



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/19783>

To cite this version :

Alexis VAUCHERET, Cécile NICOLI, Jean-François CARTON, Philippe JACQUET - Influence des paramètres process sur la formation des céroxides dans les aciers moulés faiblement alliés - Tech News Fonderie n°11, p.31-37 - 2019

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Influence des paramètres process sur la formation des céroxides dans les aciers moulés faiblement alliés

Alexis VAUCHERET^{1,2},
Cécile NICOLI^{1,2,3}, Jean-François
CARTON³ et Philippe JACQUET^{1,2}



Figure 1 - Vue de dessus d'un défaut de céroxide.



Figure 2 - Coupe d'une pièce en acier dans une zone ne présentant pas de céroxide (MEB - détecteur BSE).

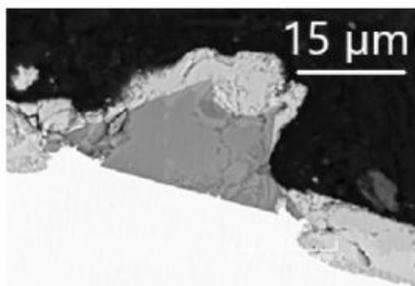


Figure 3 - Coupe d'une pièce en acier dans un céroxide (MEB - détecteur BSE).

>>> RÉSUMÉ

Les céroxides sont des défauts de surface causés par une réaction métal-moule au cours du processus de coulée des aciers. Ce type de défaut est localisé uniquement en peau de pièce et peut impacter une grande partie de leur surface. En revanche, ils n'affectent ni le cœur des pièces, ni leurs propriétés mécaniques. Néanmoins, les céroxides génèrent un manque de matière en surface, formant une sorte de cratère qui nécessite une opération de rechargement supplémentaire lors du parachèvement des pièces. Ce défaut est également constitué de plusieurs inclusions non métalliques contenant principalement Al, Mg, Si et O. Une analyse par cartographie EDX montre que ces éléments sont impliqués dans la réaction moule-métal. La présence de ces oxydes pourrait confirmer l'hypothèse de la réoxydation du désoxydant évoquée dans la bibliographie.

Pour mieux comprendre les conditions spécifiques de formation des céroxides, la première étape a été de trouver les conditions permettant de générer systématiquement ce défaut lors de chaque coulée. Deux modèles ayant des vitesses de remplissage différentes ont été conçus, simulés sur Quikcast et testés. Le modèle présentant une vitesse de remplissage élevée et donc un remplissage turbulent a permis la formation répétée de céroxides et a donc été utilisé lors de cette étude. Ce premier résultat montre que le mode de remplissage du moule peut être considéré comme un paramètre de premier ordre dans la formation des céroxides. Ensuite, un montage expérimental spécifique a été conçu pour caractériser ce défaut. L'analyse du défaut a principalement visé à caractériser ses dimensions, à savoir sa surface et sa profondeur.

Enfin, certains paramètres clés concernant la formation de défauts ont été déterminés, tels que la nature du désoxydant ou la quantité d'oxygène dans le moule. Certains essais en laboratoire ont permis de montrer l'influence de ces paramètres par comparaison des pièces coulées par rapport à un échantillon de référence. Cette étude a donc permis de trouver les paramètres du processus de fonderie responsables de la formation des céroxides et de proposer des améliorations permettant de réduire leur taille et leur fréquence d'apparition.

>>> INTRODUCTION

Les céroxides sont des défauts spécifiques qui apparaissent à la surface des pièces moulées en acier. Ils résultent probablement d'une réaction moule-métal conduisant à la réoxydation du désoxydant utilisé pour l'élaboration de l'acier lors du calmage. Les céroxides ressemblent à une sorte de cratère en surface des pièces (manque en matière) contenant des matériaux non métalliques. Même si les céroxides n'affectent pas les propriétés mécaniques des pièces coulées, le manque de matière induit par leur formation en surface des pièces impose une étape supplémentaire de rechargement par soudage lors du parachèvement. Cette étude a donc pour objectif de trouver des solutions pour éviter la formation des céroxides en modifiant les paramètres du processus d'élaboration des pièces en acier par fonderie.

Pour ce faire, cet article commence par un état de l'art visant à décrire les céroxides et leurs conditions de formation. Avant de tester les différents paramètres du procédé possiblement responsables de la formation des céroxides, le protocole expérimental et la méthode d'obtention des céroxides seront présentés ainsi que méthodes de caractérisation. Ensuite, les paramètres process choisis seront décrits avant de présenter les résultats de cette étude. Pour conclure, une discussion des résultats sera faite.

