r_A^2 + r_F^2)(r_B^2 + r_F^2)}$$

where A is the alkali metal (Li, Na or K) and M = Ba, Ca, Cd, Mg, Sr, or Mn.



RESULTS

The optimization results for various binary systems are presented. Figure 1 illustrates the LiF-MnF₂ phase diagram, characterized by a simple eutectic. Figure 2 depicts the KF-MnF₂ phase diagram, revealing the presence of three intermediate compounds, two eutectics, and two peritectics. In the NaF-MnF₂ phase diagram, shown in Figure 3, there are two intermediate compounds, two eutectics, and one peritectic. This phase diagram is not yet finalized because, at very high temperatures, a spurious liquid-liquid miscibility gap appears. Therefore, a new set of model parameters needs to be obtained. Figure 4 presents the MgF₂-MnF₂ system, where the liquid is considered ideal. There is a complete rutile solid solution with the presence of a solid-solid miscibility gap at lower temperatures. Figure 5 shows the liquid-liquid mixing enthalpies (ΔH^{mix}) at 1081°C for the three systems LiF-MnF₂, NaF-MnF₂, and KF-MnF₂, compared to Ostwald's estimates at 40 mol% MnF₂. Note that in the case of the MgF₂-MnF₂ system, due to its ideal liquid behavior, the liquid-liquid mixing enthalpy is zero for all compositions.

Calculating the thermodynamic properties of ternary systems requires the use of suitable geometric models, namely the Kohler (symmetric) and Kohler/Toop (asymmetric) models. The choice of the model can significantly influence the shape of the Gibbs free energy surface for a ternary solution, which, in turn, can have a significant impact on the calculated ternary phase diagram.

References

- Cox, A., & Fray, D. J. (2003). Separation of Mg and Mn from Beverage Can Scrap using a Recessed-Channel Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(12), D200-D208.
- Simensen, C. J., & LeBrun, P. (2009). *Light Metals* (Warrendale, PA, United States), 777-781.
- Ostwald, T. (1972). Thermochemistry of fused halide systems. Enthalpies of mixing of the alkaline earth halides with the alkali halides. *The Journal of Physical Chemistry*, 76(11), 1616-1628.
- Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A: Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography*, 32(5), 751-767.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the VLAB 4 project, funded through an Alliance grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, in collaboration with CRITM (Consortium de Recherche et d'Innovation en Transformation Métallique) and the following companies: Rio Tinto, Alcoa, Hydro Aluminium, Elysis and Constellation.

Fatim Zahra Moufakkir
Polytechnique Montréal

J.-P. Harvey - POLY
C. Robelin - POLY

L'objectif de ma recherche est de développer, dans un premier temps, un modèle thermodynamique pour un flux salin à base de MnF₂ utilisé lors du traitement d'alliages métalliques d'aluminium à base de manganèse. Les alliages d'aluminium contenant plusieurs éléments d'alliage et différentes impuretés sont typiquement traités avec des flux salins chloro-fluorés. Ce projet vise à mieux comprendre le transfert chimique potentiel du manganèse entre la phase métallique liquide et le flux salin. Selon l'objectif du traitement, le manganèse devra soit être éliminé et transféré dans le flux salin, soit être recyclé et conservé comme élément d'alliage après l'élimination des autres impuretés indésirables. La modélisation thermodynamique dépendra donc des autres constituants du flux salin. Les résultats de cette étude pourraient avoir des implications significatives pour l'industrie de l'aluminium en permettant une meilleure optimisation des processus de traitement des alliages d'aluminium à base de manganèse.

The objective of this research is to develop, initially, a thermodynamic model for a manganese fluoride-based salt flux used in the processing of manganese-containing aluminum metal alloys. Aluminum alloys containing multiple alloying elements and various impurities are typically treated with chloro-fluoride salt fluxes. This project aims to gain a deeper understanding of the potential chemical transfer of manganese between the liquid metal phase and the salt flux. Depending on the treatment goal, manganese needs to either be removed and transferred into the salt flux or recycled and retained as an alloying element after the removal of other undesirable impurities. Therefore, the thermodynamic modeling will be contingent on the other constituents of the salt flux. The findings from this study could have significant implications for the aluminum industry, enabling improved optimization of processing procedures for manganese-containing aluminum alloys.

ÉTUDE DE L'IMPACT DE LA MODIFICATION DU MN SUR LA MICROSTRUCTURE ET LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE L'ALLIAGE AISi10Mg FABRIQUÉ PAR FUSION LASER SÉLECTIVE: CONDITIONS TELLES QU'ASSEMBLÉES ET T6

INVESTIGATING THE IMPACT OF MN MODIFICATION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SELECTIVE LASER MELTED AISi10Mg ALLOY: AS-BUILT AND T6 CONDITIONS



AXE 2 : TRANSFORMATION ET APPLICATIONS TRANSFORMATION AND APPLICATIONS

1 Background

- SLM allows for the creation of intricate and highly precise metal components, making it ideal for industries demanding **complex geometries and tight tolerances**.
- **AlSi10Mg's** remarkable qualities, such as excellent weldability, minimum shrinkage, good mechanical properties, make it as a key alloy in SLM production and **high-tech industries** like **vehicle and aerospace**.



Fig.1 Complex geometries

2 Knowledge gap, Objective

- Despite the notable attributes enabling the alloy's processability through SLM, the **mechanical properties** of AlSi10Mg alloy are **lower** in comparison to **other high-strength aluminum alloys**.
- limited research have been undertaken to enhance the mechanical properties of the AlSi10Mg alloy by **modification of chemical composition**.

