

AFK502R – AFK1 – AFK18 ALLIAGE MAGNETIQUE DOUX Fe-Co

I GENERALITES

Le développement considérable des équipements du génie électrique impose une miniaturisation de plus en plus poussée des appareillages annexes de production et de transformation de l'énergie électrique. C'est particulièrement le cas lorsque l'énergie électrique est embarquée comme dans l'aéronautique, le ferroviaire ou l'automobile.

La puissance massique des équipements peut être optimisée par l'emploi des alliages magnétiques Fe-Co doux, grâce à leurs caractéristiques exceptionnelles, qui sont :

- Une forte induction à saturation, la plus élevée des alliages magnétiques connus.
- Une perméabilité intéressante à des inductions de travail égales ou supérieures à 1,6 T comparées à celle des matériaux magnétiques couramment employés, comme le fer doux et le fer silicium.
- Une résistivité assez forte pour la nuance AFK 502 R (Rotor) permettant une réduction des pertes en courant alternatif et à haute induction.

Un point de Curie se situant entre 950 et 980°C, d'où des caractéristiques magnétiques peu altérées à des températures de 250 à 500°C, avantage important pour les applications à hautes températures.

Les courbes d'induction en fonction du champ appliqué représentées Figure 1 montrent la supériorité, dans les inductions élevées, des alliages AFK sur le FeSi. Elles permettent de calculer grossièrement les gains de section, d'encombrement et de poids qui peuvent être obtenus.

Il faut noter, par ailleurs, que ces tôles Fe-Co se découpent facilement avant traitement thermique final avec une usure des outils de découpe plus faible que celle provoquée par les tôles Fe-Si.

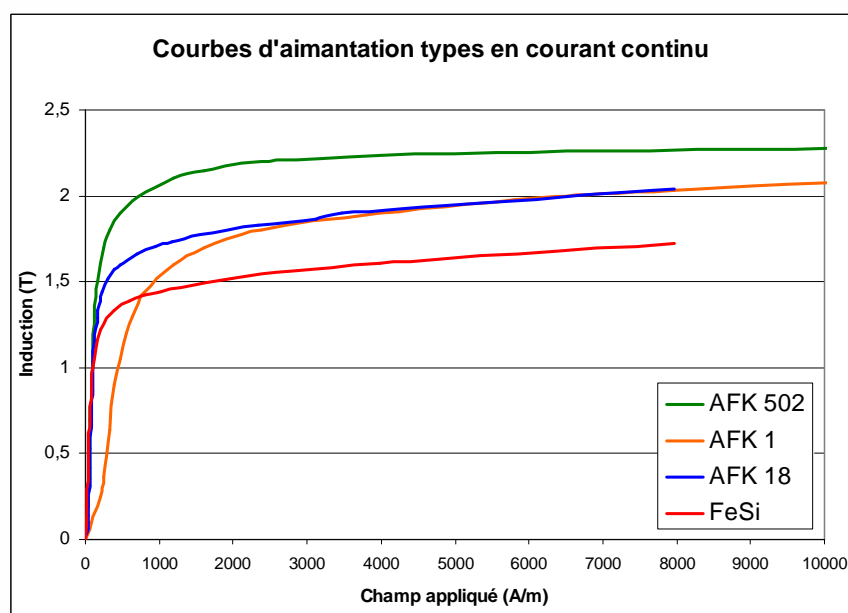


Figure 1 : Courbes de première aimantation $B = f(H)$ en courant continu à la température ambiante sur rondelles d'épaisseur 0.35 mm

Imphy Alloys , sur demande, met à la disposition de ses clients les points de mesure de ces courbes en format informatique .

Imphy Alloys a étudié et mis au point des alliages Fer-Cobalt dans la proportion de 18% à 49% de Co suivant les nuances, avec de faibles additions d'éléments, tels que le Chrome ou le Vanadium, destinés, d'une part à augmenter leur ductilité et faciliter ainsi leur transformation métallurgique (forgeage et laminage à froid) et d'autre part, à relever leur résistivité.

