

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Revêtements pour l'élimination des galettes de calamine à la surface des mandrins du laminoir Steckel de Sidbec-Dosco

Moreau, C.; Bélanger, S.

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

Publisher's version / Version de l'éditeur:

<https://doi.org/10.4224/40003103>

*Série (Conseil national de recherches Canada. Institut des matériaux industriels);
n° IMI93RT-24500-1540-G, 1993-07*

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=10e9c0bc-5aac-414a-a2ac-b8cbf91b5d7f>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=10e9c0bc-5aac-414a-a2ac-b8cbf91b5d7f>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.



Conseil national de recherches
Canada

National Research Council
Canada

Institut des
matériaux industriels

Industrial Materials
Institute

75, de Mortagne
Boucherville (Québec)
J4B 6Y4

75 de Mortagne
Boucherville, Québec
J4B 6Y4

CNRC-NRC

Revêtements pour l'élimination des galettes de calamine à la surface des mandrins du laminoir Steckel de Sidbec-Dosco

C. Moreau et S. Bélanger

Institut des matériaux industriels
Section métaux et céramiques

IMI93RT-24500-1540-G

CNRC 36638

Juillet 1993

Sommaire

Durant les opérations de laminage à chaud de tôles d'acier (laminoir Steckel), celles-ci sont bobinées alternativement sur deux mandrins situés de part et d'autre des cylindres de laminage. La calamine formée à la surface des tôles d'acier chaudes a tendance à adhérer à la surface des mandrins et s'y accumuler en formant des galettes épaisses qui peuvent éventuellement s'incruster dans les tôles laminées. Ces inclusions engendrent des défauts de surface inacceptables aux extrémités des tôles.

Une des solutions envisagées pour résoudre ce problème consiste en l'application d'un revêtement à la surface des mandrins pour réduire l'adhérence de la calamine et ainsi éviter qu'elle s'y accumule. Le but du présent travail était d'évaluer l'adhérence de la calamine portée en contact à haute température avec 16 différents revêtements projetés par plasma. Les tests étaient effectués sur des échantillons de faibles dimensions chauffés sous air à 925°C sur lesquels un bloc d'acier doux couvert de calamine était appuyé pendant 2 minutes. La quantité de calamine transférée durant la période de contact était ensuite mesurée. Parmi l'ensemble des revêtements testés, la céramique réfractaire Al_2O_3 SiO_2 (mullite) a montré le meilleur comportement vis-à-vis de la calamine (adhérence minimale).

Des échantillons revêtus de mullite appliquée sur différentes sous-couches métalliques ont montré une délamination importante de la céramique après exposition à haute température. Durant les mêmes tests, on a pu constater que la protection contre l'oxydation apportée par les différentes sous-couches métalliques était significative laissant entrevoir une plus grande durabilité des mandrins revêtus. Pour éviter la délamination de la mullite, il est proposé d'utiliser un revêtement composite de mullite dans une matrice métallique MCrAlY (M = Ni, Co, etc.) comme sous-couche ou comme couche finale. Ce revêtement obtenu à partir d'un mélange des poudres correspondantes permettrait de maintenir une bonne protection contre l'oxydation tout en présentant une bonne résistance à l'usure et aux chocs mécaniques.

1. Introduction

Durant les opérations de laminage à chaud de tôles d'acier, la calamine formée à la surface des tôles peut adhérer et s'accumuler sur la surface des mandrins du laminoir formant des galettes dont l'épaisseur peut atteindre quelques millimètres. Ces galettes peuvent se décoller du mandrin et adhérer à la tôle où elles s'y incrustent profondément lors des étapes successives de laminage. Ce problème et ses conséquences économiques sont décrits en détail dans le document "Accumulation de calamine à la surface des mandrins du Laminoir Steckel de Contrecoeur: Définition du problème" par Normand Couture, Sidbec-Dosco, Juin 1990.

Une des solutions envisagées pour résoudre ce problème consiste en l'application d'un revêtement à la surface du mandrin pour réduire l'adhérence de la calamine et ainsi éviter qu'elle s'y accumule. Le revêtement utilisé devrait résister à l'oxydation et la corrosion à la température d'utilisation, résister à l'impact de la tôle d'acier et présenter une bonne résistance à l'usure due au glissement entre la tôle et le mandrin.

En 1988, un mandrin neuf a été revêtu d'une couche céramique par projection par plasma. Le revêtement était composé d'une sous-couche métallique (Ni-Cr-Al) sur laquelle le revêtement céramique était appliqué (Metco 143: $ZrO_2 + 18\% TiO_2 + 10\% Y_2O_3$). Ce premier essai fut décevant, la formation des galettes de calamine étant plus rapide sur le revêtement que sur un mandrin non-revêtu. Cependant, ce mandrin a eu une vie utile record de 1,000,000 tonnes ce qui représente un accroissement de 20% par rapport au record précédent. Cet accroissement résulte probablement de la protection accrue apportée par le revêtement.

Les dimensions des mandrins étant importantes (la surface à revêtir est d'environ 75 pi^2), les coûts liés à l'application de plusieurs revêtements pour effectuer les tests d'adhérence de la calamine seraient énormes. Il a donc été décidé d'effectuer des essais en laboratoire sur des échantillons de dimensions restreintes (environ 1 po^2). Si, lors de cette série de tests, certains revêtements montraient un potentiel intéressant pour empêcher l'accumulation de calamine, un ou quelques mandrins pourraient alors être recouverts et testés directement en usine.