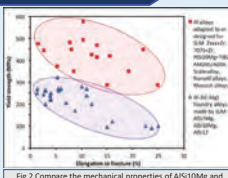


Fig.2 Compare the mechanical properties of AlSi10Mg and other alloys after SLM (Jia, Q., et al., (2019)).

Objective:

Investigating the effect of Mn additions on the microstructure and mechanical properties of SLMed AlSi10Mg.

3 Materials, Methods

I. Alloy compositions

Alloy	Label	Chemical Composition (% wt)					
		Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Sr
AlSi10Mg	Base	10.18	0.14	0.003	0.27	0.02	0.01
	Mn-SLM	10.26	0.31	0.48	0.49	0.055	0.0086

II. SLM

Scan speed (mm/s)	Laser power (W)	Powder layer thickness (µm)	Hatch distance (µm)	Laser spot size (µm)	Energy Density (J/mm ³)	Adjacent layer rotation
1650	350	30	130	62	54.4	67°

III. Heat treatment

Label	Heat treatment Condition	procedure
AB	As Built	NA
T6	Stress Relief + SHT + AA	300°C, 2h; 530°C, 0.5h; water quench; 165°C, 6h

IV. Microstructure

Scanning electron microscope (SEM)
Transmission Electron Microscope (TEM)

V. Mechanical properties

Instron 8801
ASTM E8/ E8M-16a

4 Results, Discussion

I. As-built microstructure

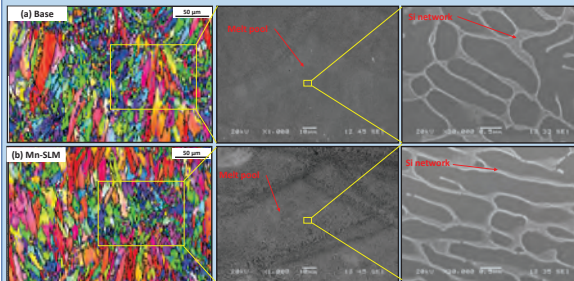


Fig.3 EBSD and SEM images showing the as built microstructure.

- For both samples grain size, grain size distribution, melt pool size and Si network size remain **similar**.

II. Microstructure after T6

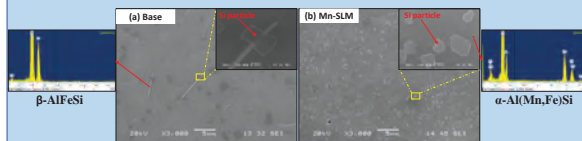


Fig.4 SEM images showing the T6 microstructure.

- Si network
- Base sample
- Mn-SLM sample

- Si particle
- β phase particle
- α-particle

III. TEM observation

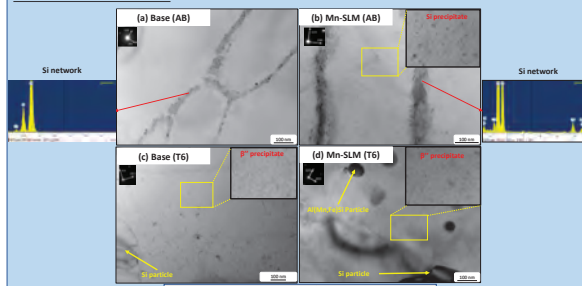


Fig.5 TEM images showing the as manufactured and T6 microstructure.

AB Condition:

- $(Nd_{Si} precipitates)_{Mn-SLM} > (Nd_{Si} precipitates)_{Base}$
- Si network composition Simple in Base and Complex in Mn-SLM

T6 condition:

- $(Nd_{dis})_{Mn-SLM} > (Nd_{dis})_{Base}$

IV. Tensile behaviour

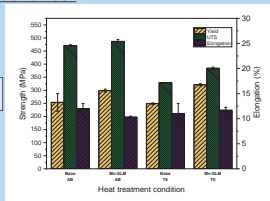


Fig.6 Mechanical properties in AB and T6 condition.

◆ Yield strength:

Increased with Mn modification in AB condition. The same behavior observed in T6 condition.

5 Conclusions

- The incorporation of Mn in AlSi10Mg alloy brings about an increase in the yield strength, improving it from 254 to 298 MPa, due to presence of **Si nano precipitates** and changing the **chemical composition of Si network**.
- In T6 condition, due to high temperature that sample experienced, the Si network totally disappear and for both sample **Si remain as a particle**.
- In T6 condition, the yield strength improves from 249 for SLM sample to 321 MPa for Mn modified alloy and meanwhile the elongation also improves slightly due to **presence of α-particle**.

Acknowledgement:

The authors thank Dr Alexandre Bois-Brochu at the Centre de Métallurgie du Québec (CMQ) for the atomisation and SLM.

