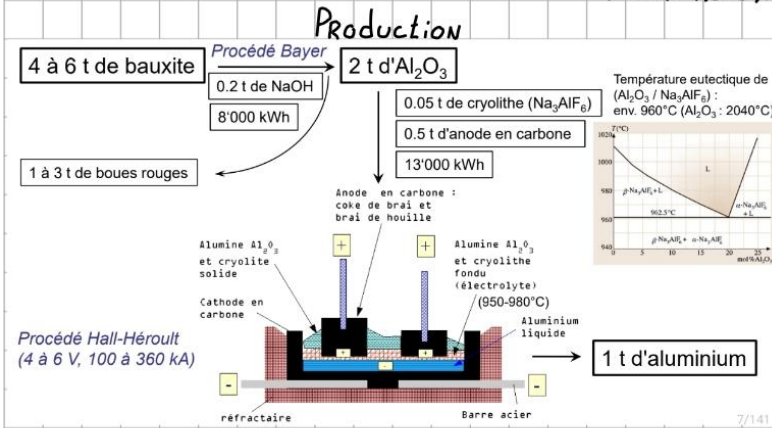


Métaux Légers

ALUMINIUM



Propriétés des alliages durcis

Les propriétés mécaniques des quelques alliages d'aluminium à durcissement structural à l'état recuit (O), à l'état trempé mûri (T4) et à l'état trempé revenu (T6).

Alliage	État	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Précipité d'équilibre
EN AW-2014 (AlCu4SiMg)	O	95	185	18	Al ₂ CuMg
	T4	290	425	20	
	T6	415	485	13	
EN AW-6063 (AlMg0.7Si)	O	50	90	30	Mg ₂ Si
	T4	90	170	22	
	T6	215	240	12	
EN AW-7075 (AlZn5.5MgCu)	O	105	230	17	MgZn ₂ , Mg ₃₂ (Al,Zn) ₄₉
	T6	505	570	11	

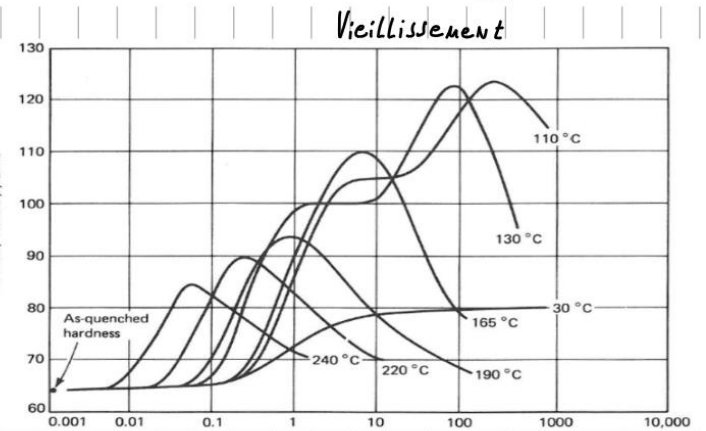
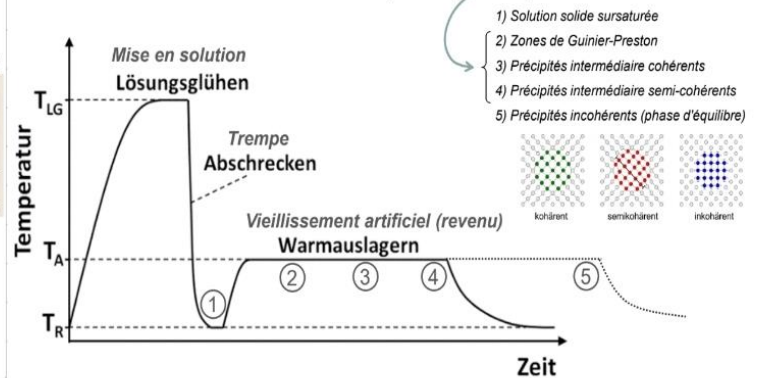
Propriétés des alliages de corroyages

Alloy Type	1XXX	3XXX	5XXX	6XXX	7XXX	2XXX	7XXX
PROPERTY							
CHEMICAL CODE	Al	Al Mn	Al Mg	Al Mg Si	Al Zn Mg	Al Cu Mg Si	Al Zn Mg Cu
STRENGTH	Soft	Low	Medium	Medium	High	High	High
Alloy Type	1XXX	3XXX	5XXX	6XXX	7XXX	2XXX	7XXX
PROPERTY							
CHEMICAL CODE	Al	Al Mn	Al Mg	Al Mg Si	Al Zn Mg	Al Cu Mg Si	Al Zn Mg Cu
STRENGTH	Soft	Low	Medium	Medium	High	High	High

Propriétés générales

- **ductilité** : la mise en forme de l'aluminium à l'état solide par déformation plastique se fait facilement
- **légèreté** : la masse volumique de l'aluminium n'est qu'un tiers de celle de l'acier
- **résistance mécanique** : la limite à la rupture est de 50 - 700 MPa; les propriétés mécaniques peuvent être améliorées par alliage, par écrouissage ou par traitement thermique (mais l'influence sur le module d'élasticité est très faible!)
- **résistance à la corrosion** : la mince couche d'oxyde en surface protège l'aluminium contre la corrosion
- **conductibilité électrique et thermique** : env. 63% de la conductibilité du cuivre
- **réflectance** : l'aluminium reflète très bien la lumière et la chaleur
- **recyclabilité** : le recyclage permet d'économiser environ 90 % de l'énergie nécessaire à la fabrication du métal

durcissement par précipitation



Aluminium Alloy Designation System (CEN)

