

Données complémentaires
pour une meilleure approche
du chapitre

APPROCHE TECHNICO-ECONOMIQUE

- Ch. 5 - Notions élémentaires sur les revêtements de surface
- Ch. 8 - Vocabulaire du métier de la fixation

BIBLIOTHEQUE & OUTILS

- Ch. 10 - Limites supérieures des épaisseurs nominales de revêtement
- Ch. 30 - Caractéristiques des revêtements de surface usuels
- Ch. 31 - Tableau des couples galvaniques

ENVIRONNEMENT & LEGISLATION

- Ch. 9 - Directive 2000/53/CE (ROHS véhicules)
- Ch. 10 - Directive 2002/95/CE (ROHS matériel électrique et électronique)
- Ch. 11 - Directive 2011/65/UE (ROHS matériel électrique et électronique)
- Ch. 12 - Usages de la profession et préconisations générales

7

Lutte contre la corrosion

7.0 Les processus de corrosion

Définitions

- La quasi-totalité des métaux n'existe pas à l'état pur dans la nature mais sous forme d'oxyde, sulfures, carbonates... il est donc logique, que dans les environnements agressifs, ils tendent à donner à nouveau des oxydes, des sulfures et autres composés chimiques.
- La corrosion est une attaque destructive plus ou moins rapide du matériau sous l'action physique chimique ou électrochimique des milieux qui l'environnent. Les métaux et alliages sont particulièrement exposés en surface, principalement, mais aussi dans la masse par cavitation ou par corrosion intergranulaire.
- Pour les alliages ferreux, il ne faut pas confondre «rouille» qui est un oxyde hydraté se formant à froid et calamine formée à haute température (forge).

Trois types de corrosion

- **Chimique** : réaction hétérogène entre un métal et une phase gazeuse ou liquide non électrolyte.
- **Biochimique ou bactérienne** : les bactéries absorbent et transforment les sels et minéraux, provoquant l'apparition de produits agressifs (acides).
- **Electrochimique** : de loin la plus fréquente, la plus dangereuse pour les métaux.

Elle nécessite la présence d'un électrolyte et d'un milieu hétérogène entraînant une formation de «piles». Un courant électrique circule entre les zones cathodes et les zones anodes qui sont attaquées.

Ces piles sont microscopiques. L'eau sous ses différentes formes sera l'électrolyte, la présence de sels dissous (NaCl) augmente les risques de corrosion par une plus grande différence de potentiel électrochimique.

Chaque métal ou constituant d'une structure possède une valeur de potentiel différente par rapport à la solution. La résultante des potentiels d'électrodes respectifs au cours du phénomène de pile (donc de corrosion) va tendre vers un équilibre représentant la force électromotrice de la pile.

Chaque métal possède un potentiel d'équilibre qui lui est propre.

Les métaux qui possèdent des potentiels négatifs se corrodent facilement, inversement ils résistent à la corrosion (métaux nobles).

Entre deux métaux associés, le métal le plus électropositif par rapport à l'autre constitue le pôle positif de la pile. Les potentiels sont aussi variables selon le milieu ambiant, l'attaque n'est sensible que pour une différence de potentiel (ddp) supérieure à 300 mV.

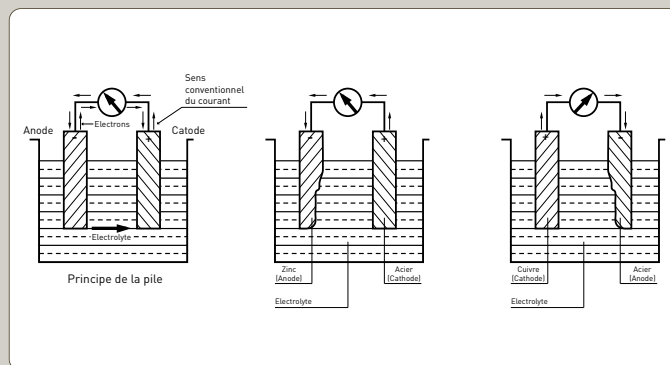
Modes de destruction par corrosion

La corrosion se traduit par :

- une diminution de poids,
- une altération de la surface attaquée,
- un affaiblissement des propriétés mécaniques.

Suivant la forme géométrique et le type de destruction, on distingue quatre principaux schémas de corrosion.

- **La corrosion uniforme** ou généralisée, avec une vitesse de dégradation uniforme, en tous les points du métal exposé qui se dissout régulièrement. La résistance mécanique décroît avec l'épaisseur et la perte de poids. Les caractéristiques mécaniques rapportées à l'unité ne varient pas.
- **La corrosion localisée** ou corrosion par piqûres (piqûres) là où existent des impuretés, des hétérogénéités chimiques, des entailles, des rugosités en surface. Cette corrosion affecte surtout la capacité de déformation de l'alliage.
- **La corrosion inter cristalline** ou corrosion intergranulaire. A l'inverse des précédentes, cette corrosion se propage en profondeur le long des joints de grains ou de cristaux. Ses effets sont particulièrement graves, car peu visibles de l'extérieur. Le métal peut se rompre sous une faible charge, il devient fragile. On n'observe pas de perte de poids.



7.0-1 Principe de la pile

- La **corrosion galvanique ou bimétallique** qui fait intervenir deux métaux électrochimiquement très différents dans un milieu conducteur. Quand la différence de potentiel est importante entre les métaux ou constituants voisins, le métal le moins résistant devient anodique, il est attaqué, l'autre, cathodique, est protégé. C'est une corrosion localisée (exemple : l'acier galvanisé attaqué par le cuivre dans les circuits de chauffage central).

Il existe d'autres formes de corrosions, citons :

- la corrosion cavernueuse,
- la corrosion à la ligne d'eau (aération différentielle),
- la corrosion par érosion,
- la corrosion transgranulaire.

La corrosion, importance économique

Cet aspect est loin d'être négligeable : les coûts directs globaux dus à la corrosion (protection et remplacement) sont estimés à 3,5% du produit national brut dans les pays occidentaux.

Trois facteurs de corrosion

Les facteurs de corrosion sont très nombreux et de natures très diverses :

Facteurs liés au milieu :

- nature du milieu, composition chimique, impuretés,
- PH, température, pression, mouvement, viscosité,
- résistivité, éclairage, présence de micro-organismes.

Facteurs liés à la pièce, au matériau :

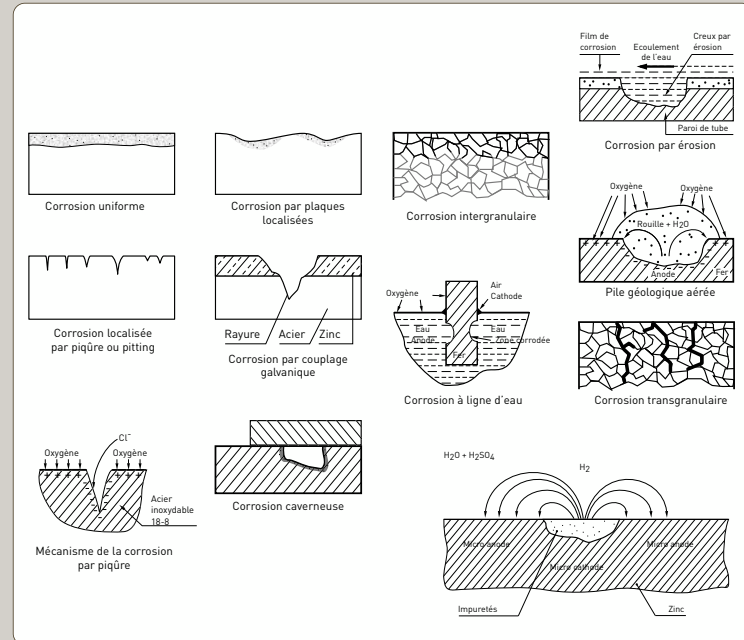
- analyse chimique, degré de pureté, structure cristalline,
- nature et morphologie des constituants,
- contraintes mécaniques, tensions internes,
- résistivité, état de surface (microgéométrie),
- tracé, formes, mode d'obtention (assemblage),
- présence de gaz inclus dans l'alliage.

Facteurs liés aux conditions d'emploi :

- contraintes mécaniques appliquées (fatigue, corrosion),
- orientation de la pièce par rapport aux courants liquides,
- mouvement de la pièce dans le milieu,
- voisinage d'autres pièces, leur nature métallique,
- potentiel de la pièce par rapport au milieu, aux autres pièces,
- rapport des volumes, pièce/milieu, température.

Métal	Réaction d'équilibre	Potentiel en volts
Or	$Au = Au^{+++} + 3e^{-}$	+ 1,42
Platine	$Pt = Pt^{+++} + 2e^{-}$	+ 1,20
Argent	$Ag = Ag^{+} + e^{-}$	+ 0,80
Cuivre	$Cu = Cu^{++} + 2e^{-}$	+ 0,34
Hydrogène	$H = 2H^{+} + 2e^{-}$	0,00 par convention
Plomb	$Pb = Pb^{++} + 2e^{-}$	- 0,13
Fer	$Fe = Fe^{++} + 2e^{-}$	- 0,44
Zinc	$Zn = Zn^{++} + 2e^{-}$	- 0,76
Aluminium	$Al = Al^{+++} + 3e^{-}$	- 1,67
Magnésium	$Mg = Mg^{++} + 2e^{-}$	- 2,34

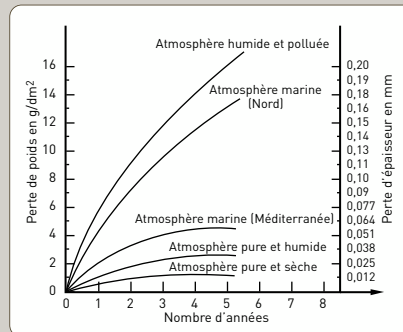
7.0-2 Potentiels d'équilibre de quelques métaux



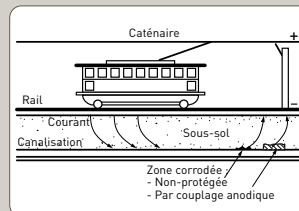
7.0-3 Modes de dégradation des métaux et alliages

Milieux corrosifs courants

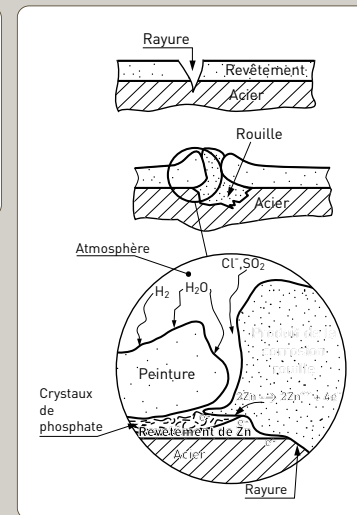
- Corrosion atmosphérique
Facteurs climatologiques : température, ensoleillement, vents, précipitations, humidité relative.
Facteurs d'agressivité : gaz sulfureux (SO₂), gaz carbonique (CO₂), chlorures (bord de mer).
- Corrosion par l'eau
L'eau de mer et l'eau douce sont chargées en sels solubles actifs dans les piles de corrosion sur métaux.
L'eau de pluie et l'eau de condensation sont très peu chargées et leur conductivité électrique est faible (sauf les pluies acides).
Le mouvement des pièces et de l'eau accentue la détérioration par corrosion-érosion par abrasion (hélices) : il y a renouvellement d'oxygène.
Dans les circuits, le couplage acier avec cuivre, bronze, acier inoxydable entraîne des corrosions rapides.
- Corrosions par les sols
Le sol humide est un électrolyte. La nature du sol, acide ou alcalin, sa perméabilité à l'air, la présence de bactéries, influencent la vitesse de corrosion des métaux et alliages enterrés. Les sols acides ou très perméables sont agressifs. Les courants électriques vagabonds (courants de fuite) circulent dans les circuits de moindre résistance (canalisations) et entraînent des risques supplémentaires de corrosion.