Le travail décrit dans le présent rapport visait donc à évaluer le comportement de la calamine portée en contact avec différents revêtements projetés par plasma. Les échantillons revêtus et une pièce d'acier doux étaient chauffés et pressés l'un contre l'autre dans des conditions similaires à celles rencontrées dans le laminoir à chaud. Les pièces étaient ensuite séparées et la quantité de calamine adhérant au revêtement était mesurée. De plus, des tests visant à évaluer l'adhérence des revêtements sur différentes sous-couches métalliques ont également été effectués.

2. Procédure expérimentale

2.1 Sélection des matériaux

Les matériaux testés ont été sélectionnés en raison de leur bonne résistance à la corrosion et l'oxydation à haute température et du fait qu'ils peuvent être projetés par plasma sous air. L'adhérence de la calamine sur les revêtements céramiques, métalliques et composites suivants a été mesurée:

- Revêtements métalliques:

- | | |
|-----------------|-----------------|
| · Ni - 20% Cr | Eutectic 18923F |
| · Ni-Cr-6% Al | Metco 443NS |
| · Ni-Co-Cr-Al-Y | Metco 461NS |
| · Co-Mo-Cr | Metco 68FNS-1 |

- Revêtements céramiques:

- | | |
|--|---------------|
| · Al_2O_3 - 2.5% TiO_2 | Amperit 742.1 |
| · Al_2O_3 - SiO_2 (mullite) | Metco XP1146 |
| · ZrO_2 - 7% Y_2O_3 | Amperit 825.1 |
| · ZrO_2 - 5% CaO | Amperit 801.1 |
| · ZrO_2 - 30% CaO (zirconate de calcium) | Amperit 805.1 |
| · ZrO_2 - 24% MgO (zirconate de magnésium) | Metco 210NS |
| · ZrB_2 | Cerac 1312 |
| · TiC | Cerac 1251 |

- Revêtements composites:

- | | |
|--|----------------------|
| · Zirconate de magnésium + alliage Ni-Cr-6% Al | Metco 441NS |
| · Borures complexes + Inconel 825 | Mtl Carbide 44.825.F |
| · Cr_3C_2 + alliage Ni-Cr (80-20) | Metco 82VFNS |
| · TiN + Si (50 % mole Si) | Cerac (special-G) |

2.2 Préparation des échantillons

Pour chaque matériau testé, trois blocs d'acier doux (1.5" x 1") et 6 disques d'acier spécial A-297 (1" diam) ont été revêtus par projection par plasma. Les blocs d'acier doux étaient destinés aux tests d'adhérence de la calamine tandis que les disques étaient utilisés pour déterminer l'adhérence des revêtements sur le substrat. Une sous-couche de NiCrAlY était d'abord appliquée pour favoriser l'adhérence des revêtements céramiques et composites et pour protéger le substrat à haute température.

L'épaisseur de la sous-couche et des couches finales était respectivement d'environ 100 et 300 μm . Les conditions de projection pour chaque couche étaient choisies suite à des tests préliminaires permettant de déterminer l'efficacité de déposition, le décentrage du jet de particules relativement à l'axe de la torche et la rugosité du revêtement. Une telle procédure ne permet pas

d'optimiser les propriétés des revêtements produits mais permet d'obtenir des revêtements satisfaisants pour effectuer les tests d'adhérence de la calamine. Les substrats étaient grenailés (grit-blasting) avant l'application des revêtements.

Dans le but de déterminer l'influence du fini de surface des revêtements, une série d'échantillons étaient polis avant d'effectuer le test d'adhérence de la calamine (voir ci-bas). Le polissage était effectué manuellement avec des papiers 240, 320, 400, et 600 (SiC).

Tous les échantillons destinés à la mesure de l'adhérence de la calamine étaient chauffés préalablement sous air pendant 12 à 24 heures à 950°C pour permettre la formation éventuelle d'une couche d'oxyde en surface.

2.3 Mesure de l'adhérence de la calamine

Les tests d'adhérence de la calamine à la surface des revêtements projetés par plasma sur les blocs de 1.5" x 1" étaient effectués à l'aide du dispositif expérimental illustré à la Fig. 1. Le bloc revêtu et une pièce d'acier doux étaient chauffés sous air à l'aide de la bobine d'induction. La température était mesurée avec un pyromètre optique et des thermocouples. Lors du test, la température était augmentée graduellement à 900-920°C en 5 minutes. Lorsque l'ensemble substrat-acier atteignait la température d'équilibre désirée, le bloc d'acier et la surface du revêtement testé étaient mis en contact avec une pression de 25 lb po⁻² (170 kPa). Les deux pièces étaient ainsi maintenues en contact pendant 2 minutes. Après ce délai, les deux pièces étaient séparées à vitesse constante et la tension requise pour détacher les deux pièces était mesurée avec la cellule de charge et enregistrée à l'aide d'une table traçante. Après refroidissement de la pièce revêtue, la quantité de calamine qui avait adhéré durant le test était déterminée en mesurant la surface totale de calamine sur le revêtement. Les résultats sont exprimés sous forme de pourcentages calculés de la façon suivante:

$$\text{Pourcent(\%)} = \frac{\text{surface totale de calamine}}{\text{surface totale de contact}}$$

La surface totale de contact était de 1 po².