Les alliages Fe-Co que nous fabriquons se divisent en trois groupes suivant leur teneur en Co :

Eléments en %	Fe	Co	V	Cr	Mn
Alliages					
AFK 502 R	Balance	49	2		
AFK 1	Balance	27		0,5	0,3
AFK 18	Balance	18			0.3

L'**AFK 502 R** a une induction à saturation légèrement plus basse que celle de l'**AFK 1** mais une perméabilité nettement supérieure dans les champs moyens. Sa résistivité est deux fois plus élevée que celle de l'**AFK 1**.

L'**AFK 1** présente l'induction à saturation la plus élevée, mais sa résistivité et sa perméabilité sont moins grandes que celles de l'**AFK 502**. Il convient plus particulièrement aux applications en courant continu : pôles d'électro-aimants et de spectrographes de masse et, en général, pièces diverses travaillant en haute induction.

L'**AFK 18** à teneur modérée en cobalt est bien plus qu'un alliage intermédiaire (par la composition) entre les FeSi et l'**AFK502 R** : il associe à la fois la saturation et l'induction de travail élevées que lui apporte la présence de cobalt, une résistivité électrique proche des **AFK502R** et Fe3%Si, une résistance mécanique similaire aux **AFK502R**, une magnétostriction sensiblement plus basse que celle de l'**AFK502R** et proche du FeSi, et une bonne aptitude à la mise en œuvre (découpe, poinçonnage, pliage, emboutissage ...) aussi bien à l'état écroui que recuit, et donc très proche par cet aspect du FeSi.

Ces nuances conviennent pour les applications en courant alternatif : tôles de moteurs, de génératrices et de transformateurs d'alimentation, de forte puissance massique.

De même, leur fort coefficient de magnétostriction les désigne pour la constitution des noyaux de transducteurs magnétostrictifs.

II TRAITEMENT THERMIQUE FINAL

Le traitement thermique, qui doit être effectué sur les pièces finies, a pour but de supprimer les tensions dues à l'écroutissage et de conférer au métal le compromis recherché entre caractéristiques magnétiques et mécaniques.

II.1. Préparation des pièces

Il est recommandé, surtout pour les pièces minces, de faire un dégraissage pour éviter tout risque d'altération superficielle.

De plus, pour éviter tout collage des pièces entre elles pendant le traitement, il est préférable de les enduire d'un film de matière inerte et anhydre; talc, magnésite ou alumine par exemple.

Pour les pièces massives, il y a lieu de prévoir des supports plans adaptés à la forme et au poids de ces pièces pour éviter toute déformation pendant le traitement.

II. 2. Atmosphère de traitement

Le traitement doit s'effectuer à l'abri de l'oxydation, dans l'hydrogène pur et sec ou sous vide. Les atmosphères d'ammoniac craqué ne sont acceptables que pour l'AFK1 et l'AFK18 ; en effet, pour l'AFK502R on y observe une nitruration qui entraîne un avilissement important des caractéristiques magnétiques.

II. 3. Cycles recommandés

Il y a lieu de remarquer que les températures indiquées ci-après ne doivent pas être dépassées, faute de quoi les caractéristiques seraient irrémédiablement dégradées dès que l'on atteindrait la température à laquelle s'amorce la transformation allotropique $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ qui se situe aux environs de 900°C pour l'AFK502R et l'AFK1 et 940°C pour l'AFK18.