7.0-4 Evolution de la corrosion en fonction des milieux



7.0-5 Courants de fuite dans le sol



7.0-6 Schéma d'une corrosion initiée par une rayure sur une carrosserie automobile

7.1 Corrosion galvanique

Définition

Risque de corrosion du fait du couple électrochimique entre les matériaux et/ou les revêtements en contact lors d'un assemblage hétérogène.

Des métaux différents, juxtaposés et mis dans un milieu donné même légèrement conducteur (une ambiance non sèche par exemple), ont tendance à créer un courant électrique proportionnel à leur différence de potentiel. Ce couplage (effet de pile) se traduit par la destruction plus ou moins rapide de l'élément ayant le plus petit potentiel (anode).

Moyen de prévention

On peut préventivement vérifier les risques de corrosion électrochimique d'un assemblage hétérogène en choisissant des couples de matériaux métalliques dont les potentiels électrochimiques sont les plus proches possibles : le tableau 7.1-1 propose ce choix parmi les principaux matériaux utilisés en mécanique générale.

Certains métaux (aluminium, cuivre, plomb), certains alliages (acier inoxydable, cupronickel) ou certains revêtements (cadmiage, chromage, nickelage, zingage) mettent en œuvre des composants ayant des aptitudes électrochimiques élevées, au point d'être utilisés pour la réalisation de piles et accumulateurs, et peuvent poser de réels problèmes lors d'associations hasardeuses.

Mode d'emploi du tableau

1. Reporter les deux matériaux choisis, l'un en abscisse, l'autre en ordonné, de manière à croiser les indications (si le croisement ne se réalise pas dans la zone chiffrée, inverser les entrées).
2. En cas de revêtement de surface, utiliser le même procédé en choisissant le métal du revêtement et non celui du support qui est protégé tant que la couche superficielle existe et empêche toute pénétration.
3. En cas de croisement en dessous du trait en pointillé (valeurs supérieures à 300), le métal en ordonnée est attaqué, et cela d'une manière d'autant plus rapide et forte que le chiffre (ddp) est élevé.
4. La rapidité du démarrage et la vitesse de destruction par corrosion sont proportionnelles à la différence de potentiel (ddp) entre les matériaux mis en œuvre.

5. L'effet galvanique est influencé par le rapport de surface des deux éléments. Si la surface du métal considéré (anode) est la plus petite, sa vitesse de corrosion croît ; dans le cas inverse, elle diminue.

6. Le métal couplé (en abscisse) ne subit pas de corrosion galvanique et bénéficie au contraire, d'un effet de protection proportionnel lui aussi à la différence de potentiel.

En conséquence, pour éviter cette corrosion, la différence de potentiel doit être la plus faible possible (elle est idéalement nulle en cas de montage homogène). A défaut l'élément de fixation devra être réalisé dans le matériau le plus noble (cathode), et les pièces à assembler dans le matériau le moins noble (anode), et/ou si possible la surface du métal considéré la plus grande vis-à-vis du métal couplé. En cas d'impossibilité d'obtenir une différence de potentiel en dessous de 300, l'emploi d'un isolant (bakélite, caoutchouc, néoprène, nylon, PVC, téflon®...) peut être une solution alternative intéressante.

7.1-1 Principaux matériaux utilisés en mécanique générale

Métal considéré : anode	Platine		Or	Acier inox A2	Argent	Nickel	Cuivre	Alliage cuivre-aluminium	Alliage cuivre-zinc (laiton)	Alliage cuivre-étain (bronze)	Étain	Plomb	Alliage fer-nickel à 25% de nickel	Alliage aluminium-cuivre	Fonte	Acier au carbone	Alliage léger de décolletage	Alliage léger de fonderie	Aluminium	Acier au carbone pour traitement thermique	Alliage aluminium-magnésium (Al-Mg)	Cadmium	Fer pur	Alliage aluminium-magnésium-Al-Mg	Chrome	Alliage aluminium-zinc-magnésium (Al-Zn-Mg)	Alliage étain-zinc (75% Sn - 25% Zn ou métal blanc)	Zinc	Magnésium		
	0	0																													
Platine	0																														
Or	130	0																													
Acier inoxydable austénitique A2 (AISI 304, ou 18-8)	250	120	0																												
Argent	350	220	100	0																											
Nickel	430	300	180	80	0																										
Cuivre	570	440	320	220	140	0																									
Alliage cuivre-aluminium (cupro-aluminium)	600	470	350	250	170	30	0																								
Alliage cuivre-zinc (Cu-Zn ou laiton)	650	520	400	300	220	80	50	0																							
Alliage cuivre-étain (Cu-Sn ou bronze)	770	640	520	420	340	200	170	120	0																						
Étain	800	670	550	450	370	230	200	150	30	0																					
Plomb	840	710	590	490	410	270	240	190	70	40	0																				
Alliage fer-nickel à 25% de nickel	930	800	680	580	500	360	330	280	160	130	90	0																			
Alliage aluminium-cuivre	940	810	690	590	510	370	340	290	170	140	100	10	0																		
Fonte	950	820	700	600	520	380	350	300	180	150	110	20	10	0																	
Acier au carbone	1000	870	750	650	570	430	400	350	230	200	160	70	60	50	0																
Alliage léger de décolletage	1000	870	750	650	570	430	400	350	230	200	160	70	60	50	0																
Alliage léger de fonderie	1065	935	815	715	635	495	465	415	295	265	225	135	125	115	65	65	0														
Aluminium	1090	960	840	740	660	520	490	440	320	290	250	160	150	140	90	90	25	0													
Acier au carbone pour traitement thermique	1095	965	845	745	665	525	495	445	325	295	255	165	155	145	95	95	30	5	0												
Alliage aluminium-magnésium (Al-Mg)	1100	970	850	750	670	530	500	450	330	300	260	170	160	150	100	100	35	10	5	0											
Cadmium	1100	970	850	750	670	530	500	450	330	300	260	170	160	150	100	100	35	10	5	0	0										
Fer pur	1105	975	855	755	675	535	505	455	335	305	265	175	165	155	105	105	40	15	10	5	5	0									
Alliage aluminium-magnésium-silicium (Al-Mg-Si)	1105	975	855	755	675	535	505	455	335	305	265	175	165	155	105	105	40	15	10	5	5	0									
Chrome ⁽¹⁾	1200	1070	950	850	770	630	600	550	430	400	360	270	260	250	200	200	135	110	105	100	100	100	95	95	0						
Alliage aluminium-zinc-magnésium (Al-Zn-Mg)	1225	1095	975	875	795	655	625	575	455	425	385	295	285	275	225	225	160	135	130	125	125	120	120	120	25	0					
Alliage étain-zinc (75% Sn - 25% Zn ou métal blanc)	1360	1230	1110	1010	930	790	760	710	590	560	520	430	420	410	360	360	295	270	265	260	260	255	255	160	135	0					
Zinc	1400	1270	1150	1050	970	830	800	750	630	600	560	470	460	450	400	400	335	310	305	300	300	295	295	200	175	40	0				
Magnésium	1950	1820	1700	1600	1520	1380	1350	1300	1180	1150	1110	1020	1010	1000	950	950	885	860	855	850	850	845	845	750	725	590	550	0			

Métal couplé : cathode

Les différences de potentiel (ddp) sont établies dans une solution aqueuse à 2% de chlorure de sodium et exprimées en millivolts, suivant la norme française NFE-25-032. Ce document ne traite pas des autres types de corrosion qui peuvent bien évidemment se superposer et attaquer les deux matériaux, y compris le métal couplé (cathode).

En dessous du trait pointillé, le métal en ordonnée est attaqué.

- Notes
- Le métal couplé ne subit pas de corrosion galvanique et bénéficie, au contraire, d'un effet de protection galvanique (faible si la différence de potentiel est petite, importante si la différence de potentiel est grande).
 - L'effet galvanique est influencé par le rapport de surface des deux métaux :
 - si la surface du métal considéré est la plus petite, sa corrosion augmente,
 - si la surface du métal considéré est la plus grande, sa corrosion diminue.
- Cet effet est d'autant plus accentué que la différence entre les deux surfaces est plus importante.

1. En milieu comme l'eau de mer ou les solutions salines, le chrome se dépassive plus ou moins dans le temps et son potentiel de dissolution diminue (pour atteindre 250 mV seulement par rapport au platine), ce qui tend à réduire l'effet de corrosion sur les métaux qui lui sont couplés.

7.2 Méthodes de lutte contre la corrosion

Généralités

Il n'existe pas de solution universelle de par la complexité du problème, il n'existe pas de métal inaltérable.

Pour chaque milieu, il existe un alliage moins exposé. Quatre types de solutions peuvent être retenus, avec différents principes de mise en œuvre :

- utilisation de revêtements protecteurs, non métalliques ou métalliques,
- métaux et alliages résistants à la corrosion,
- autoprotection par passivité du métal,
- protection cathodique ou électrochimique.