Major alloying element	Atoms in solution	Work hardening	Precipitation hardening
1XXX None (min. 99.00% Al)		X	
3XXX Mn	X	X	
4XXX Si	X	X	
5XXX Mg	X	X	
2XXX Cu	X	(X)	X
6XXX Mg + Si	X	(X)	X
7XXX Zn	X	(X)	X
8XXX Other	X	(X)	X

CASTING ALLOYS*)	EN AB- EN AC- EN AM-
1XXX0 None (min. 99.00% Al)	
2XXX0 Cu	
4XXX0 Si	
5XXX0 Mg	
7XXX0 Zn	
8XXX0 Sn	
9XXX0 Master Alloys	

Désignations des états métallurgiques des alliages d'aluminium :

F : état brut de fabrication

O : état recuit

H : état écroui

T : traitement thermique

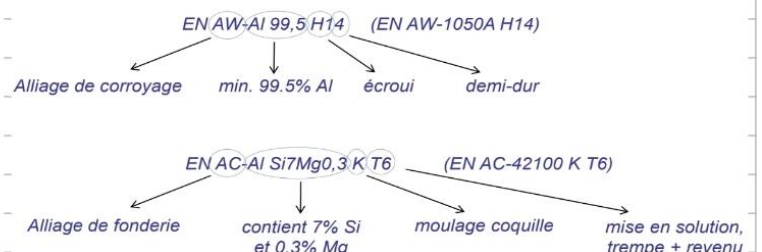
W : mis en solution, trempé

Exemples :	
H12	nuance 1/4 dur
H14	nuance 1/2 dur
H16	nuance 3/4 dur
H18	nuance 4/4 dur
H19	nuance extra- dur
T4	mise en solution, trempé + maturation (vieillessement naturel)
T6	trempé après mise en forme à chaud + revenu (vieillessement artificiel)
T7	mise en solution, trempé + sur-revenu (survieillessement)

Note : Il y a des états précisément définis avec plus de chiffres (5 chiffres au maximum)

Pour les alliages de fonderie, le procédé de moulage est désigné comme suit :

S = moulage sable par gravité
K = moulage coquille par gravité
D = moulage sous pression
L = moulage en cire perdue (dit aussi moulage de précision)



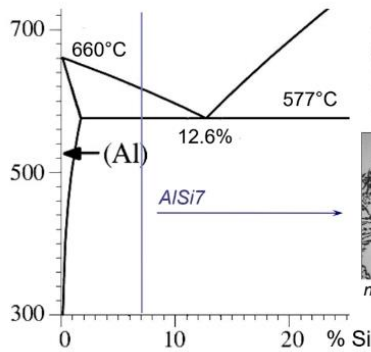
Alliage de fonderie

5-20% de silicium

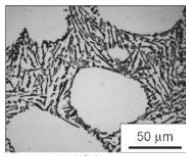
Les alliages contenant du silicium sont caractérisés par :

- très bonne coulabilité (fluidité)
- basse dilatation thermique
- bonne résistance à la corrosion
- retrait de solidification réduite
- bonne soudabilité

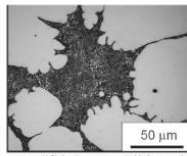
Le diagramme de phases Al-Si est du type eutectique :



Les alliages Al-Si ont besoin d'un traitement particulier pour modifier la morphologie du silicium afin que les caractéristiques mécaniques soient améliorées. La modification est notamment importante en cas de solidification lente.



non-modifié



modifié (par addition de Na ou Sr)

Mise en forme des alliages de corroyage

Le laminage à chaud :

Température initiale env. 550°C
L'épaisseur est réduite en plusieurs passes jusqu'à environ 2.5 mm en minimum. La bande est enroulée sur bobine à une température d'environ 250 - 350°C.

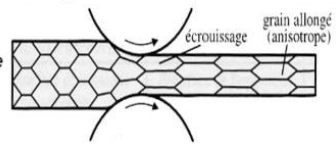
Le laminage à froid :

Les tôles laminées à chaud, après refroidissement, sont laminées à froid en plusieurs passes jusqu'à l'épaisseur finale.

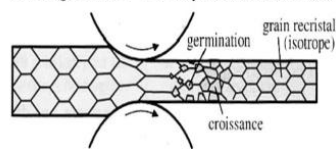
A froid l'ébauche devient parfois trop dure et doit être soumise à un recuit d'adoucissement entre deux opérations de laminage.

L'épaisseur minimale des feuilles laminées est environ 4 µm (pour aluminium très pur)

Laminage à froid $T < \text{Température de recristallisation}$

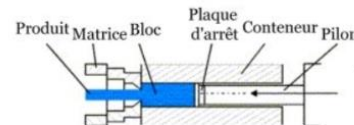


Laminage à chaud $T > \text{Température de recristallisation}$



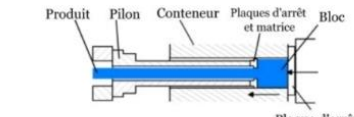
Le filage direct (le procédé le plus répandu) :

La billette chauffée à 400 - 520°C est placée dans le récipient et pressée par un cylindre hydraulique au travers d'une filière (matrice). Le récipient et la matrice restent immobiles. Le profilé extrudé est refroidi à l'air ambiant une fois sorti de la presse pour améliorer la résistance mécanique et éviter que le profilé chaud ne se déforme sous son propre poids.