Nuance	Traitement thermique type
AFK502R	<ul style="list-style-type: none">➤ Traitement d'optimisation des caractéristiques magnétiques : 2 à 3 h à 850°C dans l'hydrogène pur et sec, ou sous vide, refroidissement 250°C/h dans la même atmosphère. Le refroidissement peut être écourté à partir de 300°C : refroidissement à l'air.➤ Traitement d'optimisation des caractéristiques mécaniques : 2 à 3h 725°C dans l'hydrogène pur et sec, ou sous vide, refroidissement 150°C/h dans la même atmosphère. Le refroidissement peut être écourté à partir de 300°C : refroidissement à l'air.
AFK1	<ul style="list-style-type: none">➤ Traitement d'optimisation des caractéristiques magnétiques : 2 à 3 h à 850°C dans une atmosphère d'hydrogène pur et sec ou d'ammoniac craqué : refroidissement 250°C/h dans la même atmosphère.➤ Traitement d'optimisation des caractéristiques mécaniques : 2 à 3h 725°C dans une atmosphère d'hydrogène pur et sec ou d'ammoniac craqué : refroidissement 150°C/h dans la même atmosphère.
AFK18	1 à 4 h à 900°C-920°C dans une atmosphère d'hydrogène pur et sec, ou sous vide ou sous une atmosphère inerte (gaz rare), refroidissement dans la même atmosphère

A l'état traité tous les matériaux magnétiques demandent à être manipulé avec soin et soustraits aux chocs et aux déformations plastiques. Ces précautions sont tout particulièrement recommandées pour l'alliage AFK502R dont la capacité de déformation est réduite.

A l'issue du traitement, le métal présente une expansion dimensionnelle $\frac{\Delta \ell}{\ell}$ qui est de l'ordre de 1 à $1,5 \times 10^{-3}$. Il faut en tenir compte dans des cas particuliers lorsque des tolérances très serrées sont demandées aux pièces.

III CARACTERISTIQUES MAGNETIQUES TYPES

Les caractéristiques magnétiques sont données à la température ambiante en l'absence de toute contrainte mécanique. Toute déformation, même élastique, avilit les propriétés magnétiques. En cas de déformation élastique, le métal retrouve cependant ses propriétés initiales après disparition de cette déformation.

III.1 AFK502 R

III.1.1 AFK502R en bande laminée à froid

Caractéristiques	Unités	AFK 502 R
Induction à saturation	Tesla	2,35
Résistivité à 20°C	$\mu\Omega.cm$	40
Point de Curie	°C	900
Masse volumique	$g.cm^{-3}$	8,12
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 100°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	9,5
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 300°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	9,5
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 500°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	9,8
Conductibilité thermique entre 0°C et 100°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	29
Conductibilité thermique entre 0°C et 300°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	32
Conductibilité thermique entre 0°C et 500°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	35
Coefficient de magnétostriction à saturation $\frac{\Delta l}{l}$	10^{-6}	60 – 70
Module d'Young sur bande laminé à froid, état écroui	MPa	210 000 – 220 000
Module d'Young sur bande laminé à froid, état traité	MPa	180 000 – 200 000

Les tableaux ci-dessous présentent les propriétés magnétiques obtenues pour trois traitements thermiques à utiliser selon le compromis recherché entre propriétés magnétiques et mécaniques. Les mesures ont été réalisées sur rondelles 36*25*0,35mm (diamètre extérieur*diamètre intérieur*épaisseur).

Conditions de mesure	Pertes Magnétiques (W/kg)			
	f = 50Hz		f = 400Hz	
	B =1,5T	B =2T	B =1,5T	B=2T
Traitement Thermique				
2h à 725°C refroidissement 150°C/h			51.9	91.3
2h à 760°C refroidissement 250°C/h	3	5	44	84
3h à 850°C refroidissement 250°C/h	2.3	3.8	42.1	73.6

III.1.2 AFK502R en barre (massif)

Caractéristiques d'aimantation en courant continu					
Traitement Thermique	B (Tesla) à 800 A/m	B (Tesla) à 1600 A/m	B (Tesla) à 4000 A/m	B (Tesla) à 8000 A/m	Hc (A/m)
2h à 760°C sous H2 refroidissement 200°C/h	> 1.8	>2	>2.2	>2.25	160
3h à 850°C sous H2 refroidissement 250°C/h	> 2	>2.1	>2.2	>2.25	110
6h à 870°C sous vide refroidissement 250°C/h	> 2	>2.15	>2.2	>2.25	80

III.2 AFK1 en bande laminée à froid.

