

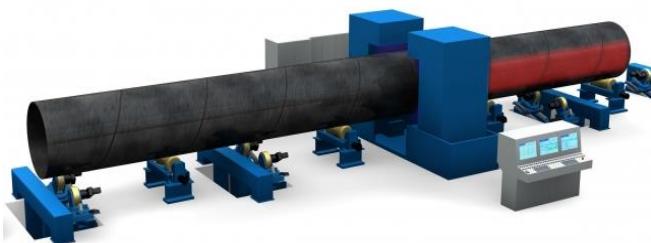
Démagnétiser des objets de grande surface comme procédé de préparation avant le soudage



Démagnétisation de tubes de construction



Démagnétisation d'une structure portante



Concept d'une installation de démagnétisation automatique pour tubes de grande dimension
Maurer Magnetic AG & Schuler Pressen GmbH

Maurer Magnetic AG
8627 Grüningen
Switzerland

Introduction

Ce White Paper donne un aperçu des procédés de démagnétisation utilisés dans le domaine de la soudure. Certains de ces procédés sont par contre peu adaptés pour démagnétiser des pièces en acier de grande surface. Une nouvelle méthode est maintenant utilisée pour démagnétiser complètement ce type d'objets avant le montage.

Exemples de structures de grande surface en acier:

- Modules et cuves dans la construction de navires
- Plateformes offshore
- Réservoirs à pression et cuves
- Structures portantes
- Echangeurs thermiques
- Panneaux en acier

Les structures en acier sont souvent magnétisées lors de la production et la déplacement. Elles sont magnétisées par divers procédés comme le contrôle, le soudage, le formage des métaux, le découpage plasma ainsi que la concentration de flux à cause de champs induits (champ magnétique terrestre). Dans la manutention, l'acier est avant tout magnétisé par les électroaimants ou les aimants permanents de levage [1].

Les aciers de construction à haute résistance se laissent tendanciellement plus magnétiser que les aciers de résistance plus faible, grâce aux plus grandes forces de champ coercitif de matériaux à grains fins. Une grande teneur en nickel (p. ex. acier à 9% de nickel de réservoirs cryogéniques) occasionne également des aciers fortement magnétisables [3]. L'expérience démontre que la variation de structures locales engendre des points à haute intensité de champ coercitif, ce qui conduit à des zones ou des parties de surface à fort magnétisme résiduel (également appelé magnétisme rémanent). Le magnétisme résiduel apparaît à l'intersection entre le matériau et l'air et peut ainsi être mesuré comme intensité de champ magnétique. L'intensité magnétique est bien plus haute vers les arêtes et goulots élancés où il se produit de fortes densifications du flux magnétique. Le magnétisme résiduel peut également parcourir le long de cercles magnétiques fermés à l'intérieur du matériau, comme c'est souvent le cas lors du soudage à l'arc submergé (SAW) de tubes. Le magnétisme parcourt le périmètre des tubes et est uniquement visible lorsque le bout du tube à une forme irrégulière ou le long d'évidements dans la matériau. Un fort magnétisme résiduel pose problème pour les transformations à venir ainsi que sur la durée de vie des composants.

Procédés influencés lors de la transformation:

- Soudage
- Contrôle non destructif (contrôle par courants de Foucault, contrôle par radiographie)
- Procédé de préparation de revêtement (microbillage, problème de particules)

Dans le domaine de la durée de vie:

- Des recherches montrent une plus grande disposition à la fragilisation par hydrogène (selon les rapports de recherche [6, 7])

Etat de l'art des techniques de manieement du magnétisme perturbant le procédé de soudage

La plus grande problématique sur des objets en acier fortement magnétisés est la perturbation du procédé de soudage. Le phénomène est connu comme « souffle magnétique ». Les forces de Lorentz engendrées par le champ global à travers la fente de soudage créent une déviation de l'arc électrique [4].

Définitions utilisées pour les champs magnétiques (glossaire):

Champ environnant H_u : Le champ environnant (champ magnétique terrestre) induit un flux magnétique aux pièces en acier.

Magnétisme résiduel B_r : Champ rémanent restant dans l'acier.





Ch. du courant de soudage H_s : Champ magnétique produit par le courant de soudage (courant de retour par la masse).

Champ contraire H_g : Champ agissant sur la fente de soudage, crée et réglable par une source de courant continu.

Champ global H_{tot} : Champ global agissant sur la fente de soudage constitué par les champs parcourant le matériau et le champ environnant. Le champ global est la somme des différents champs dans le milieu (principe de superposition).

La déviation de l'arc électrique est éliminée lorsque le champ global vers la fente de soudage est fortement réduit. Les flux magnétiques qui parcourent la pièce ne jouent pas de rôle en vue de la déviation de l'arc électrique, par contre, ils occasionnent la magnétisation de grandes surfaces sur les pièces.

