



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com

New trends in metallic alloys / *Alliages métalliques : nouvelles tendances*

## Foreword



Progress in high-social-impact fields, such as energy, transport or health, strongly depend on the development of new solutions of materials with improved structural or functional properties. The optimisation of metallurgical processes, classical or innovative, is and will remain highly strategic and competitive. The challenge of improvements or even breakthroughs with respect to traditional metallurgy faces an additional difficulty with the increasing need to take also into account environment and resource (energy and raw material) management issues. The strategy to develop metallic alloys with improved properties consists mostly in exploring new combinations of chemical composition and microstructure, relying on new processes but also with the help of predictive modelling and simulation approaches.

In this framework, the present dossier is aimed at providing an overview of the recent advances related to metallurgy and, more specifically, to metallic alloys. The issue is organized around eight review papers that cover a broad spectrum of metallic materials and associated applications. Authors from both academic and high-technology industrial sectors were invited to contribute. Among the latter, participations of ArcelorMittal on advanced steels for automotive applications, Constellium on the metallurgy of aluminium alloys, and ONERA on high-temperature materials for aerospace applications are particularly valuable and attest to the importance of the materials solution in the industrial context. A brief introduction of each contribution is given below.

*New developments of advanced high-strength steels for automotive applications*, by Jean-Hubert Schmitt and Thierry Jung. This paper provides an overview of the evolutions over the past decades of the different generations of advanced high-strength steels. The article emphasizes the impact of both the chemical design and the controlled processes on the mechanical properties of such materials. Microstructures, hardening mechanisms and processes are detailed along the generations, from the classical dual phase material to the last third generation of steel grades based on unstable austenite.

*High-temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and  $\gamma$ -TiAl alloys*, by Mikael Perrut, Pierre Caron, Marc Thomas, and Alain Couret. In this article, two essential families of key industrial materials used for aerospace applications are reviewed. In both cases, the historical evolutions are explained and the key metallurgical parameters involved in their optimization (chemical design, deformation mechanisms, environmental effects...) are described.

*Recent advances in the metallurgy of aluminium alloys. Part I: Solidification and casting*, by Philippe Jarry and Michel Rappaz. The goal of this review paper is to summarize the recent advances in the metallurgy of the transformation of aluminium alloys from the liquid to the solid state. All scales are concerned: from that of atom cluster arrangements in the melt leading to a renewed understanding of nucleation and phase selection to the variability of dendritic growth morphology anisotropy, up to fluid flow at the scale of the melt pool of the concerned casting processes and the corresponding macrosegregation phenomena. These advances point out that it is necessary to account for the strong and complex coupling between physical phenomena at different scales to correctly describe the formation of solidification structures.

*Recent advances in the metallurgy of aluminum alloys. Part II: Age hardening*, by Christophe Sigli, Frédéric De Geuser, Alexis Deschamps, Joël Lépinoux, and Michel Perez. This paper focuses on the solid phase of aluminium alloys and more specifically on recent progress on the understanding and simulation of age hardening. The main phenomena governing the formation of precipitate microstructures in aluminium alloys are presented; they provide a qualitative understanding of the relationship between alloy chemistry, processing and final precipitate microstructure at the nanoscale. Modelling approaches are shown to be capable of predicting these microstructures. The mechanisms for precipitation strengthening are also discussed, as well as the models available to quantify this strengthening.

*Design of strain-transformable titanium alloys*, by Philippe Castany, Thierry Gloriant, Fan Sun, and Frédéric Prima. This paper deals with the design and the properties of new titanium alloys for aerospace and biomedical applications. These materials offer interesting properties due to stress-induced transformations of the metastable  $\beta$  body centred cubic phase and the appearance of TRIP/TWIP effects, or of superelasticity for some well-designed compositions. Some strategies to obtain superelastic titanium alloys are exposed, and details on the deformation mechanisms of such materials are given.

<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.11.008>

1631-0705/© 2018 Published by Elsevier Masson SAS on behalf of Académie des sciences.

Ways to improve superelasticity are then presented. The paper also reviews the approach, mainly based on Bo–Md maps, to design TRIP/TWIP titanium alloys with enhanced properties due to the formation of complex microstructures.

*From high-entropy alloys to complex concentrated alloys*, by Stéphane Gorsse, Jean-Philippe Couzinié, and Daniel B. Miracle. Based on a recent breakthrough alloying design, high-entropy alloys, and by extension complex concentrated alloys, are considered as new materials offering the possibility to explore central parts of phase diagrams and revisit the notion of “alloys”. This is a very active research field, with a continuous growth since its beginning in 2004. The article exposes the main accomplishments on their design, microstructures, and mechanical properties, and highlights some of the associated numerous challenges.