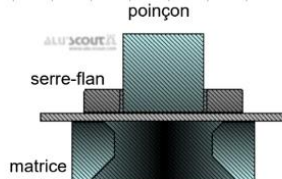
Le filage inverse :

Ce procédé consiste à presser sur la billette le cylindre et la matrice ensemble tandis que le tout est immobilisé dans le récipient. Comme la billette ne bouge pas dans le récipient, les forces dues au frottement sont sensiblement réduites et la puissance de la presse sert surtout au filage proprement dit. **Le filage indirect est surtout employé pour les alliages plus durs et difficiles à extruder.**



Emboutissage profond

La transformation survient suite à l'action conjointe de points de fixations - qui maintiennent la pièce en place et empêchent la formation de plis - d'un poinçon et d'une matrice qui viendront définir la forme nouvelle de la pièce. Des mouvements relatifs entre la pièce et l'outil peuvent avoir lieu suivant les différentes pressions employées lors du procédé. Les rapports de frottement dépendent de la rugosité des parois de la pièce aussi bien que de celles de l'outil et jouent un rôle certain en ce qui concerne les pièces en aluminium.



Assemblage par adhésion (collage)

- Nécessite de grandes surfaces de contact
- L'état de surface est important
- Tenue en température limitée

Anodisation

On peut rendre la couche protectrice d'oxyde beaucoup plus épaisse par traitement électrochimique (anodisation). L'anodisation octroie à l'aluminium une meilleure résistance à l'usure et à la corrosion.

Type d'oxydation	Couche d'oxyde	Épaisseur
Oxydation naturelle	Couche native	1-10 nm
	Couche hydratée en milieu humide	30-100 nm
Oxydation anodique	Anodisation classique (décorative)	5-30 µm
	Anodisation dure	20-100 µm

Technique d'assemblage

Le soudage : Pour les alliages d'aluminium, le soudage sous la protection d'un gaz inerte (WIG, MIG) est préféré. Au cas par cas, d'autres procédés de soudage sont utilisés (p.ex. soudage laser).

Le brasage : La couche d'oxyde complique le brasage de l'aluminium. C'est seulement le brasage fort ($T > 450^\circ\text{C}$) qui a atteint une certaine importance.

L'assemblage mécanique : p.ex. le vissage, le rivetage, le clinchage; faites attention à la corrosion galvanique en assemblant des métaux différents!

L'assemblage par adhésion : Les principaux facteurs en faveur de l'assemblage par adhésion sont aucun changement de structure ou de géométrie lié à un choc thermique et ample éventail de combinaisons de matériaux possibles.

L'assemblage hybride utilise des combinaisons entre deux, ou plusieurs processus d'assemblage, p.ex. l'assemblage par adhésion et le rivetage.

Soudage

Le soudage des alliages d'aluminium est compliqué par :

- la couche d'oxyde
- la fissuration à chaud (certains alliages)

La couche de l'oxyde d'aluminium doit être détruite mécaniquement, chimiquement ou thermiquement avant ou pendant la soudure pour obtenir une liaison satisfaisante.

- éliminer la couche mécaniquement par ponçage ou brossage

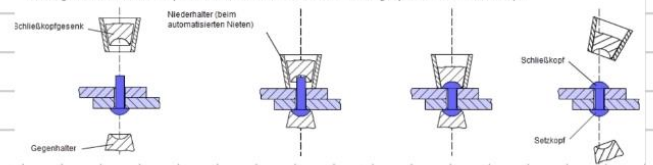
En zone affectée thermiquement (ZAT), la structure ainsi que les propriétés mécaniques sont modifiées :

- Pour les alliages à l'état écroui, le durcissement dû à l'écrouissage disparaît au voisinage de la soudure (restauration, recristallisation).
- Les alliages à durcissement structural présentent une baisse des propriétés mécaniques car les précipités sont dissous ou grandissent.

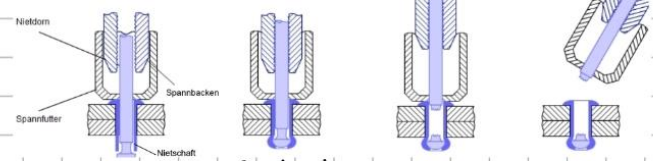


BRASAGE

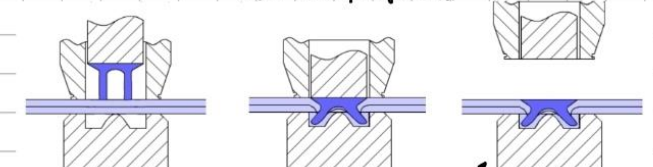
Ce sont les alliages Al-Si contenant 7-13% de silicium (intervalle de solidification: 530-600°C) qui sont couramment utilisés comme métaux d'apport pour le brasage rivetage conventionnel (nécessite un accès à l'assemblage par les deux cotés) :



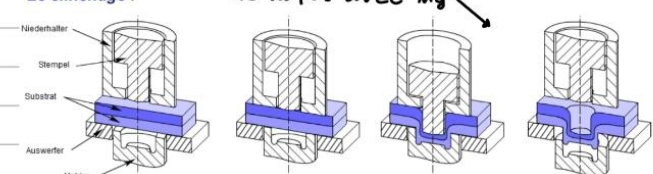
rivetage aveugle (l'accessibilité d'un seul côté suffit) :



Rivet auto-poinçonneur



Le clinchage :



Ne va pas avec Mg

Moulage des alliages légers

Le choix d'un procédé de moulage dépend de nombreux critères :

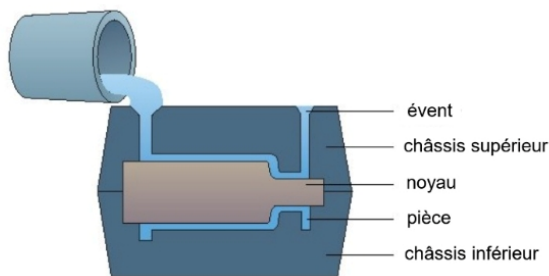
- coulabilité
- teneur en gaz contrôlé
- épaisseur minimale
- précision de la géométrie
- ductilité (caractéristiques mécaniques)
- l'état des surfaces

