

**Résumés étendus, en français,
des six articles communs
Revue de Métallurgie -
Stahl und Eisen de ce numéro**

Primaires anti-corrosion soudables pour l'industrie automobile

A. Schnell (DaimlerChrysler AG), F.-M. Androsch, K.-H. Stellnberger (Voestalpine Stahl GmbH)

Grâce à l'utilisation intensive de tôles revêtues de Zn ou d'alliages de Zn, en conjonction avec des pré-traitements de surface améliorés, les problèmes de corrosion autrefois rencontrés avec les automobiles anciennes ont été très largement éliminés. Selon un rapport allemand du TÜV, 25 % des véhicules de 10 ans d'âge souffraient de corrosion en 1990 alors que ce taux n'est plus que de 7 % en 2000. Ce résultat est attribué à la protection cathodique par le Zn et à sa propre passivation par formation d'une couche de carbonate.

Il reste des géométries susceptibles d'être des sites de corrosion, les crevasses ou les sertissages, en particulier en présence de forte humidité. Le Zn n'est pas protégé dans ces zones car il n'y a pas assez de CO₂ disponible pour former une couche de passivation. Les pré-traitements et la

cataphorèse pénètrent mal dans ces crevasses et n'assurent pas la protection du Zn. Les palliatifs sont des méthodes de protection secondaire, tel le bouchage des joints à la cire, et surtout la prise en compte de ces sites de corrosion potentielle au moment de la conception du véhicule.

Plus efficacement et pour éviter les inconvénients de ces protections secondaires, on utilise des primaires anti-corrosion. L'objectif de ces revêtements appliqués sur les bobines est d'améliorer la résistance à la corrosion des revêtements de Zn dans les zones sensibles. Des garanties de plus longue durée peuvent être proposées contre la corrosion grâce à ces primaires, à la satisfaction de l'utilisateur final. Ces systèmes pourraient aussi dans le futur permettre une simplification du processus de production des constructeurs.

Propriétés et applications potentielles des revêtements d'alliage Zn-Mg par PVD sur les tôles minces

T. Koll, K. Ullrich (Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH),
J. Faderl, J. Hagler (Voestalpine Stahl GmbH),
B. Schuhmacher (Dortmunder Oberflächencentrum GmbH), A. Spalek (BMW Group Labortechnik)

Les progrès accomplis dans le domaine des dispositifs de vaporisation ouvrent la voie au procédé continu de revêtement sous vide. Un des principaux avantages offerts par le revêtement PVD concerne la grande variété de dépôts possibles, grâce à l'absence de toute contrainte qui résulterait d'une incompatibilité entre le substrat et le dépôt. De ce fait le PVD permet d'apporter des solutions « à la carte » à des applications spécifiques, en combinant protection anti-corrosion efficace et bonne aptitude au formage, à l'assemblage et au laquage.

Associer un revêtement classique de galvanisation et un traitement PVD peut apporter une solution économique à la production de revêtements d'alliage de Zn.

Parmi les nombreux revêtements alliés étudiés, le dépôt de magnésium sur tôle galvanisée semble le plus prometteur et fait l'objet de cet article. Il améliore fortement la résistance à la corrosion tout en maintenant ou en augmentant l'aptitude au formage, au soudage et au laquage par rapport à la tôle galvanisée.

Choix et utilisation des nouveaux aciers revêtus à haute résistance pour automobiles

R. Bode, T.-W. Schaumann (ThyssenKrupp Stahl AG),
M. Meurer, W. Warnecke (Dortmunder Oberflächencentrum GmbH)

Au cours de ces dernières années, l'allègement est devenu un objectif majeur pour les constructeurs d'automobiles. La tendance à l'amélioration du confort et de la sécurité des véhicules et les exigences contradictoires de réduction de la consommation et des émissions d'échappement imposent la construction de caisses plus légères. Dans ce contexte, l'acier doit faire face à la concurrence de matériaux intrinsèquement plus légers, aluminium, magnésium, plastiques.

Les aciers multiphases à haute résistance suscitent actuellement beaucoup d'intérêt pour la conception de véhicules allégés. Ils offrent en effet une combinaison résistance-ductilité supérieure à celle des aciers plus conventionnels et surtout à celle des alliages légers. Leur loi de comportement en déformation plastique et leur potentiel de *bake-hardening* les destinent à la fabrication de pièces de structure à haute résistance. Pour répondre à la demande de protection anti-corrosion, TKS a développé des aciers multiphases à haute résistance aptes au revêtement. Il est ainsi

possible de réduire la masse des caisses d'automobiles de 25 à 35 % en utilisant des aciers à haute résistance et des techniques optimisées de formage et d'assemblage.

