



HAL
open science

Exploration expérimentale locale du système ternaire Mn-Cr-C par l'élaboration de trois alliages et leur étude métallographique

Jean-Paul K Gomis, Synthia Annick Ozouaki Wora, Patrice Berthod

► To cite this version:

Jean-Paul K Gomis, Synthia Annick Ozouaki Wora, Patrice Berthod. Exploration expérimentale locale du système ternaire Mn-Cr-C par l'élaboration de trois alliages et leur étude métallographique. 2020. hal-02541176v2

HAL Id: hal-02541176

<https://hal.science/hal-02541176v2>

Preprint submitted on 15 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Exploration expérimentale locale du
système ternaire Mn – Cr – C par
l'élaboration de trois alliages et leur étude
métallographique**

*Local experimental investigation of the Mn–Cr–C
system by the elaboration of three alloys and by their
metallographic observation*

Jean-Paul K. Gomis, Synthia Annick Ozouaki Wora, Patrice Berthod*

Université de Lorraine
Faculté des Sciences et Technologies, Campus Victor Grignard, Boulevard des Aiguillettes,
54500 Vandoeuvre-lès-Nancy, France ; Institut Jean Lamour, Campus Artem, 2 allée André
Guinier 54000 Nancy, France ; *Courriel : pberthodcentralelille1987@orange.fr

Soumis le 13 avril 2020 / Submitted on April 13th, 2020

Citation : J. P. Gomis, S. Ozouaki, P. Berthod, hal-02541176 (2020)

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02541176>

Résumé : Trois alliages, de compositions visées Mn(reste)–25Cr–0,25C, Mn(reste)–25Cr–0,5C et Mn(reste)–25Cr–1C (toutes teneurs en % massiques), ont été élaborés pour découvrir les microstructures de tels alliages dont les teneurs en Cr et en C sont calquées sur des alliages ternaires base nickel ou base cobalt renforcés par carbures de chrome. L'élaboration des alliages par fonderie sous atmosphère inerte s'est accompagnée d'une forte vaporisation du manganèse avec pour résultat une teneur finale en Mn plus faible que visée et une teneur en chrome de 28 à 29 pds.% au lieu des 25 visés. Les trois alliages présentent des matrices biphasées, une phase étant plus claire (plus riche en Mn) que l'autre (plus riche en Cr). Les carbures ne sont vraiment visibles que dans l'alliage à 0,5 pds.%C, et dans celui à 1 pds.%C dans lequel ils forment un réseau dense. Ces carbures sont apparemment de type $M_{23}C_6$ et M_7C_3 dans l'alliage à 0,5 pds.%C, et uniquement M_7C_3 dans celui à 1 pds.%C.

Mots-Clefs : Système Mn–Cr–C ; Elaboration ; Microstructures ; Carbures ; Dureté

Abstract: Three alloys, with as targeted compositions Mn(bal.)–25Cr–0,25C, Mn(bal.)–25Cr–0,5C et Mn(bal.)–25Cr–1C (all contents in weight %), were elaborated in order to explore the microstructures of such alloys, the Cr and C contents of which are on the model of the ones of ternary nickel-based and cobalt-based alloys strengthened by chromium carbides. The melting and casting under inert atmosphere was accompanied by a significant vaporization of manganese with as result a final content in manganese lower than wished, and a chromium content ranging between 28 and 29 wt.% instead 25 wt.%. The matrixes of the three alloys are double-phased, one clear phase richer in Mn than the alloy and a darker one richer in Cr than the alloy again. One can really distinguish carbides in the 0.5wt.%C-containing alloy and in the one with 1wt.%C. In the later alloy carbides are present as an almost continuous network. Carbides are seemingly both $M_{23}C_6$ and M_7C_3 in the alloy with 0.5 wt.%C, and exclusively M_7C_3 in the 1 wt.%C-containing one.

Keywords: Mn–Cr–C system; Casting; Microstructures; Carbides; Hardness

Introduction

Le manganèse est souvent un élément d'alliage dans des matériaux métalliques basés d'autres éléments : aluminium (par exemple [2012Khakbaz], copper (par ex. [1993Mukherjee]), [2017Stan-Glowinska]), ou encore – et surtout – fer (par ex. [1978Barton], [2004Zhang]), dans lesquels il peut former des sulfures (par ex. [1999Oikawa]). Plus rarement il est pris comme élément de base d'alliages. Une des références qui peuvent être citées pour illustrer un tel rôle du manganèse est [1988Kerney]. L'association du manganèse avec du chrome peut se rencontrer dans des aciers (par ex. [1942Krainer]) ou des alliages à base de nickel (par ex. [2006Yang]), par exemple. Un alliage binaire Mn–25pds.%Cr a été élaboré par fonderie récemment, suivi d'un début d'étude de sa microstructure ([2020Berthod]).

Détails expérimentaux

Elaboration des alliages

Les trois alliages ont été élaborés par fusion d'une charge de 40 grammes environ, constituée d'éléments Mn, Cr et C purs (Alfa Aesar, pureté > 99,9%). Le four utilisé (CELES, France) était de type induction à haute fréquence. Après constitution d'une atmosphère de 300 millibars d'argon pur dans la chambre de fusion, on a monté de 0 à environ 4 kV la tension du courant alternatif, d'environ 110 kHz de fréquence, injecté dans la bobine entourant le creuset de cuivre refroidi à l'eau dans lequel la charge à fondre avait été placée. Après un maintien à l'état liquide, l'alliage s'est refroidi puis solidifié pendant que l'on abaissait progressivement la tension de 4 kV à zéro. Le refroidissement, initialement rapide en raison du contact entre la boule d'alliage affaissée et le creuset froid, puis de plus en plus lent, a amené le lingot à température ambiante en quelques 30 minutes.