>>> ETAT DE L'ART

Ce défaut est situé sur la surface supérieure d'une pièce en acier moulé [1] et n'affecte ni son cœur ni ses propriétés mécaniques. Il a la forme d'un cratère circulaire avec la présence de quelques bulles à l'intérieur ou à l'extérieur comme le montre la figure 1.

Le nom céroxide vient de la contraction de deux mots anglais «ceramic-oxide» et ressemble à une large inclusion contenant des matériaux non métalliques [2-3]. Selon Campbell [2], dans le cas des aciers, les céroxides contiennent des éléments chimiques tels que Al, Mn, Si, O

Les figures 2 et 3 présentent l'examen de la coupe transversale d'une pièce en acier faiblement allié avec un microscope électronique à balayage (MEB) à l'extérieur de la zone de céroxide (fig. 2) et à l'intérieur (fig. 3).

¹ Université de Lyon, ECAM Lyon, INSA-Lyon, LabECAM, F-69005 Lyon, France

² LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech, 71250 Clunay, France

³ SAFE Metal, 1 Boulevard de la Boissonnette, 42110 Feurs, France

À l'extérieur, la surface semble très « propre », alors qu'à l'intérieur du cratère, on observe une couche épaisse de plusieurs micromètres.

Quelques analyses chimiques au moyen d'une sonde EDX ont été réalisées sur la section transversale présentée à la figure 3. Les résultats de la cartographie sont présentés aux figures 4a) à 4e). La couche supérieure est composée d'oxydes de fer et un oxyde mixte (contenant Al, Mn et Si) est piégé entre cette couche supérieure et le substrat en acier.

Contrairement à un autre défaut moule-métal connu sous le nom de « gale » qui se caractérise par une pénétration du métal à l'intérieur du moule en sable [4], les céroxides ressemblent à un manque de matière. La présence de nombreux oxydes (SiO₂, MnO, FeO, Al₂O₃) [5], semble due à une réaction chimique entre l'oxygène de l'atmosphère et les désoxydants (principalement de l'aluminium) introduits dans l'acier liquide avant la coulée [3, 6]. Mahaney [7] montre que parmi les défauts de fonderie ayant l'aspect de céroxides, environ la moitié sont liés à des produits de réoxydation. Les paramètres qui semblent donc jouer un rôle dans l'apparition d'un tel défaut selon [5, 8-9] sont la température de coulée, la vitesse de remplissage du moule, la réactivité chimique des désoxydants et l'humidité du sable de moulage.

>>> PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

MODÈLES DE FONDERIE

Un dispositif expérimental spécifique permettant de créer des modèles à vitesse de remplissage variable a été conçu pour cette étude. Il comprend la pièce où le céroxide peut apparaître (1), une masselotte (2), un entonnoir de coulée (3) et une zone de régulation du débit (4). La taille de cette dernière partie est ajustable et un filtre peut être ajouté