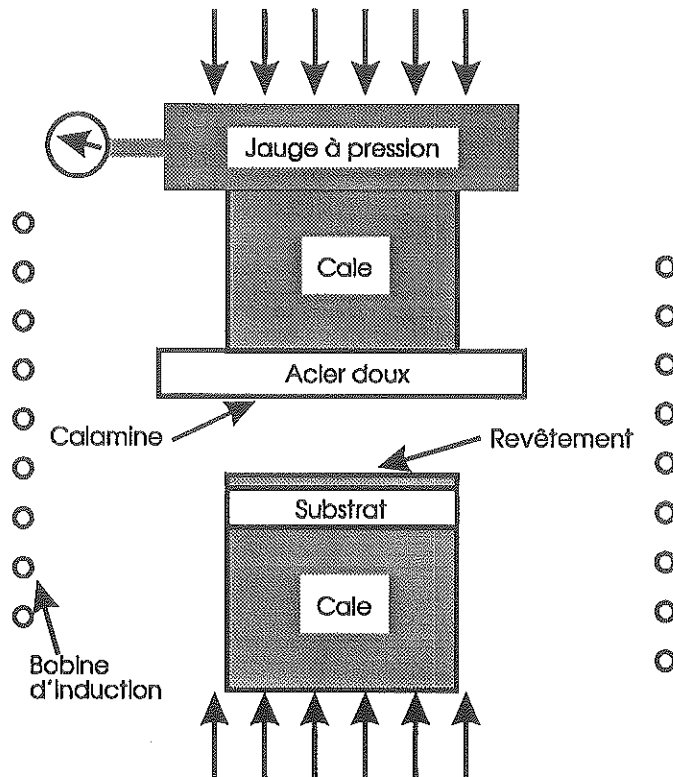


Fig. 1: Dispositif expérimental pour mesurer l'adhérence de la calamine sur différents revêtements projetés par plasma.

2.4 Adhérence et rugosité de surface des revêtements

La résistance à l'arrachement des revêtements était mesurée par des essais de traction effectués avec une machine Instron (pull up tests). La force nécessaire à l'arrachement du revêtement était mesurée et, connaissant la surface de celui-ci, la contrainte correspondante était calculée. La rugosité de surface des revêtements polis ou non était mesurée avec le profilomètre Surtronic 3 Taylor-Hobson.

3. Résultats

3.1 Adhérence de la calamine

3.1.1 Quantité de calamine adhérente

Les résultats des tests d'adhérence de la calamine sont donnés au Tableau 1. Les revêtements des séries 1 et 2 n'ont subi aucune modification du fini de surface après projection tandis que les échantillons de la série 3 ont été polis selon la procédure indiquée plus haut. Le fini de surface du bloc d'acier spécial A-297 des séries 1 et 2 est celui obtenu après usinage. Le Tableau 2 donne pour fin de comparaison la rugosité de surface de l'ensemble des revêtements et des blocs d'acier spécial tels que produits et après polissage. Les résultats du Tableau 1 sont représentés graphiquement à la Figure 2.

Tableau 1: Quantité de calamine adhérente à la surface des revêtements après contact à haute température.

Matériaux	Quantité de calamine adhérente (%)		
	Série 1	Série 2	Série 3 (poli)
Ni - 20% Cr	43	68	70
Ni-Cr-6% Al	65	60	68
Ni-Co-Cr-Al-Y	30	36	65
Co-Mo-Cr	42	40	46
Al ₂ O ₃ + 2.5% TiO ₂	22	26	46
Mullite	0	0	12
ZrO ₂ + 7% Y ₂ O ₃	24	20	40
ZrO ₂ + 5% CaO	18	18	21
ZrO ₂ + 30% CaO	38	22	51
ZrO ₂ + 24% MgO	36	35	26
ZrB ₂	95	61	--
TiC	22	30	--
(ZrO ₂ .MgO)+ NiCrAl	34	53	50
Borures + In 825	7	34	17
Cr ₃ C ₂ + NiCr	66	24	35
TiN + Si	39	--	--
Acier special A-297	0.7	0.4	3

La Figure 3 montre l'état de surface de trois pièces de la série 2 après le test d'adhérence de la calamine. On voit qu'à la surface du revêtement de ZrO₂+20% MgO (Figure 3.a), une importante quantité de calamine a adhéré au revêtement (35%). La Figure 3.b montre que l'état de la surface du revêtement de mullite n'a pas été sensiblement modifié durant le test et que la calamine n'a pas adhéré au

Tableau 2: Rugosité de surface R_a des revêtements tels que produits et après polissage.

Matériaux	Rugosité de surface R_a (μm)	
	tel que produit	poli
Ni - 20% Cr	7.8	3.0
Ni-Cr-6% Al	14.0	6.3
Ni-Co-Cr-Al-Y	14.8	5.5
Co-Mo-Cr	4.9	1.3
Al_2O_3 + 2.5% TiO_2	6.0	1.2
Mullite	11.7	5.2
ZrO_2 + 7% Y_2O_3	5.0	1.2
ZrO_2 + 5% CaO	6.1	0.8
ZrO_2 + 30% CaO	4.7	0.6
ZrO_2 + 24% MgO	8.1	0.9
ZrB_2	5.8	2.8
TiC	5.7	1.2
$(\text{ZrO}_2.\text{MgO})$ + NiCrAl	10.2	3.2
Borures + In 825	7.6	4.0
Cr_3C_2 + NiCr	5.7	0.9
TiN + Si	5.6	0.9
Acier special A-297	0.6	0.1

revêtement. L'état du bloc d'acier spécial A-297 après le test est montré à la Figure 3.c. On voit qu'une très faible quantité de calamine a adhéré à la surface du bloc (0.4%). De plus, on note la formation d'une zone d'interaction entre la calamine et la surface du bloc (formation d'un contour blanchâtre). Le revêtement de mullite ne présentait pas cet aspect après le test indiquant probablement une meilleure stabilité de la mullite vis-à-vis de la calamine.