Préparation et observations métallographiques

Pour faciliter son maintien dans l'étau de la tronçonneuse métallographique, chaque lingot ovoïde a été préalablement enrobé dans un mélange de type résine à froid (ESCIL, France). Le lingot a été coupé en quatre quartiers, qui ont été examinés pour détecter la présence d'éventuels infondus et autres défauts de fonderie. Après polissage d'ébauche aux papiers SiC (grades de #240 à #1200), rinçage à l'eau et polissage de finition au feutre enrichi en particules d'alumine de granulométrie 1µm, chaque échantillon a été examiné en microscopie électronique à balayage en mode « électrons secondaires » (mode dit « SE ») et en mode « électrons rétrodiffusés » (mode dit « BSE »), sous 20 kV de tension d'accélération et à différents grandissements. Ce MEB, de type JEOL JSM-6010LA, étant équipé d'un spectromètre de dispersion d'énergie (« EDS »), il a été possible de mesurer la composition des alliages, mais uniquement pour le manganèse et le chrome (le carbone étant trop léger et en trop petite quantité). Pour ce faire cinq plages ×250 entières choisies aléatoirement ont été analysées, tandis que des pointés ont été réalisés sur les différentes phases vues.

Calculs thermodynamiques

Des calculs thermodynamiques ont été réalisés avec la version N de Thermo-Calc et la base de données KP [1993Thermo-Calc], pour aider à l'interprétation des microstructures observées. Seul le système binaire Mn–Cr a pu être calculé avec cette base de données.

Résultats et discussion

Déroulement des fusions ; découpe des lingots ; observation à l'œil nu

Lors de la fusion de chaque alliage l'état liquide a été obtenu sans problème. En revanche un panache de fumée sombre s'est systématiquement formé à partir de la boule de métal liquide en lévitation. Du fait du plus faible point de fusion du manganèse par rapport au chrome, et de son relativement faible point de vaporisation, il a été considéré comme probable qu'il s'agissait de vapeurs de manganèse.

La découpe des lingots a été d'une part pénible, et d'autre part génératrice de fissuration, ces alliages opposant visiblement une grande dureté et une faible ténacité. Les fissures étaient très visibles à l'œil nu.

Observations au MEB ; santé interne de l'alliage

Après polissage miroir, les échantillons ont été examinés au MEB en mode SE (« électrons secondaires »), pour une imagerie laissant un grand rôle au relief. Ces observations ont révélés de multiples défauts dans les trois lingots (Figure 1 : alliage à 0,25 pds.%C, Figure 2 alliage à 0,5 pds.%C et Figure 3 : alliage à 1 pds.%C).

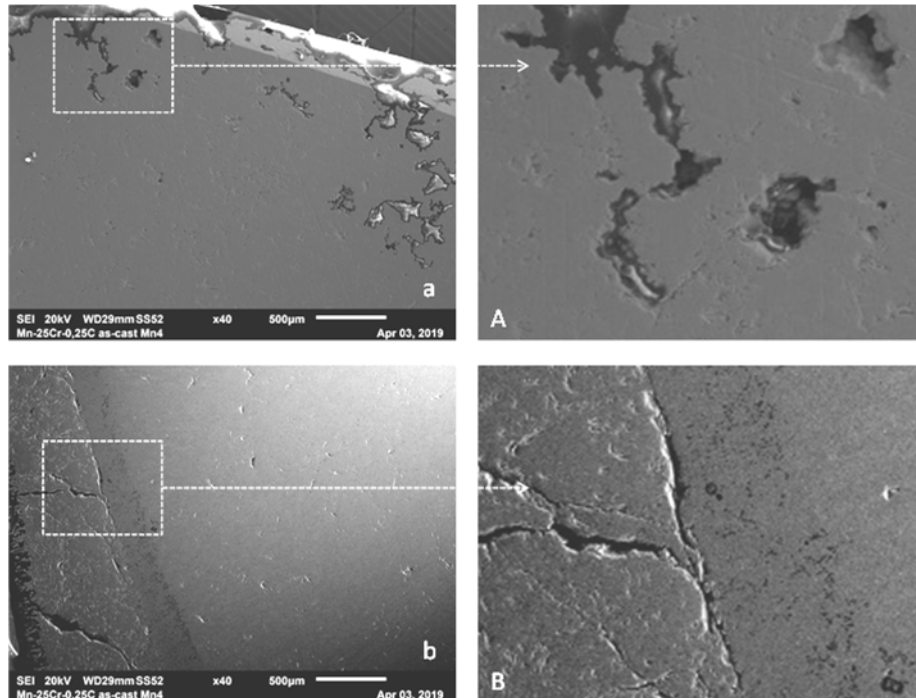


Figure 1 : Vue de la structure interne de l'alliage à 0,25 pds.%C à faible (a, b) et plus fort (A, B) grossissement ; a, A : microretassures, b, B : fissures et hétérogénéités métallurgiques) (internal structure of the 0.25wt.%C alloy at low magnification (a, b) and higher (A, B) magnification ; a, A: micro shrinkage defects, b, B: cracks and metallurgical heterogeneities)