Caractéristiques	Unités	AFK 1
Induction à saturation	Tesla	2,4
Résistivité à 20°C	$\mu\Omega.cm$	20
Point de Curie	°C	980
Masse volumique	$g.cm^{-3}$	8
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 100°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	10,3
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 300°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	10,3
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 500°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	11
Conductibilité thermique entre 0°C et 100°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	46
Conductibilité thermique entre 0°C et 300°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	67
Conductibilité thermique entre 0°C et 500°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	84
Coefficient de magnétostriction à saturation $\frac{\Delta l}{l}$	10^{-6}	30-35

Les tableaux ci-dessous présentent les propriétés magnétiques obtenues pour deux traitements thermiques à utiliser selon le compromis recherché entre propriétés magnétiques et mécaniques. Les mesures ont été réalisées sur rondelles 36*25*0.35mm (diamètre extérieur*diamètre intérieur*épaisseur).

Caractéristiques d'aimantation en courant continu					
Traitement Thermique	B (Tesla) à 800 A/m	B (Tesla) à 2000 A/m	B (Tesla) à 8000 A/m	B (Tesla) à 16000 A/m	Hc (A/m)
2h à 725°C refroidissement 150°C/h	>1,47	>1,73	>2,02	>2,19	200
3h à 850°C refroidissement 250°C/h	>1,47	>1,73	>2,02	>2,19	95

III.3 AFK18 en bande laminée à froid

Caractéristiques	Unités	AFK 18
Induction à saturation	Tesla	2,3
Résistivité à 20°C	$\mu\Omega.cm$	30
Point de Curie	°C	940
Masse volumique	$g.cm^{-3}$	7,9
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 100°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	10,5
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 300°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	10,5
Coefficient de dilatation moyen entre 0°C et 500°C	$10^{-6}.^{\circ}C^{-1}$	11,2
Conductibilité thermique entre 0°C et 100°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	57
Conductibilité thermique entre 0°C et 300°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	67
Conductibilité thermique entre 0°C et 500°C	$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	84
Coefficient de magnétostriction à saturation $\frac{\Delta l}{l}$	10^{-6}	21-26

Les tableaux ci-dessous présentent les propriétés magnétiques obtenues pour deux traitements thermiques à utiliser selon le compromis recherché entre propriétés magnétiques et mécaniques. Les mesures ont été réalisées sur rondelles 36*25*0.35mm (diamètre extérieur*diamètre intérieur*épaisseur).

Traitement Thermique	B (Tesla) à 2500 A/m	B (Tesla) à 5000 A/m	B (Tesla) à 10000 A/m	Hc (A/m)
2h à 700°C refroidissement 250°C/h	> 1,75	>1,85	>2	150
2h à 900°C refroidissement 250°C/h	> 1,75	>1,85	>2	60

Pertes Magnétiques (W/kg)				
Conditions de mesure	f = 50Hz		f = 400Hz	
	B =1,5T	B =1.7T	B =1,5T	B=1.7T
Traitement Thermique				
2h à 700°C refroidissement 250°C/h	5.5	6.7	77	99
2h à 900°C refroidissement 250°C/h	3.3	4.3	66	88

IV CARACTERISTIQUES MECANIKQUES TYPES

Comme tous les autres alliages magnétiques, les alliages AFK ont une faible capacité de déformation à l'état écroui (non traité). Toutefois, pour l'AFK502R, le recuit usuel ne régénère pas intégralement la capacité de déformation qui conserve une valeur modeste, comme le montrent les allongements A % dans les tableaux ci-après. Cette capacité de déformation réduite augmente l'incertitude de la mesure de la limite élastique Rp0.2% et de la résistance à la rupture Rm **dont les valeurs sont données à titre indicatif**. Bien que faibles en valeur absolue, ces allongements s'avèrent néanmoins suffisants pour permettre de réaliser ces tôles qui, après assemblage, entrent dans la fabrication de moteurs répondants aux exigences de l'aviation civile et militaire.