Une attention particulière est accordée à la protection anti-corrosion. L'acier est essentiellement protégé par des revêtements de zinc et d'alliages de zinc. Les bandes à chaud ou à froid sont revêtues par galvanisation ou par électrodéposition, deux procédés très bien maîtrisés. La galvanisation des aciers à haute résistance présente des aspects particuliers, liés à la formation à leur surface de fines couches d'oxydes d'éléments d'alliage (Mn, Si, Al, Cr) au cours du recuit avant galvanisation. Ces couches d'oxydes peuvent gêner le mouillage de la surface par le zinc au cours de la galvanisation. Jusqu'à présent, aucune solution réellement satisfaisante n'avait été développée industriellement pour pallier cette difficulté. TKS a donc développé une nouvelle génération d'aciers multiphases avec une qualité de surface optimale après galvanisation sur des lignes classiques.

Amélioration de la qualité des bandes galvanisées par le procédé d'oxydation-réduction

L. Bordignon, X. Vanden Eynde, R. Franssen (CRM)

Les éléments d'addition, présents dans les aciers, sont généralement oxydés en extrême surface de l'acier lors du recuit continu précédant la galvanisation au trempé. La présence de cette oxydation sélective ne permet plus de réaliser une réactivité correcte du fer avec le bain de zinc ce qui provoque une dégradation de l'adhérence du revêtement ainsi que de sérieux problèmes de démouillage du zinc liquide.

De nombreux travaux ont montré qu'il existe différentes solutions permettant de diminuer, voire même de supprimer cette oxydation en extrême surface des éléments d'alliage. Parmi toutes ces solutions, il s'avère que le procédé d'oxydation-réduction est certainement le plus économique.

L'oxydation contrôlée de la bande peut se faire au chauffage dans le four à flammes directes, en réglant par exemple les brûleurs en sur-stœchiométrie. Un excès d'oxygène est en effet nécessaire pour oxyder suffisamment vite la tôle au cours du chauffage rapide (40°C/s). Afin d'éviter les risques de poudrage du revêtement, il est préférable de limiter la quantité d'oxyde à environ 1 g/m². La composition chimique de l'acier peut influencer fortement la cinétique d'oxydation. En effet, au cours de la formation de l'oxyde de fer, les éléments d'addition (sauf le manganèse) plus oxydables que le fer, migrent à l'interface acier/oxyde de fer pour réagir avec cet oxyde. La présence des éléments oxydables (Si, Al, Cr, ...) peut faire un écran à la diffusion des atomes de fer vers l'extrême surface, ce qui peut aller jusqu'à un blocage de la réaction d'oxydation dans le cas des aciers très chargés en silicium (1,5 %).

La réduction de cet oxyde se fait, dans la section de maintien du four à tubes radiants, par l'hydrogène de l'atmosphère mais également par les éléments d'alliage. Le carbone, qui diffuse rapidement dans l'acier, est un des éléments les plus efficaces pour réduire cet oxyde. L'oxyde de fer, sur les aciers chargés en éléments d'addition (acier dual phase et TRIP), peut ainsi être complètement réduit uniquement par les éléments d'addition. Cela présente l'avantage de ne pas devoir augmenter la purge du four pour maintenir une cinétique de réduction correcte par l'hydrogène.

L'oxydation du fer peut aussi être réalisée au cours de l'étape de refroidissement rapide de la tôle ($\pm 50^\circ\text{C/s}$). Afin de faciliter cette oxydation, le recuit de recristallisation doit impérativement être effectué dans une atmosphère ayant un point de rosée élevé ($\pm 0^\circ\text{C}$). En effet, l'oxydation sélective en mode externe, réalisée dans les conditions standards de recuit (5 % H₂ et point de rosée de -30°C), fait un écran à la diffusion du fer lors de la croissance de l'oxyde et induit la formation d'un oxyde mixte de fer avec les éléments d'alliage. Dans ce cas, la réduction, qui a lieu dans la section de sur-vieillessement par une atmosphère contenant une teneur élevée en hydrogène (> 20 %), n'est plus complète et l'adhérence du revêtement est très mauvaise.