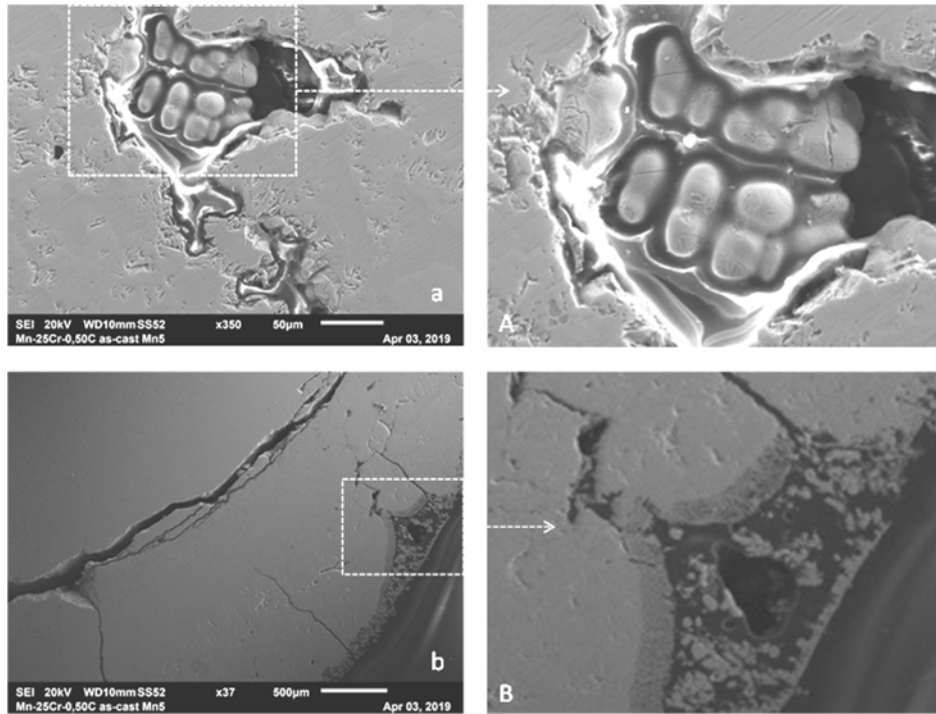


Figure 2 : Vue de la structure interne de l'alliage à 0,5 pds.%C à faible (a, b) et plus fort (A, B) grossissement ; a, A : dendrite dans une microretassure, b, B : fissures et hétérogénéités métallurgiques) (internal structure of the 0.5wt.%C alloy at low magnification (a, b) and higher (A, B) magnification ; a, A: dendrite in a micro shrinkage defect, b, B: cracks and metallurgical heterogeneities)

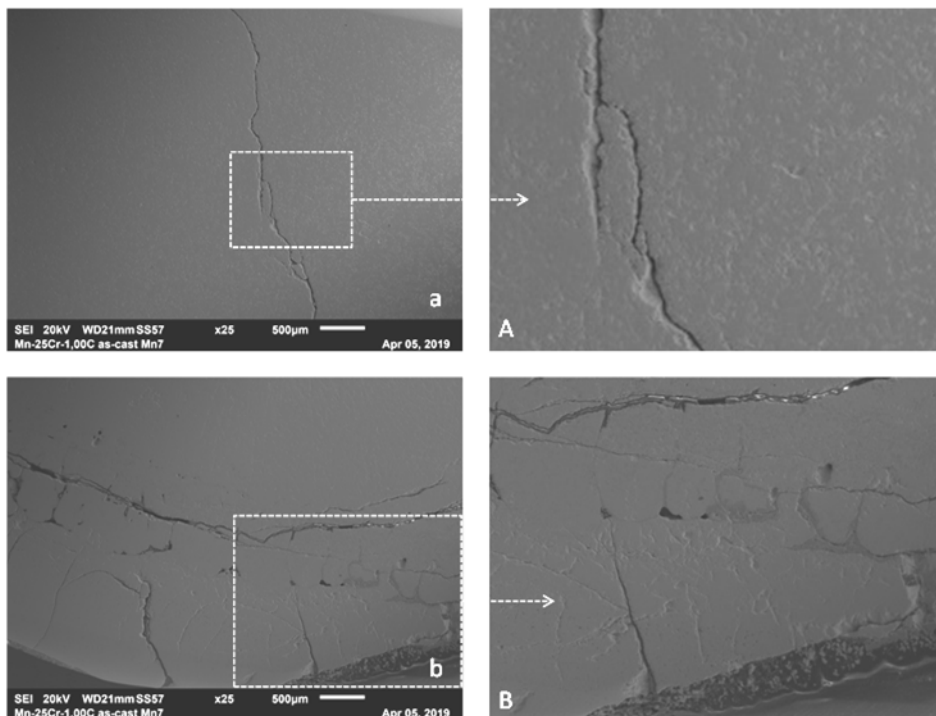


Figure 3 : Vue de la structure interne de l'alliage à 1 pds.%C à faible (a, b) et plus fort (A, B) grossissement ; a, A : fissure longue, b, B : fissure et hétérogénéités métallurgiques) (internal structure of the 1 wt.%C alloy at low magnification (a, b) and higher (A, B) magnification ; a, A: long crack, b, B: cracks and metallurgical heterogeneities)

Observations au MEB ; imagerie de la microstructure

Des microphotographies prises à différents grossissements sont présentées en Figure 4 pour l'alliage à 0,25 pds.%C, en Figure 5 pour l'alliage à 0,5 pds.%C et en Figure 6 pour l'alliage à 1 pds.%C. Les trois alliages présentent des défauts internes creux qui sont présents en plus ou moins grande densité suivant les régions des lingots. Côté microstructure, les trois alliages ont un « dénominateur commun » : le caractère biphasé de la matrice. Celle-ci est manifestement composée de deux phases distinctes se différenciant par leurs niveaux de gris. Ces niveaux de gris sont très proches et il faut forcer le contraste pour distinguer des plages plus claires et des plages plus sombres. Des carbures sont également présents. Dans l'alliage à bas carbone (0,25 pds.%C) il est difficile d'en voir. C'est plus facile pour l'alliage à 0,5 pds.%C, pour lesquels on distingue deux types, qui ont fait l'objet de pointés EDS. Grâce à la plus forte teneur en carbone de ces particules, en comparaison avec l'alliage entier, une surconcentration en carbone a pu être notée. De plus, pour les particules les plus grosses, la poire d'interaction pouvait concerner principalement la particule. En considérant alors les teneurs atomiques il est apparu que les particules plus sombres que la matrice pouvaient être des M_7C_3 (M étant un mélange de Mn et de C) et celles plus pâles que la matrice pouvaient être des $M_{23}C_6$.