Esmail Pourkhorshid
Université du Québec à Chicoutimi

P. Rometsch - Rio Tinto
X-G. Chen - UQAC

L'impact de la modification au Mn sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'alliage AISi10Mg produit par fusion sélective par laser (SLM) dans les états de fabrication et T6 a été étudié. La microstructure a été caractérisée par MEB et MET. Les résultats montrent que l'alliage contenant du Mn a favorisé la précipitation de Si à l'échelle nanométrique à l'état de fabrication et a modifié la microstructure eutectique. En conséquence, la limite d'élasticité (LE) passe de 254 MPa à 298 MPa avec une légère réduction de l'élongation de 12 % à 10,3% par rapport à l'alliage de base AISi10Mg sans Mn. Lors du traitement thermique T6, la structure en réseau de Si passe d'une forme continue à particulière, affectant les propriétés mécaniques des alliages AISi10Mg modifié et de base. De plus, le Mn a supprimé la formation de β-AlFeSi et a formé les particules α-Al(Fe,Mn)Si, contribuant ainsi au renforcement. La LE dans l'alliage modifié au Mn atteint 321 MPa, soit une amélioration de 28 % par rapport à l'AISI10Mg. De plus, l'élongation totale s'est légèrement améliorée (12 % contre 11 %). Ces résultats ouvrent une voie prometteuse pour améliorer les performances de l'AISI10Mg fabriqué par SLM.

The impact of Mn modification on the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting (SLM) in both as built and T6 conditions were investigated. The microstructure was characterized by SEM and TEM. The results show that the Mn-containing alloy promoted nanosized Si precipitation in the as-built state and changed the eutectic microstructure. As a result, the yield strength (YS) increases from 254 MPa to 298 MPa with a slight reduction in elongation from 12% to 10.3% compared to the base AlSi10Mg alloy free of Mn. During T6 heat treatment, the Si network structure changes from continuous to particulate, affecting the mechanical properties of both modified and base AlSi10Mg alloys. In addition, Mn suppressed β-AlFeSi formation and formed the α-Al(Fe,Mn) Si particles, providing additional strengthening contribution. The YS in Mn modified alloy reached 321 MPa representing a 28% improvement relative to AlSi10Mg. Furthermore, the total elongation slightly improved (12% vs. 11%). These results afford a promising way to improve the performance of AlSi10Mg manufactured by SLM.

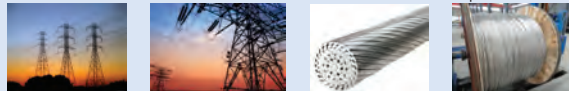
EFFET DE L'AJOUT DE SCANDIUM ET DES TRAITEMENTS THERMOMÉCANIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES, MÉCANIQUES ET DE RÉSISTANCE THERMIQUE DES ALLIAGES CONDUCTEURS DE BASE Al-Zr

EFFECT OF Sc ADDITION AND THERMOMECHANICAL PROCESSING ON THE ELECTRICAL, MECHANICAL, AND THERMAL RESISTANT PROPERTIES OF Al-Zr BASED CONDUCTOR ALLOYS



Introduction

Aluminum alloy wires that exhibit a favorable combination of electrical, mechanical, and thermal-resistant properties are studied. The effects of Sc addition and two thermomechanical processing routes on these properties were investigated using transmission electron microscopy, EBSD analysis, electrical conductivity measurements, microhardness measurements and tensile tests with and without thermal exposures.



Objective

To develop electrical conductor Al alloys with AT4 grade that combines high thermal-resistant property (at 310 °C for 400 h) with excellent electrical conductivity (58 %IACS) and high strength.

Experimental

1. Alloys

Table 1 Chemical compositions of alloys.

Alloy	Si	Fe	Zr	Sc	Al
A	0.26	0.27	0.14	0.00	Bal.
B	0.24	0.28	0.11	0.07	Bal.
C	0.03	0.27	0.08	0.07	Bal.
D	0.07	0.07	0.12	0.09	Bal.

2. Thermo-mechanical processing

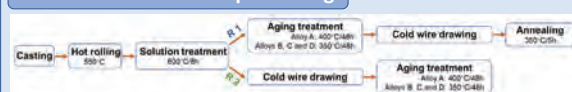


Fig. 1 Thermal-mechanical processing routes.

Results

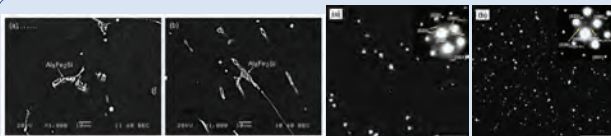


Fig. 2 As-cast microstructure: (a) alloy A, (b) alloy B.

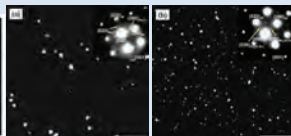


Fig. 3 Precipitate microstructures processed with route R2: (a) alloy A, (b) alloy B.

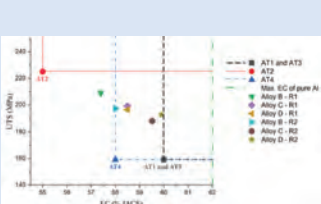


Fig. 4 Comparison of the UTS and EC of the developed alloys with the standard values of four thermal-resistant conductor grades.

Table 2 Characteristics of the precipitates.

Alloys	Number density ($\times 10^{22} \text{m}^{-3}$)	Diameter (nm)
A-R2	0.03 ± 0.04	8.8 ± 2.5
B-R2	1.19 ± 0.22	5.6 ± 1.6
C-R2	1.08 ± 0.11	5.5 ± 1.3
D-R2	1.16 ± 0.37	5.3 ± 1.1
B-R2-TE	1.03 ± 0.31	6.1 ± 1.9

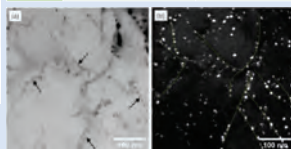


Fig. 6 TEM images of alloy B-R2-TE subjected to 310°C/1000h thermal exposure.