En dehors des mesures liées aux techniques de soudage, comme la modification des paramètres de soudage ou le positionnement différent de la prise de masse, les procédés suivants sont utilisés: *procédé par champ contraire*: le champ global est neutralisé par un champ contraire ciblé. *Procédé Knock-Down*: un champ contraire est appliqué de manière à ce que le champ global soit nulle une fois le champ contraire arrêté. *Procédé de démagnétisation*: le matériau est démagnétisé en inversant successivement les pôles dans le matériau grâce à un champ alternatif.

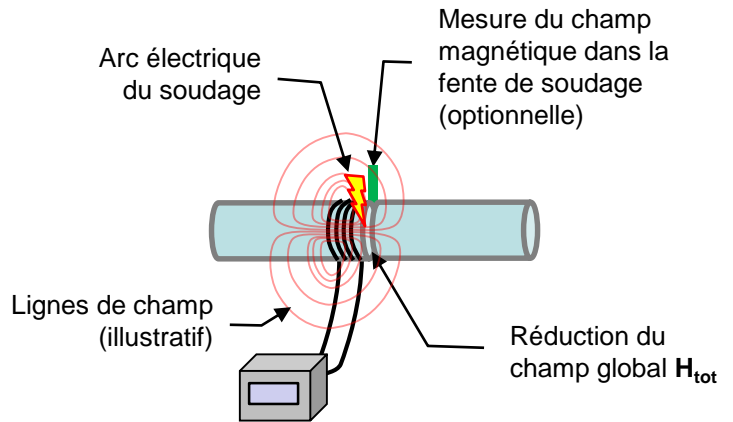
	Appareil	Procédé par champ contraire	Procédé Knock-Down	Procédé de démagnétisation
Source de courant	Redresseur de soudage, resp. source de courant continu standard	Oui	Oui	Non
	Source de courant continu réglable et inversable	Oui	Oui	Oui
	Source de champ alternatif sinusoïdale à haute puissance	Non	Non	Oui
Bobine	Bobine bobinée avec des câbles flexibles 	Oui	Oui	Oui
	Bobine bobinée autour d'un cadre solide 	Oui	Oui	Oui
	Bobine à pinces 	Oui	Oui	Limité

(les procédés de démagnétisation stationnaires ne sont pas pris en compte ici).

Exemples d'application des procédés par champ contraire, Knock-down et démagnétisation

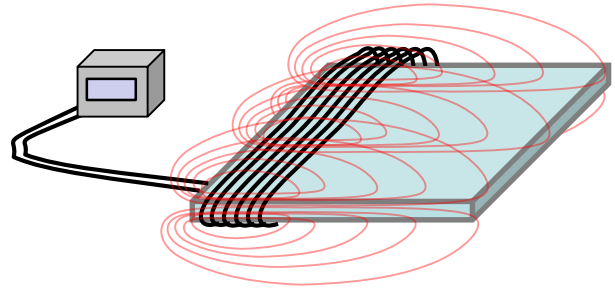
Câbles bobinés proche de la zone de soudage: **bobinage autour du périmètre**

- Procédés par champ contraire, Knock-down et démagnétisation utilisables.
- Seules les zones proches du bobinage seront influencées magnétiquement (valable pour tous les exemples).
- Temps de mise en œuvre considérable.
- L'utilisation de bobine à pince ou de bobinage sur un cadre réduit le temps de bobinage.



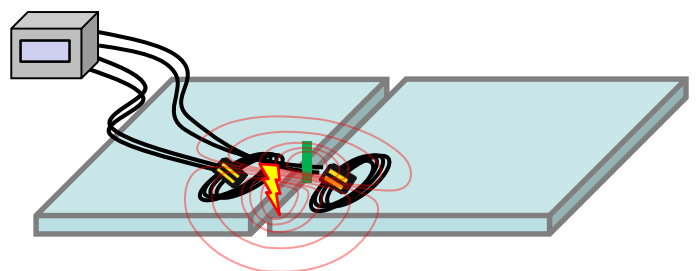
Bobine autour du périmètre à l'extrémité d'une plaque:

- Procédés de démagnétisation ou par Knock-down utilisables.
- Uniquement réalisable avec une bobine par câbles, temps de mise en œuvre considérable.
- La démagnétisation de l'objet complet exige le déplacement de la bobine et un nouveau bobinage.



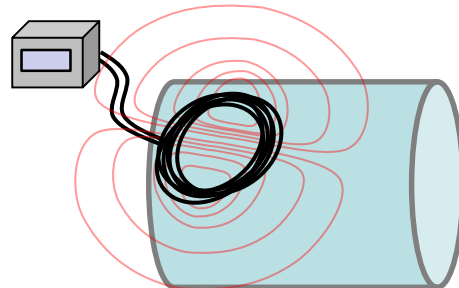
Câbles bobinés créant une bobine déposée sur la surface de l'objet: **Bobinage en surface**

- Procédés par champ contraire, Knock-down et démagnétisation utilisables.
- Les bobines doivent régulièrement être déplacées mais pas rebobinées.