En résumé, de tous les matériaux testés, la mullite présente le plus faible taux d'adhérence de la calamine. Les mesures sur revêtements polis ou non polis montrent que le fini de surface influence le processus d'adhérence de la calamine, celle-ci étant généralement supérieure sur les matériaux présentant une faible rugosité de surface. Comparée à l'acier spécial, la mullite permet une réduction de l'adhérence de la calamine et ne montre pas de signe de réaction avec celle-ci.

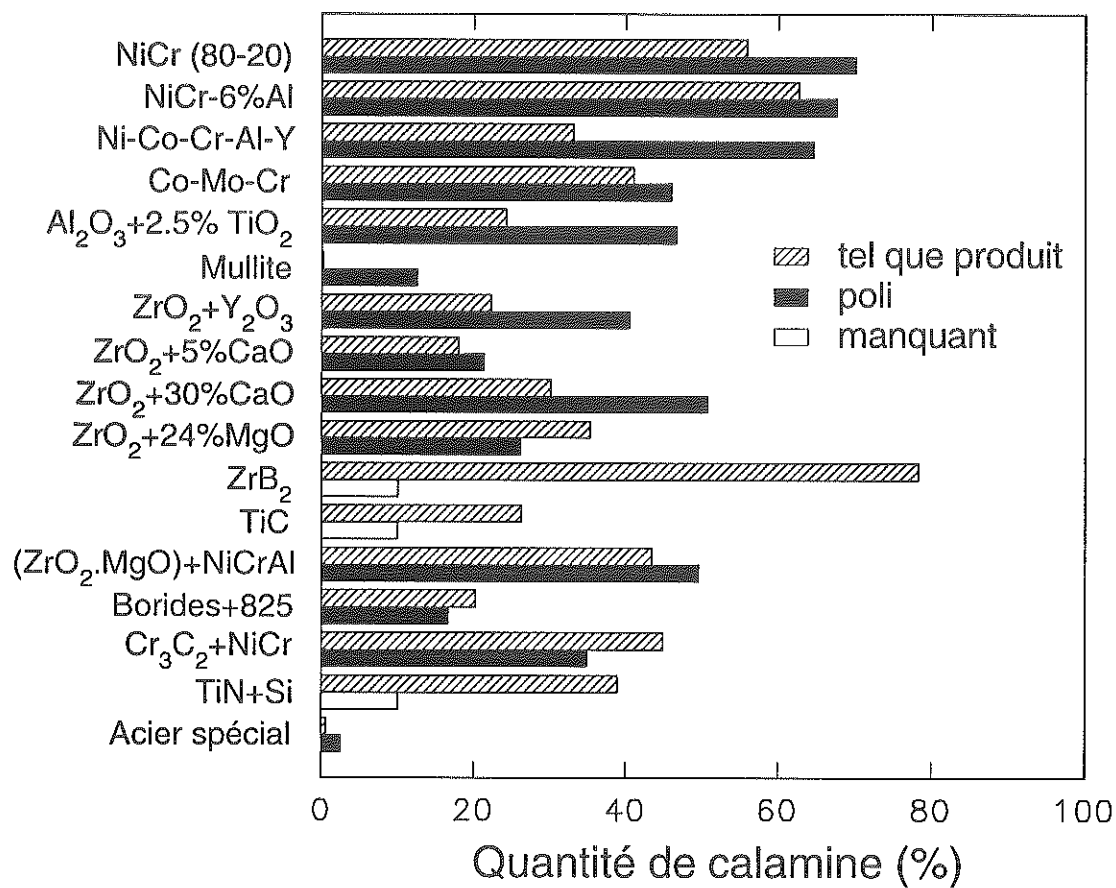
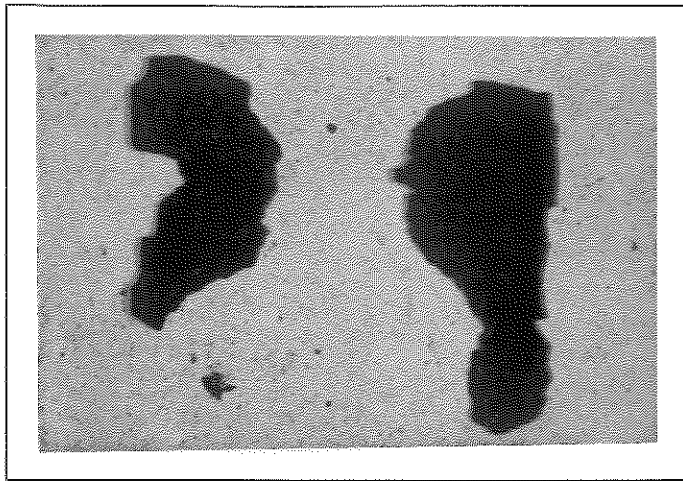
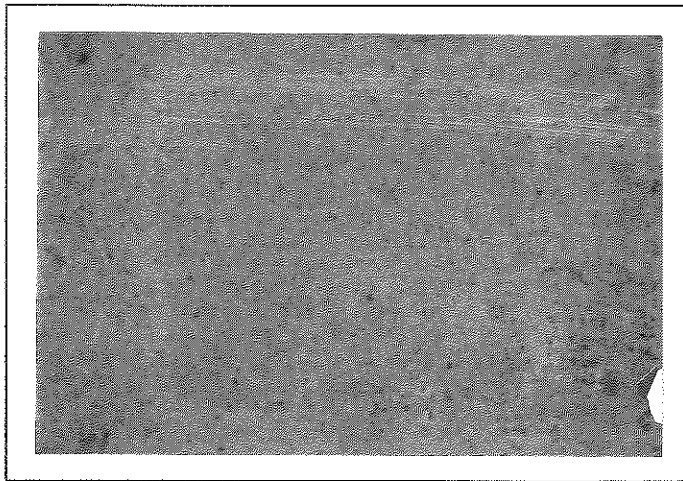