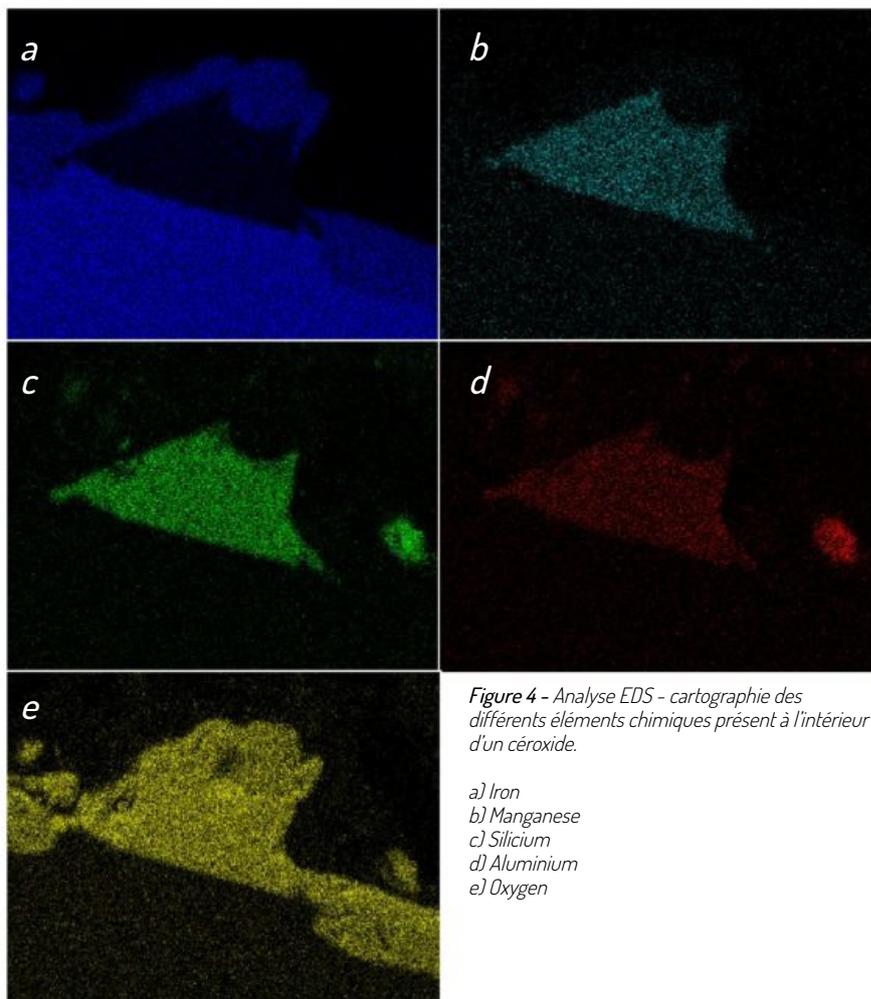


Figure 4 - Analyse EDS - cartographie des différents éléments chimiques présent à l'intérieur d'un céroxide.

- a) Iron
- b) Manganese
- c) Silicon
- d) Aluminium
- e) Oxygen

afin de tester différents débits de remplissage faisant passer le remplissage d'un mode laminaire à turbulent. La variation du débit de remplissage a été faite grâce aux changements de section des canaux d'alimentation ainsi que par la présence ou l'absence d'un filtre dans le moule. Les modèles correspondant au régime laminaire et turbulent ainsi que leurs dimensions respectives sont pré-

sentés à la figure 5. La pièce et la masselotte sont les mêmes pour les deux modèles. La masselotte a été dimensionnée pour se prémunir de la présence de retassures au sein de la pièce mesurant 80 * 80 * 40mm. Les dimensions de la pièce ont été définies de manière à avoir suffisamment de métal pour pouvoir créer une réaction en moule tout en restant à une échelle de coulée en laboratoire avec un volume de métal d'environ un litre.

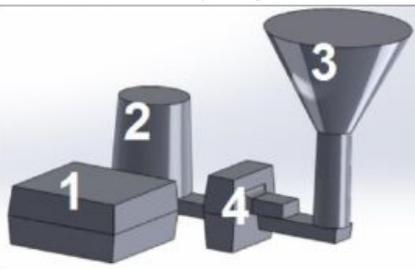
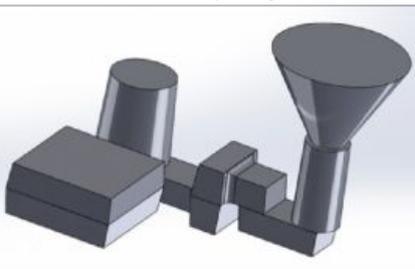
Modèle avec remplissage laminaire	Modèle avec remplissage turbulent
	
Canaux d'alimentation : 20*10 mm = 200 mm ²	Canaux d'alimentation : 30*20mm = 600 mm ²
Filtre : 20 ppi	Pas de filtre
Temps de remplissage : 2.5 seconds	Temps de remplissage : 1.1 seconds

Figure 5 - Modèles expérimentaux

Des simulations numériques utilisant le logiciel Quikcast ont été effectuées pour chaque modèle pour valider la différence de vitesse de remplissage. Les résultats sont présentés aux figures 6a et 6b. Il est possible de voir que la vitesse de remplissage est doublée avec le modèle turbulent. De plus, le modèle laminaire donne une vitesse de remplissage correspondant à celles classiquement utilisées dans les fonderies industrielles.

La première série d'essais (tests de répétabilité) a montré que les céroxides apparaissaient systématiquement en cas d'écoulements turbulents et non en cas d'écoulements laminaires. Ce phénomène a également été observé par W. S. Lyman [5] et indique que