Bobine en surface à l'extrémité d'un tube:

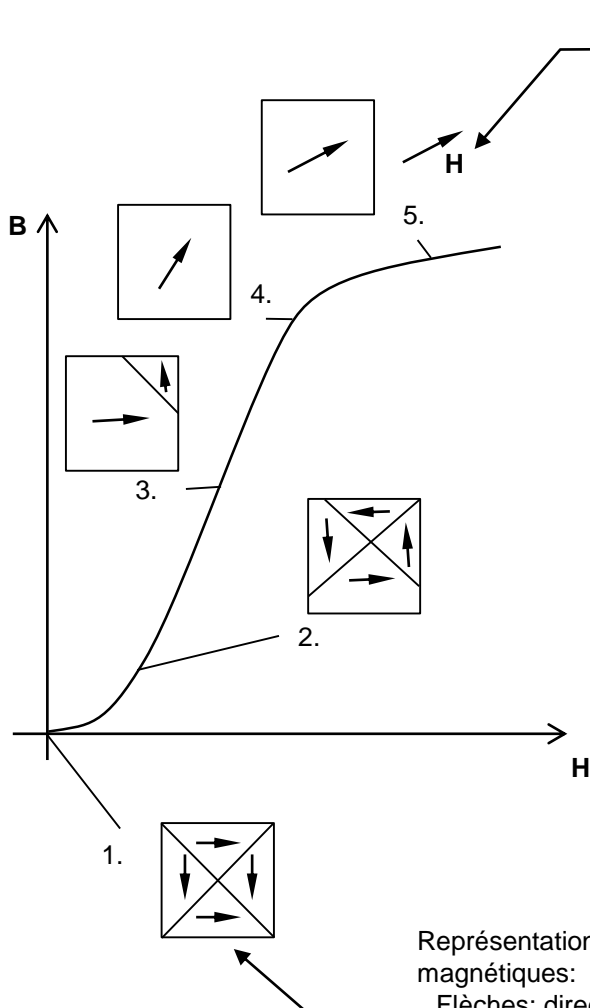
- Procédés de démagnétisation ou par Knock-down utilisables.
- La démagnétisation de l'objet complet exige uniquement le déplacement de la bobine sans nouveau bobinage.



L'état magnétique dans le matériau

L'état magnétique (structure des domaines) dans un matériau ferromagnétique est expliqué par l'observation de la courbe d'aimantation initiale. Cette courbe décrit les étapes de magnétisation dans le matériau en fonction du champ appliqué H .

Les domaines sont composés de zones magnétisées à saturation délimitées par des parois (parois de Bloch). La direction du magnétisme entre les domaines change aux parois de Bloch. Lorsque l'intensité de champ H augmente, les domaines s'orientent de plus en plus en direction du champ H , ce qui supprime les parois de Bloch qui délimitent les directions. A saturation maximale, il existe plus qu'un seul grand domaine.



H : Somme de tous les champs magnétiques agissant à l'extérieur du matériau

Courbe de magnétisation $B(H)$ comme courbe d'aimantation initiale [8]

1. Etat non magnétisé* avec une structure à flux fermé (aucun flux magnétique sort).
2. Déplacement des parois réversible.
3. Déplacement des parois irréversible.
4. Le déplacement des parois est terminé, changement de l'orientation réversible.
5. Une plus grande augmentation de la densité du flux B à saturation débouche uniquement à un processus de changement d'orientation de la polarisation.

* Cet état est uniquement atteint par un recuit ou une démagnétisation par champ alternatif. Le matériau est mis à saturation magnétique puis un grand nombre de changement de polarités d'intensité décroissante le ramène à l'état initial non magnétisé.

Représentation de la structure des domaines magnétiques:

Flèches: direction magnétique des domaines
Lignes: Limites des domaines = parois de Bloch
(grandeur des domaines magnétiques: env. $10\mu\text{m}$ à 1mm)

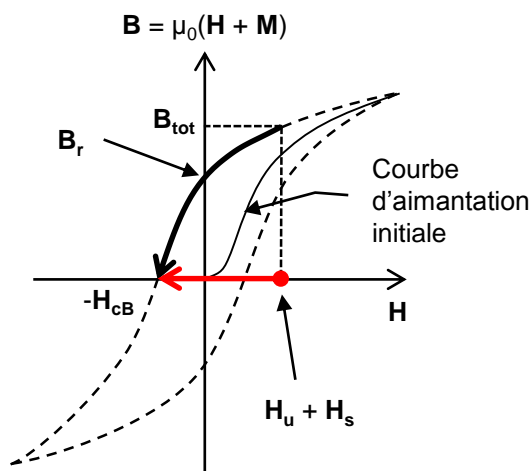
Les descriptions ci-dessous des procédés par champ contraire, Knock-down et de démagnétisation font référence à la courbe d'aimantation initiale.

Description des procédés avec leurs avantages et inconvénients

1) Procédé par champ contraire

Dans ce procédé, on cherche à neutraliser le champ magnétique perturbant avec l'application d'un champ contraire contrôlé. Pour les sources de courant (p.ex. redresseur de soudage), un courant est réglé à travers la bobine afin de créer le champ contraire. Ce champ contraire se superpose au champ perturbateur. Avec une régulation précise du courant à travers la bobine, le champ perturbateur peut pratiquement être neutralisé.