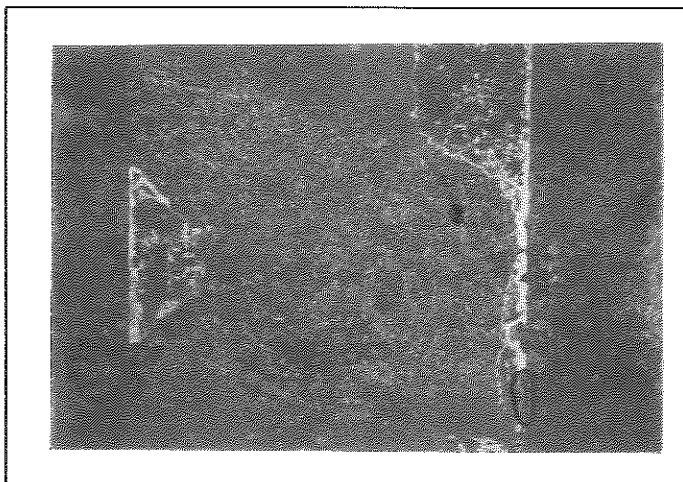
Fig. 2: Quantité de calamine adhérente à la surface des revêtements après contact à haute température



a



b



c

Fig. 3: État de la surface après le test d'adhérence de calamine sur des échantillons de a) $ZrO_2+20\% MgO$, b) mullite et c) acier spécial A-297.

3.1.1 Force d'adhérence de la calamine

Après la période de 2 minutes pendant laquelle le revêtement testé et le bloc d'acier doux étaient en contact à haute température, les deux pièces étaient séparées et la force de tension était mesurée en fonction de la distance de séparation. Le résultat de cette mesure est illustré à la Figure 4 pour un revêtement de mullite poli. On voit que, lors de la séparation des pièces, plus d'un pic de tension apparaissent indiquant probablement que la couche de calamine se détache ou se déchire en plusieurs étapes successives. Dans le présent cas, la tension maximale atteinte était de 32 lb po⁻².

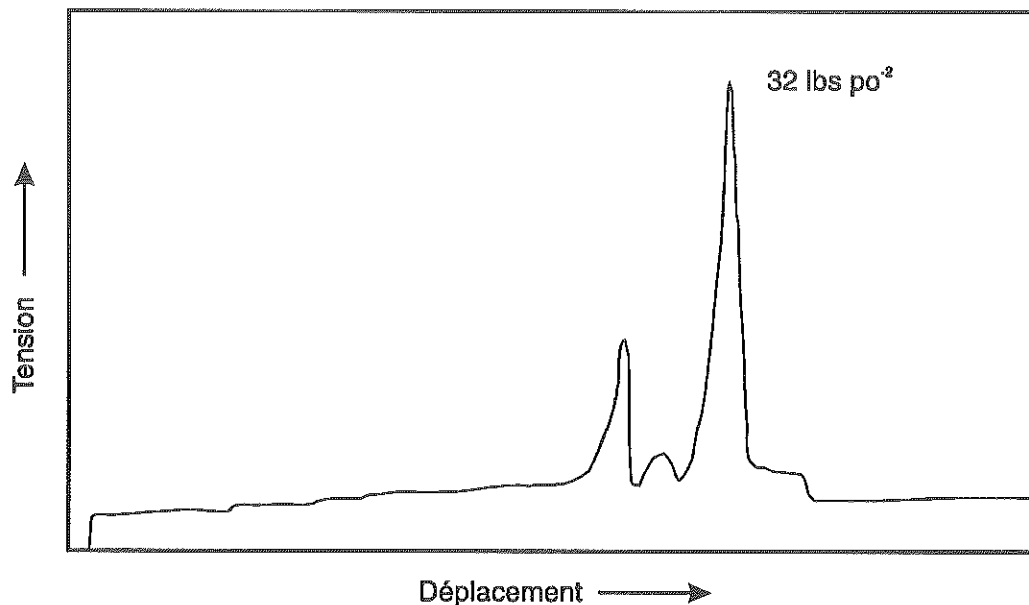


Fig.4: Évolution de la tension en fonction de la distance de séparation.

Le Tableau 3 donne la liste des valeurs maximales de tension observées pour l'ensemble des revêtements testés. La Figure 5 présente les mêmes résultats sous forme graphique. On peut y voir que la tension nécessaire pour séparer les pièces varie de 10 à 40 lb po⁻². De plus, il n'y a pas de corrélation évidente entre ces mesures et celles portant sur la quantité de calamine adhérente aux revêtements après contact à haute température (voir section précédente).

Dans le but d'évaluer la reproductibilité de la mesure de la force d'adhérence de la calamine, le test a été effectué avec quatre paires de blocs d'acier doux non-revêtus. Lors du chauffage à haute température, de la calamine était donc formée sur les faces des deux blocs avant qu'ils ne soient mis en contact et la tension pour les séparer était ensuite mesurée. Les résultats des quatre mesures ainsi effectuées varient de 17 à 41 lb po⁻² ayant une moyenne de 27 lb po⁻². La dispersion de ces mesures est aussi grande que celle observée avec les différentes pièces revêtues.