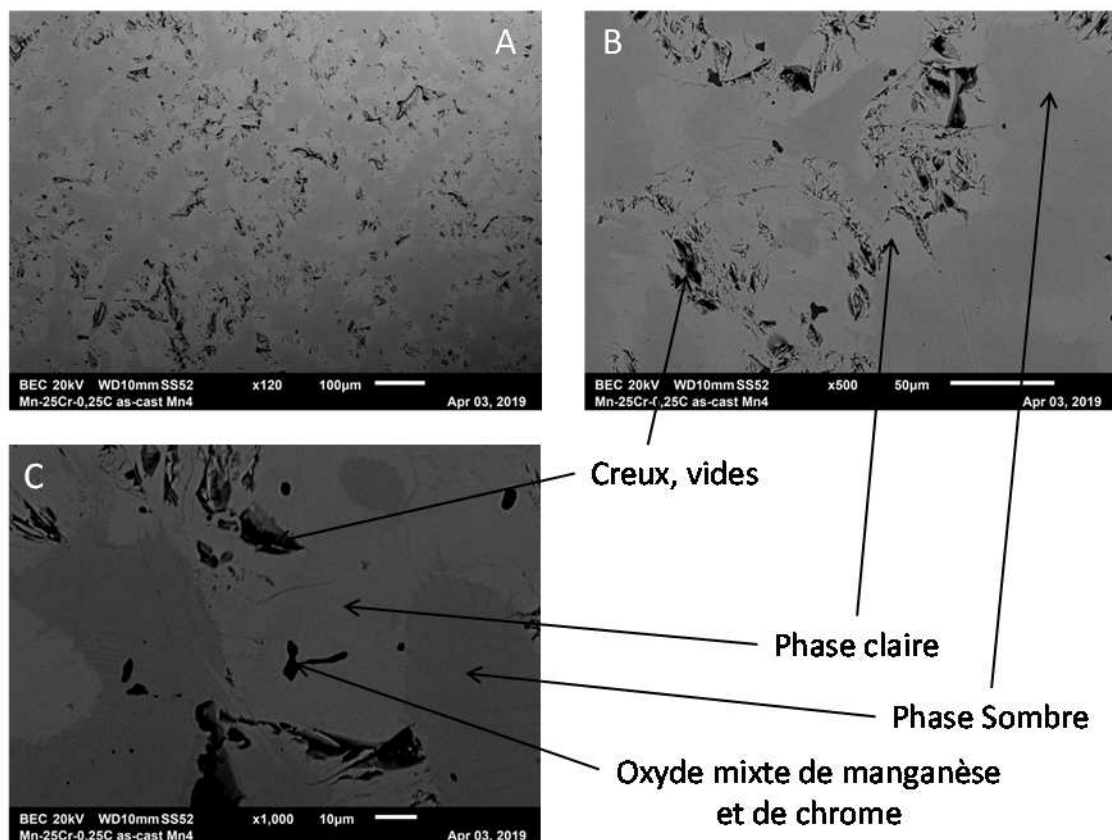


Figure 4 : Microstructure de l'alliage à 0,25 pds.%C à faible (A), moyen (B) et fort (C) grossissement ; matrice biphasée, oxydes mixtes de manganèse et de chrome, apparemment de composition $(Mn,Cr)_3O_2$, et défauts creux (microstructure of the 0.25 wt.%C alloy at low (A), medium (B) and high (C) magnification: double-phased matrix, oxides of both chromium and manganese (seemingly $(Mn,Cr)_3O_2$), and cavities/voids)