Il est d'ailleurs possible d'améliorer la ductilité de l'AFK502R et AFK1 par recuit au-dessous de la température de 760°C, suivi d'un refroidissement à vitesse appropriée. Cependant, comme le gain d'allongement s'obtient au détriment des caractéristiques magnétiques et que le recuit qui procure la déformabilité optimale est d'exécution délicate, il n'y a lieu de l'envisager que dans des cas tout à fait particuliers.

IV.1 Caractéristiques mécaniques sur bandes laminées à froid

Les valeurs ci dessous sont des valeurs types à température ambiante et les mesures sont faites selon les normes:

- NF EN 10002 pour les essais de tractions
- EN ISO 6507 pour la dureté

AFK502R - épaisseur 0,35mm				
Traitement Thermique	Rm (MPa)	Rp0.2% (MPa)	A%	Dureté
Etat écroui	1200	1150	2	400
2h à 725°C refroidissement 150°C/h	715	450	7.5	255
2h à 760°C refroidissement 250°C/h	600	400	5.5	240
3h à 850°C refroidissement 250°C/h	480	300	4.5	220

AFK1 - épaisseur 0,35mm				
Traitement Thermique	Rm (MPa)	Rp0.2% (MPa)	A%	Dureté
Etat écroui	1000	900	2	300
2h à 725°C refroidissement 150°C/h	600	350	17	190
3h à 850°C refroidissement 250°C/h	510	250	13	180

AFK18 - épaisseur 0,35mm				
Traitement Thermique	Rm (MPa)	Rp0.2% (MPa)	A%	Dureté
Etat écroui	850	800	2	310
2h à 700°C refroidissement 250°C/h	470	355	29	185
2h à 900°C refroidissement 250°C/h	380	210	31	175

V FORMES DE LIVRAISON

Nuances	Tores traités (1)	Pièces traitées (1)	Bandes laminées à froid	Produits longs et massifs (2)
AFK502R	■	■	■	■
AFK1	■	■	■	■
AFK18	■	■	■	■

(1): tores, profils, empilages collés, tôles de rotors et stators, plaques pour découpe chimique vendus par MECAGIS, filiale d'Imphy UGINE Précision comme Imphy Alloys

(2): barres, profilés, pièces forgées, tôles laminées à chaud

Les alliages AFK peuvent être livrés :

- En bande laminée à froid à l'état écroui pour l'AFK1, l'AFK502R et l'AFK18

C'est le cas courant lorsque les utilisateurs doivent usiner ou découper des pièces dans des plats, ronds, ou bandes. Le traitement thermique devra être effectué sur les pièces après toutes les opérations mécaniques.

Nous proposons également une livraison avec une isolation au méthylate de magnésium.

- En bande laminée à froid à l'état adouci pour l'AFK18

Cet état est intéressant lorsque l'utilisateur veut transformer par découpe, usinage ... la tôle en pièces pour montage direct dans les systèmes électrotechniques sans passer par un recuit final d'optimisation des propriétés magnétiques. Cet état adouci peut être satisfaisant lorsque le matériau magnétique fonctionne à saturation ou sous forte impulsion de champ magnétique.

- Sous forme de pièces traitées prêtes à l'emploi pour l'AFK1, l'AFK502R et l'AFK18

Mécagis, filiale d'Imphy UGINE Précision comme Imphy Alloys, propose la découpe de pièces, l'enroulage de tores et la réalisation du traitement thermique pour optimisation des propriétés recherchées.

V.1 Produits plats

Les tableaux ci-dessous présentent nos formats de livraison standards

AFK502 R			
Forme	Epaisseur (mm)	Largeur maximum (mm)	Etat
Bande laminée à froid livrée en couronnes	0,1 – 0,5	200	Ecroui
	1-1,3	50	Ecroui
Tôle laminée à chaud	5 à 50	500 à 2 000	Brut de laminage Décapé

AFK1			
Forme	Epaisseur (mm)	Largeur maximum (mm)	Etat
Bande laminée à froid livrée en couronnes	0,1 – 0,5	300	Ecroui
	1-1,3	50	Ecroui
Tôle laminée à chaud	5 à 50	500 à 2 000	Brut de laminage Décapé