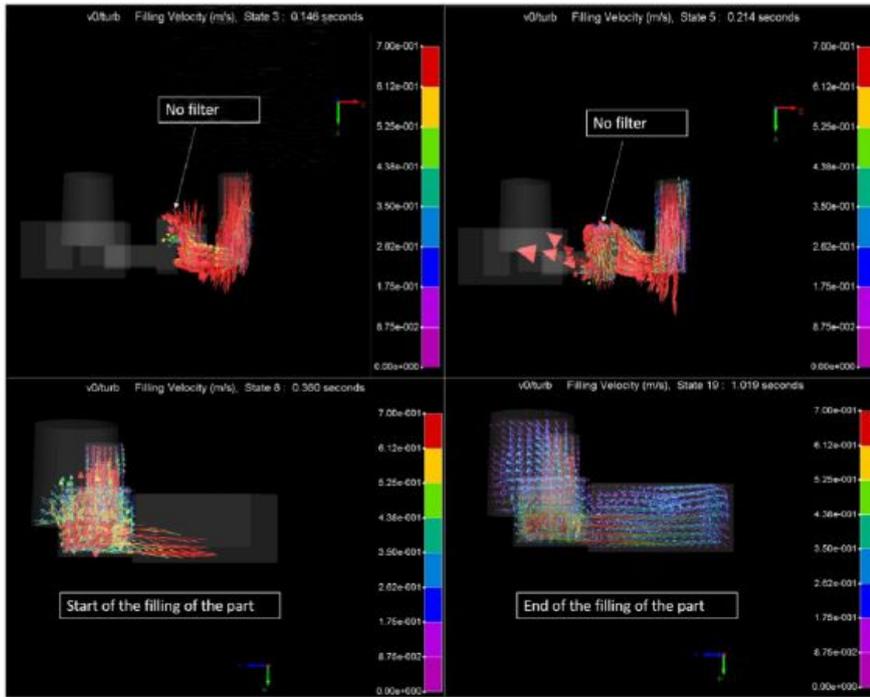


Figure 6a - Vitesse de remplissage du modèle turbulent obtenue par simulation Quikcast.

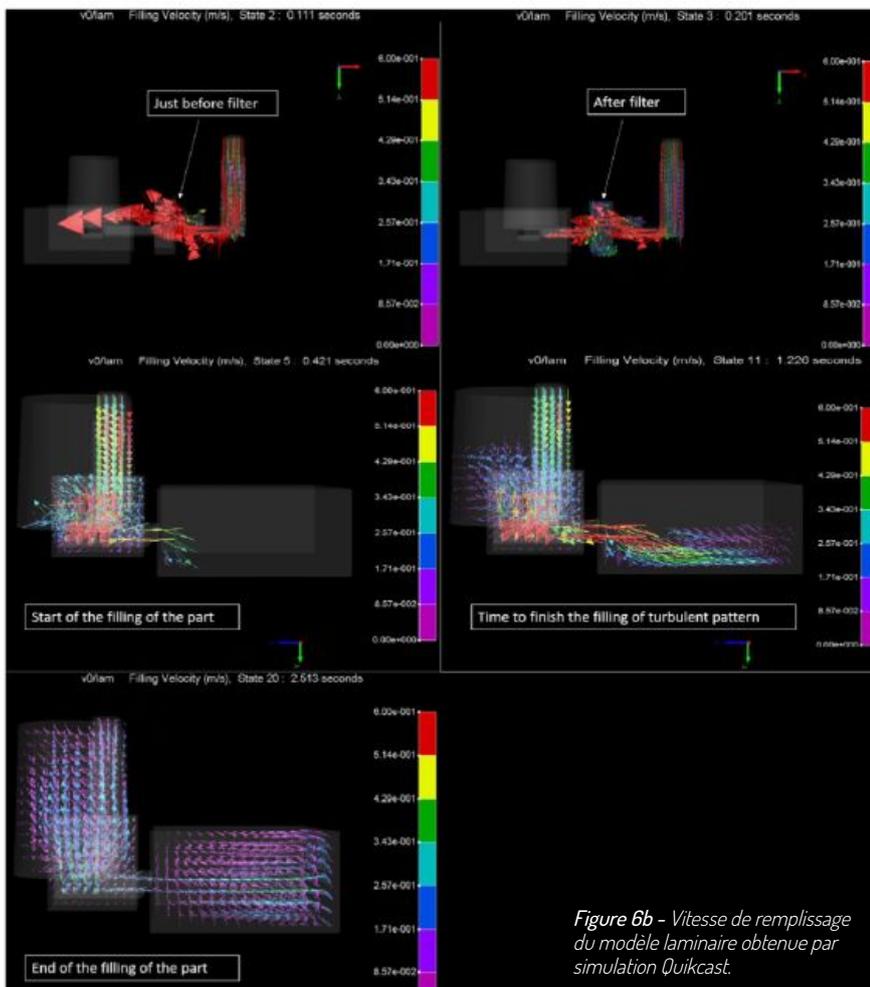


Figure 6b - Vitesse de remplissage du modèle laminaire obtenue par simulation Quikcast.

le débit est un paramètre de premier ordre. Afin de montrer l'influence d'autres paramètres sur l'apparition de céroxides, il a donc été décidé de réaliser tous les essais avec un écoulement turbulent. Au cours des cinq essais de répétabilité, la plage de surface impactée par les céroxides variait entre 10 et 82% et la profondeur entre 2 et 9 mm. La plage de variation est donc assez importante. Pour cette étude, seule la valeur la plus faible des tests de répétabilité sera considérée pour contrôler l'influence de chaque paramètre. Pour chaque paramètre testé, si les résultats donnés par la caractérisation des céroxides sont inférieurs à ces valeurs minimales, il sera considéré comme une amélioration notable par rapport aux essais de référence.