Ces solutions sont classées ci-après par nature de revêtement.

Protection par revêtements non métalliques

Peinture, laque, vernis. Solution relativement simple qui permet une décoration de la pièce à protéger. C'est une faible protection car une détérioration locale du revêtement accélère la progression de la corrosion (aération différentielle).

Applications. Automobile, électroménager, cycles... Esthétique, décoration.

Oxydation chimique

Méthode essentiellement appliquée à l'aluminium et ses alliages. L'épaisseur du film d'oxyde qui se forme naturellement à la surface ne dépasse pas 1/10^e de micron. C'est une protection insuffisante contre une attaque chimique ou l'abrasion. Le traitement d'oxydation permet de former à la surface du métal, par électrolyse, une pellicule d'alumine épaisse, dure et protectrice.

Applications. Pièces exposées en atmosphère extérieure.

Phosphatation. Méthode consistant à réaliser une sous-couche permettant une meilleure adhésion des peintures à la surface d'une pièce à protéger. La pièce est plongée dans une solution de phosphate de manganèse, de zinc ou de sodium, portée à une température de 80°C à 100°C. L'immersion dure de quelques minutes à une heure. Il y a formation de cristaux de phosphates de fer insolubles à la surface du métal qui permettront ensuite une meilleure adhésion mécanique de la peinture ou une protection naturelle.

Applications. Métaux ferreux, aciers, fontes. Epaisseur du revêtement : 10 à 20 µm. Anticorrosion. Bonne résistance au frottement. Déformation à froid des aciers et alliages d'aluminium.

Protection par revêtements métalliques

Immersion. Les pièces à protéger sont plongées dans un bain de métal en fusion :

Les revêtements possibles sont surtout des métaux à bas point de fusion :

- étain : étamage,
- zinc : zingage, galvanisation.

Applications. Protection contre la corrosion atmosphérique. Pièces de machines à laver, corps de vannes, bacs...

Diffusion. Les pièces à protéger sont soumises à un traitement thermique au contact d'un élément chimique. Celui-ci diffuse depuis la surface. La pièce est recouverte de métal pur en surface avec une sous-couche d'alliage par en dessous :

- shérardisation : cémentation à 350°C de sable et de gris de zinc,
- chromisation : cémentation au fluorure de chrome à 1050°C,
- calorisation : cémentation Al + Al₂O₃ à 850°C.

Applications. Pièces mécaniques. Esthétique. Décoration.

Métallisation. Le métal protecteur (Zn, Al) est fondu à l'aide d'un pistolet métalliseur à gaz. Un jet d'air comprimé pulvérise le métal fondu. Les gouttelettes sont ainsi projetées sur la pièce avec une grande vitesse (100 m/s environ), permettant leur soudure en donnant un dépôt très adhérent.

Applications. Canalisations souterraines en fonte ou acier, automobile. Très bonne protection.

Placage. Méthode s'effectuant sur les tôles au cours d'un laminage à chaud. La pression et la diffusion thermique assurent la liaison entre le métal à protéger et le métal protecteur. Le cuivre, le nickel, le laiton sont utilisés comme métaux protecteurs sur les métaux ferreux ainsi que l'acier inoxydable.

Applications. Construction mécanique, chaudronnerie, cuves.

Electrolyse. On fait passer un courant électrique dans un bain électrolytique par l'intermédiaire d'une cathode constituée de la pièce à protéger (pôle -) et l'anode du métal à déposer. Le métal d'apport se dissout dans l'électrolyte et vient se déposer sur la cathode. Principaux métaux d'apport utilisés : cuivre, nickel, chrome, zinc, étain. Plusieurs étapes peuvent se succéder : par exemple, le chromage d'une pièce en acier nécessite un cuivrage suivi d'un nickelage.

Applications

- Dépôts épais : dépôts pour gravure électronique, vilebrequins, matrices, moules...
- Dépôts minces : décoration, sous-couche avant dépôt final, pistons et segments, industrie électrique.

Métaux et alliages résistant à la corrosion

Autoprotection par la nature de la structure (cubique à faces centrées) **ou par passivation naturelle selon les éléments associés.** Ce sont souvent des métaux à phase unique qui sont utilisés, soit des métaux purs, soit des alliages à solution unique :

- métaux purs (nickel, plomb, titane, aluminium), qui résistent bien à la corrosion mais qui offrent de faibles caractéristiques mécaniques ;
- aciers alliés au chrome : à partir d'une teneur de 12% de chrome, il se forme une couche d'oxyde compacte et adhérente ;
- aciers inoxydables : avec 18% de chrome et au moins 8% de nickel, on obtient une structure austénitique. D'autres éléments, en faible quantité, peuvent être rajoutés pour encore augmenter la résistance à la corrosion (Mo, Ti, Nb, Cu...).

Applications. Toutes situations agressives chimiquement. Agroalimentaire, médical, industries chimiques.

7.3 Les revêtements électrolytiques

Le zingage électrolytique ou électrozingage

Le zingage électrolytique est un procédé simple d'utilisation et économiquement compétitif.

Il est réalisé par électrolyse d'une solution aqueuse contenant des sels métalliques et non métalliques dont la nature dépend de l'application envisagée et des propriétés souhaitées du revêtement. La grande variété des dépôts obtenus suivant la formulation et les conditions de dépôt rend ce revêtement incontournable dans de nombreuses applications.

Les anodes pour le zingage électrolytique sont du zinc, le métal consommé est de haute pureté car sa qualité conditionne la marche du bain d'électrolyse.

Le revêtement par voie électrolytique ajoute à la régularité du dépôt obtenu, qui est la caractéristique majeure du procédé, le pouvoir dans le cas du zinc, d'être anodique vis-à-vis du fer (acier) et de présenter ainsi les conditions d'une bonne protection contre la corrosion.

Cette régularité de l'épaisseur de dépôt présente un avantage important pour les pièces délicates et précises, les tolérances restent acquises sans nécessité des opérations complémentaires de reprise de finition.

Le revêtement par voie électrolytique se prête parfaitement bien au traitement éventuel de chromatisation qui permet de stabiliser l'aspect du dépôt de zinc, tout en renforçant la tenue à la corrosion.

Le zingage électrolytique s'effectue dans des installations classiques d'électrolyse mais évidemment spécialement affectées au traitement par le zinc.

On utilise le plus souvent des bains cyanurés, la densité de courant étant de l'ordre de $3A/dm^2$.

Pour les petites pièces, il est avantageux de traiter au tonneau.

Les pièces importantes (gros diamètres, longueurs inhabituelles) seront traitées à l'attache mais avec un coût nettement plus important, afin d'éviter les phénomènes de chocs sur filets.

Importance de la séquence d'électrozingage

Satisfaire les critères de qualité exigés par les donneurs d'ordre impose à l'exploitant la maîtrise du procédé, en l'occurrence la maîtrise de la stabilisation de l'électrolyte pour une conduite optimale de fonctionnement du réacteur. Ainsi, et s'agissant d'un réacteur fermé de type batch (cas du traitement à l'attache ou en vrac), la composition du bain évolue tout au long des campagnes suite aux réactions susceptibles de se dérouler au sein du réacteur mais également en raison des entraînements des postes amont vers les postes aval.

De nombreux travaux ont permis d'établir que les propriétés structurales d'un revêtement électrolytique dépendent de la densité de courant imposée, de la composition de l'électrolyte (c'est-à-dire de la forme chimique sous laquelle se trouve la phase mère dans l'électrolyte ainsi que de la nature des additifs), du substrat et du procédé d'application.

Une approche globale basée sur l'établissement d'un bilan matière pour chaque constituant minéral de l'électrolyte permet à l'exploitant une meilleure compréhension du fonctionnement du réacteur. Ce faisant, il sera en situation de définir les consignes de concentration, et par là-même, les actions correctives à mener pour maintenir l'équilibre de fonctionnement du système.

La chromatisation

La chromatisation est un traitement de conversion chimique pouvant être appliqué par immersion ou par aspersion à partir d'une solution contenant du chrome hexavalent comme constituant principal. Elle permet de former des couches complexes d'oxydes et de sels de chrome sur des revêtements électrolytiques de métaux communs comme le zinc. Ce procédé confère au matériau des propriétés particulières telles que :

- une amélioration de la résistance à la corrosion des systèmes de protection cathodique de revêtements de zinc sur substrat acier due à l'effet inhibiteur de corrosion du chrome hexavalent,
- une excellente base d'accrochage pour les finitions organiques.

Matériaux susceptibles d'être chromatisés

Le procédé de chromatisation peut être réalisé sur un certain nombre de métaux et leurs alliages, tels que le zinc électrolytique ou galvanisé, l'aluminium, l'argent, le cadmium, le magnésium et le cuivre.

Cette partie est consacrée uniquement à la chromatisation sur zinc, utilisée dans le domaine des fixations.

Méthodes d'application

La surface de la pièce à chromater doit être exempte de graisses pour permettre une bonne adhérence et une homogénéité de la couche de conversion. Pour cette raison, on réalise généralement le traitement de chromatisation directement après le rinçage de l'étape de zingage, ou après le dégazage.

Le traitement consiste à immerger le produit à chromater (durée d'immersion variant de quelques secondes à plusieurs minutes) dans une solution acide constituée majoritairement :

- des sels de chrome hexavalent ou d'un mélange de sels de chrome hexavalent et trivalent,
- d'anions activateurs tels que fluorures, chlorures, sulfates, phosphates... Ils déterminent les caractéristiques, la vitesse de formation et les propriétés du film chromaté,
- d'anions réducteurs (acétates, formiates, oxalates...) qui activent la cinétique de réduction du chrome hexavalent en chrome trivalent,
- d'un acide qui permet d'activer le substrat métallique.

Rôle de la couche

La couche de chromatisation réalisée sur un matériau revêtu peut avoir un triple rôle :

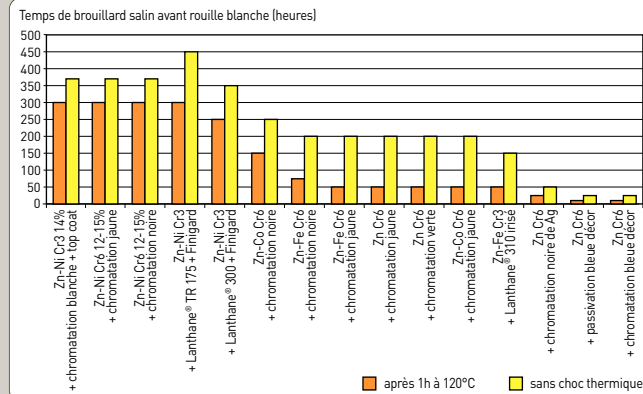
- améliorer la résistance à la corrosion du matériau en retardant notamment le phénomène de rouille blanche du zinc, puis de rouille rouge de l'acier,
- donner à la pièce un aspect esthétique sans autre traitement,
- assurer l'adhérence d'un revêtement organique en conditionnant la surface pour qu'elle soit apte à recevoir une finition organique.