La viabilité industrielle de ce procédé d'oxydation-réduction est rendue possible par le récent développement d'un capteur simple et fiable qui permet de mesurer en continu l'épaisseur d'oxyde formé et ce indépendamment de la composition chimique de l'acier.

Production des mattes de surface en galvanisation

M. Dubois (Arcelor Flat Carbon, RDGS)

Les mattes de surface ou écumes sont un co-produit bien connu du galvanisateur. Elles coûtent de l'ordre de 1€/T mais ce chiffre est variable en fonction de la spécification du produit galvanisé fabriqué sur la ligne de production.

De manière technique, les exploitants les comptabilisent en pourcentage du zinc total enfourné. Cette manière est un non-sens physique car aussi bien la dissolution du fer que la formation des écumes par l'essorage sont des phénomènes de surface. Il est donc proposé de remplacer le comptage actuel par le calcul de la quantité produite par unité de surface. Cette manière permet ainsi de réduire la dépendance du chiffre à la spécification du produit et en particulier de la charge moyenne de revêtement. Elle est aussi étayée par une brève description phénoménologique de ce qui conduit à la formation des écumes

Partant de cette nouvelle méthode de comptage, une analyse statistique est réalisée sur quatre lignes industrielles d'Arcelor afin de calculer la production moyenne d'écumes ainsi que d'étudier dans quelle mesure il est possible de corréliser leur production journalière à des paramètres du procédé. Les lignes sont très différentes entre elles : avec ou sans dégraissage, traitant du laminé à chaud ou à froid.

Les écumes moyennes vont de 8 g/m² à un peu moins de 20 g/m² double face, le chiffre le plus bas revenant au Galfan qui se distingue nettement des autres. Quant à l'étude statistique, c'est la méthode de régression de type pas à pas qui est utilisée et dans laquelle on n'introduit dans le modèle linéaire que les variables significatives. Cette méthode a été retenue pour essayer de s'affranchir au mieux du fait que les variables sont très souvent non indépendantes, comme vitesse ligne et épaisseur ou que les tôles fines sont toujours plus étroites que les épaisses.

Différentes formules sont proposées avec des coefficients de corrélation complets relativement acceptables. Il n'est pas possible de démontrer l'effet de la présence ou non d'un dégraissage ou du type de support (laminé à chaud ou froid) dans la mesure où le mix produit et la fenêtre procédé sont très différents. Ainsi, la ligne n'ayant pas de dégraissage a aussi comme pratique d'utiliser un bain plus chaud pour les fines épaisseurs et celle qui fait du laminé à chaud a évidemment une vitesse plus lente, ce qui biaise l'analyse stricte des résultats.

De manière globale il apparaît, par contre, que les vitesses élevées induisent une plus forte production d'écumes. C'est l'essorage au gaz qui en est probablement responsable. Il apparaît aussi, de manière surprenante et ceci est valable pour chaque ligne, que la production d'écumes par unité de surface est d'autant plus élevée que la largeur traitée de la tôle est faible. Aucune explication à base scientifique n'est proposée mais par contre il est supposé que cette observation est liée à la pratique de démattage manuelle : elle se fait généralement à périodicité prédéfinie et donc correspond à une plus grande quantité à écrémer lorsque la tôle est large, vu que plus de m² ont été galvanisés par unité de temps.

Une analyse chimique d'écumes industrielles est faite en particulier pour y rechercher le taux d'oxydation. Les teneurs en particules de type Fe₂Al₅ sont inférieures à 3 % du poids total et la quantité d'oxyde, inférieure à 5 %, même si le chiffre exact est difficile à préciser. Cette faiblesse de la teneur en ZnO est confirmée par des coupes micrographiques. Le mécanisme par lequel l'essorage a une telle action sur la formation des écumes n'est donc pas clair et des études plus fondamentales sur l'oxydation du Zn et le mélange Zn - ZnO seraient nécessaires.

Enfin, si une modélisation mathématique de la formation des écumes n'est pas réalisée, le sujet est abordé sur une base phénoménologique. L'approche mathématique globale devra comprendre, d'une part l'effet essorage avec probablement l'intervention des nombres sans dimension de Weber et de Reynolds du film afin de modéliser le mélange liquide gaz et, d'autre part la dissolution du fer à l'instant t-x qui correspond au fait que les intermétalliques arrivant en surface à l'instant t correspondent à du Fe dissout bien avant, au temps (t-x). Enfin, il faudra considérer une fonction d'auto égouttage de l'ensemble une fois en surface qui correspond à l'observation que moins on la nettoie et plus sa teneur en particules est élevée. Au système d'écrémage, manuel ou robotisé, correspondra un coefficient d'efficacité de l'égouttage. La question est néanmoins de savoir à quelle grandeur adimensionnelle on fera correspondre cette fonction, par exemple les g/m² d'écume divisé par les g/m² de Zn mais pouvoir affirmer a priori que cette grandeur soit la bonne.