La qualité de la pièce moulée est influencée par :

- l'alliage
- la fusion, le traitement et le contrôle du métal
- le procédé de moulage

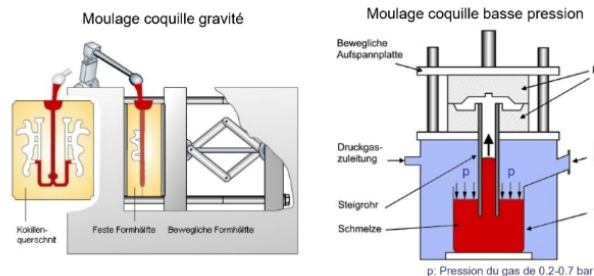
	Sandguss	Kokillenguss	Druckguss
besonders eignet für	Grosse, komplizierte Teile in kleinen bis mittleren Stückzahlen	Teile mit guten Eigenschaften und Oberflächen in mittleren bis grossen Stückzahlen	Massenteile mit eher geringen Eignungsanforderungen, speziell dünnwandig
Gussqualität	gut mittlere Porosität 0.5%	sehr gut / Sicherheitsteile niedrige Porosität 0.2%	schlecht hohe Porosität 1 - 2%
mechanische Eigenschaften	mittel	gut	gering
Massgenauigkeit	gering	gut	sehr gut
Oberflächengüte	eher rau	glatt	sehr glatt
mögliche Wandstärken	5 - 40 mm	4 - 20 mm	1.5 - 6 mm
mögliche Bauteilgrössen	unbeschränkt	mittel	eher klein evtl. dünn + grossflächig
Taktzeiten	10 Minuten und mehr	1 - mehrere Minuten	30 Sekunden - 1 Minute
sinnvolle Produktionsmengen	geringe Stückzahlen	mittlere - grosse	sehr grosse
Kosten			
Maschineninvestition	mittel	hoch	sehr hoch
Formherstellung	gering	hoch - sehr hoch	sehr hoch
Giessen pro Teil	sehr hoch	hoch	sehr gering

Le moulage en sable :



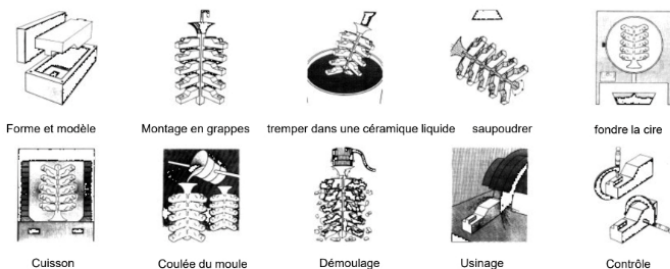
- approprié pour les petites et moyennes séries (et les prototypes)
- permet des formes très compliquées
- modification de la forme géométrique du moule est rapide et économique
- solidification lente $\Rightarrow$ structure plus grossière
- approprié pour des grosses pièces

Le moulage en coquille :



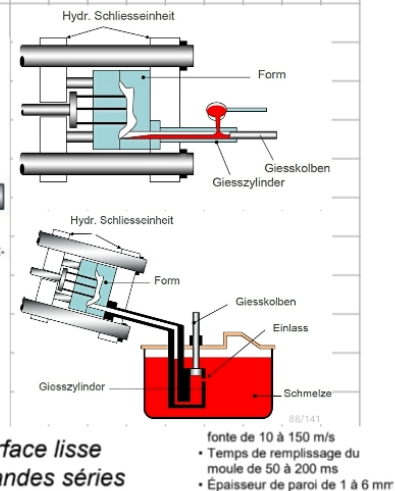
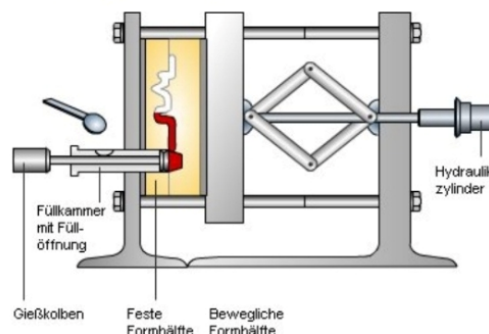
- la meilleure combinaison de ductilité et dureté
- solidification rapide $\Rightarrow$ structure plus fine
- approprié pour les moyennes et les grandes séries
- meilleur état de surface et meilleure précision dimensionnelle en comparaison avec le moulage en sable
- coquille métallique réutilisable mais coûteuse, noyaux en sable possible

Le moulage en cire perdue :



- moulage de précision
- approprié pour les petites, les moyennes et les grandes séries
- aussi approprié pour les métaux à haut point de fusion (titane)
- bon état de surface

Le moulage sous pression :



- grande précision dimensionnelle et état de surface lisse
- court temps de cycle $\Rightarrow$ approprié pour les grandes séries
- remplissage turbulent $\Rightarrow$ entraînements d'air $\Rightarrow$ non soudable
- moules métalliques très chers (acier à travail à chaud)
- les parois obtenues même sur de grandes surfaces sont minces
- possibilité d'appliquer un vide (moulage vacural, soudable, peut être soumis à un traitement thermique)

Magnésium : Variantes de moulage sous pression

Le moulage en chambre froide

- système de dosage séparé
- force pour tenir le moule fermé $\leq 4'500$ t
- pression d'injection: env. 800bar
- poids d'injection ≤ 60 kg
- parois ≥ 1.5 mm