Tenue à la corrosion

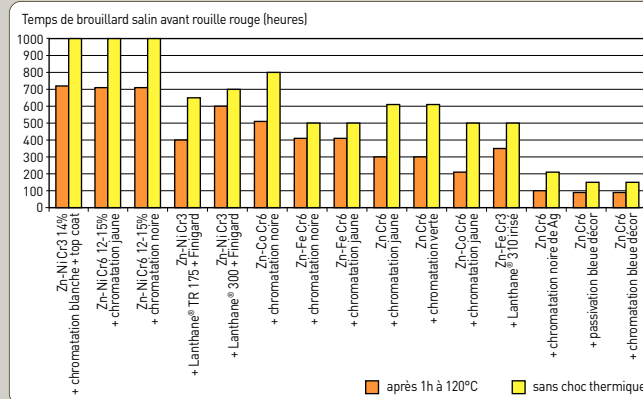
La couche de chromatisation agit, dans un premier temps, comme couche passive et barrière, diminuant la vitesse de dissolution du zinc, même lorsqu'il est couplé à l'acier. La «durée de vie» de la couche de zinc est ainsi augmentée, sans diminuer significativement l'efficacité de la protection galvanique. C'est aussi un inhibiteur cathodique efficace diminuant ainsi la réduction de l'oxygène à la surface du métal.

Enfin, la présence d'ions «chromate» solubles dans la couche de chromatisation apporte un effet cicatrisant.

Les diagrammes 7.3-1 et 7.3-2 représentent respectivement les tenues au brouillard salin de divers dépôts de zinc et zinc alliés revêtus de différents types de chromatisation avant apparition de rouille blanche et avant apparition de rouille rouge. Pour chaque figure, sont comparés les systèmes ayant subi ou non un choc thermique de 1 heure à 120°C. Ces valeurs sont données à titre d'exemple et les besoins doivent être précisés à la commande. Les tenues au brouillard salin varient avec l'épaisseur du revêtement et le processus de réalisation (au tonneau ou à l'attache). Elles sont constatées en sortie de traitement. Les opérations postérieures (notamment le conditionnement) peuvent dégrader les performances.



7.3-1 Résistance au brouillard salin de revêtements de zinc chromatés avant apparition de rouille blanche



7.3-2 Résistance au brouillard salin de revêtements de zinc chromatés avant apparition de rouille rouge

7.4 Fragilisation par l'hydrogène

Fragilisation par l'hydrogène due à certains traitements de surface

Aussi bien au cours de son histoire métallurgique que durant son utilisation, un matériau métallique, tel l'acier, est soumis à différentes sources d'hydrogène.

L'interaction hydrogène-acier peut engendrer d'importantes détériorations du matériau dues à une perte de ses propriétés mécaniques et conduire ainsi à une rupture différée des pièces.

L'importance de ce phénomène et de ses conséquences justifie la multitude de travaux qui lui est dédiée.

Dans une gamme d'électrozingage, les traitements chimiques et/ou électrolytiques sont générateurs d'hydrogène. Si le volume d'hydrogène produit peut être réduit, il ne peut pas être totalement évité aussi bien durant la phase de dépôt qu'au cours des traitements chimiques et/ou électrolytiques antérieurs, dits «de préparation», tels que le dégraissage cathodique ou le décapage acide de l'acier. Une réflexion sur la séquence de préparation montre que lorsqu'il est effectué un dégraissage alcalin anodique entre le décapage acide et le zingage proprement dit, il se produit une «désensibilisation» de l'interface en oxydant l'hydrogène piégé à l'issue du décapage et donc une diminution de la sensibilité du métal avant électrozingage. L'interaction hydrogène-acier requiert donc une attention toute particulière si l'on considère son impact sur les propriétés d'usage des produits finis.

Jusqu'en 2000, les modèles interprétatifs de la décharge cathodique de l'hydrogène sur acier et des divers endommagements récurrents ont fait l'objet d'un consensus quasi général. Dans ce contexte, et quelle que soit la nature de l'électrolyte considéré, les mécanismes établis font intervenir une succession d'étapes élémentaires cathodiques électrochimiques et chimiques.

Le taux de recouvrement de l'acier par l'hydrogène est plus important en milieu acide qu'en milieu neutre ou basique, en raison de l'absence de molécules d'eau et d'ions HO^- adsorbés.

S'agissant des dommages récurrents, ils sont traités en termes d'hydrogène «interne» et «externe». Ainsi, la fragilisation et la décohésion interne de l'acier sont expliquées par l'hydrogène interne, c'est-à-dire l'hydrogène introduit avant la mise en service. Quant à la rupture différée sous contrainte, l'hydrogène externe, c'est-à-dire l'hydrogène introduit lors de la mise en service, permet de l'expliquer.

Depuis 2000, l'apport de la physique de la matière condensée a permis une meilleure perception de l'état de l'élément d'alliage hydrogène en solution solide dans l'acier et de l'ion H^+ en solution.

Précisons qu'en intégrant structure électronique et microstructure de l'acier, état physique de l'ion H^+ et mouvement des dislocations dans l'acier, le mécanisme cathodique protonique permet dans un schéma unifié de rendre compte du chargement de l'hydrogène dans l'acier et de tous les modes d'endommagements associés.

La littérature rapporte que la valeur de la vitesse de diffusion de l'hydrogène dans le zinc massif présente une forte dispersion, bien que l'on admette qu'elle est plus rapide que dans le fer. On peut donc s'attendre à ce que le zinc électrodéposé sur acier ne joue pas le rôle de barrière de diffusion de l'hydrogène. C'est ce qui ressort notamment des travaux sur l'électrozingage en milieu alcalin, qui montre que :

- durant la période dite «de temps de prise», période au cours de laquelle l'interface a un taux de recouvrement en zinc très faible, la décharge de l'hydrogène est effective ;
- les cinétiques de perméation électrochimique d'un dépôt de zinc non couvrant de $2\mu\text{m}$ d'épaisseur sur acier permettent de conclure que le chargement en hydrogène perdure au cours de l'électrozingage ;
- pour des pièces de forme (vis en acier 38Cr4 traitées au tonneau), les quantités d'hydrogène désorbé varient notablement selon la nature de l'acier (trempé-revenu, carbonitruré-revenu, écroui) et, dans une moindre mesure, avec la densité de courant apparente et à quantité d'électricité dépensée, c'est-à-dire avec l'épaisseur de revêtement ($3 \text{ à } 11\mu\text{m}$).

Technique de mesure	Zinc (99,99%)	Fer α	Fer γ
Volumétrie à gaz	$5,25.10^{-4}$	7.10^{-5}	5.10^{-12}
Perméation électrochimique	$5,25.10^{-5}$	-	-
Perméation en phase gazeuse	$6,86.10^{-1}$	-	-

7.4-1 Coefficients de diffusion ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) du zinc et du fer (α et γ)

Quoi qu'il en soit, les caractéristiques aussi bien surfaciques que volumiques, donc les paramètres physico-chimique et métallurgiques de l'acier, sont essentielles pour la compréhension des phénomènes de fragilisation et de rupture différée sous contraintes de l'acier électrozingué. Afin de s'en affranchir, la solution industrielle adoptée consiste à optimiser la gamme de traitements

et à étuver les pièces en fin de gamme, suivant une procédure fondée sur un savoir-faire ou sur des recommandations générales. Il est à noter que la procédure industrielle ne tient pas compte des effets cumulatifs des différentes étapes du traitement, ni de la complexité des phénomènes mis en jeu qui dépassent les notions de chargement cathodique (phase de sensibilisation) et de dégazage thermique (désorption). En effet, une partie de l'hydrogène diffusé peut être absorbée dans le réseau métallique de façon irréversible. S'il parvient à se recombiner ultérieurement, la rupture peut être différée. Aussi, effectue-t-on une désorption thermique dans des conditions qui peuvent assurer une marge de sécurité, sans exclure toutefois les accidents dans certains cas particuliers.

Avec les dépôts électrolytiques à partir d'une solution aqueuse (zingage, cuivrage, nickelage, cadmiage, chromage...) ou à l'occasion du décapage ou du dégraissage chimique, ou de phosphatation, il est engendré un risque de rupture différé due à la fragilisation des aciers par l'hydrogène en particulier sur :

- les vis en acier allié ou non allié, de classe de qualité ≥ 10.9 ,
- les écrous en acier allié ou non allié, de classe de qualité ≥ 10 ,
- les rondelles de dureté ≥ 310 HV (Vickers),

Toutes les pièces comme les pièces fortement écrouies doivent faire l'objet d'un dégazage. Si l'hydrogène atomique (H⁺) pénètre dans la matière, il peut

provoquer une diminution de la ductilité et de la résistance mécanique. Il peut également provoquer des micro-fissurations qui affaiblissent rapidement les matériaux d'une façon irréversible et imprévisible pouvant entraîner la rupture des pièces concernées.

Traitement thermique de dégazage

Les pièces qui ont subi un traitement électrolytique ou un décapage chimique et qui sont soumises à la fatigue ou à des efforts continus en service, les pièces en acier fortement écroui (vis à filetage roulé et après traitement thermique) avec résistances et duretés élevées ($R_m \geq 1000$ MPa, HV ≥ 310) ou de classe ≥ 10 à 12.9 doivent subir un dégazage. Il est bon d'effectuer dans un laps de temps de 4h et de préférence dans l'heure qui suit le revêtement électrolytique, avant chromatation. La température de maintien pour les aciers doit être comprise entre 190 et 230°C.

- Le tableau 7.4-2 indique des durées de traitement qui peuvent servir de référence pour les dépôts à base de zinc en général (la norme NF EN ISO 4042 spécifie que «il n'a pas été possible de donner une durée exacte de dégazage»). Ces durées sont données à titre strictement indicatif et un traitement thermique de dégazage ne constitue pas une garantie d'élimination de tout risque de fragilisation par l'hydrogène.