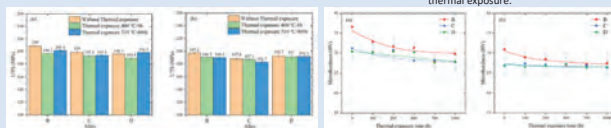


Fig. 5 Effect of different thermal exposures on the UTS and microhardness of alloy wires processed with routes R1 (a) and R2 (b).

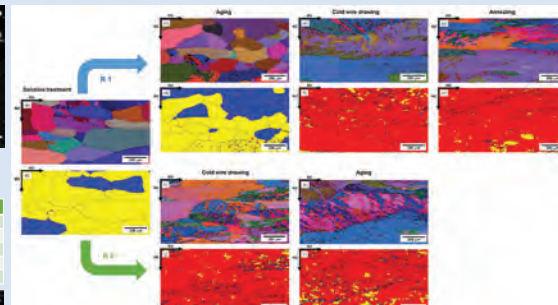


Fig. 7 All-Euler orientation, grain orientation spread (GOS) maps and quantifications of alloy B in different stages of the processing routes R1 and R2.

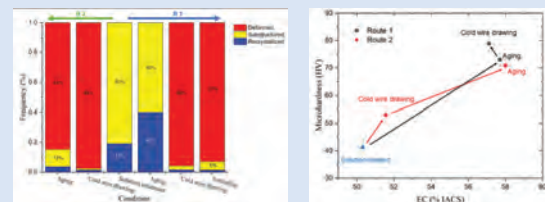


Fig. 8 Statistical distribution of the fractions of the structures revealed by the GOS maps.

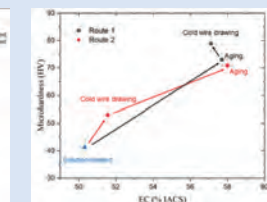


Fig. 9 Evolution of the microhardness and EC of alloy B during thermomechanical processing in routes R1 and R2.

Conclusions

1. Adding Sc (≤ 0.10 wt.%) to Al-Zr alloy significantly increased strength to 188-209 MPa, a 73-88% improvement over the base alloy, while maintaining excellent electrical conductivity at 57.4-59.9% IACS. The strength improvement is attributed to numerous $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ precipitates.
2. Sc-containing alloys exhibit remarkable thermal resistance after thermal exposure to 310°C for 400 hours and 400°C for 1 hour due to strong coarsening resistance of $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ precipitates.
3. Sc-containing alloys, with their excellent mechanical, electrical, and thermal properties, offer a cost-effective solution for producing various IEC standard grades of thermally-resistant aluminum conductors using traditional thermomechanical processes.

Future works

- Optimizing the amount of Zr and Sc additions to further enhancing strength.
- Achieving AT2 grade through the minor addition of Sr.

Finaliste
Finalist

Quan Shao

Université du Québec à Chicoutimi

E.M. Elgallad - UQAC

X-G. Chen - UQAC

A. Maltais - Rio Tinto

La demande en énergie électrique augmente rapidement en raison du développement des activités économiques. Cette augmentation rend nécessaire le développement d'un alliage d'aluminium dont les propriétés améliorent la performances des fils conducteurs haute tension. Pour ce projet, les effets de l'ajout de Scandium et de deux traitements thermomécaniques ont été étudiés. D'une part, la microstructure a été caractérisée par microscopie électronique à transmission ainsi qu'analyse EBSD. D'autre part, les propriétés ont été évaluées par mesures de conductivité électrique, mesures de microdureté ainsi que des essais de traction avec et sans apport de chaleur. L'alliage avec moins de 0.1% de Scandium a permis d'obtenir une amélioration de la résistance en traction de 73 à 88 %, et ce, tout en conservant une excellente conductivité électrique (57,4 à 59,9 % IACS). De plus, pour les alliages contenant du Scandium, et ayant reçu un traitement thermique à 310 et 400 °C, une réduction maximale de 6,0% de la résistance mécanique a été observée. Enfin, les traitements thermiques ont résulté en des propriétés mécaniques et électriques comparables avec un écart de 12 MPa et 1,4 % IACS. Les alliages développés dans ce projet présentent une combinaison de propriétés favorables au développement de fils conducteurs haute tension.

The demand for electric power is rapidly increasing due to the swift development of economic activities. This trend has led to a growing necessity for aluminum alloy wires that exhibit a favorable combination of electrical, mechanical, and thermal-resistant properties. The effects of Sc addition and two thermomechanical processing routes on these properties were investigated using transmission electron microscopy, EBSD analysis, electrical conductivity measurements, microhardness measurements and tensile tests with and without thermal exposures. The microalloying with Sc (≤ 0.10 wt.%) resulted in substantially high strength of 188-209 MPa, representing 73-88% improvement compared to the Sc-free base alloy, while maintaining excellent electrical conductivity of 57.4-59.9% IACS. Moreover, the maximum strength reduction was limited in the Sc-containing alloys to $\leq 6.0\%$ after thermal exposures at 310 and 400 °C. Both processing routes yielded comparable mechanical and electrical properties, where the maximum differences in the strength and electrical conductivity between both routes were 12 MPa and 1.4% IACS, respectively. The excellent combinations of electrical, mechanical and thermal-resistant properties made the developed alloys promising candidate materials for four standard grades of thermal resistant aluminum conductors.



1. Introduction

- The sharpening of aluminum parts to consumer products comes with many challenges which include friction.
- Friction occurring at the tool-chip-workpiece interfaces can impact the tool performance and quality of the machined parts.