Le moulage en chambre chaude

- mécanisme d'injection immergé dans le métal liquide
- force pour tenir le moule fermé ≤ 700 t
- pression d'injection: 160 - 200bar
- poids d'injection ≤ 5 kg
- parois ≥ 0.6 mm
- productivité élevée

Magnésium : Moulage sous pression

Le moulage sous pression est le procédé de production de pièces en magnésium le plus commun :

Les avantages:

- productivité très élevée (jusqu'à 50% plus rapide que le moulage d'aluminium)
- grande précision dimensionnelle et état de surface de bonne qualité (faible tendance à l'adhérence au moule)
- microstructure fine ($\Rightarrow$ durcissement)
- possibilité de mouler des pièces de forme complexe et à paroi mince
- durée de vie du moule environ 50 % plus longue que dans le cas du moulage sous pression de l'aluminium (Al : 50'000 à 200'000 cycles, Mg : 120'000 à 300'000 cycles)

Les désavantages:

- porosité (inclusion de gaz dû au remplissage turbulent, retrait de solidification, chute abrupte de la solubilité des gaz lors de la solidification)
- non approprié pour la fabrication des pièces à paroi épaisse

Magnésium

Magnésium : Production

Gisements :

- Minerais: dolomite ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$), magnésite (MgCO_3), serpentine ($3 \text{ MgO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$), carnallite ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$)
- Eau de mer (teneur en Mg de 0.13%)

Production du métal primaire :

- Réduction électrolytique du MgCl_2 . On ajoute du chlorure de calcium et de sodium pour abaisser le point de fusion.
- Procédé silicothermique (réduction de la dolomite calcinée avec le ferrosilicium)
 $2 \text{ CaO} \cdot \text{MgO} + \text{FeSi} \rightarrow 2 \text{ Mg} + (\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2 + \text{Fe}$

Le magnésium et ses alliages sont caractérisés par leur :

- **légèreté** : masse volumique de 1.8 g/cm³, i.e. 30% plus léger que l'aluminium, 75% plus légers que l'acier
- **résistance mécanique spécifique assez élevée** : résistance spécifique au niveau des alliages d'aluminium et des aciers
- **excellentes propriétés de fonderie** : très bonne coulabilité, approprié pour les pièces de fonderie à grande surfaces et paroi mince (moulage sous pression en utilisant les alliages Mg-Al-Zn)
- **usinabilité** : efforts de coupe très faible, grande vitesse de coupe, état de surface de bonne qualité
- **bonne conductibilité électrique et thermique**
- **réactivité chimique** : Utilisation des gaz de protection nécessaire dans la fonderie; protection anticorrosion nécessaire
- **formage à froid défavorable** : structure hexagonal, évolution d'une texture lors de la déformation

Les normes EN connaissent des désignation numériques et symbolique pour les alliages de magnésium, mais, dans l'usage courant, on utilise le système de codage selon ASTM (p.ex. : **EN-MC MgAl9Zn1 = EN-MC 21120 = AZ91**)

Symbole	Élément d'alliage	Symbole	Élément d'alliage
A	aluminium	N	nickel
B	bismuth	P	plomb
C	cuiivre	Q	argent
D	cadmium	R	chrome
E	terres rares	S	silicium
F	fer	T	étain
H	thorium	W	yttrium
K	zirconium	Y	antimoine
L	lithium	Z	zinc
M	manganèse		

Symboles métallurgiques suivit de la concentration en % de l'élément d'alliage

Caractéristiques mécaniques de quelques alliages de magnésium :

Moulage sous pression	Alliage	R _{p0.2}	R _m	A
	AM20	95	190	15
	AM50	110	200	10
	AM60	130	220	8
	AZ91	160	230	3
	WE54-T6	190	260	2
Moulage en sable				
Alliages de corroyage, profilés d'extrusion :	Alliage	R _{p0.2}	R _m	A
	AZ31	160	240	10
	AZ61	180	260	8
	ZK60	250	300	5

Influence des éléments d'alliage

aluminium :

Le principal élément d'alliage, surtout dans les alliages pour moulage sous pression:

- + augmentation de la dureté / de la résistance mécanique
- + amélioration de la coulabilité
- réduction de la ductilité
- tendance à la microporosité plus prononcée
- utilisable jusqu'à 120°C

zinc :

- + augmentation de la dureté / de la résistance mécanique
- + augmentation de la résistance à la fatigue
- + amélioration de la coulabilité
- tendance à la microporosité plus prononcée
- plus sensible à la fissuration à chaud (> 2% Zn)

manganèse :

- + augmentation de la résistance à la traction
- + amélioration de la résistance à la corrosion (Mn précipite / élimine le fer)
- + soudabilité améliorée

silicium :

- + bonne résistance au fluage (formation de Mg_2Si)
- diminue la coulabilité

terres rares :

- + bonne résistance à des températures élevées
- + bonne résistance au fluage
- + amélioration de la résistance à la corrosion
- coûteux

Assemblage

En assemblant le magnésium avec des autres métaux, il faut toujours se rappeler du risque de corrosion galvanique et prendre des précautions pour l'empêcher.

Le vissage : vis enduites (aciers zingués ou aluminés) ou vis en aluminium (de préférence en alliage AlMg).

Le soudage : Soudage sous la protection d'un gaz inerte (WIG ou MIG sous une atmosphère sèche d'argon ou Ar/He) ou soudage laser en utilisant un métal d'apport de la même composition (ou un peu plus concentré) que l'alliage à souder. Mis à part le magnésium-zinc (> 2% Zn) la plupart des alliages de magnésium ont une bonne soudabilité.