7.4-2

Résistance à la traction R_m (MPa)	Dureté (HV)	Classes équivalentes	Délai de réalisation (h)	Plage de température (°C)	Épaisseur des pièces (diamètre ou hauteur)	Durée du traitement (h)
$R_m < 1000$	< 300	4 - 4.6 - 5 - 5.8 - 6 - 6.8 - 8 - 8.8 (B7)		Traitement non obligatoire (si $R_m \leq 1000$ MPa)		
$1000 \leq R_m \leq 1450$	≤ 300	10 - 10.9 - 12 - 12.9 - 33H	Dégazage dans les 4h maxi après réalisation du revêtement électrolytique	190 à 230	< 12 mm	4
	≤ 400				de 12 à 25 mm	12
≤ 440		> 25 mm			24	
	≤ 545	< 12 mm			12	
		de 12 à 25 mm			18	
$R_m > 1800$	≤ 545	45 H (suivant dureté)			> 25 mm	24
			Autres dimensions		24	

7.5 Les revêtements lamellaires NF EN ISO 10683

Il n'y a pas de désignation générique, de nombreux revêtements lamellaires existent, liés au formulateur du produit. Chaque formulateur peut produire des variantes des produits présentés ci-dessous, offrant des couleurs différentes (noir par exemple), d'autres plages d'épaisseur et/ou de coefficient de frottement...

GEOMET®

Formulateur : NOF METAL COATING GROUP.

Le GEOMET® est un revêtement mince, non électrolytique, dont la chimie brevetée est à base aqueuse. De couleur gris aluminium, il est constitué de lamelles de zinc et d'aluminium dans une matrice inorganique. Il a été développé comme une alternative 100% sans chrome.

Le GEOMET® assure la protection des surfaces métalliques grâce l'action combinée de plusieurs phénomènes :

- Effet barrière : la superposition de lamelles de zinc et d'aluminium confère une excellente barrière entre le substrat en acier et le milieu corrosif.
- Protection sacrificielle (ou protection cathodique) : le zinc s'oxyde préférentiellement à la place de l'acier.
- Passivation : le zinc et l'aluminium sont passivés dans toute l'épaisseur du revêtement, ce qui permet un ralentissement de la consommation naturelle du zinc. Le GEOMET® 500 est lubrifié dans la masse. Il permet d'obtenir une lubrification contrôlée avec un coefficient de frottement compris entre 0,12 et 0,18 (suivant ISO 16047).

Le GEOMET® ne contient pas de métaux lourds tels que cadmium ou plomb, pas de chromates ou de chrome (Cr3 ou Cr6), pas de CFC et s'inscrit dans une démarche de protection de l'environnement, en réponse aux Directives Européennes (voir en fin d'ouvrage).

Méthodes d'application

Après une phase de préparation : dégraissage chimique puis généralement décapage par action mécanique (grenailage)

Le GEOMET® s'applique par trempé ou pulvérisation, en vrac ou à l'attache.

Principales propriétés

La résistance à la corrosion n'est pas modifiée par une exposition préalable des pièces de 100 heures à 180°C.

Pas de fragilisation par l'hydrogène du fait de son application.

Excellente résistance aux solvants, carburants, huiles moteur, liquides de refroidissement, liquides de frein, solvants organiques (test VDA 621-412).

Conductivité suffisante pour la dépose d'une cataphorèse

Cataphorèse envisageable en finition

Peut être complété par une peinture. Cependant le test d'adhérence par quadrillage n'est pas adapté en raison de la structure lamellaire du revêtement.

Résistance excellente à la corrosion bimétallique avec l'aluminium et le zinc.

Maintien des performances anticorrosion du revêtement pour des expositions jusqu'à 300°C.

Attention à valider la compatibilité de l'épaisseur du revêtement et les tolérances du filetage.

Sensibilité à l'humidité avant montage qui peut modifier le coefficient de frottement et sensibilité aux phénomènes d'abrasion.

Revêtement	Poids de couche	Essai Brouillard Salin (ISO 9227)*
GEOMET®321/500 Grade A	> 24 g/m ²	> 240 heures sans rouille blanche > 720 heures sans rouille rouge
GEOMET®321/500 Grade A + finition	> 24 g/m ² + finition (1 couche)	> 240 heures sans rouille blanche > 720 heures sans rouille rouge
GEOMET®321/500 Grade B	> 36 g/m ²	> 240 heures sans rouille blanche > 1 000 heures sans rouille rouge
GEOLBLACK®	> 24 g/m ² + finition noire (2 couche)	> 1 000 heures sans rouille rouge

*Les résultats peuvent varier selon le substrat, la géométrie des pièces et le type de procédés d'application.

Nota : hors Europe il existe d'autres références dont les caractéristiques peuvent être légèrement différentes.

DELTA PROTEKT®

Formulateur : DÖRKEN MKS Système.

La gamme de produits Delta Protekt® se compose de procédés non électrolytiques de zinc lamellaire avec finition de couleur argentée.

Le système est constitué d'une sous-couche inorganique à haute teneur en lamelles de zinc et aluminium (DELTA-PROTEKT® KL100) et de couches de finition de type vernis inorganique aqueux à base silicium de la série VH 300 qui permettent d'obtenir les différents coefficients de frottement requis par l'industrie automobile (VH301.1GZ, VH315, VH302GZ)

Le procédé est totalement exempt de chrome, plomb ou cadmium, ni de produits CMR.

Le DELTA-PROTEKT® KL105 est une version de zinc lamellaire auto lubrifiée de dernière génération qui permet d'augmenter la résistance à la corrosion pour des épaisseurs équivalentes avec un coefficient de frottement de 0,12- 0,18.

Méthodes d'application

- En vrac par immersion (au trempé), puis centrifugation (selon les pièces) ou égouttage.
- A l'attache : pulvérisation au pistolet pneumatique, HVLP ou électrostatique.
- Préparation par lavage, grenailage ou phosphatation.
- Condition de cuisson : 200 à 240°C pour le zinc lamellaire, 180 à 220°C pour les finitions.

Principales propriétés

- Film sec de 5 à 15 microns.
- Tenue au brouillard salin : 200 heures rouille blanche, 600 à 1000 heures rouille rouge, voir plus avec le DELTA-PROTEKT® KL105.
- Protection cathodique par effet sacrificiel de zinc.
- Effet barrière par superposition de lamelles de zinc et d'aluminium.
- Résiste aux solvants organiques.
- Pas de fragilisation par l'hydrogène du fait de son application.
- Diminution de la corrosion galvanique avec l'aluminium.
- Maîtrise du coefficient de frottement.
- Protection contre les acides, les bases, les détergents, les huiles, l'essence...
Attention à valider la compatibilité de l'épaisseur du revêtement et les tolérances du filetage.

DELTATONE®

Formulateur : DÖRKEN MKS Systeme.

Le Delta®-Tone est un revêtement de zinc lamellaire réalisé en couches minces de couleur gris argent.

Il est composé d'un liant inorganique contenant zinc et aluminium.

Il ne contient pas de métaux lourds comme plomb ou cadmium, pas de chromates, pas de chrome hexavalent, pas de PCB ni CFC.

La polymérisation effectuée après le dépôt lui confère une couleur gris argent.

La bonne résistance à la corrosion résulte notamment de la protection cathodique et de l'effet barrière du aux paillettes de zinc et d'aluminium.

Les températures de polymérisation excluent toute modification métallurgique.

Son pouvoir de pénétration, associé à une bonne mouillabilité du substrat, permet de revêtir des pièces de formes complexes.

Il peut être suivi d'une finition organique Delta®-Seal GZ (argent ou noire) qui permet d'ajuster le coefficient de frottement (0,10 à 0,14) et apporte une coloration utile pour les opérations de repérage.

Méthodes d'application

- En vrac par immersion (au trempé), puis centrifugation (selon les pièces) ou égouttage.
- A l'attache : pulvérisation au pistolet pneumatique, HVLP ou électrostatique.
- Préparation par lavage, grenailage ou phosphatation.
- Température de polymérisation inférieure à 220°C.

Principales propriétés

- Tenue au brouillard salin 400 heures rouille rouge pour un poids de couche de 20/26 g/m² soit une épaisseur de 6 à 10 microns.
- Tenue au brouillard salin 800 heures rouille rouge pour un poids de couche de 32/38 g/m² soit une épaisseur de 10 à 15 microns.
- Pas de fragilisation par l'hydrogène du fait de son application.
- Attention à valider la compatibilité de l'épaisseur du revêtement et les tolérances du filetage.

Magni 565®

Formulateur : MAGNI EUROPE®

Le MAGNI 565® est un revêtement bi couches, combinant une base inorganique sacrificielle chargée en zinc et aluminium (MAGNI B46) et une couche de finition (MAGNI B18) organique chargée en aluminium qui améliore la tenue à la corrosion et régule le coefficient de frottement.

Pas de Chrome 6, Plomb, Cadmium, Baryum, Cuivre ou Nickel.

Épaisseur de la couche de base 7 à 8 µm, de la couche de finition 4 à 6 µm.

Méthodes d'application

- En vrac par immersion (au trempé) puis centrifugation (selon les pièces) ou égouttage
- A l'attache : pulvérisation au pistolet pneumatique ou électrostatique
- Préparation grenailage, dégraissage, phosphatation

Pré-cuisson à basse température, inférieure à environ 150°C de la sous-couche puis cuisson à 250°C maximum

Deuxième sous-couche possible selon les performances recherchées

Couche de finition par imprégnation, essorage et cuisson

Principales propriétés

- Tenue au brouillard salin ≥ 720 heures rouille rouge
- Pas de fragilisation par l'hydrogène du fait de son application.
- Possibilité d'application sur Zinc ou Zamak
- Lubrifiant intégré
- Coefficient de frottement variable selon couche de finition :
 - B18 : $\mu = 0,15 \pm 0,03$ (argent)
 - B28N : $\mu = 0,16 \pm 0,03$ (argent)
 - B18N : $\mu = 0,18 \pm 0,03$ (argent)
 - B18T : $\mu = 0,24 \pm 0,03$ (argent)
 - B37E : $\mu = 0,12 \pm 0,03$ (noir)
 - B37 : $\mu = 0,15 \pm 0,03$ (noir)

Attention à valider la compatibilité de l'épaisseur du revêtement et les tolérances du filetage.