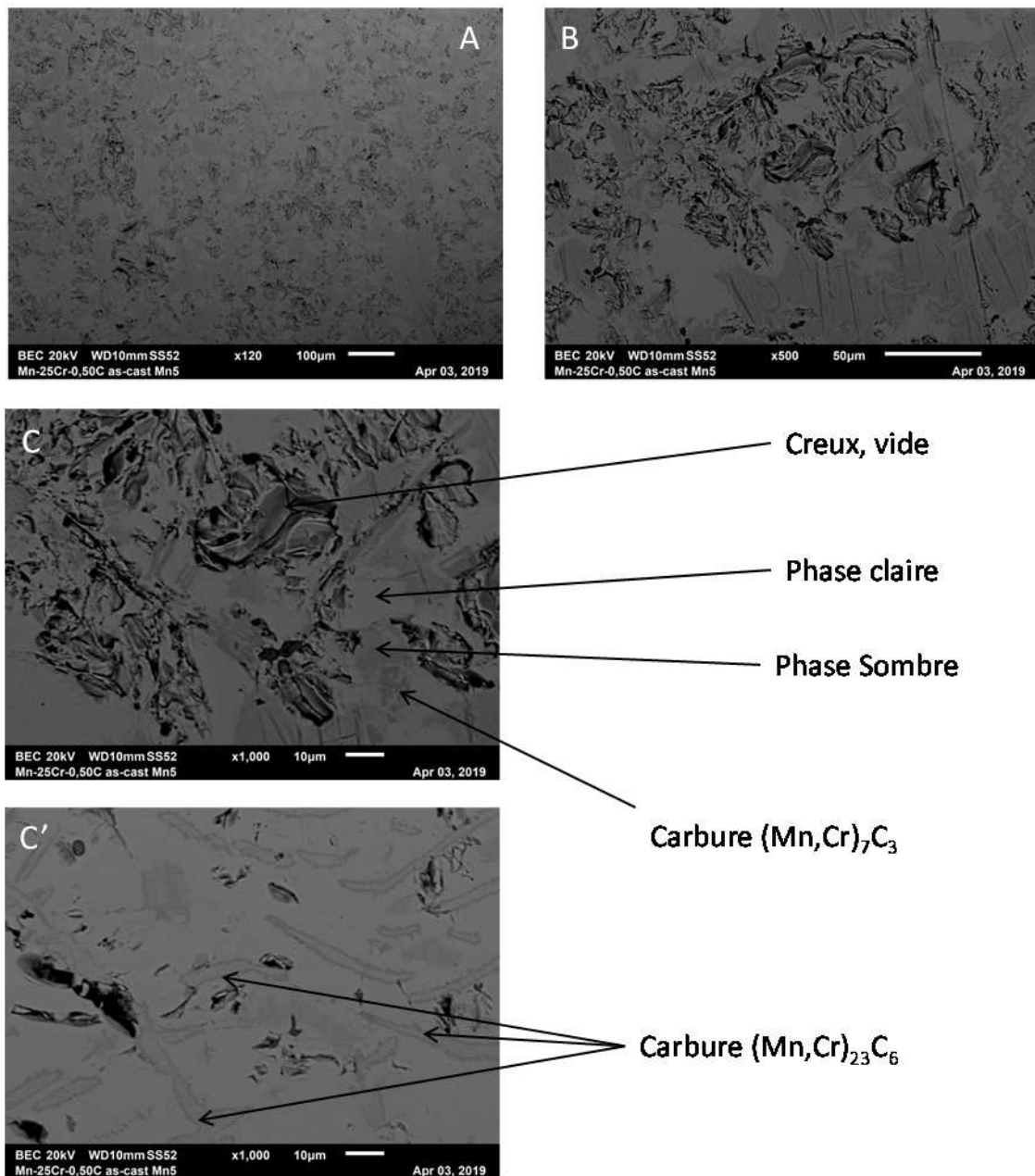


Figure 5 : Microstructure de l'alliage à 0,5 pds.%C à faible (A), moyen (B) et fort (C,C') grossissement ; matrice biphasée, défauts creux et possiblement carbures (*microstructure of the 0.5 wt.%C alloy at low (A), medium (B) and high (C,C') magnification: double-phased matrix, cavities/voids, and maybe carbides*)

Dans l'alliage le plus riche en carbone (1 pds.%C, Figure 6), les carbures sont apparemment des $(\text{Mn,Cr})_7\text{C}_3$, qui semblent former un composé eutectique avec la matrice. Ce réseau de carbures eutectiques quadrille la structure.

Analyses MEB/EDS ; composition des alliages et des phases

Les résultats d'analyse EDS globale sur les alliages ainsi que ceux des pointés sur les deux phases de matrice sont présentés dans les Tableau 1 (alliage à 0,25 pds.%C), Tableau 2 (0,5 pds.%C) et Tableau 3 (1 pds.%C).