PARAMÈTRES PROCESS

Pour cette étude, l'ensemble des moules a été réalisé avec un sable vert représentatif des conditions industrielles : 80% de sable recyclé et 20% de sable neuf. De la bentonite sodique (environ 9%) et de l'eau sont ajoutées pour obtenir les caractéristiques mécaniques requises [10], qui sont mesurées avant chaque essai. Les plages de variation pour chaque paramètre du moule sont présentées dans le tableau 1.

Les fusions ont été effectuées dans un four à induction (2,5 kHz, 100 kW) à creusets amovibles en carbure de silicium. Pour chaque essai, des lingots de G20Mn5 (1.6220 dans la désignation AISI) ont été refondus : il n'y a pas eu d'élaboration d'alliage en four. La désoxydation à l'aluminium a été effectuée directement dans le creuset une fois la température de coulée de 1620 ° C atteinte. Dans cette étude, les coulées ont été effectuées directement avec un creuset amovible, c'est-à-dire sans transvasement d'alliage dans une poche.

CARACTÉRISATION DES CÉROXIDES

La caractérisation des céroxides a été faite par la mesure de sa profondeur maximale grâce à un comparateur à aiguilles de précision ± 0,1 mm et par évaluation du rapport entre sa surface et la surface totale supérieure de la pièce n° 1 sur la figure 5. La figure 7 présente le système utilisé pour mesurer la profondeur des céroxides. Pour cette caractérisation, tout le cratère a été balayé avec le comparateur et seule la valeur maximale de chaque échantillon a été conservée. Les profondeurs maximales mesurées pour chaque essai sont présentées dans les tableaux 2, 3 et 4.

Table 1 - Caractéristiques requises pour le sable à vert de moulage.

Compressibilité	Humidité	Aptitude au serrage	Dureté
[14-18] N/cm ²	[3,40 - 4,5] %	[50 - 70] %	[75 - 95] GF



Figure 7 - Dispositif de mesure de la profondeur des céroxides.

La méthode de caractérisation des céroxides peut, à première vue, sembler simple. Néanmoins, cette méthode est fiable et efficace pour l'évaluation des dimensions maximales du défaut. D'autres caractérisation du défaut telles que des mesures de rugosité et de volume ont été effectués par différentes méthodes, comme par exemple en microscopie numérique. Malheureusement, la taille des défauts était trop importante pour obtenir des résultats exploitables.

>>> PLAN D'ESSAIS

Comme défini précédemment, l'apparition de céroxide semble être due à une réoxydation de l'aluminium lors de la coulée. Pour mieux comprendre sa formation, certains paramètres du processus de fonderie ont été modifiés à chaque étape de l'élaboration de l'acier : moulage, élaboration de l'acier et coulée. De plus, tous les essais ont été effectués en ne modifiant qu'un seul paramètre à la fois. Tous les paramètres ont donc été testés indépendamment les uns des autres. L'objectif du plan d'essais est de pouvoir piloter l'apparition des céroxides de trois manières différentes :

- Changer l'élaboration de l'acier et en particulier la désoxydation. Pour ce faire, trois désoxydants différents et ne contenant pas d'aluminium ont été testés : FeSiMnCa, FeSiMg et FeSiZr. Le calcium, le magnésium et le zirconium doivent réagir avec l'oxygène et jouer le même rôle que l'aluminium [11]. La désoxydation a été effectuée à la fin du processus d'élaboration de l'acier juste avant la coulée, c'est-à-dire dans les mêmes conditions que pour l'essai de référence. La quantité de chaque désoxydant a été calculée pour obtenir la même quantité de calcium, de magnésium et de zirconium ajoutée que l'aluminium dans le cas de l'essai de référence. Cependant, ces essais reposent sur l'hypothèse que l'oxydation de l'acier est constante à chaque fusion car l'activité de l'oxygène ne pouvait être mesurée dans le bain.
- Réduire la quantité d'oxygène dans le moule pour limiter la réaction de réoxydation de l'aluminium lors de la coulée. Ce paramètre n'était pas simple à modifier car il était impossible, avec les moyens du laboratoire, de couler la pièce sous vide ou sous atmosphère inerte. Pour ce faire, le moyen le plus simple consistait à utiliser une masselotte borgne lors du moulage. La masselotte borgne permettait de limiter la quantité d'oxygène en moule. Dans cette configuration, seul l'oxygène présent dans le moule au moment du remplissage pouvait réagir avec le désoxydant. La géométrie et le module de la masselotte atmosphérique ont été conservés pour la masselotte borgne.
- Réaliser une autre réaction pendant la coulée pour consommer un

maximum d'oxygène présent dans le moule. Comme il était impossible de contrôler la quantité d'oxygène dans le moule, l'idée était de le consommer lors de la coulée par une autre réaction. De cette manière, la probabilité d'apparition de céroxide devenait plus faible. Pour ce faire, deux essais différents ont été réalisés en utilisant un combustible comme revêtement de surface du moule. Les combustibles, l'huile de lin et le fioul, sont censés brûler pendant la coulée et consommer ainsi tout l'oxygène.