VARIANTE : MAGNI 594® ($\mu = 0,12 \pm 0,03$, argent)

Nota : La norme NF EN 10683 « Eléments de fixation – revêtements non électrolytiques de zinc lamellaire » a fait l'objet d'une révision parue en 2014.

Les principales modifications sont les suivantes :

- application à tous les types de fixation
- description des différents systèmes de revêtement de zinc lamellaire
- définitions relatives aux revêtements pour fixation déplacées dans une nouvelle norme ISO 1891-2
- spécification détaillées concernant le chrome hexavalent
- priorisation de la résistance à la corrosion sur l'épaisseur de revêtement
- extension de la gamme des caractéristiques et des méthodes d'essais associées (essai Kesternich, détermination épaisseur et poids, relation couple/tension...)
- prise en compte des facteurs de manutention en vrac, et conséquences des process automatiques (stockage, transport...)
- révision du classement des essais à effectuer pour chaque lot en contrôle de fabrication ou spécification particulière
- désignation complétée et étiquetage
- nouvelle annexe A informative : Conception et assemblage des fixations revêtues
- nouvelle annexe B informative : Epaisseur de revêtement et jeu dans le filetage pour les filetages métriques ISO
- nouvelle annexe C informative : Contrôle de l'agressivité de l'enceinte de brouillard salin pour les fixations revêtues

7.6 Galvanisation à chaud

Définition

La galvanisation à chaud consiste à recouvrir de zinc un métal ferreux, principalement l'acier, par l'immersion dans un bain de zinc en fusion. Le revêtement ainsi obtenu doit avoir les meilleures qualités de continuité, de régularité d'épaisseur et d'adhérence au métal de base. C'est la recherche de ces qualités qui conditionne les techniques d'exécution du procédé.

Caractéristiques du revêtement

La température de fusion du zinc est de 419°C ; la galvanisation à chaud s'effectue normalement de 440 à 460°C.

A l'immersion du fer (acier) dans le zinc fondu, il se produit une réaction entre les deux métaux qui amène une diffusion entre le fer et le zinc entraînant la formation de couches d'alliages.

L'examen micrographique de coupes des revêtements permet de différencier les phases qui se succèdent du fer vers la surface extérieure :

	Alliage de	Dureté (Mpa)
- phase gamma ou couche d'adhérence	21 à 28% de fer	4500-5500
- phase delta :	7 à 12% de fer	2500-4500
- phase dzêta :	5 à 6% de fer	1800-2700
- phase éta ou couche de zinc pur	≤ 0,03% de fer	300-500

La galvanisation apporte aux pièces en acier une double protection contre la corrosion :

- protection physique par la barrière / écran que forme le revêtement de zinc et sa tenue à la corrosion.
- protection électrochimique par effet cathodique, due au pouvoir sacrificiel en vas de blessure du revêtement.

La très faible vitesse de corrosion du zinc permet d'obtenir des pièces avec une longévité remarquable.

Annuel	Milieu	Temps moyen de longévité du zinc (*)
0,5 à 1,5 microns	Extérieur en milieu rural	50 ans et +
1 à 3 microns	Extérieur en milieu urbain, selon le taux de pollution	25 à 30 ans et +
1,5 à 4 microns	Milieu marin	20 à 30 ans et +
3 à 8 microns	Milieu industriel	15 à 20 ans et +

* Epaisseur de revêtement conforme à la norme NF EN ISO 1461 (Ces données n'ont aucune valeur contractuelle)

Les différences d'épaisseur de ces couches dépendent, comme d'ailleurs l'épaisseur totale du revêtement, d'un certain nombre de facteurs influencés par l'intensité et la durée de la réaction par l'opération d'immersion dans le bain de zinc.

L'importance des opérations de préparation

La galvanisation à chaud nécessite un traitement de préparation de surface particulier de façon à ce que le contact fer-zinc, dont il vient d'être question, se réalise intimement en tous points des pièces traitées.



Les opérations préliminaires sont, dans l'ordre : dégraissage, rinçage, décapage, rinçage, fluxage*, préchauffage et couvert (pour la galvanisation humide).

*Le fluxage consiste à déposer sur la surface des pièces un mélange de chlorure de zinc et de chlorure d'ammonium. L'opération a trois objectifs :

- parfaire la préparation de surface (dissolution des oxydes de fer réformés à la surface au cours de l'opération de rinçage),
- protéger la surface de toute oxydation avant immersion dans le bain de zinc,
- assurer une bonne mouillabilité de la surface des pièces par le zinc fondu.

La qualité finale du revêtement dépend en grande partie de la maîtrise du processus de préparation, puis de la maîtrise du cycle de température pendant l'opération de revêtement proprement dite.

7.6-1 Coupe micrographique d'un revêtement par galvanisation

	Couche	Microdureté Vickers
	éta	70
	dzêta	179
	delta	244
	gamma	450
	acier	159

Galvanisation proprement dite

La qualité d'une galvanisation dépend des opérations préliminaires de préparation de surface que nous venons de voir, et dont le rôle est extrêmement important sur ce qu'on appelle la «prise de zinc» résultant du contact Fe-Zn. Elle dépend aussi d'un nombre appréciable de facteurs dont les principaux sont :

- la température du bain de zinc,
 - la durée d'immersion,
 - la vitesse de retrait des pièces,
 - la composition du zinc dans le bain,
 - le refroidissement suivant le retrait,
- et évidemment l'influence de la nature des aciers, constituant les objets ou structures à galvaniser.

Applications

Les profilés galvanisés ont trouvé des applications particulièrement intéressantes dans la construction métallique : structures de bâtiments, charpentes, pylônes de grande hauteur, etc.

Au contact de la galvanisation avec le béton, il se crée une couche d'hydroxy zincate de calcium qui se comporte comme une couche de passivation et améliore l'adhérence au béton, évitant ainsi l'éclatement du béton provoqué par l'oxyde de fer.

Industrie du tréfilage de l'acier

La galvanisation à chaud est pratiquée systématiquement dans toutes les usines de tréfilage de l'acier. L'opération se fait en continu.

Industrie du tube d'acier

Toutes les usines de fabrication de tubes d'acier (tubes soudés et tubes étirés sans soudure) possèdent des installations de galvanisation très importantes et fortement mécanisées dans toutes les différentes opérations de traitement car le tube galvanisé a de très nombreuses applications, aussi bien comme conducteur de fluides (canalisations d'eau, de gaz, d'air comprimé, d'air de conditionnement thermique), que comme élément de construction : pylônes, échafaudages métalliques, structures et charpentes tubulaires, etc.

Industrie de la tôle d'acier

La galvanisation à chaud des tôles, qui s'effectuait, il y a encore quelques années, suivant le procédé classique sur des tôles en dimensions finies sous le nom de galvanisation feuille-à-feuille, est actuellement presque entièrement supplanté par la galvanisation des tôles en bandes continues.

Tôles prélaquées

Depuis les années 1960, les bandes d'acier galvanisées jouissent d'une présentation complémentaire qui, depuis lors, connaît une très forte progression de ses applications : il s'agit de la tôle prélaquée sur tôle d'acier galvanisée.

Les traitements de préparation de surface et d'application des laques sont réalisés sur des lignes de prélaquage importantes exploitant des procédés technologiques très perfectionnés qui concourent à l'obtention de produits de hautes performances en qualité, adhérence, ductilité... et en aspect : homogénéité, fixité des couleurs avec de nombreuses teintes de présentation des produits.

La tôle prélaquée est fournie commercialement en bandes de 0,60 à 1,50 m de largeur, en feuilles de mêmes largeurs et en bandes refendues toutes largeurs.

Ses principales applications se situent en construction métallique et bâtiment (couvertures, bardages, murs, rideaux...), en climatisation, en électroménager, en agriculture (équipements agricoles), en construction automobile, en emballage...

Application aux fixations

La norme NF EN ISO 10684 spécifie les matériaux, les étapes du procédé, les dimensions et caractéristiques fonctionnelles des revêtements de galvanisation à chaud s'appliquant aux fixations à pas gros de M8 à M64, de classes de qualité jusqu'à 10.9 pour les vis et goujons et jusqu'à la classe 12 pour les écrous.

La galvanisation à chaud n'est pas recommandée pour les fixations à pas fin et/ou de diamètre inférieur à M8.

Une des caractéristiques d'un revêtement par galvanisation est son épaisseur, au minimum de 40 µm localement et en moyenne au minimum de 50 µm. Les filetages doivent donc être adaptés afin de conserver les écarts fondamentaux (jeux fonctionnels) nécessaires. Deux méthodes le permettent :

- des vis dont le filetage est de position de tolérance g ou h avant revêtement, avec des écrous à filetage majoré, de classe de tolérance 6AZ ou 6AX après revêtement. L'écrou sera alors marqué Z ou X immédiatement après le marquage de sa classe de qualité.
- Des vis à filetage minoré, de classe de tolérance 6az avant revêtement, avec des écrous à filetage de position de tolérance H ou G après revêtement. La vis sera alors marquée U immédiatement après le marquage de sa classe de qualité.

Attention : Les écrous à filetage minoré ne doivent JAMAIS être montés sur des vis à filetage minoré il existe un risque majeur de ruine de l'assemblage par d'arrachement du filet.

- Les marquages Z, X ou U ci-dessus indiqués doivent être repris sur l'emballage.
- Cependant, si vis et écrous sont emballés ensemble, et livrés dans l'emballage scellé du fabricant, le marquage complémentaire des produits n'est pas obligatoire : le marquage obligatoire de l'emballage est considéré comme suffisant.
- Le marquage complémentaire des produits et de l'emballage n'est pas non plus obligatoire dans le cas d'un produit défini dans une norme de produit qui spécifie la tolérance de filetage des vis (ou goujons) et écrous, impliquant de ce fait que le fabricant n'a pas le choix de la tolérance de filetage.

Avertissement : Pour les filetages M8 et M10, les charges d'épreuve et les contraintes sous charge d'épreuve des écrous ainsi que les charges ultimes en traction et les charges d'épreuve des vis et goujons sont spécifiées dans l'annexe A de la norme NF EN ISO 10684.



7.6-2 Application de produits galvanisés : pylônes



7.6-3 Application de produits galvanisés : antennes

7.7 Chromage

Principe

Ce procédé de revêtement électrolytique est un des plus connus, bien que cette appellation désigne aussi improprement des protections multicouches, comme nickel + chrome.