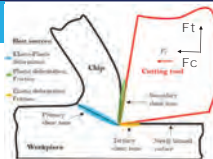


Figure 1 : Heat generation in metal cutting [1]

3. Objectives

- Develop new empirical friction models under various aluminium machining conditions at the tool-workpiece interface;
- Develop Finite element (FE) models with new variables COF to improve the accuracy of the prediction of machined results.

2. Problem Statement

- Constant coefficient of friction (COF μ^*) causes a discrepancy between experimental and simulated machining results.
- Very few dependent COF models in metal cutting are available in the literature.
- Variable friction models may improve the accuracy of the numerical prediction of the machining responses.

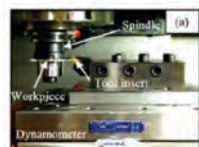
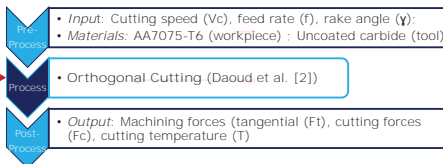


Figure 2 : Experimental Setup[2]



4. Methodology

- Calculation of COF: $\mu = \text{tangential forces} / \text{Normal}$
- Central Composite Design (CCD)
- Analysis of variables (ANOVA)
- Regression data --> $\mu = f(Vc, f, \gamma)$

5. Results & Discussions

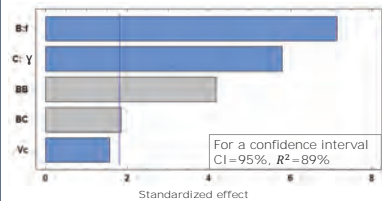


Figure 3: PARETO diagram

- Feed rate is more statistically significant, followed by the rake angle, and then the cutting speed.
- There is a quadratic effect of the feed rate on μ .

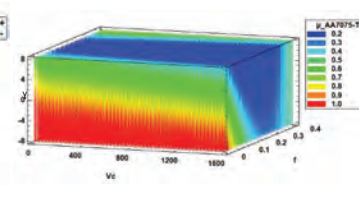


Figure 4 : Response Surface mesh

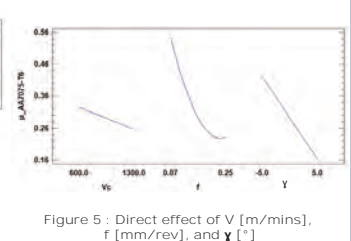


Figure 5 : Direct effect of V [m/min], f [mm/rev], and γ [°]

$$\mu = 0.97 - 9.7(10^{-5})V_c - 5.6f - 0.04\gamma + 12f^2 + 0.12\gamma$$

6. Conclusion & Future Work

- A new COF model as a function of the machining parameters and the tool rake angle was statistically determined via Statgraphics software.
- In future work, the empirical COF formula will be implemented in DEFORM software to simulate and compare with previous models the machining responses of some Aluminum alloys.

Acknowledgments

The authors would like to thank REGAL for financial support and INALCO for organizing this conference.

References

[1] Gupta, M.K., Khan, A.M., Singh, G. et al. A review on conventional and advanced minimum quantity lubrication approaches on performance measures of grinding process. *Int J Adv Manuf Technol* 117, 729–750 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-01778-x>
[2] M. Daoud, W. James, J. F. Chablain, and A. Bouras. A machining-based methodology to identify material constitutive law for finite element simulation. *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 77, no. 9, pp. 2019–2033, Apr. 2015, doi: 10.1007/s00170-014-6583-z

Les pièces en aluminium sont largement utilisées dans les transports (avions, bateaux, conducteurs d'électricité, vélos, automobiles, etc.), la construction (structure) et l'ingénierie. Les familles d'aluminium sont bien connues pour les propriétés très intéressantes qu'elles possèdent. Cependant, leur mise en forme présente de nombreux défis. Le frottement qui se produit pendant l'usinage dans l'un de ces défis peut avoir un impact sur les performances de l'outil, l'état de surface de la pièce usinée, les contraintes résiduelles ou la précision des résultats de l'usinage simulé. Le frottement produit tout au long d'un procédé de fabrication est évalué par le coefficient de frottement (COF), dont la valeur dépend de l'état de surface des corps en contact. Dans l'usinage, il peut également être influencé par d'autres facteurs tels que la géométrie de l'outil et les paramètres d'usinage. Cette dépendance, très importante pour une meilleure prédiction numérique des réponses d'usinage, n'est pas disponible dans la littérature pour la plupart des matériaux. Dans ce poster, des modèles de frottement d'usinage pour l'AA7075-T6 sont établis en fonction des angles de coupe de l'outil et des paramètres de coupe (vitesses de coupe et vitesses d'avance), à l'aide d'une analyse statistique et des réponses de surface.

Components made of Aluminium are widely found in transportation (airplanes, boats, electricity conductors, bikes, automobiles, etc.), construction (structure), and engineering. The aluminum's families are well known by the very interesting properties they possess. However, their shaping comes with many challenges. Friction occurring during machining in one of these challenges can impact the tool performance, machined part surface finish, residual stresses, or the accuracy of simulated machining results. Friction produced throughout a manufacturing process is evaluated by the coefficient of friction (COF), which value depends on surface finishes of bodies in contact. In machining, it can also be influenced by other factors such as tool geometry and machining parameters. This dependency, very important for better numerical prediction of machining responses, is not available in the literature for most materials. In this poster, machining friction models for AA7075-T6 are established as a function of tool rake angles and cutting parameters (cutting speeds and feed rates) using statistical analysis and surface responses.