>>> RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tout d'abord, les essais basés sur le changement de désoxydant ont donné des résultats hétérogènes comme le montrent la figure 8 et le tableau 2. La désoxydation au zirconium à l'aide de FeSiZr ne réduit pas la formation de céroxide: le défaut formé lors de cet essai était encore plus grand et plus profond que celui de référence. Les deux autres désoxydants (base de Ca et de Mg) appartiennent à la même colonne de la classification périodique, leur réaction de désoxydation devrait donc être plus ou moins équivalente. Néanmoins, le calcium étant plus réactif avec l'oxygène que le magnésium [11]; il est supposé avoir un meilleur rendement de désoxydation et donc réduire davantage la formation de céroxide. Les résultats semblent confirmer cette hypothèse. La désoxydation au magnésium a donné un résultat similaire à celui du test de référence, tandis que le désoxydant au calcium évite la formation de céroxide. A la vue de ces résultats, l'utilisation du magnésium comme désoxydant en fonderie industrielle présente peu d'intérêt par rapport à l'aluminium en raison de la différence de coût entre les deux produits. Enfin, la meilleure façon de désoxyder l'acier pour éviter la formation de céroxide semble être l'utilisation d'un désoxydant à base de calcium. Cependant, la désoxydation au calcium est assez difficile à maîtriser et peut être dangereuse en raison de la réactivité importante de cet élément avec l'oxygène. Désoxyder l'acier au calcium seul dans des conditions industrielles peut présenter certains risques pour sa qualité, c'est pourquoi une désoxydation mixte utilisant une combinaison d'al-

Table 2- Impact de la nature du désoxydant sur la formation des céroxides.

Numéro d'essai	Description	Surface (%)	Profondeur (mm)
0	Valeurs minimales des essais de référence	10	2
1	Désoxydant FeSiMnCa	0	0
2	Désoxydant FeSiMg	14	3,4
3	Désoxydant FeSiZr	86	3,1

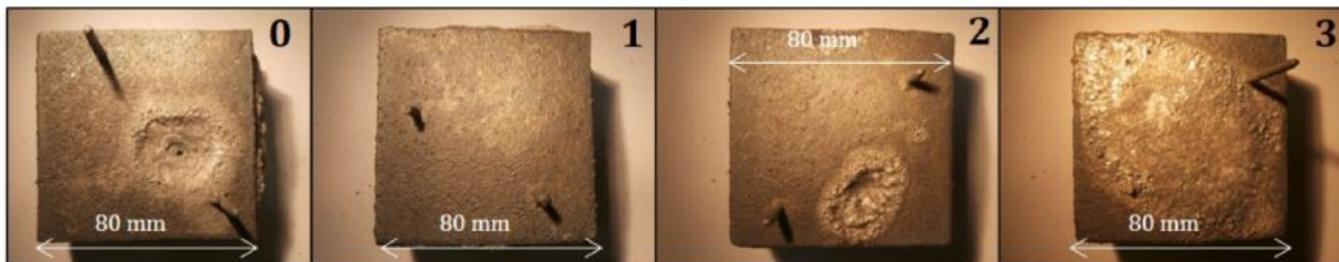


Figure 8 - Illustration de l'impact de la nature du désoxydant sur la formation des céroxides.

Table 3- Impact de la réduction de la quantité d'oxygène dans le moule par utilisation d'une masselotte borgne sur la formation des céroxides

Numéro d'essai	Description	Surface (%)	Profondeur (mm)
0	Valeurs minimales des essais de référence	10	2
4	Masselotte borgne	4,7	1