En résumé, le test de mesure de la force d'adhérence de la calamine tel qu'effectué ici ne permet pas d'identifier des différences significatives dans le comportement des différents revêtements testés. La dispersion importante des mesures est probablement reliée à la complexité des processus de déchirure et de décollement de la couche de calamine et aussi, éventuellement, à un alignement imparfait des pièces lors du test. De plus, il n'y a pas de corrélation évidente entre les résultats de ce test et les mesures de la quantité de calamine adhérente après contact à haute température.

Tableau 3: Adhérence de la calamine à la surface des revêtements après contact à haute température.

Matériaux	Adhérence de la calamine (lb po ⁻²)		
	Série 1	Série 2	Série 3 (poli)
Ni - 20% Cr	30	35	32
Ni-Cr-6% Al	35	35	29
Ni-Co-Cr-Al-Y	24	34	29
Co-Mo-Cr	26	13	34
Al ₂ O ₃ + 2.5% TiO ₂	35	11	36
Mullite	28	23	29
ZrO ₂ + 7% Y ₂ O ₃	30	20	10
ZrO ₂ + 5% CaO	13	16	15
ZrO ₂ + 30% CaO	18	10	20
ZrO ₂ + 24% MgO	16	18	26
ZrB ₂	26	12	--
TiC	45	--	--
(ZrO ₂ .MgO)+ NiCrAl	30	33	31
Borures + In 825	24	16	22
Cr ₃ C ₂ + NiCr	14	43	15
TiN + Si	39	--	--
Acier special A-297	31	27	20

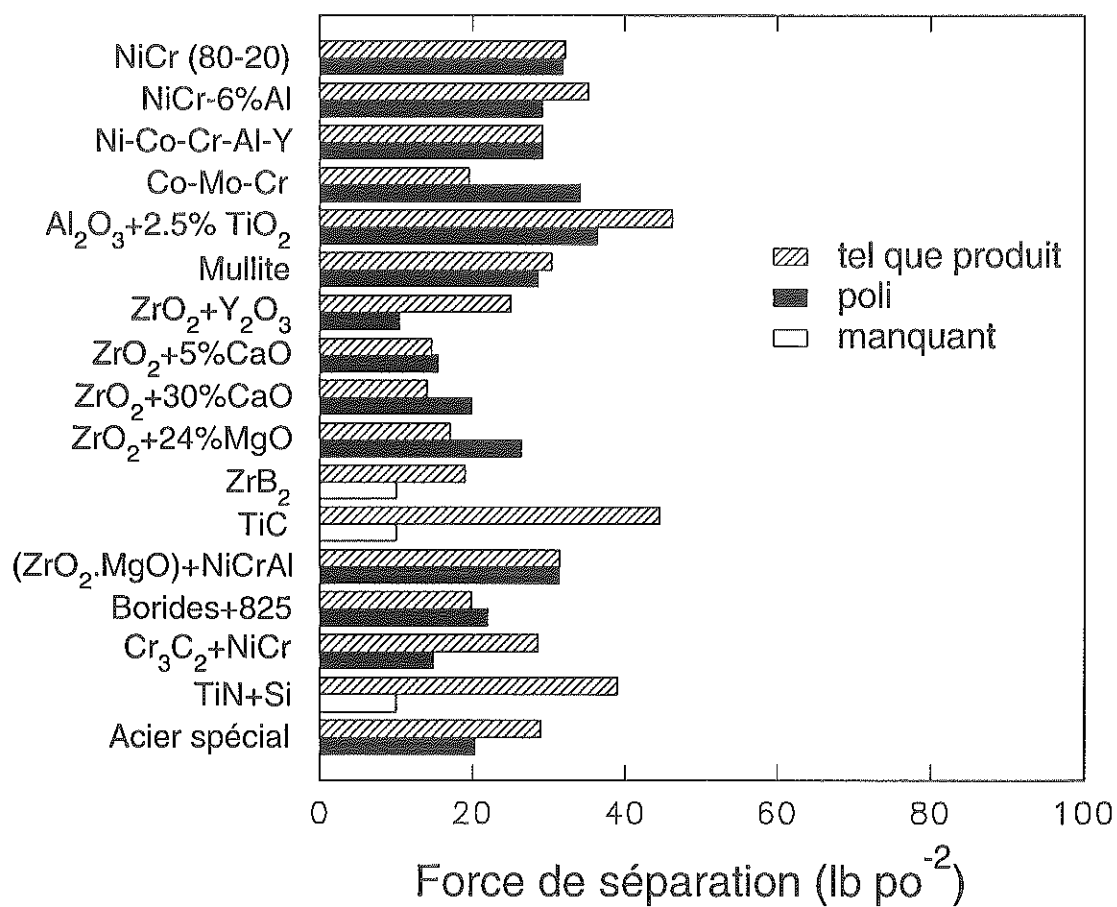


Fig. 5: Force de tension nécessaire pour détacher le bloc d'acier doux de la surface des revêtements testés après contact à haute température.

3.2 Résistance à l'arrachement des revêtements

Pour chaque matériau testé, une série de six échantillons a été produite pour déterminer la résistance en tension du revêtement appliqué sur l'acier spécial A-297. Les revêtements étaient appliqués sur des pastilles d'acier A-297 de 1" de diamètre et de 0.25" d'épaisseur. Les mesures de résistance en tension devaient être effectués sur des revêtements tels que produits (3 échantillons) et sur des revêtements après une exposition d'environ 2 mois à l'atmosphère oxydante des fours du laminoir (3 échantillons).