Son importance industrielle se justifie tant par sa fonction décorative (non-ternissement), avec des épaisseurs inférieures ou égales au micromètre, que protectrice et mécanique (chromage dur) où le même dépôt de chrome est réalisé sur le métal de base, avec des épaisseurs d'une dizaine à quelques centaines de micromètres.

Les performances du chrome électrolytique, pour de telles applications, tiennent à sa dureté, à sa résistance à l'abrasion, à la passivité de la surface et aux qualités de frottement de pièces antagonistes, en glissement ou en rotation.

Mécanismes réactionnels lors du chromage

Pour que l'électrolyse donne lieu à un dépôt de chrome, une certaine proportion d'un anion catalyseur (SO_4^{--}) est nécessaire ($\approx 1/100^e$ en masse de l'anhydride chromique).

Les phénomènes sont schématisés par la figure 7.7-1 et correspondent aux réactions électrochimiques à la cathode et à l'anode.

Chromage décor

Cette appellation recouvre, en fait, un système de protection anticorrosion multicouches : Ni + Cr ou même Cu + Ni + Cr, le chrome apportant passivité, dureté superficielle et résistance au ternissement, mais une structure généralement fissurée ; le nickel, plus épais, ductile et non poreux, isole le métal de base du milieu ambiant. Anodique par rapport au chrome, le nickel se corrodera au niveau des fissures ou porosités du dépôt de chrome.

Il existe une grande variété de systèmes nickel + chrome dont les principaux sont, dans un ordre croissant de protection, les suivants :

- nickelage brillant + chrome standard (par exemple, objets d'intérieur),
- nickelage brillant + chrome micro-fissuré,
- nickelage brillant + chrome duplex (non fissuré + micro-fissuré),
- nickelage duplex + chrome non fissuré,
- nickelage duplex + chrome micro-fissuré.

Ces systèmes de dépôt ont largement été utilisés dans l'industrie automobile,

où les épaisseurs requises vont de 10 à 50 μm de nickel et de 0,1 à 1 μm de chrome.

Les applications du chrome décoratif se rencontrent dans beaucoup d'industries, particulièrement :

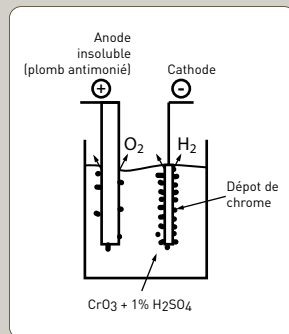
- industrie automobile et équipements,
- instruments d'optique, de précision, et médicaux,
- matériels téléphoniques et électriques,
- mobiliers métalliques,
- articles de sports et appareillage domestique...

Les contrôles de qualité concernent l'adhérence, la porosité, l'épaisseur, la corrodabilité. C'est pourquoi les normes déjà citées pour le nickelage électrolytique, ainsi que la norme NF A 91-119, pourraient être consultées.

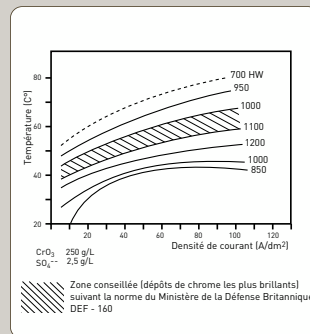
Chromage dur et épais

Cette technique de chromage pour usages industriels concerne des dépôts plus épais que pour les usages décoratifs, et permet de tirer parti d'une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- faible cohérence de frottement,
- propriétés anti-adhérentes,
- résistance à l'usure et haute dureté,
- résistance à la corrosion,
- qualités de résistance aux charges.



7.7-1 Schéma de principe de l'électrolyse d'un bain de chromage



7.7-2 Courbes d'isodureté en fonction de la température et du courant cathodique

Caractéristiques du chromage dur

Les revêtements de chrome dur ont habituellement une épaisseur de 8 à 250 µm. Les bains utilisés sont tout à fait semblables à ceux utilisés en chromage décoratif, hormis la concentration en Cr3 plus faible (150 à 300 g/l) et la température à 50°C, ce qui permet des densités de courant jusqu'à 80 A/dm².

Pour obtenir les duretés les plus élevées (≈ 1000 HV), il faut considérer ensemble température et densité de courant cathodique (figure 7.7-2).

Le chromage épais mettant en jeu d'importantes densités de courant cathodique, et donc une grande intensité par unité de volume, il sera souvent utile de prévoir un système de refroidissement du bain adapté à la puissance dissipée par effet Joule.

Techniques d'application

Forme et état de surface

La qualité finale du dépôt de chrome épais est lié à l'état de surface et à la forme de la pièce à revêtir.

7.7-3

Etat de surface et forme	Défauts	Remèdes
Effet d'angles	Surépaisseurs sur arêtes, manque de dépôt dans les creux	Rayonner ou ne pas chromer l'angle
Rayures ou fissures	Absence ou réduction du dépôt	Adoucir par meulage
Filetage	Modification du diamètre et de l'angle de filetage	Compenser par usinage ou polissage électrolytique
Alésage	Irrégularité d'épaisseur	Utiliser une anode de forme ou prévoir un dégagement à la meule
Limite de dépôt	Surépaisseur	Reporter la limite en zone non fonctionnelle ou utiliser une cathode auxiliaire

Le chrome épais amplifie les défauts du métal de base et ce d'autant plus que son épaisseur est importante. La surface devra donc être exempte de piqûres, occlusions, zones écrouies, arrachements de métal, stries d'étirage, tapures de tremp, soufflures, etc.

Il faudra aussi tenir compte de l'amplification de la rugosité superficielle en prévoyant les opérations préalables de rodage, polissage ou rectification (rugosité totale $R_t \leq 1 \mu\text{m}$ et $R_a \leq 0,5 \mu\text{m}$).

Usinable à la meule ou par pierrage, le chrome électrolytique permet d'obtenir par superfinition des rugosités très faibles : R_a de 0,1 à 0,02 µm.

Choix du dépôt

Pour une pièce cylindrique tolérancée, il est possible d'obtenir par chromage une surface utilisable sans retouche en considérant toutefois que la tolérance sur le diamètre chromé est la somme algébrique des tolérances d'usinage du support et de la tolérance d'épaisseur du chromage.

Chromage à la cote

- Epaisseur du chrome $\leq 12 \mu\text{m}$: frottement à sec, outils de coupe, par exemple.
- Epaisseur du chrome 10 à 25 µm : moules.
- Epaisseur du chrome 20 à 60 µm : frottement de glissement, prévention légère de l'usure ou de la corrosion.

Chromage épais

Epaisseur > 50 µm, parfois jusqu'à 500 µm, pour assurer une cote précise après rectification sur des pièces :

- neuves : protection, importante contre l'usure (abrasion et corrosion),
- défectueuses en usinage ou usées : apport > 50 µm et tolérance diamétrale $\leq 40 \mu\text{m}$ après rectification.

Pré et post-traitements

Les traitements préalables au chromage élimineront les souillures, les oxydes mais aussi la couche superficielle écrouie, et éventuellement abaisseront la rugosité. En vue d'améliorer l'endurance à la fatigue, un grenailage de précontrainte peut être spécifié :

- intensité de grenailage 0,3 mm d'arc, acier $R_m < 1100 \text{ MPa}$,
- intensité de grenailage 0,4 mm d'arc, acier $R_m \geq 1100 \text{ MPa}$.

Après chromage électrolytique, les aciers à haute résistance, du fait de l'intense dégagement d'hydrogène, subissent une fragilisation.

Les propriétés de telles pièces sont restaurées par un traitement thermique dit de dégazage qui favorise la diffusion de l'hydrogène vers l'extérieur, aussitôt après chromage (moins de 4h) et avant toute finition mécanique.

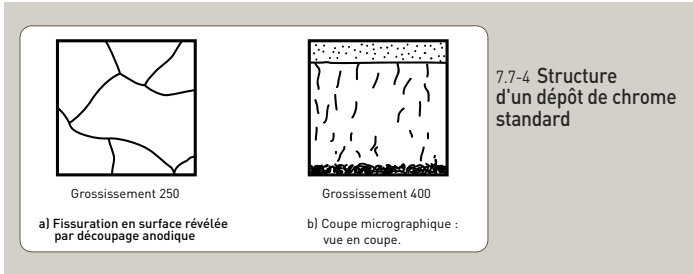
Les pièces devant résister à la fatigue et non précontraintes subiront le traitement thermique suivant : 400 à 480°C pendant 1h minimum ; mais cela peut entraîner une diminution de la dureté du chrome et de l'acier.

Il peut être prescrit une détente à une température de 135 à 150°C durant 2 à 5h, après rectification du dépôt de chrome.

Dans tous les cas, les contrôles magnétoscopiques ou par ressuage sont recommandés avant et après rectification du chrome, car une rectification mal conduite provoque une fissuration accrue du dépôt.

Structure et propriétés du chrome dur

Même à faible épaisseur 0,5 à 1 µm, le dépôt de chrome électrolytique se fissure car les tensions internes du dépôt (≈ 100 MPa) sont supérieures à la ténacité du chrome (≈ 15 MPa).



L'examen au microscope montre ainsi des réseaux de fissures caractéristiques, réseaux qui se superposent sans continuité au fur et à mesure de l'accroissement du dépôt (figure 7.7-4).

Une relative étanchéité du dépôt ne s'obtient qu'à partir de 30 à 50 μm d'épaisseur.

Au contraire, des autres dépôts électrolytiques, la taille des grains est excessivement fine, 0,008 à 0,12 μm ; elle est révélée seulement aux rayons X et n'est modifiée que par des traitements thermiques excédant 400°C et durant plus d'une heure, modification qui coïncide alors avec une baisse de dureté.

La dureté et la résistance à l'usure sont deux propriétés essentielles du chrome électrolytique. Les paramètres vus au paragraphe «*Caractéristiques du chromage dur*» permettront de fixer le plus souvent cette valeur, au mieux, entre 800 et 1000 HV.

Il est à noter que cette valeur correspond à des mesures effectuées sur dépôts épais (épaisseur supérieure à 50 μm), sans rupture du dépôt, ni fissuration aggravée.

Cependant, les dépôts de dureté intermédiaire 750 à 800 HV donneraient la meilleure résistance à l'usure (essai Taber).

Le faible coefficient de frottement du chrome électrolytique permet de très nombreux usages mécaniques : pistons, vérins, coulisseaux, soupapes, arbres, etc.

7.8 Les autres traitements ou revêtements

Parmi les nombreux procédés de revêtements, sont présentés ci-après, les revêtements non électrolytiques ou lamellaires les plus courants en matière de fixations.