Sandrine A. Tcheuhebou Tina
ÉTS

V. Songmene - ÉTS
M. Jahazi - ÉTS
Y. Younsi - ÉTS

DÉVELOPPEMENT DES PARAMÈTRES DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE D'ALLIAGE EXTRUDÉ AA6061-T6 À L'AIDE D'UN PION À DOUBLE ÉPAULEMENT

FRICTION STIR WELDING PARAMETERS DEVELOPMENT OF AA6061-T6 EXTRUDED ALLOY USING A BOBBIN TOOL

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

UNIVERSITÉ LAVAL

alu Québec
Groupe de Fabrication

Canada
MRC-CRRC

Mitacs

Remerciements

Mes remerciements s'adressent à AluQuebec et l'Université Laval en collaboration avec l'Université du Québec à Chicoutimi ainsi qu'au CNRC/CTA et le REGAL pour leur implication tout au long de ce projet. De plus, mes remerciements s'adressent à MITACS pour leur soutien financier.

Introduction

Le soudage par friction malaxage (FSW) est un procédé de soudage à froid qui génère de la chaleur par friction grâce à un outil rotatif pour assembler deux matériaux. Le soudage à l'aide du pion à double épaulement, contrairement au FSW conventionnel, ne requiert aucun support envers des pièces soudées. Il existe cependant peu d'étude concernant ce procédé, notamment au niveau des propriétés en fatigue. Le but de cette étude est de déterminer des paramètres à forte productivité qui permettront d'obtenir des joints soudés bout à bout de qualité en accord avec les normes et codes en vigueur pour des applications dans le domaine de l'ingénierie civile.



Figure 1. Configuration du soudage FSW avec pion à double épaulement

Objectifs

- Définir les paramètres FSW avec le pion à double-épaulement vers des vitesses de soudage élevées pour une épaisseur de 8,0 mm d'extrusions en AA6061-T6.
- Évaluer la qualité des soudures par des contrôles non-destructifs et destructifs (ultrasons en bain d'immersion, essais de pliage, essais mécaniques en tension et en fatigue) permettant de qualifier les joints en conformité avec les normes et codes applicables.

Méthodologie

Deux extrusions d'alliage AA6061-T6 de 8 mm d'épaisseur ont été soudées bout à bout à l'aide d'une machine de friction malaxage de type portique. La méthode de travail est séquencée suivant les étapes suivantes :

- ➔ **Étape 1 : Soudage**
Soudage de deux extrusions avec le pion à double épaulement.
- ➔ **Étape 2 : Essais de qualification**
Inspection visuelle
Analyse par ultrason en bain d'immersion (8 éprouvettes)
Essais de traction (16 éprouvettes)
Essais de pliage (8 éprouvettes)
- ➔ **Étape 3 : Définition des paramètres à haute performance**
- ➔ **Étape 4 : Essais en fatigue (14 éprouvettes)**



Figure 2. Extrusions soudées AA6061



Figure 3. Pion à double épaulement fileté

Méthodologie (suite)

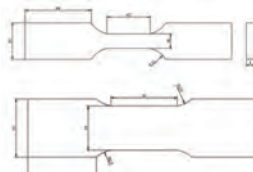


Figure 4. Dimensions des éprouvettes (traction et fatigue)

Tableau 1. Paramètres de soudage

Identification	Vitesse de rotation (rpm)	Vitesse d'avance (mm/min)
1	400	400
2	500	500
3	600	600
4	800	800
5	800	800
6	850	650
7	850	650
8	500	500

Résultats

Tableau 2. Propriétés mécaniques en traction

Identification	Vitesse de rotation (RPM) avance (mm/min)	Limite élastique (MPa)	Limite ultime (MPa)	Efficacité de joint (%)	Allongement à la rupture (%)
1	400-400	121	205	70	14
2	500-500	124	206	70	11
3	600-600	138	219	74	13
4	800-800	130	206	70	11
5	800-800	128	213	72	11
6	850-650	136	217	74	11
7	850-650	124	208	71	13
8	500-500	124	217	74	13

Tableau 3. Résultats d'essais de pliage et d'analyse par ultrasons en bain d'immersion

Identification soudures	Résultats des essais de pliage	Analyse de l'inspection par ultrasons	Décalage axial (mm)
1	Pas de défauts	Pas de défauts	0,4
2	Pas de défauts	Pas de défauts	0,7
3	Pas de défauts	Pas de défauts	0,5
4	Fissure à la racine	Indication interne	1,4
5	Pas de défauts	Indication interne	0,5
6	Pas de défauts	Pas de défauts	0,5
7	Pas de défauts	Indication interne	1,3
8	Pas de défauts	Pas de défauts	0,5

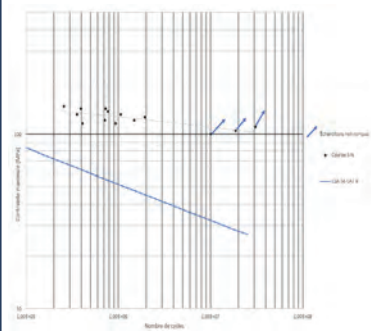


Figure 5. Courbe de fatigue S-N expérimentale



Figure 6. Éprouvette de fatigue rompue dans le noyau de soudage



Figure 7. Éprouvette de fatigue rompue dans la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM)

Conclusion

- La vitesse maximale de soudage obtenue avec une excellente qualité de joint est de 0.65m/min pour une vitesse de rotation de 850RPM.
- L'efficacité de joint est supérieure de 14% par rapport au minimum spécifié par la norme ISO 25239 (60%).
- Toutes les éprouvettes soudées et soumises aux essais mécaniques statiques (tension) se sont rompues dans la zone affectée thermiquement (ZAT).
- Les propriétés en fatigue des joints FSW à double-épaulement, par rapport à la norme CSA S6 (catégorie B), sont nettement plus élevées atteignant jusqu'à 125MPa à 2 000 000 de cycles.
- Le faciès de rupture des échantillons rompus en fatigue démontre en tout temps une rupture s'initiant à la surface de la soudure à partir de défauts géométriques, soit les stries de soudage ou dans la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM).