Ce qu'il se passe dans le matériau:



Courbe de l'hystérèse de l'acier

- Explication de H_g , H_u , H_s , B_r voir la page 3.
- Intensité magnétique coercitive de la densité du flux magnétique: H_{cb}
- Champ contraire $H_g = H_u + H_s + H_{cb}$. Le flux total B_{tot} aux abords de la bobine est réduit à zéro par la bobine.
- Le champ contraire reste allumé pendant le procédé de soudage.
- Après l'arrêt du champ contraire, le flux global B_{tot} se reforme.

Fente de soudage

- Le champ global à la fente de soudage est composé de la superposition du flux sortant* et du champ environnant (pas représenté sur le graphique).

* Le flux sortant est défini par les lignes de champ sortant du matériau.

Avantages

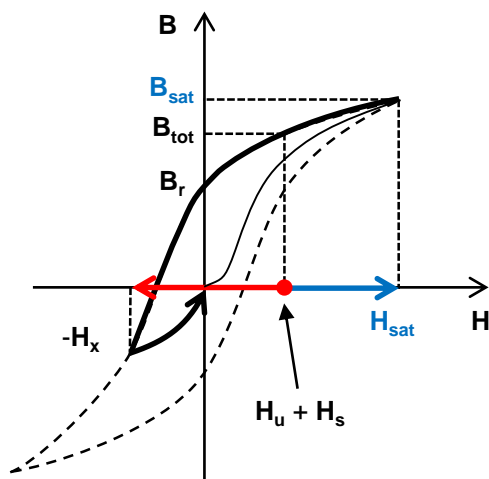
- Réalisable avec les équipements de soudage conventionnel. Un redresseur de soudage ainsi qu'un câble de soudage de longueur suffisante est nécessaire.
- En théorie, cette méthode peut neutraliser tous les cas rencontrés dans la pratique.

Inconvénients

- Sans l'utilisation d'un appareil de mesure du champ magnétique dans la fente de soudage, il est difficile de régler le champ contraire. Ce qui conduit à une méthode „Trial and Error“ avec la faible productivité et qualité qui en découle.
- Un champ global irrégulier le long de la fente de soudage nécessite un ajustement successif des réglages.
- Le bobinage des câbles n'est pas toujours possible.
- Les nouveaux appareils de soudage sont basés sur une technologie par inverseur, ce qui rend la méthode par champ contraire moins facilement réalisable.
- Le matériau n'est pas démagnétisé (état 3 dans la courbe d'aimantation initiale, voir page 5).

2) Procédé par Knock-down

Cette méthode commence par magnétiser au maximum le domaine proche du bobinage, si possible jusqu'à saturation dans le but d'orienter tous les champs multipolaires dans la même direction. Ensuite, un champ contraire est appliqué pour annuler le champ global une fois ce champ contraire arrêté [9].



Courbe de l'hystérèse

- Explication de H_g , H_u , H_s , B_r à la page 3.
- H_x : champ pour lequel le flux B est complètement annulé.
- Le matériau est magnétisé jusqu'à saturation (B_{sat} , H_{sat}) pour obtenir une magnétisation orientée.
- Champ contraire $H_g = H_u + H_s^* + H_x$.
- Le champ contraire est arrêté lors du soudage.
- Après l'arrêt du champ contraire, le flux global B_{tot} est presque nulle (pendant un certain moment).

* Dans la pratique, le champ H_s produit par le courant de soudage n'est souvent pas pris en compte.

Fente de soudage

- Le champ global à la fente de soudage est composé de la superposition du flux sortant et du champ environnant (pas représenté sur le graphique).

Avantages

- Le champ contraire et la bobine peuvent être enlevés une fois le procédé Knock-down réalisé.
- Les surfaces de soudure peuvent être préparées avant le procédé de soudure (p. ex. par une équipe de démagnétisation).

Inconvénients

- Après un certain temps, la matière présente à nouveau un magnétisme car le procédé par Knock-down n'influence pas l'acier aux alentours de la zone traitée (typiquement après 1-2 heures).
- Avec de forts champs magnétiques extérieurs, le procédé seul ne suffit pas pour annuler le champ global. Dans ce cas, l'utilisation supplémentaire du procédé par champ contraire est nécessaire.
- Le matériau n'est pas démagnétisé (état 3 dans la courbe d'aimantation initiale, voir page 5).