Trois pastilles de chaque matériau ont été placées dans un des fours du laminoir dans une enceinte d'acier construite par Sidbec. Ces échantillons ont été perdus en raison d'une erreur dans la sélection de l'acier de l'enceinte lors de sa construction. Il a alors été décidé de fabriquer une nouvelle série limitée d'échantillons revêtus de mullite, ce matériau ayant été identifié comme étant le plus prometteur pour éliminer l'adhérence de la calamine sur les mandrins. Cinq groupes de 6 pastilles ont ainsi été produits utilisant cinq sous-couches métalliques différentes pour évaluer l'adhérence de la mullite avant et après exposition à l'atmosphère oxydante du laminoir pendant environ 2 mois. Les résultats pour les échantillons tels que produits sont donnés au Tableau 4. Les valeurs de résistance en tension correspondent à la moyenne des mesures effectuées sur 3 échantillons.

Tableau 4: Mesure de l'adhérence des revêtements de mullite déposés sur différentes sous-couches métalliques sans exposition à haute température.

Sous-couches	Tension ultime	
	lb po ⁻²	MPa
Ni-Cr-Al-Y	3720	26
Ni-Co-Cr-Al-Y	2360	16
Ni - 20% Cr	2480	17
Ni-Cr-6% Al	2380	16
Ni-Al 5%	2090	14

Après exposition à l'atmosphère oxydante du four, lors de la récupération des échantillons, il a été constaté que les revêtements de mullite étaient détachés des échantillons. Les tests d'adhérence des revêtements n'ont donc pas pu être effectués. Il est à noter que les échantillons étaient localisés près du plafond du four pour toute la durée de leur séjour. À cet endroit, la température est supérieure à celle atteinte par le mandrin durant le fonctionnement normal du four en raison de la convection de l'air. L'examen des pièces après exposition montre que la face des pastilles qui était couverte par le revêtement (sous-couche métallique et mullite) est nettement moins dégradée que la face opposée

qui n'était pas revêtue. Cette dégradation moindre est probablement attribuable à la présence des sous-couches métalliques utilisées.

Suite à ces tests, il est cependant difficile de comparer la qualité de la protection apportée par chacune des sous-couches en raison de l'interdiffusion importante des éléments des revêtements et des substrats et de la sévère oxydation observée comme illustré à la Figure 6.

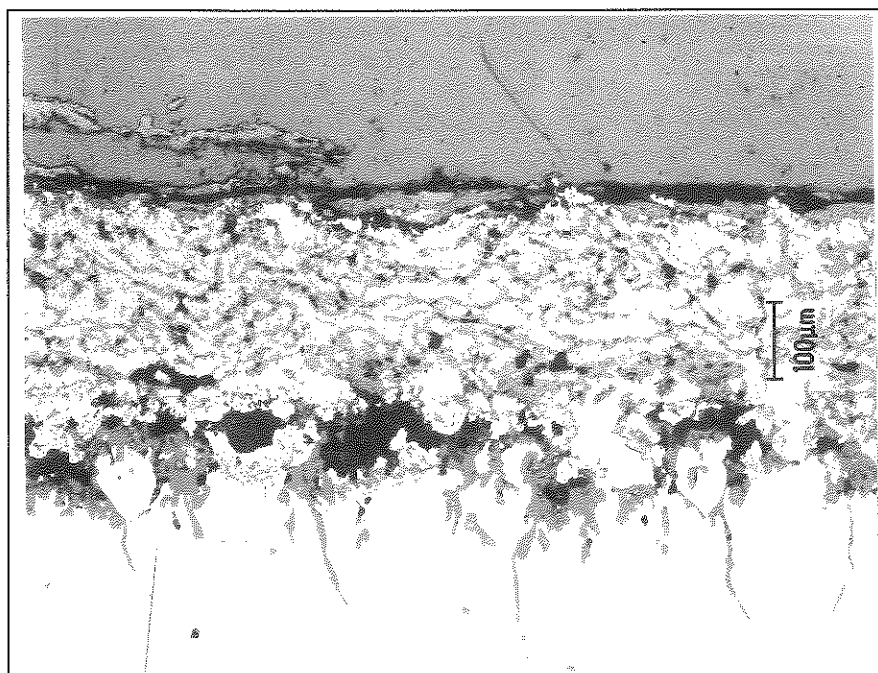


Fig. 6: Coupe métallographique d'une pastille revêtue d'une sous-couche de NiCr-Al 6% et de mullite après 2 mois dans le four du laminoir (200X).

Dans le but de vérifier le comportement de la mullite à une température contrôlée correspondant à celle du mandrin en usage normal (900-950°C), une nouvelle série de pastilles revêtues de NiCrAlY et de mullite a été placée dans un four tubulaire dans une atmosphère humide à 925°C pendant 3 semaines. À la fin de cette période, les échantillons ont été refroidis lentement et inspectés visuellement. On pouvait noter que les revêtements de mullite étaient délamérés à certains endroits. Une des pastilles sur laquelle la mullite était encore partiellement adhérente a été coupée et polie métallographiquement après infiltration sous vide avec une résine époxye. La Figure 7 illustre cette coupe où on peut noter la présence d'une fissure dans la mullite, parallèle à l'interface mullite-NiCrAlY, menant éventuellement à la délamination totale de la couche céramique. On note aussi la présence dans la céramique de nombreuses fissures perpendiculaires à l'interface mullite-NiCrAlY. De plus, il n'y a pas évidence d'une réaction significative entre la mullite et la sous-couche.