Kenza Marianne Siperh Tinguery
Université du Québec à Chicoutimi

A. Rahem - UQAC
M. Fafard - UL
F. Nadeau - CNRC

Le soudage par friction malaxage avec le pion à double épaulement (BT-FSW) est un procédé de soudage à l'état solide qui utilise deux épaulements rotatifs opposés par un pion. Dans ce procédé, l'épaulement inférieur remplace la plaque d'appui utilisée dans le soudage par friction malaxage à outil conventionnel (CT-FSW) pour favoriser la solidarisation des joints à l'état solide. Les paramètres de soudage du BT-FSW, tels que le profil du pion de l'outil, la vitesse de rotation, la vitesse de soudage et la force axiale, ont un effet considérable sur la microstructure et les propriétés mécaniques du joint résultant. Dans la présente étude, deux extrusions d'alliage d'aluminium AA6061-T6 de 8 mm ont été soudées par le procédé BT-FSW avec un pion fileté et huit paramètres de soudage différents (vitesse de rotation de l'outil et vitesse de soudage). La valeur maximale de la résistance à la traction a été atteinte en utilisant des conditions de soudage optimales d'une vitesse de rotation de l'outil de 850 tr/min et une vitesse de soudage de 650 mm/min. Également, plusieurs points ont été étudiés dont l'efficacité du joint soudé, les défauts de la zone de soudure et la durée de vie en fatigue avec les paramètres optimisés.

Friction stir welding with the bobbin tool (BT-FSW) is a solid-state welding process that uses two rotating shoulders opposed by a pin. In this process, the lower shoulder replaces the support plate used in conventional tool friction stir welding (CT-FSW) to promote the bonding of joints in the solid state. The welding parameters of the BT-FSW, such as tool pin profile, rotational speed, welding speed and axial force, have a considerable effect on the microstructure and mechanical properties of the resulting joint. In the present study, two 8 mm AA6061-T6 aluminum alloy extrusions were welded by the BT-FSW process with a threaded pin and eight different welding parameters (tool rotation speed and welding speed). The maximum tensile strength value was achieved using optimal welding conditions with a tool rotation speed of 850 rpm/min and a welding speed of 650 mm/min. Furthermore, several points are studied including the efficiency of the welded joint, the defects of the weld zone and the fatigue life with the optimized parameters.

COMPORTEMENT EN FATIGUE DES JOINTS BOUT À BOUT PAR RECOUVREMENT SOUDÉS PAR FRICTION MALAXAGE DANS LES PROFILS EXTRUDÉS POUR APPLICATION DANS LES PLATELAGES DES PONTS ROUTIERS EN ALUMINIUM

FATIGUE BEHAVIOUR OF BUTT-LAP FRICTION STIR WELDED JOINTS IN HOLLOW EXTRUDED PROFILES FOR ALUMINUM BRIDGE DECK APPLICATIONS



1-Introduction

Context

- **Fatigue cracks** initiate from vulnerable details such as welds which are extensively used in the fabrication of **aluminum highway bridge decks**
- A relatively new welding technology known as **friction stir welding (FSW)** has been suggested to replace conventional welding processes due to its enhanced welding quality and fatigue strength

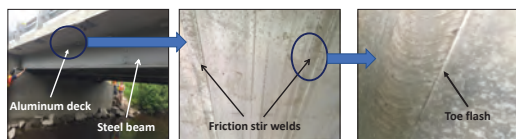


Figure 1. Friction stir welded aluminum highway bridge deck in Saint Ambroise, Québec

What is missing ?

- **Fatigue design curves** of friction stir welds in aluminum highway bridge decks
- **Quality control criteria** of friction stir welds in aluminum highway bridge decks
- **Effect of common welding fabrication defects** on the fatigue behaviour of friction stir welded joints in aluminum highway bridge decks

Objectives

- **Provide design S-N curves** of aluminum highway bridge deck friction stir welded joints.
- **Provide quality control criteria** of friction stir welded joints in aluminum highway bridge deck application
- **Provide fatigue optimization guidelines** of friction stir welded joints in aluminum highway bridge decks

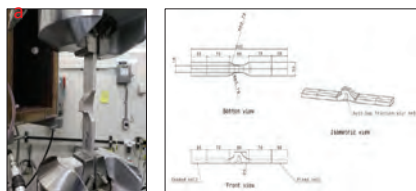


Figure 2. Fatigue testing setup (dimensions in mm): a-small scale (ASTM E466) fatigue specimens, b-large scale fatigue specimens (aluminum alloy for both specimens is 6063-T6)

3- Results

Small-scale fatigue testing

- Fatigue failure at weld toe (cracks arising at toe flash)
- Enhanced fatigue strength (compared to butt-lap friction stir welded joints in literature)