*Combinatorial approaches for the design of metallic alloys*, by Alexis Deschamps, Franck Tancret, Imed-Eddine Benrabah, Frédéric De Geuser, and Hugo P. Van Landeghem. The design of new metallic alloys is faced with the challenge of an increasing complexity of the alloys composition, processing and resulting microstructures necessary to meet multiple property targets, together with a requirement that the design stage be faster and less expensive. This paper shows that combinatorial methods, combining numerical and experimental approaches, can be applied to the specific requirements of alloy design and lead to an improved understanding of fundamental processes of physical metallurgy, such as precipitation, together with improved alloy compositions and processing.

*Emerging processes for metallurgical coatings and thin films*, by Alain Billard, Francis Maury, Pascal Aubry, Fanny Balbaud-Célérier, Benjamin Bernard, Fernando Lomello, Hicham Maskrot, Erick Meillot, Alexandre Michau, and Frédéric Schuster. Surface coatings provide wear, corrosion, chemical, electrical, optical, or cosmetic properties that may exceed those possible for the base material surface. This paper illustrates potential vectors of process innovation in the field of metallurgical coating through several examples: physical vapour deposition, chemical vapour deposition, plasma spraying, cold spraying, and laser cladding.

The guest editors of this dossier on *new trends in metallic alloys*, Jean-Philippe Couzinié and François Willaime, would like to express their gratitude to Denis Gratias for giving them the opportunity to prepare it. They also gratefully acknowledge all the authors of the articles in this issue as well as the reviewers.

## Avant-propos

Les défis à fort impact sociétal associés à l'énergie, le transport ou la santé dépendent fortement du développement de nouvelles solutions de matériaux à propriétés structurales ou fonctionnelles avancées. L'optimisation des procédés métallurgiques, traditionnels ou innovants, est et restera hautement stratégique et concurrentielle. Les défis qui se posent quant à l'amélioration, voire aux ruptures, par rapport à la métallurgie traditionnelle font face à une difficulté supplémentaire liée à la nécessité croissante de prendre en compte des aspects environnementaux et d'économie de ressources en énergie et en matière première. La stratégie de développement de matériaux métalliques à propriétés améliorées passe par l'exploration de nouvelles combinaisons de compositions chimiques et de microstructures, en se basant sur de nouveaux procédés, mais aussi avec l'aide d'approches de modélisation et simulation prédictives.

Dans ce cadre, ce dossier des *Comptes rendus Physique* a pour but de donner une vue d'ensemble des récentes avancées dans le domaine de la métallurgie et, de façon plus spécifique, des alliages métalliques (massifs et revêtements). Le numéro est organisé autour de huit articles de revue qui couvrent un large spectre de matériaux métalliques et d'applications. Nous avons souhaité inclure des contributions de partenaires, à la fois académiques et industriels, issus de secteurs de pointe. Les participations d'ArcelorMittal sur les aciers avancés pour les applications automobiles, de Constellium sur la métallurgie des alliages d'aluminium et de l'Onera sur les matériaux à haute température pour applications aérospatiales méritent d'être soulignées et attestent l'importance des solutions de matériaux dans le contexte industriel. Une brève introduction à chaque contribution est donnée ci-après.

*Nouveaux développements dans le domaine des aciers de nouvelle génération à haute résistance pour les applications automobiles*, par Jean-Hubert Schmitt et Thierry Lung. Cette contribution donne un aperçu des évolutions au cours des dernières décennies des différentes générations d'aciers à haute résistance. L'article met en avant à la fois l'impact de la composition des alliages et celui des procédés sur les propriétés mécaniques de ces matériaux. Les microstructures, les mécanismes de durcissement et les procédés sont détaillés tout au long des générations, de l'acier à double phase jusqu'à la troisième génération d'aciers basés sur l'austénite instable.

*Matériaux haute température pour applications aéronautiques : superalliages base Ni et alliages TiAl*, par Mikael Perrut, Pierre Caron, Marc Thomas et Alain Couret. Dans cet article, deux familles d'alliages industriels essentielles pour les applications aéronautiques sont passées en revue. Dans les deux cas, l'évolution historique de ces familles d'alliages est expliquée, avec une attention particulière portée sur la description des paramètres métallurgiques clés impliqués dans leur optimisation : conception, mécanismes de déformation, effets d'environnement.

*Développements récents en métallurgie des alliages d'aluminium. Première partie : coulée et solidification*, par Philippe Jarry et Michel Rappaz. Le but de cet article est de résumer les avancées récentes dans la métallurgie de la transformation des alliages d'aluminium de l'état liquide à l'état solide. Toutes les échelles sont concernées : des amas d'atomes dans le bain liquide, qui permettent de porter un nouveau regard sur la compréhension des phénomènes de germination et de sélection des phases, à la variabilité de l'anisotropie de la morphologie de croissance des dendrites, jusqu'à l'écoulement du liquide

à l'échelle de la masse fondue dans les procédés de coulée et aux phénomènes de macroségrégation associés. Ces avancées mettent en évidence la nécessaire prise en compte des couplages forts entre phénomènes physiques à différentes échelles pour décrire correctement la formation des structures de solidification.