AFK18			
Forme	Epaisseur (mm)	Largeur maximum (mm)	Etat
Bande laminée à froid livrée en couronnes	0,1 – 0,5	300	Ecroui ou recuit
	1-1,3	50	Ecroui
Tôle laminée à chaud	5 à 50	500 à 2 000	Brut de laminage Décapé

* Remarque :

En raison de leur capacité d'allongement limitée qui les exposent à des ruptures s'ils ne sont pas correctement soutenus, les tiges de faibles diamètres et les plats de faibles épaisseurs ne sont pas livrables en AFK 502 R en grandes longueurs. Pour ces dernières, il est recommandé de choisir des épaisseurs et des diamètres supérieurs.

V.2 Barres

AFK502R – AFK1 – AFK18	
Diamètre (mm)	Longueurs courantes de fabrication (mm)
$\phi \leq 13$	2000 à 3000
$14 \leq \phi \leq 80$	3000 à 4000
$\phi > 80$	En fonction du diamètre et de la quantité commandée

V.3 Pièces forgées et moulées

Nous consulter pour devis

VI MISE EN OEUVRE

VI.1 Façonnage-Usinage

Les alliages AFK peuvent être cisailés et découpés, mais étant peu ductiles, ils ne s'étirent pas et ne s'emboutissent pas. L'AFK 1 peut cependant être plié.

Nous recommandons les conditions d'usinage suivantes pour les alliages AFK :

		AFK 18	AFK 1	AFK 502
Tournage	Outils	Carbure	Carbure	Carbure
	Arrosage	Huile soluble	Huile soluble	Huile soluble
Fraisage	Angle de coupe	10°	8°	10°
	Angle de dépouille	4°	4°	4°
	Vitesse de coupe :	50 -150 m / min	55 - 100 m / min	50 -150 m / min
	Outils	Acier rapide	Acier rapide	Acier rapide
Fraisage	Arrosage	Huile soluble	Huile soluble	Huile soluble
	Avance	0.08 – 0.10 mm / dent	0.05 – 0.07 mm / dent	0.08 – 0.10 mm / dent
Fraisage	Vitesse de coupe :	40 – 150 m / min	15 – 40 m / min	20 - 50 m / min

La résilience réduite de ces matériaux les apparente à certains aciers ; comme pour ces derniers, éviter les chocs mécaniques ou thermiques, ainsi que les vibrations de forte amplitude.

VI. 2. Soudure - Brasure

La soudure et la brasure de l'AFK502R nécessitent des précautions particulières. D'une part, les températures pratiquées et le refroidissement lent des pièces occasionnent une baisse de résilience dans les zones de transition à proximité des soudures, accompagnées d'une chute des caractéristiques mécaniques ; d'autre part, il faut éviter toute perte de vanadium sous forme d'oxyde ou de nitrate. La ductilité serait encore diminuée et les propriétés magnétiques localement abaissées. La soudure ou la brasure de l'AFK502R est donc à éviter dans toute la mesure du possible. L'AFK1, qui ne présente pas ces inconvénients, doit être préféré lorsqu'une telle opération est nécessaire.

Toutefois, la soudure par bombardement électronique, lorsque cela est possible, permet d'éviter ces écueils.

En ce qui concerne la brasure, il faut choisir judicieusement le métal d'apport pour éviter une corrosion sous tension et par conséquent n'opérer que sur des pièces totalement exemptes de tensions mécaniques, c'est à dire sur des pièces étuvées à une température relativement élevée, ou recuites.

VI. 3. Soudure à l'étain

Elle ne peut se faire que sur des pièces ayant subi le traitement thermique final.

Pour effectuer cette soudure dans de bonnes conditions, il est indispensable de nettoyer et décaper soigneusement les surfaces. Utiliser par exemple le décapage au chlorure de zinc avec la solution suivante :

Zn	380 g
HCl 22° Bé	1 000 cm ³