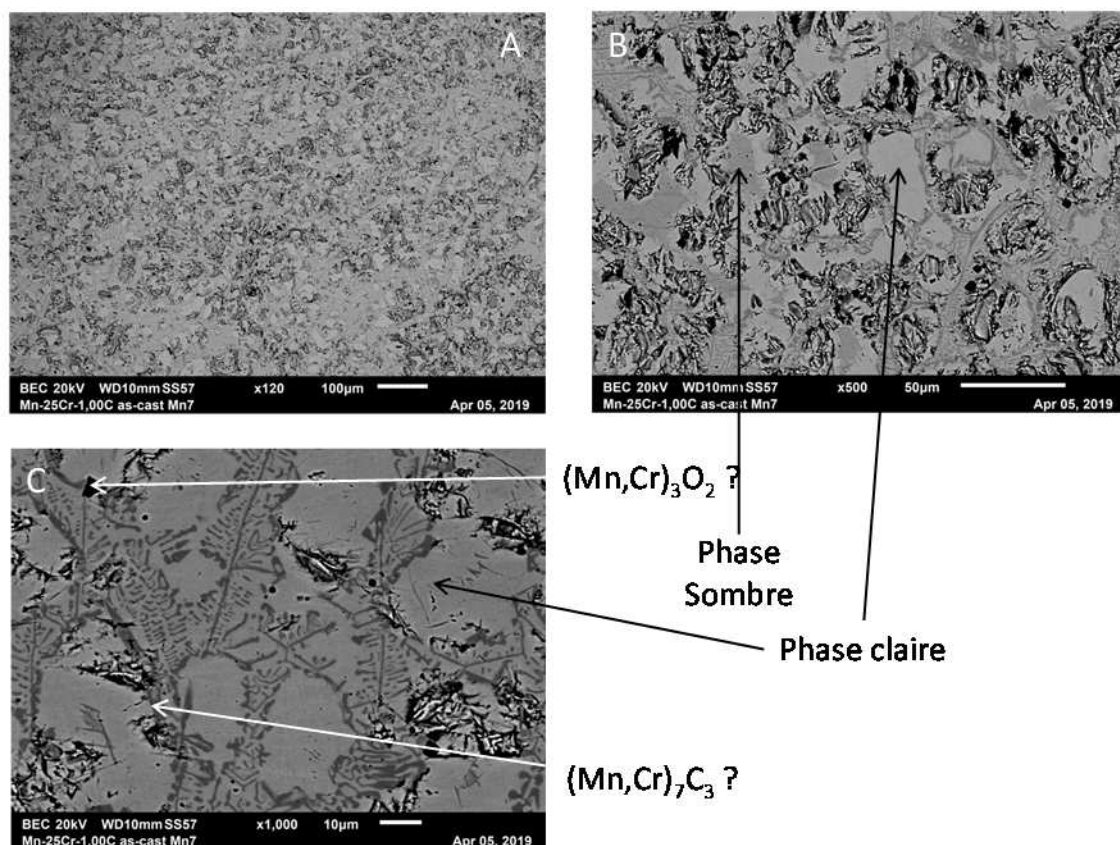


Figure 6 : Microstructure de l'alliage à 1 pds.%C à faible (A), moyen (B) et fort (C) grossissement ; matrice biphasée, oxydes mixtes de manganèse et de chrome, apparemment de composition $(\text{Mn,Cr})_3\text{O}_2$, et défauts creux (*microstructure of the 0.25 wt.%C alloy at low (A), medium (B) and high (C) magnification: double-phased matrix, oxides of both chromium and manganese (seemingly $(\text{Mn,Cr})_3\text{O}_2$), and cavities/voids*)

Les alliages sont tous les trois déficitaires en manganèse par rapport à ce qui était visé. Leurs teneurs en Mn sont autour des 71-72 pds.% contre à peu près 75 pds.% Mn visés (dépendant de la teneur en carbone) tandis que leurs teneurs en chrome sont supérieures avec 28-29 pds.% contre 25 pds.%Cr visés. Cela va dans le sens de l'évaporation du manganèse à la fusion, évoquée plus haut.

Tableau 1 / Table 1: Compositions chimiques de l'alliage à 0,25 pds.%C (5 plages $\times 250$) et des deux phases observées (5 à 9 pointés à $\times 1000$) obtenues en EDS au MEB (*chemical compositions of the 0.25wt.% alloy (5 full frames $\times 250$) and of both phases (5 to 9 spot analyses at $\times 1000$)*)

pds.% / wt.%	Mn (moyenne /average)	Mn (écart-type, / standard deviation)	Cr (moyenne /average)	Cr (écart-type / standard deviation)
Alliage / alloy	71,40	0,39	28,60	0,39
Zones claires / pale zones	72,14	0,98	27,86	0,98
Zones sombres / dark zones	66,75	1,50	33,25	1,50

Tableau 2 / Table 2: Compositions chimiques de l'alliage à 0,5 pds.%C (5 plages x250) et des deux phases observées (5 à 9 pointés à x1000) obtenues en EDS au MEB (chemical compositions of the 0.5wt.% alloy (5 full frames x250) and of both phases (5 to 9 spot analyses at x1000))

pds.% / wt.%	Mn (moyenne /average)	Mn (écart-type, /standard deviation)	Cr (moyenne /average)	Cr (écart-type/ standard deviation)
Alliage / alloy	70,85	0,46	29,15	0,46
Zones claires / pale zones	72,25	1,07	27,75	1,07
Zones sombres / dark zones	66,36	2,00	33,64	2,00

Tableau 3 / Table 3: Compositions chimiques de l'alliage à 1 pds.%C (5 plages x250) et de sa matrice (> 10 pointés à x1000) obtenues en EDS au MEB (chemical compositions of the 1wt.% alloy (5 full frames x250) and of its matrix (> 10 spot analyses at x1000))

pds.% / wt.%	Mn (moyenne /average)	Mn (écart-type, /standard deviation)	Cr (moyenne /average)	Cr (écart-type/ standard deviation)
Alliage / alloy	71,60	0,58	28,40	0,58
Zones claires / pale zones	75,77	3,76	24,23	3,76

Les zones claires sont apparemment plus riches en Mn (plus de 72 pds.%) et plus pauvres en Cr (24-28 pds.%) que les alliages, tandis que les zones sombres sont plus pauvres que les alliages en Mn (66-67 pds.%) et plus riches qu'eux en Cr (33-34 pds.%). Ceci explique l'ordre des niveaux de gris entre les zones claires et les zones sombres, le manganèse étant de numéro atomique d'un point supérieur au chrome (et masse atomique supérieure de trois points).

Calculs thermodynamiques

Le système ternaire Mn–Cr–C n'étant pas présent dans les bases de données fournies dans la version N de Thermo-Calc, des calculs ont été faits simplement sur le binaire Mn–Cr. Ces résultats peuvent cependant être utiles pour comprendre la constitution de la matrice, du moins pour celui des trois alliages qui est à très faible teneur en carbone. A ainsi été obtenu la portion {0,15–0,45 pds.%Cr × 800–1700K} du diagramme binaire Mn–Cr. On voit déjà que les liquidus et solidus des alliages binaires ayant les compositions des matrices des alliages ternaires de cette étude (zone rectangulaire grisée) sont de l'ordre de 1650K et 1600K respectivement, soit d'un peu moins de 1400°C. L'obtention réussie de ces alliages à l'état liquide et leur maintien dans cet état s'explique par ces températures raisonnablement élevées pour les capacités du four à induction hautes fréquences utilisé.