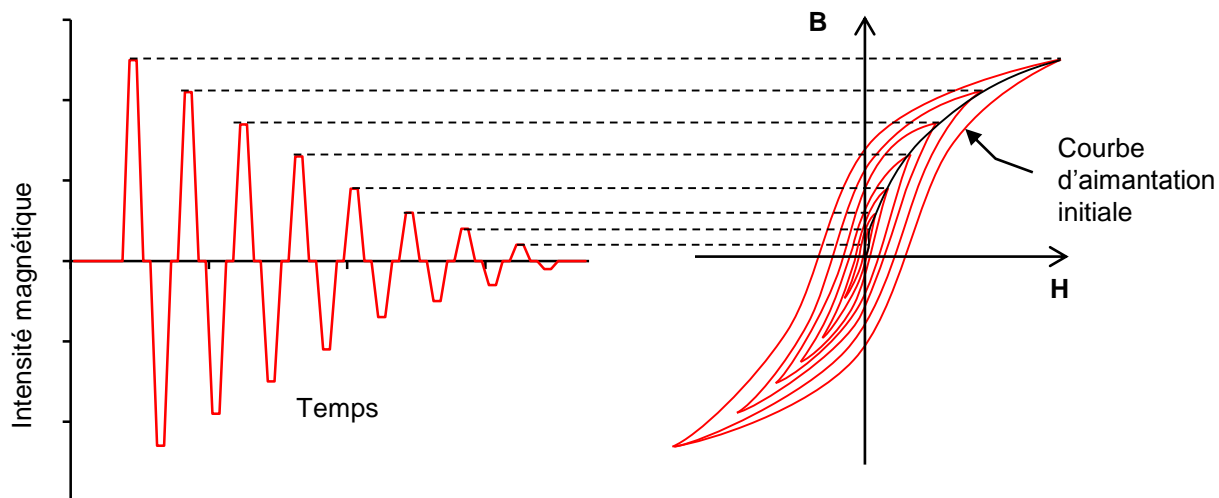
3) Procédé de démagnétisation

Dans cette méthode, un champ magnétique alternatif décroissant est généré dans une bobine. La source de courant produit un courant d'amplitude décroissante. Le procédé opère une démagnétisation du matériau en réduisant successivement la courbe d'hystérèse. L'acier est magnétisé au maximum (orientation unidirectionnelle dans tous les domaines magnétiques). Le changement de polarité continu avec une décroissance de l'amplitude permet de réorganiser l'orientation des domaines magnétiques aléatoirement [10].

La réussite du procédé dépend des paramètres suivants:

- Intensité magnétique maximale (pour magnétiser le matériau jusqu'à saturation).
- Fréquence de démagnétisation (basse fréquence pour une grande profondeur de pénétration).
- Dimension du champ magnétique produit (grand domaine d'utilisation).
- Homogénéité du domaine d'utilisation (constance du champ dans le domaine d'utilisation).
- Précision de la décroissance (décrément de l'amplitude [10] et précision de la symétrie du champ).

3.1) Démagnétisation avec un changement de polarité en courant continu



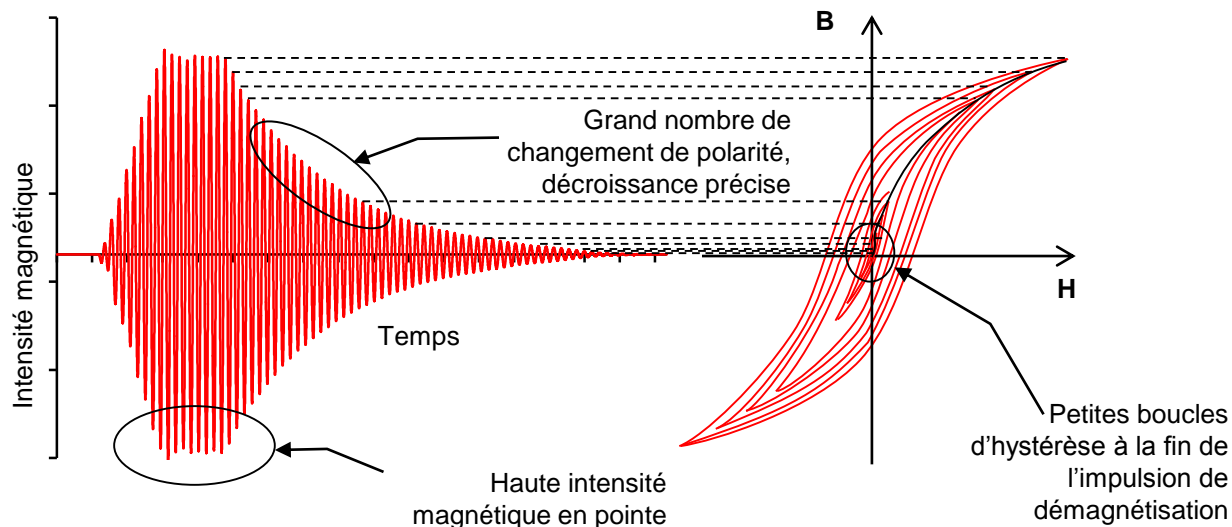
Avantages

- Le matériau est démagnétisé (état 1 à 3 sur la courbe d'aimantation initiale).
- Ne demande aucun réglage ou ajustement sur le générateur de courant: démarrage de l'impulsion par interrupteur.