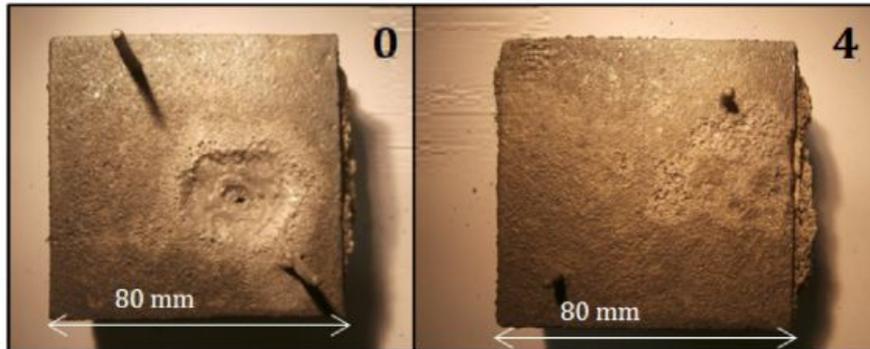


Figure 9 - Impact de la réduction de la quantité d'oxygène dans le moule par utilisation d'une masselotte borgne sur la formation des céroxides.

liage d'aluminium et une faible quantité de FeSiMnCa juste avant la coulée pourrait être la solution optimale.

Le deuxième paramètre testé dans cette étude était l'impact de la quantité d'oxygène dans le moule capable de réagir avec l'aluminium. Pour faire varier ce paramètre, une modification du moule a dû être réalisée en utilisant une masselotte borgne au lieu d'une masselotte débouchante afin d'éviter un contact permanent entre le métal et l'air ambiant pendant la coulée. Comme attendu, cette solution a donné de bons résultats même si la limitation du débit d'air dans le moule n'était pas suffisante pour éliminer le céroxide (voir tableau 3). La masselotte borgne a permis de réduire à la fois la surface affectée par le céroxide et la profondeur du défaut. Cette

solution est déjà très largement utilisée dans la plupart des fonderies et ne pourrait donc pas être la seule réponse à apporter pour supprimer l'apparition des céroxides. Néanmoins, cette expérience met en évidence le rôle de l'oxygène dans la réaction moule-métal à l'origine du défaut. La figure 9 présente les pièces obtenues lors de cet essai. Le céroxide ressemble ici plus à un défaut classique de peau de pièce de fonderie qu'à un cratère comme décrit précédemment.

Pour terminer cette étude, certains revêtements de surface ont été utilisés dans les moules pour consommer l'oxygène par combustion lors de la coulée de métal. La chaleur générée lors de la coulée devrait alors réagir avec le combustible et ainsi réduire la quantité d'oxygène dans le moule. Deux combustibles

Table 4- Impact du changement d'atmosphère sur la formation des céroxides.

Numéro d'essai	Description	Surface (%)	Profondeur (mm)
0	Valeurs minimales des essais de référence	10	2
5	Huile de lin	28	5,3
6	Fioul	3	0,9



Figure 10 - Impact du changement d'atmosphère sur la formation des céroxides.

ont été choisis en raison de leurs besoins en air différents pour la combustion: l'huile de lin et le fioul. Le changement d'atmosphère en moule est habituellement utilisé pour améliorer la rugosité des pièces [12], en particulier en utilisant de l'huile de lin ou du graphite. Pour chaque essai, il a été possible de noter l'apparition d'un céroxide dont la surface et la profondeur étaient variables pour chaque échantillon (voir tableau 4 et figure 10). Le revêtement d'huile de lin ne diminue ni la taille, ni la profondeur du défaut par rapport à la référence. Néanmoins, ce revêtement améliore la rugosité de surface de l'échantillon sur la surface non affectée par le céroxide, comme vu dans la bibliographie [12].

Le revêtement de fioul a donné des résultats prometteurs car il diminue de manière conséquente la taille et la profondeur du défaut. Cependant, son utilisation dans un contexte industriel semble être difficile à mettre en oeuvre en raison des règles de sécurité (combustion, dégagement gazeux...). En effet, le fioul brûlait lors de la coulée du métal et des flammes étaient donc visibles au sommet du moule. Il est possible de supposer qu'une partie importante de l'oxygène présent dans le moule a été consommée pour la combustion du fioul et n'a donc pas pu réagir avec l'aluminium.

>>> CONCLUSION

Tout d'abord, cette étude permet de mettre en évidence le paramètre d'ordre 1 concernant la formation de céroxide à savoir la vitesse de remplissage. Un remplissage laminaire est conseillé pour réduire la probabilité d'apparition des céroxide. Cependant, si la vitesse de remplissage est trop importante et génère un écoulement turbulent alors des céroxides se formeront. Ainsi, la conception de la pièce doit être validée par simulation et un contrôle du débit par l'ajout d'un filtre ou d'un régulateur est option pertinent pour limiter l'apparition du défaut. Un complément à cette étude pourrait être la détermination du débit de remplissage critique générant systématiquement des céroxides.