Le collage : La couche d'adhésif assure un joint étanche et isolant entre les deux matériaux écartant tout risque de couplage galvanique. Mais il faut faire attention à la différence en coefficient de dilatation thermique.

Les procédés d'assemblage mécanique, qui nécessitent la déformation plastique locale des pièces (p.ex. le clinchage, le rivetage par rivets auto-poinçonneurs) ne sont guère utilisés pour le magnésium (déformation à froid insuffisante).

La sécurité :

- A l'état massif, il n'y a pas de risque d'inflammation du magnésium
 - Les copeaux sont inflammable au-dessus d'environ 430°C, et la poussière peut s'enflammer spontanément. Il faut séparer la poussière de l'air p.ex. par un arrosage à l'eau.
 - Formation d'hydrogène par la réaction avec l'eau (copeaux, poussière)
 - Ne jamais utiliser de l'eau pour éteindre un feu de magnésium!
- Les agents d'extinction appropriés sont :
- des extincteurs de type D
 - des copeaux de fonte grise (secs et non oxydés)
 - des flux de sels secs spécifiques à l'extinction du magnésium
 - des sables secs et sans silice

Titane

Titane : Production

Gisements :

- Minerais: ilménite (FeTiO_3), rutile (TiO_2)

L'élaboration du titane s'effectue en plusieurs étapes :

- Production du tétrachlorure de titane par une carbochloration:
du rutile : $\text{TiO}_2(\text{s}) + 2\text{C}(\text{s}) + 2\text{Cl}_2(\text{g}) \xrightarrow{800-1200^\circ\text{C}} \text{TiCl}_4(\text{l}) + 2\text{CO}(\text{g})$
de l'ilménite : $\text{FeTiO}_3(\text{s}) + \text{C}(\text{s}) \xrightarrow{1600^\circ\text{C}} \text{TiO}_2(\text{s}) + \text{Fe}(\text{l}) + \text{CO}(\text{g})$
 $\text{TiO}_2(\text{s}) + 2\text{C}(\text{s}) + 2\text{Cl}_2(\text{g}) \xrightarrow{800-1200^\circ\text{C}} \text{TiCl}_4(\text{l}) + 2\text{CO}(\text{g})$
- Purification du TiCl_4 par distillation fractionnée
- Réduction par le magnésium sous gaz inerte, i.e. argon (procédé Kroll)
 $\text{TiCl}_4 + 2\text{Mg} \xrightarrow{950-1150^\circ\text{C}} \text{Ti} + 2\text{MgCl}_2$

Le titane obtenu est un solide poreux (l'éponge de titane).

- Purification par lavage acide ou par distillation sous vide
- Fusion sous vide (four électrique à arc sous vide) avec les éléments d'addition, trois fusions successives du même lingot pour obtenir un lingot d'alliage de très bonne homogénéité

La désignation des alliages de titane peut être fait par :

- la composition: symboles chimique des éléments d'alliage suivis par la teneur en %.
 - le numéro de matière : les alliages de titane ont les numéros 3.7XXX
 - le système de codage selon ASTM (Grade 1 à Grade 38).
- De plus, les producteurs de titane utilisent leurs noms de marque individuels.

ASTM	DIN	Composition	R _{p0.2} / R _m / A
Grade 1	3.7025	< 0.20%Fe, < 0.18%O	170 / 240 / 24
Grade 2	3.7035	< 0.30%Fe, < 0.25%O	275 / 345 / 20
Grade 3	3.7045	< 0.30%Fe, < 0.35%O	380 / 450 / 18
Grade 4	3.7065	< 0.50%Fe, < 0.40%O	485 / 550 / 15
Grade 5	3.7165	6%Al, 4%V (< 0.4%Fe, < 0.2%O)	830 / 900 / 10

CP Titan
(commercially pure)

TiAl6V4 (Ti6Al4V)

L'alliage le plus couramment utilisé est le TiAl6V4, qui représente plus que 50% de la production de Ti. Les titanes CP sont la deuxième groupe la plus importante (20-30%).

L'oxygène est un élément d'alliage qui forme une solution solide interstitielle ce qui entraîne une augmentation considérable de la résistance, même à de faibles niveaux.

alliages α	alliages quasi- α	alliages ($\alpha+\beta$)	alliages β
résistance mécanique basse à moyenne	meilleure résistance que α	résistance mécanique moyenne à haute	résistance très haute possible
soudable	bonne tenue au fluage	possibilité d'adapter les caractéristique mécanique par traitement thermique	résistance à la fatigue élevée
bonne résistance à la corrosion	bonne stabilité sous contrainte à chaud jusque vers 600°C		module d'élasticité plus bas (certains alliages; 80 GPa)
emploi aux températures cryogéniques	(max. 5-10% β)		faible stabilité à chaud
CP Ti, TiP0.2, TiAl5Sn2.5	TiAl6Sn2Zr4Mo2, TiAl8Mo1V1	TiAl6V4, TiAl6Nb7, TiAl6V6Sn2	densité élevée (V, Mo, Cr)
			TiV13Cr11Al3, TiV10Fe2Al3, TiMo8V8Fe2Al3

Tab. 1.4 Properties of α , $\alpha+\beta$ and β Ti alloys.

	α	$\alpha+\beta$	β
Density	+	+	-
Strength	-	+	++
Ductility	-/+	+	+/-
Fracture toughness	+	-/+	+/-
Creep strength	+	+/-	-
Corrosion behavior	++	+	+/-
Oxidation behavior	++	+/-	-
Weldability	+	+/-	-
Cold formability	--	-	-/+

Due à la transformation de phase, on a la possibilité d'adapter la microstructure et, en conséquence, les propriétés des alliages de titane par des traitements thermiques.