Inconvénients

- Temps de cycle de démagnétisation relativement long (env. 30s à 3min selon la source de courant).
- Dans la pratique, un long temps de cycle engendre un facteur de marche relativement élevé, ce qui crée un échauffement des conducteurs et empêche la production d'une haute intensité magnétique sans mesure de refroidissement.
- La démagnétisation complète d'objets de grande dimension demande beaucoup de temps.
- Le magnétisme ne peut pas être enlevé ou réduite suffisamment dans tous les cas. Dans ce cas, les causes sont soit une action de démagnétisation trop faible ou un champ induit après démagnétisation encore trop important.

3.2) Démagnétisation avec une impulsion sinusoïdale et une haute intensité de champ



Les paramètres du procédé suivant ont été confirmés lors d'essais pratiques et sont particulièrement adaptés pour démagnétiser des objets de grande surface (jusqu'à une épaisseur d'env. 60mm):

- Haute intensité magnétique (env. 50...100kA/m) pour inverser la polarité des zones fortement magnétiques et augmenter la profondeur de pénétration.
- Fréquence de démagnétisation d'env. 5...20Hz.
- Durée d'impulsion d'env. 6...20 sec., liée à la fréquence de démagnétisation.
- Bobine avec volume d'utilisation suffisant (diamètre d'env. 600...1'000mm). Ce volume est nécessaire pour casser la circulation magnétique qui parcourt l'intérieur des pièces ainsi que pour éviter d'uniquement déplacer le magnétisme résiduel.
- Oscillation sinusoïdale décroissante avec une grande précision, permettant de réduire les gros domaines magnétiques aux plus petits domaines possible.

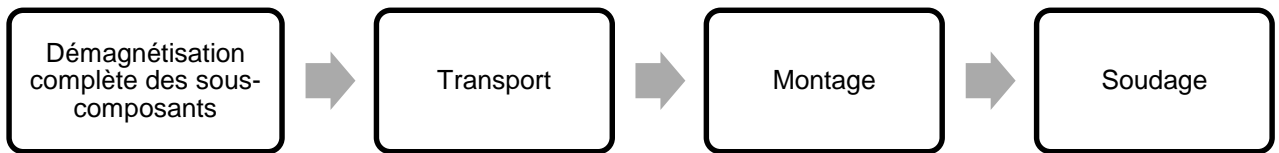
Avantages

- Le procédé est rapide, ce qui le rend particulièrement attractif pour de grandes surfaces.
- Démagnétisation optimale du matériau (état 1 dans la courbe d'aimantation).
- Le procédé ne demande aucun réglage ni ajustement sur la source de courant. L'impulsion est déclenchée par interrupteur, utilisation et maniement particulièrement simple.

Inconvénients

- Le magnétisme ne peut pas être enlevé ou réduit suffisamment dans tous les cas (mêmes raisons que le procédé du point 3.1).
- Le procédé exige une alimentation électrique de plus grande puissance, rendant son utilisation sur le terrain plus délicate.

Démagnétisation de sous-composants de grande surface avant le montage final



Cette méthode a déjà été utilisée dans le passé, souvent avec un succès limité. Les raisons principales sont une action de démagnétisation trop faible ainsi qu'une mise en pratique trop longue et compliquée [1, 5].

Dans de nombreux cas, Maurer Magnetic AG a utilisé avec succès la méthode décrite ci-dessus de démagnétisation de sous-composants à l'aide d'une *démagnétisation par impulsions sinusoïdales à haute intensité magnétique*. Le procédé est breveté plusieurs fois.

Le procédé élimine l'aimantation (magnétisme résiduel) du sous-composant complet.

En revanche, il n'a pas d'influence sur les flux magnétiques induits dans la pièce. Le flux ressortant dépend du matériau, de la géométrie de la pièce et de l'intensité magnétique du champ avoisinant. Dans les cas extrêmes, malgré une démagnétisation complète, le magnétisme induit peut être suffisamment grand pour empêcher le procédé de soudage.

De plus, il est connu que les procédés de soudage CC ou hybride CC/CV ont le potentiel de remagnétiser l'acier [1]. Dans des cas exceptionnels, la démagnétisation complète des pièces avant un procédé de soudage difficile ne suffit plus et doit être complété par un procédé de champ contraire comme décrit dans le point 1).

D'une manière générale, les développements dans le domaine de la technologie de soudage (procédé AC, par. ex. G-FCAW-AC, Tandem-Wire CC/CV) stabilise l'arc et permettent ainsi le soudage avec un fort champ magnétique [2].

Globalement, cette méthode influence positivement les procédés de soudage, les contrôles non-destructifs par champs tournants ou radiographiques et réduit la fragilité par corrosion magnétique [6, 7]. En complément d'un processus de fabrication et montage pas ou faiblement magnétique, ces avantages valent également pour l'ensemble finis.

Module pour la démagnétisation de composants de grande surface

Le démagnétiseur est composé d'un module de puissance de la série MM DM /-P /-PC. La bobine est bobinée avec deux ou trois câbles de démagnétisation, généralement de type K8/10-30 de 30m. chacun. Ces câbles comprennent 8 conducteurs et sont couplables. Avec trois câbles, la longueur totale est de $3 \times 30 \times 8 = 720\text{m}$ qui sont enroulé sur un diamètre d'environ 1m.