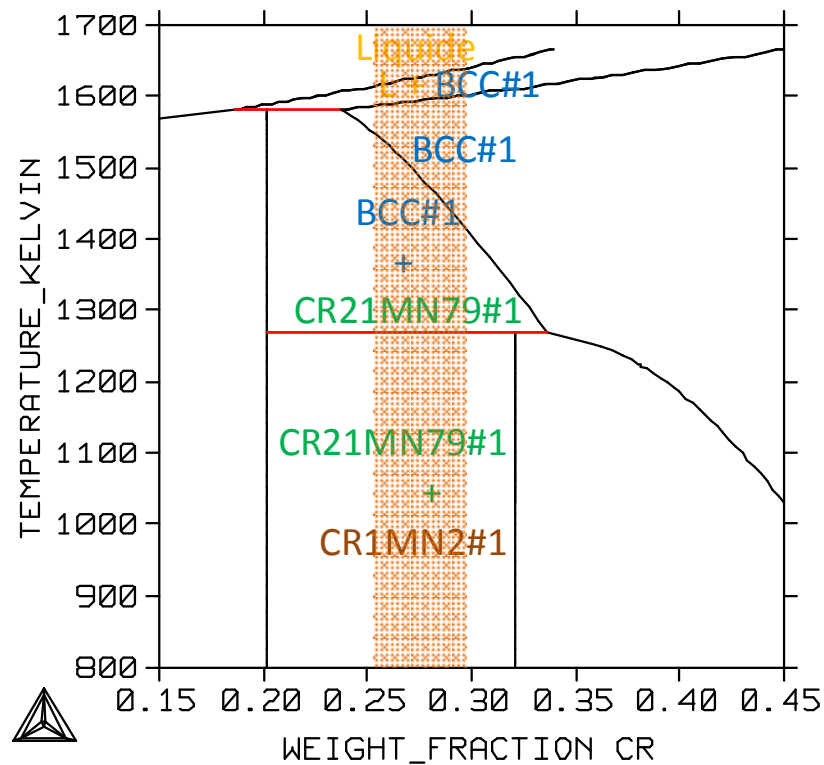


Figure 7 : Portion d'intérêt du diagramme Mn-Cr binaire calculé avec Thermo-Calc
(area of interest of the binary Mn-Cr diagram computed by Thermo-Calc)

Par ailleurs, ces calculs prévoient que la constitution des alliages binaires de même compositions que les matrices des alliages ternaires de cette étude implique deux composés intermétalliques, $Mn_{79}Cr_{21}$ et Mn_2Cr , qui auraient donc des teneurs massiques en Mn et Cr de pratiquement 80 pds.% Mn – 20 pds.% Cr, et 68 pds.% Mn – 32 pds.% Cr, respectivement. La deuxième composition chimique ressemble bien à celle de la phase sombre, mais la première est assez éloignée de celle de la phase claire.

Dans l'hypothèse où cette correspondance {phase sombre ↔ intermétallique Mn_2Cr } et {phase claire ↔ intermétallique $Mn_{79}Cr_{21}$ } puisse être considérée comme malgré tout acceptable, et dans l'hypothèse aussi selon laquelle la structure calculée pour 800K (527°C) reste figée lors du refroidissement jusqu'à l'ambiante (diffusion de moins en moins facile pour Mn et Cr quand la température devient de plus en plus basse et refroidissement de plus assez rapide jusqu'au bout en raison de la faible masse des lingots et du contact avec le creuset froid), on aurait donc des alliages dont la matrice serait constituée de composés intermétalliques qui, en tant que tels, sont durs et cassants à température ambiante. Ceci expliquerait la difficulté rencontrée pour la découpe des lingots et l'état de fissuration de ces derniers.

Concernant l'effet du carbone sur la microstructure, à l'aide du diagramme binaire Mn-Cr on peut essayer d'imaginer les microstructures théoriques des alliages ternaires au fur et à mesure d'un accroissement en carbone. Les compositions des trois alliages se retrouvant vers 28–29 pds.% Cr du fait de la perte en manganèse à l'élaboration, l'alliage à 0,25 pds.% Cr peut avoir sa matrice biphasée qui contient en moyenne la même teneur en chrome (28,6 pds.% Cr) que

l'alliage entier (aucun carbure n'a vraiment été vu dans cet alliage). Approximativement, à l'aide de la règle du bras de levier (ou règle des segments inverses) appliquée à la partie basse température du diagramme de la Figure 7, cela donnerait, en masse, à peu près 1/3 de $Mn_{79}Cr_{21}$ et 2/3 Mn_2Cr . C'est à peu près l'impression que l'on peut avoir en % surfacique sur les micrographies de la Figure 4 (on suppose que les masses volumiques des deux intermétalliques ou des deux phases de matrice sont équivalentes).

Lorsque la teneur en carbone est doublée (deuxième alliage), puis quadruplée (troisième alliage), les carbures de chrome deviennent de plus en plus présents et leur formation prive la matrice d'une partie du chrome de l'alliage. Par exemple, en supposant que la totalité du carbone de l'alliage Mn-25(en fait 28,4)Cr-1C est impliquée dans la formation des de Cr_7C_3 cela ferait $[(7 \times 52 \text{ g.Mol}^{-1}) / (3 \times 12 \text{ g.Mol}^{-1})] \times 1 \text{ pds.\%} \approx 10 \text{ pds.\% Cr}$ des 28,6 pds.%Cr de l'alliage qui seraient impliqués dans les carbures. Ce n'est pas autant car, d'une part, une partie du carbone peut aussi rester en solution solide dans la matrice, et d'autre part, des atomes Mn sont également présents dans les carbures M_7C_3 . En regardant sur le diagramme de la Figure 7 l'effet possible d'une telle baisse en Cr pourrait être un rapprochement de la teneur en chrome de la matrice vers l'intermétallique « de gauche » ($Mn_{79}Cr_{21}$) au détriment de celui de « droite » (Mn_2Cr). En passant de la Figure 4, à la Figure 5 puis à la Figure 6, il semble qu'en effet la phase sombre se réduise au profit de la phase claire.