*Développements récents en métallurgie des alliages d'aluminium. Deuxième partie : durcissement par revenu*, par Christophe Sigli, Frédéric De Geuser, Alexis Deschamps, Joël Lépinoux et Michel Perez. Cet article examine quelques progrès en matière de compréhension et de simulation du durcissement par revenu des alliages d'aluminium. Les principaux phénomènes régissant la formation des microstructures de précipitation sont présentés. Ils fournissent une compréhension qualitative de la relation entre la composition de l'alliage, le traitement thermique et la taille des précipités à l'échelle nanométrique. Les approches de modélisation se montrent capables de prédire de telles microstructures. Les mécanismes de durcissement par précipitation sont également discutés, ainsi que les modèles disponibles pour les quantifier.

*Conception d'alliages de titane transformable par déformation*, par Philippe Castany, Thierry Gloriant, Fan Sun et Frédéric Prima. Cet article porte sur la conception et les propriétés de nouveaux alliages de titane pour des applications aérospatiales et biomédicales. Ces matériaux offrent d'intéressantes propriétés dues à des transformations induites sous la contrainte de la phase  $\beta$  métastable de structure cubique centrée, avec l'apparition d'effets TRIP/TWIP ou de superélasticité dans le cas de compositions soigneusement conçues. La première partie du manuscrit expose les stratégies d'obtention d'alliages superélastiques et donne des détails sur les mécanismes de déformation de tels matériaux. Les moyens d'améliorer la superélasticité sont abordés à la fin de cette section. La deuxième partie examine l'approche visant à la conception d'alliages de titane TRIP/TWIP à microstructure complexe et à propriétés avancées, principalement à l'aide de diagrammes Bo-Md. Quelques faits marquants sont détaillés, et des perspectives d'avenir sont avancées.

*Des alliages à haute entropie aux alliages concentrés complexes*, par Stéphane Gorsse, Jean-Philippe Couzinié et Daniel B. Miracle. Basés sur un concept d'alliage en rupture, les alliages à haute entropie de mélange et, par extension, les alliages concentrés complexes sont considérés comme de nouveaux matériaux offrant la possibilité d'explorer les parties centrales méconnues des diagrammes de phases et de revisiter la notion d'alliage. Le domaine est très attractif dans la communauté et en pleine expansion depuis quatorze ans. L'article expose les principaux accomplissements obtenus sur ces nouveaux alliages métalliques (conception, microstructures, propriétés mécaniques...) et détaille de nombreux nouveaux défis à relever dans le domaine.

*Approches combinatoires pour la conception d'alliages métalliques*, par Alexis Deschamps, Franck Tancret, Imed-Eddine Benrabah, Frédéric De Geuser et Hugo P. Van Landeghem. La conception de nouveaux alliages métalliques est confrontée au défi d'une complexité de leur composition, des procédés et des microstructures résultantes, nécessaires pour répondre aux multiples propriétés cibles, le tout avec l'exigence d'une étape de conception rapide et peu coûteuse. Cet article montre que les méthodes combinatoires, associant des approches numériques et expérimentales, peuvent être appliquées aux exigences spécifiques de la conception d'alliage, et conduire à une meilleure compréhension des processus fondamentaux de la métallurgie physique, tels que la précipitation, ainsi qu'à des compositions et des traitements d'alliages améliorés.

*Procédés émergents de revêtements métallurgiques et de films minces*, par Alain Billard, Francis Maury, Pascal Aubry, Fanny Balbaud-Célérier, Benjamin Bernard, Fernando Lomello, Hicham Maskrot, Erick Meillot, Alexandre Michau et Frédéric Schuster. Les revêtements de surface fournissent des propriétés d'usure, de corrosion, chimiques, électriques ou optiques pouvant dépasser celles de la surface du matériau de base. Cet article illustre les vecteurs possibles pour l'introduction de procédés innovants dans le domaine des revêtements métallurgiques, à travers quelques exemples : dépôt physique en phase vapeur, dépôt chimique en phase vapeur, projection plasma, projection à froid et rechargement laser.

Pour conclure, Jean-Philippe Couzinié et François Willaime, en tant qu'éditeurs invités de ce dossier, souhaitent remercier vivement Denis Gratias pour leur avoir proposé d'effectuer ce travail. Ils remercient également chaleureusement tous les auteurs des articles de ce numéro et toutes les personnes qui ont contribué à leur relecture.

The Guest Editors / Les rédacteurs en chef invités

Jean-Philippe Couzinié  
Université Paris-Est Créteil (UPEC),  
Institut de chimie et des matériaux Paris-Est (ICMPE, CNRS/UPEC, UMR7182),  
France

François Willaime  
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA),  
Centre d'études de Saclay, Université Paris-Saclay,  
France