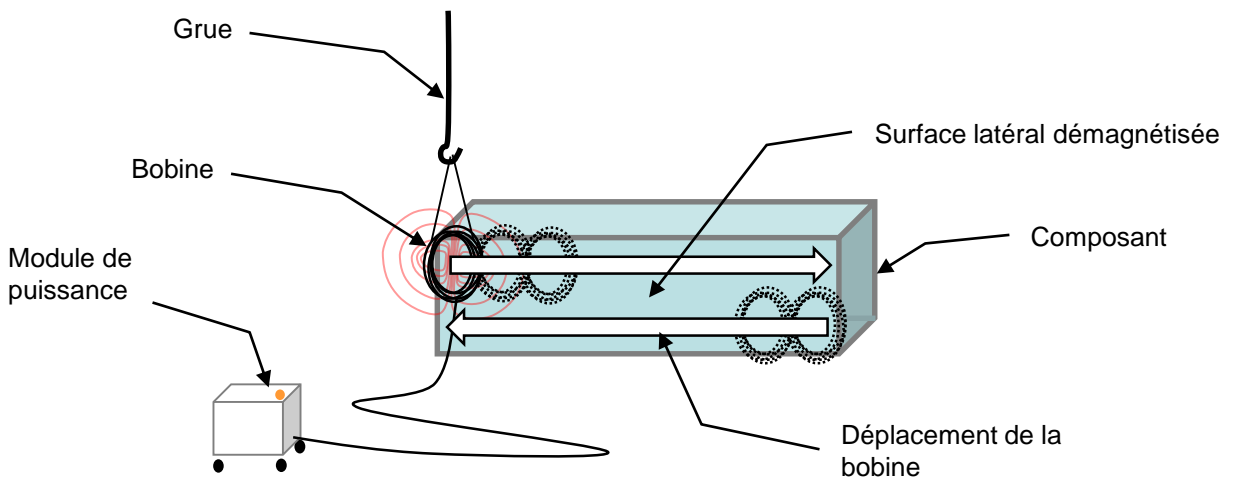
La puissance maximale du module de puissance MM DM200 avec 3 câbles est d'environ 60kW. Cette puissance maximale (env. 30 fois supérieur aux procédés 1), 2) et 3.1)) est consommé uniquement pendant un très court laps de temps de quelques centaines de millisecondes. Avec une cadence d'une à deux impulsions par minute, la puissance moyenne est d'environ 3 à 6% de la puissance maximale, ce qui permet de réduire la charge thermique et la génération de chaleur. Il faut veiller à avoir un réseau électrique ou un générateur de courant permettant de livrer suffisamment de puissance à court terme. Sur le réseau électrique, une connexion triphasée 3x380..480VAC 50/60Hz de 63A est suffisante (les brefs pics de courant allant jusqu'à 200A sont supportés par la courbe caractéristique des fusibles).

La haute intensité magnétique de démagnétisation pour une fréquence relativement haute (5..20Hz) est suffisante pour garantir une pénétration du champ en profondeur. La haute fréquence permet elle un temps d'impulsion court avec un grand nombre d'oscillations.

Démagnétisation d'objets de grand surface

Déroulement de la démagnétisation:

La démagnétisation des composants se fait par plusieurs impulsions successives sur la surface de la pièce. La surface recouverte par la bobine est démagnétisée par une impulsion (durée ~6..20s) puis la bobine peut être déplacée avant la prochaine impulsion. Pendant l'impulsion, la bobine ne bouge pas.



Bobine:
3x câbles flexibles de démagnétisation
K8/10-30

structure portante d'une longueur de 15m.



Tube de construction

Unité de rotation de tubes

Source de courant:
Module de puissance
DM200-PC

Temps nécessaire du procédé

La productivité du procédé a été mainte fois confirmée par de nombreux services. La manutention et le déplacement de la bobine sont les éléments cruciaux pour une démagnétisation rapide. L'utilisation d'une grue pour la manutention à fait ses preuves alors que la démagnétisation de tubes est avantagée avec une unité de rotation. La manutention optimale est définie selon les composants présents:

Démagnétisation de 20 tubes de construction D x L 2'500 x 7'000 mm, épaisseur de 20 et 40 mm, acier X52, surface de démagnétisation de la bobine ~1m². Nombre d'impulsions / tube: 7 x 7 = 49 impulsions de 10 sec. L'unité de rotation des tubes demande en moyenne 30 sec. de manutention entre chaque impulsion. Temps de démagnétisation total $t_E = 49 \times 10s + 49 \times 30s = 1'960s = 32,66min$.

Les 20 tubes peuvent être démagnétisés sur le chantier en $20 \times 32,66min = 653,2min$, soit environ 11h (chargement et déchargement non inclus).

Dans cet exemple, le délai entre la démagnétisation, le transport et le soudage final des tubes est de plusieurs jours.