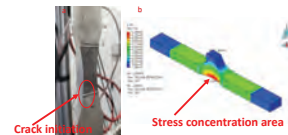
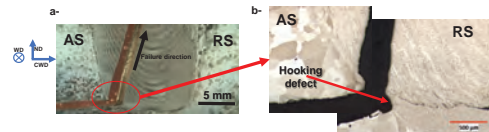


Figure 3. Fatigue failure in small-scale specimens

Large-scale fatigue testing

- LVDT helped with the determination of the number of cycles to failure
- Fatigue failure started from the hooking defect within the interface tip



4-Conclusions

- Small-scale specimens fail within the heat affected zone area
- Relative thickness (thickness of the joint / thickness of the flange) significantly enhances the fatigue strength of butt-lap friction stir welds
- Large-scale fatigue specimens fail in the upper flange FSW joint from the hooking defect

5-Acknowledgements

- Les fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT)
- Safi Inc.
- Construction Proco Inc.



Mahmoud Trimech
Université Laval

C.-D. Annan - UL
S. Walbridge - University of Waterloo

Cette recherche se concentre sur la compréhension du comportement en fatigue des joints soudés par friction-malaxage (FSW) de type «butt-lap», une technique émergente dans l'industrie des tabliers de ponts en aluminium. La soudure traditionnelle par fusion, souvent utilisée dans ces structures, introduit des défauts affectant la résistance en fatigue. Cependant, la FSW offre un meilleur contrôle sur ces défauts, bien que son application soit entravée par une standardisation limitée dans les codes actuels. Cette étude caractérise le comportement à la fatigue des joints FSW, détermine les niveaux de tolérance pour les défauts d'ajustement et introduit des outils numériques pour prédire la durée de vie à la fatigue de spécimens FSW à grande échelle. Les essais expérimentaux sur ces échantillons ont révélé que l'amorçage par fatigue commence souvent par le défaut de «remontée de surface» à la racine de la soudure. Les simulations numériques, conformément aux recommandations de l'Institut International de la Soudage (IIW), ont confirmé les résultats expérimentaux. Des essais supplémentaires sur les défauts d'ajustement et les variations des conditions de soudage ont mis en évidence le rôle du défaut de remontée de surface dans les fissures par fatigue. La recherche introduit également un cadre numérique, basé sur des modèles d'éléments finis, prédisant efficacement l'initiation et la durée de vie en fatigue, validé par des données expérimentales.

This research focuses on understanding the fatigue behaviour of butt-lap Friction Stir Welding (FSW) joints, an emerging technique in the aluminum bridge deck industry. Traditional welding, often used in these structures, introduces defects impacting the fatigue resistance. However, FSW offers better control over these defects, though its application is hindered by limited standardization in current codes. This research characterizes the fatigue behaviour of FSW joints, determines tolerance levels for fit-up defects, and introduces numerical tools for predicting the fatigue life of large-scale FSW specimens. Experimental tests on these specimens revealed that fatigue failure often begins from the "hooking" defect in the weld root. Numerical simulations, in line with the International Institute of Welding's recommendations, confirmed the experimental findings. Further experimentation on fit-up defects and variations in welding conditions showcased the hooking defect's role in fatigue failures. The research also introduces a numerical framework, based on finite element models, effectively predicting fatigue initiation and life, validated against experimental data.

REMERCIEMENTS

ACKNOWLEDGEMENTS

La mise en œuvre de l'ensemble des projets présentés dans cette encyclopédie nécessite des investissements majeurs et ce, tant au niveau des milieux universitaires et gouvernementaux que de la part des secteurs industriels concernés. C'est en parcourant cet ouvrage que vous réaliserez le dynamisme et l'ingéniosité de ces étudiantes, étudiants, chercheuses et chercheurs passionnés, visant non seulement l'excellence, mais le développement d'un pôle québécois de recherche sur l'aluminium reconnu au niveau international.

Le Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL tient à remercier l'ensemble des personnes ayant participé à la Journée des étudiants du REGAL qui, en acceptant la reproduction de leurs affiches, ont permis la création de cette encyclopédie.

The realization of the projects presented in this synopsis required major funding from key players working in the aluminium industry, including university, governments and various industrial sectors. When reading through this work, you will realise how dynamic and ingenious these passionate students, professors, and researchers are. They not only aim to excel, they wish to develop an internationally-recognised aluminium research hub in Quebec.

Aluminium Research Centre – REGAL would like to thank the participants of the REGAL Students' Day who, by accepting to have their posters reproduced, made the creation of this synopsis possible.

Partenaires / Sponsors



Le Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL tient également à remercier l'ensemble de ses collaborateurs qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cet ouvrage. Aluminium Research Centre – REGAL would also like to thank every one of their collaborators who, near or far, contributed to the production of this work.

Membres du bureau de direction du REGAL / Members of REGAL Steering Committee

Houshang Alamdari, directeur REGAL, Université Laval
Daniel Marceau, directeur adjoint REGAL, UQAC
Lukas Dion, UQAC
Florence Paray, McGill University
Mamoun Medraj, Université Concordia

Myriam Brochu, École Polytechnique de Montréal
Victor Songmene, École de technologie supérieure
Ahmed Maslouhi, Université de Sherbrooke
Gheorghe Marin, Cégep de Trois-Rivières
Carl Duchesne, Université Laval



Le Centre de recherche sur l'aluminium – REGAL est financé par le FRQNT