Ensuite, certains paramètres ont été testés pour trouver un moyen de réduire les céroxides par des méthodes simples et également pour vérifier l'hypothèse de leur formation. Certains résultats semblent vraiment prometteurs et pourraient faire l'objet d'une enquête plus approfondie. Vingas [3] et Lyman [5] ont supposé que la formation de céroxides était due à une réaction moule-métal entre l'oxygène et l'aluminium utilisé pour désoxyder l'acier. Certains résultats semblent confirmer cette hypothèse et montrer le rôle prépondérant de ces deux éléments. Certaines variations de processus, principalement sur la quantité d'oxygène dans le moule, permettent la réduction de la surface et de la profondeur du défaut par l'utilisation d'une masselotte borgne ou d'un revêtement combustible sur le sable vert. Changer l'atmosphère du moule pour réduire la quantité d'oxygène par combustion semble être l'axe de recherche le plus prometteur à explorer. Néanmoins, les règles de sécurité en milieu industriel pourraient être un frein à l'utilisation de ce type de revêtement. Le meilleur moyen de confirmer le rôle de l'oxygène dans la formation des céroxides serait de couler des pièces en atmosphère inerte à l'aide d'argon ou d'azote et de vérifier l'absence de défaut.

Les moyens du laboratoire de fonderie d'Arts et Métiers ParisTech Cluny n'ont pas permis

de réaliser ce type d'essais dans le cadre de cette étude.

Enfin, des paramètres d'élaboration de l'acier ont été modifiés pour montrer l'impact de la nature du désoxydant sur la formation des céroxides en utilisant un désoxydant à base de zirconium, de magnésium et de calcium en fin de fusion. Les résultats décrits étant relativement hétérogènes, il est difficile de définir une tendance. Les désoxydants contenant du zirconium ou du magnésium ont donné les mêmes résultats (ou pire) que ceux contenant de l'aluminium. Ces éléments peuvent également réagir avec l'oxygène lors de la coulée et former ainsi des céroxides. La réaction moule-métal semble être la même quel que soit le désoxydant utilisé.

Le désoxydant à base calcium a donné les meilleurs résultats de cette étude en éliminant complètement le défaut. En considérant le diagramme d'Ellingham, le calcium devrait réagir avec l'oxygène comme l'aluminium, le zirconium ou le magnésium et participer ainsi à la formation de céroxides. L'absence de céroxide pourrait s'expliquer par le faible rendement d'addition lors de l'ajout du calcium en raison de sa forte réactivité avec l'oxygène. Cette faible quantité de calcium dans l'acier pourrait suffire à le désoxyder tout en diminuant fortement la quantité de calcium résiduel capable de réagir avec l'oxygène.

>>> REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier la société Safe Metal pour son soutien technique et financier tout au long de cette étude

Références

- [1] Ladles and linings regarding cerroxides (1968), CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie), Report N°1752 (in French).
- [2] Campbell J. (2015), Complete Casting handbook (Second Edition), Chapter 6.
- [3] Vingas G.J., Zrimsek A.H. (1965), US Patent n°3216078 A, Process for casting steel and compositions of matter for use therein.
- [4] Colbaut A., & Beauvais, P. (2005), Metal penetration in cast iron massive parts poured in resin-binded sand, Fonderie, Fondateur d'aujourd'hui, N°250, p.38-46 (in French).
- [5] Lyman W.S., Boulger F.W., Briggs C.W. (1963), Character and source of the cerroxide defect on steel castings, transactions of the American Foundrymen's Society, V71, p.358-368.
- [6] Beeley P. (2001), Defects in castings, Foundry Technology, 2nd Edition, p239-318.
- [7] Mahaney J.K. (1999), Advances in the production and use of steel with improved internal cleanliness, ASTM.V.
- [8] V. Chaume, Internship Report, made with SAFE Metal for ESFF master degree, 2008 (in French).
- [9] Belding P. (1971), The control of non-metallic inclusions in cast steel, thesis for the degree of Master of Science, Oregon State University.
- [10] Cuenin P. (1994), Molding and Core Making, Techniques de l'Ingénieur, Report M3512 (in French)
- [11] Datta P.K., Du H.L., Burnell-Gray J.S. and Ricker R.E. (2005), Corrosion: Materials, Volume 13B, ASM Handbook, ASM International
- [12] Desbordes M. (1930), The patternmaker, Eyrolles edition (in French).

[Lien vers l'article en anglais \(pdf\)](#)

Modernisez votre outil de production et gagnez en productivité

Spécialisée dans la conception et la réalisation de projets pour la fonderie, SCOVAL est une société française qui fabrique et commercialise des produits intégrables à votre process.

- Malaxer
- Mouler
- Automatiser
- Contrôler
- Intégrer
- Robotiser
- Refroidir

SCOVAL
fondarc.

TEL 33 (0)2 38 22 08 12
Mail : contact@scoval.fr
www.scoval.fr • www.fondarc.com

GIFA
STAND 17B53

f in YouTube