Optimisation de la gestion du parc à brames de Sidmar

W. Van der Stricht, D. Stroo, A. Verstraete, E. Heene, D. De Baets, H. Delvoey (Arcelor Sidmar)

Introduction

Compte tenu de l'augmentation de production prévue pour le train à bandes, Sidmar a lancé un projet d'amélioration de la gestion du parc à brames. En premier lieu il fallait introduire une nouvelle stratégie de stockage des brames en fonction de leurs propriétés physiques au lieu de les regrouper par commandes. Puis, le stock disponible pour la programmation du train devait être augmenté. Au lieu d'utiliser uniquement les ponts roulants dans les halles, les engins Kress et les empileuses des aires extérieures ont été mis en œuvre pour l'alimentation directe du train à chaud. Finalement, la capacité de transports de brames s'est avérée suffisante pour assurer l'augmentation de production prévue à condition que l'organisation et l'optimisation du parc à brames proposées soient appliquées.

Approche

Une approche de bas en haut fut utilisée pour l'automatisation et l'optimisation de la gestion du parc à brames. La plus basse couche réalise l'automatisation des véhicules de transport, les autres couches l'optimisation des ordres de transport.

La nouvelle stratégie de stockage requiert que tous les véhicules de transport respectent les nouvelles directives de stockage. Donc, un système de suivi du stock en temps réel enregistre toutes les positions et tous les mouvements des brames. La localisation des ponts roulants et des engins extérieurs est réalisée au moyen de PLC et GPS respectivement. L'utilisation d'une configuration GPS différentielle améliore la précision de la localisation jusqu'à 1 m. Un réseau sans fil assure la communication entre les engins de transport et une base de données centrale.

La gestion du transport des brames donne des ordres de transport aux véhicules. Le générateur des ordres de transport calcule une séquence optimale et l'envoi automatiquement à l'engin de transport concerné.

Les tâches de transport sont actuellement gérées par des dispatchers. Ils peuvent lancer des calculs pour chaque tâche, mais un générateur de tâches de transport créera la plupart de ces tâches automatiquement à la suite d'événements sur le parc à brames.

Plusieurs interfaces conviviales ont été développées pour assister les dispatchers logistiques dans la gestion du flux des matières à travers le parc à brames et pour le lancement sur demande des tâches appropriées sur le parc à brames.

Optimisation des ordres de transport

Un générateur d'ordres de transport détermine les mouvements de brames individuels pour exécuter des différentes tâches en parc à brames. Il ne s'agit pas de définir des règles de décision générales pour la solution de toutes les différentes tâches ou d'optimiser chaque mouvement de brame pris séparément, mais d'optimiser une séquence complète de mouvements. La séquence optimale est obtenue par la genèse d'alternatives qui sont évaluées par la suite pour trouver la séquence optimale. Lorsqu'il y a différents mouvements de brames possibles, on utilise un algorithme heuristique pour limiter le nombre de routes entrant en ligne de compte. Pour déterminer finalement l'alternative optimale un algorithme de programmation dynamique est utilisé.

Résultats

Actuellement presque toutes les tâches peuvent être exécutées par des ordres de transport générés de manière automatique. Les opérations de 10 ponts roulants et de 5 autres engins de transport sont actuellement contrôlées à partir d'un centre de dispatching. Le nombre des tâches calculées et optimisées est de 1 800 en moyenne journalière. Jusqu'à présent le gain total du projet comprend l'économie de 87 employés (principalement des gestionnaires de stock) et une sécurité accrue dans le parc à brames. Les ordres de transport générés respectent rigoureusement les règles de sécurité et les employés ne sont plus exposés au danger lié à leur présence sur le parc à brames. De plus, le nombre de mouvements de brames pour l'exécution d'une tâche spécifique a été réduit de 17 % en comparaison avec les modes d'empilement utilisés antérieurement ce qui entraîne des performances de gestion améliorées. Le projet a permis en outre de mettre hors service un pont roulant.