Il est probable que la délamination de la mullite soit liée aux contraintes thermiques générées à haute température dues à la différence importante des

coefficients de dilatation thermique de la mullite et de la sous-couche. D'autres facteurs peuvent aussi intervenir. En outre, le niveau des contraintes résiduelles dans les revêtements tels que déposés peut être élevé et ainsi favoriser la délamination de celui-ci lors d'une exposition à haute température. Finalement, il est possible que la formation relativement rapide d'une couche d'oxyde à la surface de la sous-couche de NiCrAlY participe à la génération de contraintes résiduelles importantes dans la couche céramique près de l'interface mullite-NiCrAlY favorisant la génération de fissures lors de l'exposition à l'air à haute température.

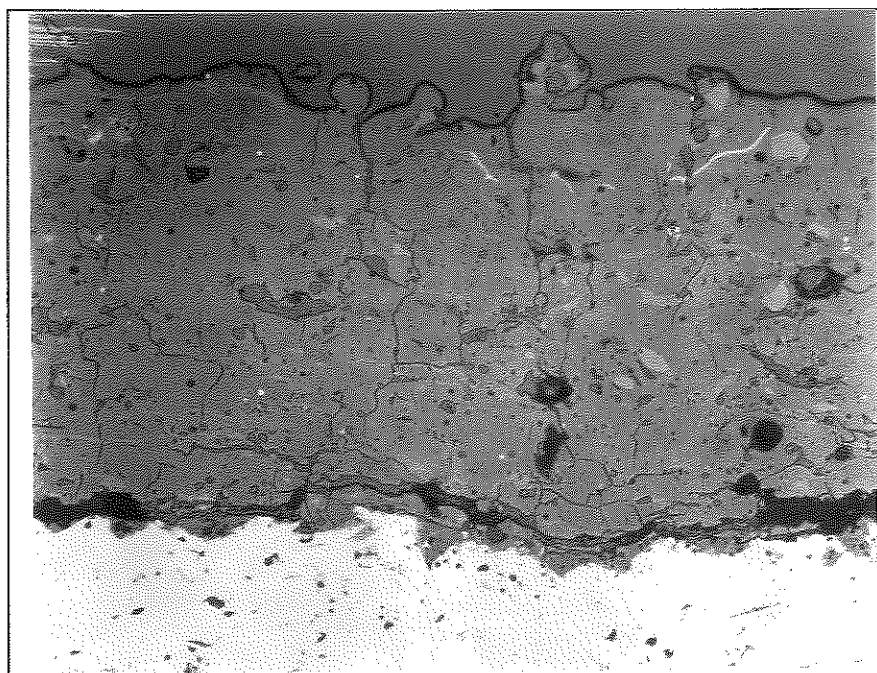


Fig.7: Coupe métallographique d'un revêtement de mullite déposé sur une sous-couche de NiCrAlY après 3 semaines à 925°C dans une atmosphère d'air humide.

4. Conclusion

Le présent travail avait pour objet d'identifier un ou des matériaux à la surface desquels la calamine développe une adhérence minimale. Il est espéré que l'application de ce matériau sous forme de revêtement à la surface des mandrins de bobinage du laminoir Steckel puisse éviter la formation de galettes de calamine qui sont ultérieurement incrustées dans les tôles laminées où elles génèrent des défauts de surface inacceptables.

Parmi les 16 matériaux testés, il a été montré que la mullite est le matériau sur lequel l'adhérence est minimale. De plus, il a été vérifié que le fini de surface

influence le phénomène d'adhérence. En général, l'adhérence de la calamine tend à croître lorsque la surface est plus lisse.

Suite à ces premiers tests, le comportement de revêtements de mullite appliqués sur diverses sous-couches métalliques a été étudié. Après exposition à haute température, une délamination importante des revêtements de céramique était observée. Cette délamination résulte probablement de contraintes thermiques importantes dans les revêtements à haute température. Il a cependant été noté que les sous-couches métalliques utilisées réduisaient la dégradation des échantillons exposés.

4.1 Étapes futures

Il est essentiel que le revêtement réfractaire de mullite adhère à la surface des mandrins de façon forte et stable sur une période de plusieurs mois pour qu'il puisse être utilisé dans le laminoir. Pour atteindre cet objectif, un travail d'optimisation des conditions de dépôt et de sélection des matériaux projetés est nécessaire.

La prochaine étape des travaux de développement devrait inclure les actions suivantes effectuées lors d'essais à échelle réduite en laboratoire:

- choix d'une couche intermédiaire entre la mullite et la sous-couche MCrAlY pour réduire les contraintes thermiques. Cette couche pourrait être, par exemple, composée dans des proportions égales de mullite et de MCrAlY.
- projection de couches composites mullite-MCrAlY en différentes proportions relatives. Ces couches pourraient remplacer la couche de mullite pure telle qu'envisagée jusqu'à maintenant.
- sélection des conditions de dépôt pour optimiser la tenue à haute température des revêtements projetés.

La projection d'une couche composite mullite-MCrAlY (obtenue par simple mélange mécanique des poudres) devrait permettre d'obtenir une couche présentant une bonne adhérence à la sous-couche MCrAlY tout en ayant une bonne résistance aux chocs et à l'usure et une faible tendance à accumuler de la calamine lors des contacts répétés.

Si un revêtement tenace en laboratoire est obtenu, un mandrin pourra être revêtu pour évaluer son comportement en utilisation réelle. On peut envisager tester 2 ou 3 revêtements différents sur le même mandrin en déposant ceux-ci en bandes parallèles sur le diamètre du mandrin.

Il est à noter aussi qu'au cours des prochains mois, il sera possible de juger de la protection amenée par un revêtement de NiCrAlY en service réel. En effet, un mandrin a été revêtu avec un tel revêtement appliqué par projection à l'arc et entrera en service prochainement.