Dureté des alliages

Chaque alliage a fait l'objet d'indentation Vickers sous 10 kg de charge, à raison d'une dizaine pour chaque. Les résultats, présentés dans le Tableau 4. Tous les alliages présentent une grande dureté. Avec environ $500H_{V10kg}$, l'alliage à 0,25 pds.%C présente le niveau de dureté d'un superalliage base cobalt assez chargé en carbures. En doublant la teneur en carbone, avec des carbures devenus visibles on atteint $800H_{V10kg}$, dureté d'un acier martensitique adouci par un revenu de trempe. La dureté de l'alliage Mn-25Cr-1Cr (pds.%, visées) dépasse les $1000H_{V10kg}$, et est de fait du niveau de celle de la cémentite. Ces hautes duretés, à l'origine des quelles on trouve la constitution de la matrice faisant intervenir deux intermétalliques, et aussi un réseau de carbures plus ou moins dense, expliquent la grande difficulté de découpe et la très faible ténacité de ces alliages.

Tableau 4 / Table 4: Valeurs des duretés Vickers sous 10kg de charge obtenues à partir d'une petite dizaine d'indentations sur les échantillons métallographiques des trois alliages (H_{V10kg})
hardness values issued from about ten Vickers indentations (applied load: 10 kg) performed on the three alloys)

Dureté Vickers / Vickers hardness	Valeur minimale / lowest value	VALEUR MOYENNE/ AVERAGE VALUE	Ecart-type / standard deviation	Valeur minimale / highest value
0.25 pds.%C (0.25 wt.%C)	442	516	48	585
0.5 pds.%C (0.5 wt.%C)	681	791	65	847
1 pds.%C (1 wt.%C)	1018	1046	32	1097

Conclusion

Les alliages ternaires basés sur le manganèse, contenant vers 25–30 pds.% de chrome et du carbone avec des teneurs dignes d'aciers au carbone mi-durs et durs ou de superalliages dont la résistance au fluage à haute température repose sur un réseau interdendritique de carbures, sont très durs et très cassants. Leur microstructure est intéressante à étudier mais elle ne l'a été ici que par microscopie électronique à balayage et spectrométrie de dispersion d'énergie. Elle devra se poursuivre par, au minimum, des analyses par diffraction des rayons X tandis que les compositions chimiques, des carbures en premier lieu, pourront être avantageusement précisées par des pointés à la microsonde de Castaing. Une base de données dans laquelle le système Mn–Cr–C et ses sous-systèmes seraient mieux décrits permettrait de mieux connaître les séquences de solidification de ces alliages. Ce travail est donc à considérer comme étant une pré-étude et demande à être approfondi.

Remerciements

Les auteurs remercient Monsieur Erwan Etienne de l'Institut Jean Lamour pour son assistance lors des essais de dureté.

Bibliographie

- [2020Berthod] Berthod, P. Etude locale du système Mn–Cr par calcul thermodynamique et par l'élaboration d'un alliage suivie de son étude métallographique. HAL-02538447 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02538447>
- [2017Stan-Glowinska] Stan-Glowinska, K.; Litynska-Dobrzynska, L.; Rogal, L. Influence of Fe addition on the formation of a quasicrystalline phase in bulk Al-rich Al-Mn base alloys. *Materials Characterization*, Volume128, Pages203-208 (2017)
- [2012Khakbaz] Khakbaz, F.; Kazeminezhad, M. Strain rate sensitivity and fracture behavior of severely deformed Al-Mn alloy sheets. *Materials Science & Engineering, A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, Volume532, Pages26-30 (2012)
- [2006Yang] Yang, Zhenguo; Singh, Prabhakar; Stevenson, Jeffrey W.; Xia, Guan-Guang. Investigation of modified Ni-Cr-Mn base alloys for SOFC interconnect applications. *Journal of the Electrochemical Society*, Volume153, Issue10, PagesA1873-A1879 (2006)
- [2004Zhang] Zhang, Y. S.; Zhu, X. M.; Zhong, S. H. Effect of alloying elements on the electrochemical polarization behavior and passive film of Fe-Mn base alloys in various aqueous solutions. *Corrosion Science*, Volume46, Issue4, Pages853-876 (2004)
- [1999Oikawa] Oikawa, K.; Sumi, S. -I.; Ishida, K. The effects of addition of deoxidation elements on the morphology of (Mn,Cr)S inclusions in stainless steel. *Journal of Phase Equilibria*, Volume20, Issue3, Pages215-223 (1999)
- [1993Mukherjee] Mukherjee, D.; Chidambaram, K. Antifouling properties of copper-manganese alloys. *Tool & Alloy Steels*. Volume27, Issue9, Pages287-289 (1993)

[1993Thermo-Calc]Thermo-Calc version N: Foundation for Computational Thermodynamics, Stockholm, Sweden, Copyright (1993, 2000)

[1988Kerney] Kerney, U.; Krueger, J. Studies on the strength and structure of manganese-base alloys. Metall (Isernhagen, Germany), Volume42, Issue10, Pages972-977 (1988)

[1978Barton] Barton, J.; Wieser, E. Investigation of magnetic preferred directions in an iron-manganese base alloy. Physica Status Solidi A: Applied Research, Volume45, Issue2, PagesK105-K108 (1978)

[1942Krainer] Krainer, H.; Mirt, O. The diagram of state of nitrogen-containing chromium and chromium-manganese steels. Archiv für das Eisenhüttenwesen, Volume15, Pages467-472 (1942)



Work Written @ Home

Pont à Mousson, le 13 avril 2020