La martensite n'est pas très dure parce que la distorsion du réseau du titane α est faible.

Note: La martensite des aciers est beaucoup plus dure, comme les atomes de carbone et azote créent une distorsion importante du réseau cc.

Trempe + vieillissement

1. Sans tension
2. Transformation martensitique
3. Orientation de la martensite
4. Retour à l'austénite

- une résistance mécanique importante : Les alliages de titane ont des résistances spécifiques plus élevées que tous les autres métaux.

- une tenue exceptionnelle à la corrosion : Le titane développe une couche protectrice passivante, intègre et très adhérente en présence d'air.

- une bonne résistance à des températures élevées et une haute ténacité à la rupture

- la biocompatibilité

- une usinabilité difficile

- un prix élevé : dû à leur élaboration complexe et coûteuse, les alliages titane sont environ dix fois plus chers que ceux de l'aluminium.

Titane : Mise en forme

Les alliages de titane ne sont pas facilement déformable à froid, sauf le titane CP mou et les alliages β (grâce au réseau cc).

La transformation à chaud est plus facile, mais on doit tenir compte de la grande affinité du titane pour l'oxygène, l'azote et l'hydrogène. L'absorption de ces éléments induit une fragilisation de l'alliage de titane.

Le laminage à chaud : On enveloppe le titane de l'acier pour empêcher l'oxydation durant le laminage à chaud.

Le forgeage : chauffage sous atmosphère inerte; la température de forgeage est au dessus de la température de recristallisation (en domaine β ou un peu dessous). Après le forgeage, on fait un recuit de détente et on décape la couche superficielle enrichie en oxygène.

La transformation de tôles : habituellement fait en-dessus de 540°C

Les traitements thermiques : sous atmosphère inerte ou sous vide; l'hydrogène absorbé peut être éliminé par un recuit prolongé sous vide (mais ni l'oxygène ni l'azote ne sont éliminés).

Le moulage : Le moulage en cire perdue est utilisé couramment.

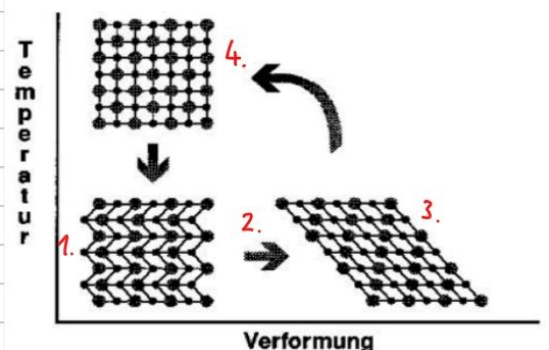
Soudage du titane

En raison de la grande affinité du titane pour l'oxygène, l'azote et l'hydrogène (→ fragilisation du titane) on ne peut pas utiliser toutes les méthodes de soudage.

La méthode de soudage la plus courante pour les alliages de titane est le soudage TIG. Les autres méthodes utilisées sont le soudage plasma, le soudage par résistance (le soudage par résistance par points ne nécessite pas de gaz inerte), le soudage par faisceau d'électron, le soudage par diffusion, le soudage laser et le soudage par friction.

Alliage à mémoire de forme

Les alliages à base de Ni-Ti (phase intermédiaire, environ 50-60% Ni) sont des alliages à mémoire de forme (AMF). Un objet déformé retrouve sa forme initiale après son réchauffement au-dessus de la température de transformation. L'effet mémoire de forme est basé sur une transformation de phase martensitique.



CORROSION

Galvanique

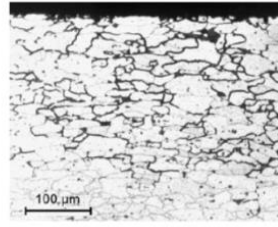
Types de corrosions



Kontaktkorrosion



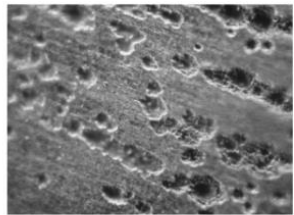
Filiformkorrosion



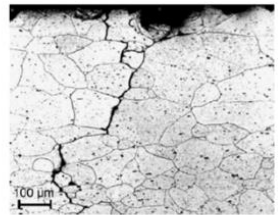
Interkristalline Korrosion



Filiformkorrosion



Lochkorrosion



Spannungsrissskorrosion

La corrosion par piqûres est une forme poussée de corrosion localisée, qui se produit essentiellement dans des milieux contenant des chlorures. La corrosion par piqûre se caractérise entre autre par le fait que la corrosion se produit seulement localement formant des petits points à la surface du métal.

Le déclenchement de la corrosion par piqûre est souvent lié à la présence de défauts locaux sur la surface du métal, tels que des fissures dans l'oxyde ou des ségrégations d'éléments d'alliage, et à la présence d'anions agressifs, tels que des chlorures se trouvant dans l'environnement. Les chlorures brisent localement l'oxyde, de préférence aux points faibles préexistants, qui finissent par devenir des microfissures de plusieurs nm de diamètre.

CAVERNEUSE

Ce genre de corrosion s'installe dans des cavernes ou crevasses et tire son origine de la différence de concentration de produits corrosifs. Le mécanisme de base à l'origine de la corrosion caverneuse des alliages passivables en milieux chlorurés aérés est une acidification progressive du milieu dans la caverne avec l'apparition de conditions locales du milieu très agressives qui détruisent la passivité.

La taille critique d'une crevasse, à partir de laquelle se manifeste la corrosion, présente une largeur généralement inférieure à 0,5 mm.