Démagnétisation de deux structures portantes L x H x P 15'000 x 2'300 x 1'000 mm, épaisseur de 20 mm, acier S355M: surface de démagnétisation de la bobine ~1m². Nombre d'impulsions / structure: 2 x 2 x 15 impulsions = 60 impulsions. Le temps d'une impulsion est de 10 sec, soit un temps total de 60 x 10s = 600s. Le temps de positionnement de la bobine demande en moyenne 40 sec., 60 x 40s = 2'400s. Temps total de démagnétisation $t_E = 600s + 2'400s = 3'000s = 50min$.

Dans cet exemple, le délai entre la démagnétisation et le soudage final des tubes est de plusieurs semaines.

Dans ces deux cas, aucune remagnétisation entre la démagnétisation et le montage final sur place n'a pu être observée.

Avantages d'une démagnétisation de composants séparés

- Le procédé entraîne une forte réduction ou élimination du magnétisme résiduel dans toute la structure ferromagnétique.
- La démagnétisation complète de la structure ferromagnétique agit avantageusement sur les phénomènes de corrosion magnétique de fragilisation par hydrogène.
- Sans l'influence d'un fort champ magnétique, d'une forte déformation ou d'une mauvaise manipulation, une remagnétisation n'est pas possible.
- Des essais ont montré qu'après une démagnétisation complète, le magnétisme résiduel a même tendance à diminuer (particulièrement après le transport ou de faibles vibrations).
- La démagnétisation augmente la productivité et la qualité de procédés comme le revêtement, le soudage et le contrôle non destructif de fissures.
- Le procédé est simple d'utilisation et ne demande aucune connaissance particulière.
- La démagnétisation peut être implémentée dans les usines des fournisseurs de composants, garantissant une qualité constante des composants bruts.
- Le procédé peut être automatisé et selon la mise en œuvre être utilisé en continu par passage.

Inconvénients

- Un champ magnétique dans la pièce est induit par les champs magnétiques extérieurs. Après la démagnétisation, les points avec le magnétisme induit le plus haut, entre 2...10 Gauss, se trouvent généralement aux arêtes et aux extrémités de la pièce. Ces champs induits peuvent uniquement être éliminés par les méthodes décrites dans les points 1) et 2).

Résumé

L'accumulation des problèmes liés au magnétisme résiduel vient de l'utilisation d'aciers hautement liés à grains fin, de chaînes d'approvisionnement globalisées avec différents niveaux de qualité et de longs transports avec de nombreux transbordements. Le développement des procédés de soudage augmente la résistance aux perturbations magnétiques. Mais l'influence des champs magnétique ne peut être négligée lors de hautes exigences de qualité et de procédés de soudage sensibles. Ils retardent la production, génère des frais induits et diminue la qualité et la durée de vie du produits finis.

La démagnétisation complète de composants avant le montage final garanti une qualité du matériau constante et minimise les perturbations de procédés lors de la construction.

La méthode présentée dans cet article permet de démagnétiser automatiquement ou manuellement des pièces de grande surface, autant en amont, chez le fournisseur que sur le chantier de construction.

La démagnétisation sinusoïdale avec une puissance largement supérieure se différencie clairement des procédés utilisés jusqu'à maintenant et se caractérise par une grande simplicité, une haute productivité et une grande fiabilité du processus.

Une fois la construction terminée, l'ensemble peut au besoin à nouveau être démagnétisé avec la même méthode. Le magnétisme résiduel dans le matériaux est ainsi complètement enlevé alors que le magnétisme ressortant de la construction (signature magnétique permanente) est largement diminué.

Littérature complémentaire

- [1] József Takács; Magnetism – A blow to welding; Welding & Metal Fabrication; 05.1999.
- [2] P. van Erk, D. Fleming; Combat old foes with new technology in LNG tank construction; The Lincoln Electric Company; 17.03.2012.
- [3] Svetsaren; Welding and Cutting Journal; Vol. 57 No. 2; ESAB; 2002.
- [4] R. J. Perry, Z. Paley; Effects associated with arc blow; Welding Journal; 09.1970.
- [5] K. R Suresh, P. Senthilmurugan; Demagnetization of residual magnetism in plates of odd shapes; Indian society for non-destructive testing; 12.2006.
- [6] Dr. D. Olson; Measurement of the effect of magnetism on hydrogen cracking susceptibility of pipeline steels; Colorado School of Mines; 03.2011.
- [7] Dr. D. Olson; An assessment of magnetization effects on hydrogen cracking for thick walled pipelines; Colorado School of Mines; 02.2006.
- [8] Dr. Otto Stemme; Magnetismus; Maxon Academy; 2004, page 87.
- [9] John Anderson; Around the pipe in 80 seconds; Engineerlive; Diverse-Technologies; 02.2013
- [10] Sôshin Chikazumi; Physics of Ferromagnetism; Oxford University Press; 1997, page 479.

Maurer Magnetic AG, votre spécialiste pour:

- des équipements industriels de démagnétisation
- la technique de mesure du magnétisme
- la démagnétisation en service
- la gestion de problèmes de magnétisme
- aimants et systèmes magnétiques