Shéardisation

La shéardisation est un procédé thermo-chimique de diffusion superficielle de zinc dans l'acier afin de protéger les articles contre la corrosion.

La pénétration mutuelle des métaux par combinaison ou par diffusion est un phénomène d'ordre très général. A température ordinaire, la réaction est extrêmement lente et ne serait réalisable que sous forte pression mais en élevant la température, la migration atomique est très sensiblement favorisée par l'agitation thermique des atomes.

La diffusion du carbone dans le fer est bien connue : c'est la cémentation classique, dite cémentation carburante. Mais la plupart des métaux et certains métalloïdes peuvent être utilisés comme céments et ils forment un revêtement d'un alliage riche du métal incorporé dans le ciment.

Parmi les cémentations métalliques, la plus ancienne appliquée industriellement est celle de zinc, connue sous le nom de shéardisation, du nom de l'ingénieur anglais Sherard Cowper-Cowles.

Le ciment est constitué par de la poudre de zinc auquel on ajoute une charge inerte dont l'objet est d'éviter d'endommager les pièces durant l'opération de chauffe et d'assurer une égale répartition de la poudre de zinc.

Le traitement s'effectue dans des récipients métalliques appelés caissons, soigneusement fermés afin d'opérer dans une atmosphère inerte non oxydante. Les pièces à traiter sont préalablement décapées puis noyées dans le ciment à l'intérieur des caissons.

Ces caissons sont placés dans un four chauffant. Ils sont mis en rotation lente sur un axe horizontal, pour un brassage permettant une température homogène à l'intérieur du caisson.

La température de traitement est de l'ordre de 400°C, avec montée en température et retour à la température ambiante très lente afin d'éviter déformations et modifications des caractéristiques mécaniques.

La shéardisation confère aux pièces une excellente tenue à la corrosion, le revêtement est très régulier avec d'excellentes propriétés d'adhésion et d'un aspect gris mat.

Cataphorèse

La peinture par cataphorèse permet une bonne uniformité de revêtement, de couleur noire.

Pour les pièces soumises à des agressions mécaniques, une sous-couche de

zinc de 5 à 6 µm améliore la tenue à la corrosion et la résistance aux agressions mécaniques.

Le procédé consiste en l'application d'une peinture qui est un primaire cationique. Celle-ci est une dispersion de molécules organiques et de pigments minéraux en milieu aqueux. En appliquant une tension de 200 à 350V en courant continu entre les pièces immergées à la cathode et les cellules d'électrolyse faisant office d'anode, les molécules chargées + se déplacent à la cathode, entraînant les pigments minéraux et se déposent sur les pièces chargées (-). Après application, on procède à un rinçage puis à une polymérisation.

La couche obtenue peut être laissée en l'état ou servir de couche d'accrochage à une peinture d'aspect [peinture poudre ou liquide].

Méthodes d'application

S'applique sur tous matériaux conducteurs : aciers, alliages cuivreux, alliages d'aluminium, fonte, zinc et alliages, magnésium, aciers inoxydables...

Principales propriétés

- Couleur noire, aspect brillant.
- Epaisseur de 12 à 24 µm d'épaisseur uniforme, intervalle de tolérance de l'ordre de 5 µm.
- Adhérence excellente sur tout support, y compris sur tôle galvanisée ou pièces électrozinguées.
- Tenue à la corrosion : 500 heures au brouillard salin sur acier phosphaté, sans dégradation mécanique de la couche.
- Bonne tenue aux U.V.
- Bonne pénétration dans les corps creux.

Nickelage électrolytique

Le procédé consiste à assurer un dépôt de nickel par procédé électrolytique. Ce dépôt améliore les caractéristiques de frottement du métal sur lequel il est déposé et offre une bonne protection à la corrosion.

Le nickel électrolytique peut s'effectuer sur l'acier, l'inox, le cuivre/Laiton et l'aluminium.

Méthodes d'application

Traitement au tonneau

Il sera préféré au nickel chimique en cas de pièces ayant des cotes serrées pour des raisons d'inhomogénéité d'épaisseur du dépôt, caractéristiques propres aux dépôts électrolytiques.

Principales propriétés

- Aspect : Uniforme
- Epaisseur : 5 à 70µm
- Résistance à la corrosion
- Dureté : 150 à 350 Hv

Nickelage chimique

Le procédé de nickelage chimique se distingue principalement du procédé par voie électrolytique par le fait que sa réaction se produit à vitesse constante en tout point de la surface de la pièce en contact avec la solution.

En nickelage électrolytique, la vitesse de dépôt est en général variable, puisque le flux du courant dépend de la géométrie de la pièce.

Cette propriété se traduit par un "effet de pointe" sur les arrêtes vives et par un dépôt pratiquement nul dans les cavités.

Cet avantage du nickelage chimique assure au revêtement deux qualités essentielles :

- Respect rigoureux des cotes, ce qui évite un usinage ultérieur.

Pratiquement, l'épaisseur d'un dépôt peut être garantie à 2 microns près.

- Uniformité de la protection, quelle que soit la complexité de la pièce.

Méthodes d'application

Traitement au tonneau ou à l'attache

En règle générale, grâce aux qualités de l'alliage nickel-phosphore, à la régularité et à la précision de son dépôt, à l'épaisseur de la couche pouvant varier de 0 à 200 µ et plus, le champ d'application du nickelage chimique ne connaît pratiquement pas de limites.

Principales propriétés

- Brillant ou satiné
- Bonne conductibilité électrique
- Epaisseur de 3 à 100µ
- Adhérence Très bonne: comparable en tous points un dépôt électrolytique
- Tous types de métaux: acier carbone et inoxydable, aluminium et ses alliages, cuivre et ses alliages, fontes.

Cuivrage électrolytique

Le cuivre est très employé en sous-couche sur un grand nombre de substrats, non seulement pour la protection qu'il peut apporter si son épaisseur est convenable, mais aussi pour la liaison qu'il procure entre le métal de base et les dépôts terminaux.

Le cuivrage électrolytique peut s'effectuer sur l'acier, l'inox et l'aluminium.

Méthodes d'application

Traitement au tonneau

Principales propriétés

- Epaisseur : jusqu'à 20µm
- Ductilité
- Propriétés mécaniques médiocres

Etamage

Le revêtement d'étain est souvent utilisé pour sa bonne résistance chimique, sa basse température de fusion facilitant la soudabilité, son comportement alimentaire (résistance et absence de toxicité), sa conductivité électrique, ainsi que son aspect gris-blanc décoratif.

Méthodes d'application

Traitement au tonneau ou à l'attache

Substrats cuivreux, acier ou fonte, aluminium

Principales propriétés

- Bonne tenue à la corrosion
- Bonne résistance chimique à l'oxydation
- Bonne conductibilité électrique
- Bonne soudabilité
- Bonne résistance au frottement
- Température limite d'emploi 150°C

Brunissage

Le brunissage est une oxydation superficielle des aciers obtenue par voie chimique, permettant l'obtention d'un aspect noir.

Ce traitement peut être effectué sur acier ou acier inoxydable.

La couleur obtenue sera fonction de la nature du métal.

Méthodes d'application

Dégraissage, décapage et conversion chimique.

Principales propriétés

- Protection temporaire.
- Finition sèche et grasse.
- Possibilité de ne pas huiler.
- Pas de surépaisseur.
- Résistance aux U.V.

7.9 Choix d'un revêtement conforme ROHS

Les directives européennes

Les directives européennes 2000/53/EC et 2002/95/EC (voir extraits en fin d'ouvrage) ont, dans le cadre de la protection de l'environnement et de la recyclabilité des produits, introduit la limitation de l'emploi de métaux lourds et/ou polluants, notamment le chrome hexavalent.

Par exemple, les véhicules automobiles mis sur le marché depuis le 1^{er} juillet 2003 doivent contenir moins de 2 grammes de chrome hexavalent.

Les solutions consistent en la substitution du chrome 6 présent dans la chromatisation par du chrome 3 dans les passivations. La résistance à la corrosion sera obtenue par l'ajout d'une couche organo-minérale complémentaire.

Eléments de choix

Du fait de l'ajout d'une couche complémentaire, le choix devient un compromis entre trois caractéristiques majeures induites par le revêtement, choix dépendant de l'application envisagée :

- épaisseur,
- tenue au brouillard salin,
- coefficient de frottement.

Par ailleurs, on remplace souvent un revêtement «générique» (par exemple le zingué jaune bichromaté) par un revêtement ayant fait l'objet de développements techniques par un formulateur et protégé.

Il convient donc de prendre en compte les préconisations du donneur d'ordre amont, souvent exprimées dans un cahier des charges qui peut spécifier une formulation particulière et la diffusion de la formulation dans le réseau de sous-traitants disponibles.

Le tableau 7.9-1 présente quelques éléments de choix de revêtements sans chrome 6 ; vos interlocuteurs Emile Maurin sont à votre disposition pour vous proposer une solution en fonction de vos critères particuliers.

7.9-1

Traitement	Aspect	Épaisseur	Tenue brouillard salin	Coefficient de frottement et remarques
Zingage blanc	Blanc bleuté	5 µm	48 h rouille rouge	
		10 µm	72 h rouille rouge	
Zingage Lanthane® sans finition renforcée	Argent	10 µm	200 h rouille rouge	
Zingage Lanthane® avec finition rapportée	Argent	10 µm	600 h rouille rouge	Possibilité de coefficient de frottement maîtrisé $\mu = 0,12$ à $0,18$
Zinc nickel 12-15% finition bleue	Bleuté	8 µm mini.	720 h rouille rouge	Évite la corrosion par couplage avec l'aluminium
Zinc nickel 12-15% finition noire	Noir	8 µm mini.	720 h rouille rouge	Évite la corrosion par couplage avec l'aluminium
Geomet 500® grade A	Gris	5 à 7 µm	600 h rouille rouge	Coefficient de frottement $\mu = 0,12$ à $0,18$
Geomet 500® grade B	Gris	8 à 10 µm	1000 h rouille rouge	Coefficient de frottement $\mu = 0,12$ à $0,18$
Delta Protekt®	Gris argenté	5 à 10 µm	600 à 1000 h rouille rouge	
Deltatone®	Gris argenté	6 à 10 µm	400 h rouille rouge	Avec finition Deltaseal GZ® coefficient de frottement $\mu = 0,10$ à $0,14$
		10 à 15 µm	800 h rouille rouge	