La corrosion filiforme est une forme de corrosion ayant un aspect comparable à un fil. Elle se produit notamment sous les revêtements organiques. La source qui est à l'origine de ce type de corrosion est souvent un défaut ou une rayure mécanique du revêtement. La corrosion filiforme est une attaque superficielle (pénétration de 40 µm au maximum) de la surface et constitue essentiellement un défaut esthétique.

La corrosion intergranulaire ou intercrystalline (CIG) attaque de préférence les joints de grain ou les régions étroitement limitrophes. La CIG est provoqué par la différence de potentiel de corrosion entre la zone du joint de grain et les corps adjacents du grain.

Ce type de corrosion est fréquent pour les séries 2xxx, 5xxx, 7xxx et moins fréquent pour la série 6xxx.

La CIG peut être provoquée par la précipitation préférentielle des intermétalliques fins aux joints du grain. Les précipités ou les zones appauvries en certains éléments d'alliages possèdent un autre potentiel de corrosion que l'intérieur des grains → formation d'un couple galvanique.

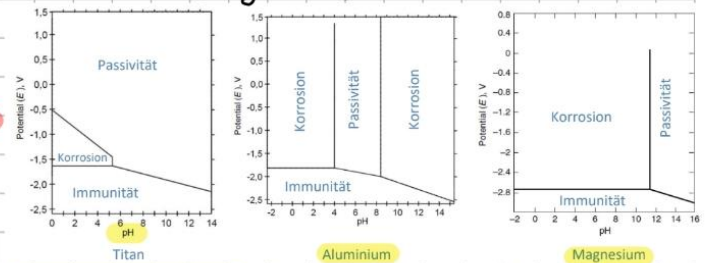
La corrosion sous contrainte (CSC) résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique en tension (résiduelle ou appliquée), et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau (chlorures, soit eau de mer ou sel de déneigement). Des fissures s'amorcent dans la direction perpendiculaire à la contrainte appliquée et se propagent jusqu'à la rupture fragile de la pièce.

Les alliages principalement prédisposés à la CSC appartiennent aux séries d'alliages EN-AW 2xxx, EN-AW 5xxx (Mg > 3 % en poids) et EN-AW 7xxx. La sensibilité d'un alliage peut être diminuée par un traitement thermique (l'état T7 est moins sensible que T6).

Comparaisons

Propriété	Unité	Al	Mg	Ti	Fe
Réseau cristallin	-	cfc	hc	hc / cc	krz/kfz
Température de fusion	°C	660	650	1660	1535
Masse volumique (ρ)	g/cm³	2.70	1.74	4.51	7.87
Module d'élasticité (Module de Young)	GPa	70	45	110	210
Module d'élasticité spécifique (E/ρ)	GPa·g·cm⁻³	26	26	25	27
Capacité thermique massique (0-100°C)	J/kg·K	917	1038	528	456
Conductibilité thermique (20-100°C)	W/m·K	238	156	26	78
Coef. de dilatation thermique (0-100°C)	10⁻⁶/K	23.5	26.0	8.9	12.1
Résistivité électrique (20°C)	µohm/cm	2.67	4.2	54	10.1

Diagrammes de Pourbaix



La corrosion galvanique est une forme de corrosion localisée qui se produit à chaque fois que deux métaux ou alliages ayant une différence de potentiel d'au moins 50-100 mV se retrouvent en contact direct dans le même milieu électrolytique.

Le moins noble des deux métaux ou alliages devient l'anode de la réaction de corrosion. Les potentiels de métaux sont dépendant du milieu.

Compatibilité des alliages d'aluminium en contact avec des autres métaux dans des milieux différents :

Métal ou alliage	Atmosphère			Eau	
	rurale	industrielle	marine	douce	de mer
Chrome	1	1	2	(2)	(3)
Plomb	0	0	3	(2)	3
Alliage fonte	0	1	2	1	3
Carbone	1	2	3	(3)	3
Cuivre	1	3	3	3	3
Magnésium & alliages	0	1	2	1	2
Laiton	1	3	3	3	3
Acier inoxydable (18/18CrNi)	0	1	2	2	3
Acier	1	1	3	2	3
Titane & alliages	0	1	2	2	3
Métaux pour brasage tendre ¹)	1	2	3	(2)	3
Zinc & alliages	0	0	0	0	0

„Normalspannungsreihe“¹)

Praktische Spannungsreihen ²)

in Wasser mit pH 6 ³)

in künstl. Meerwasser mit pH 7,5

Metall	mV	Metall	mV	Metall	mV
Kupfer	+340	Titane	(+136)	Nickel	+1
Blei	-126	Messing MS63	+100	Messing MS63	-32
Zinn	-140	Kupfer	+95	Kupfer	-35
Nickel	-230	Nickel	+73	RF Stahl 1.4301	(-90)
Eisen	-440	RF Stahl 1.4301	(-129)	Titane	(-156)
Zink	-763	Aluminium	(-214)	Blei	-304
Titane	-1630	Hartchrom	(-294)	Hartchrom	(-336)
Aluminium	-1660	Zinn Sn98	(-320)	Stahl	(-380)
Magnésium	-2370	Blei 99.9	(-328)	Aluminium	(-712)
		Stahl	-395	Zink (Feinzink)	-851
		Zink (Feinzink)	-852	Zinn	-845
		Magnésium⁴)	-1460	Magnésium⁴)	-1335

	Densité [g/cm³]	Module E [GPa]	Résistanc à la traction [MPa]
Acier	7.86	210	350 - 1500
Aluminium	2.70	70	200 - 700
Magnésium	1.74	45	150 - 400
Titane	4.50	110	800 - 1300