

Défauts possibles lors d'un durcissement par trempe après chauffage par induction (2/2)

Les principaux défauts et anomalies connus lors d'un durcissement par trempe après chauffage par induction des aciers et des fontes ont été décrits dans le cadre du dossier consacré à l'induction du dernier numéro. Reste à présenter les facteurs d'influence possibles sur l'apparition de ces défauts.

Claude Leroux
Ingénieur conseil

Alexandre Fleurentin
Conseil et aide au choix matériaux et traitements, Pôle d'activités Matériaux Métalliques et Surfaces du Cetim

Les facteurs d'influence possibles sur l'apparition de défauts lors d'un durcissement par trempe après chauffage par induction des aciers et des fontes sont multiples. Ils seront abordés ici en suivant deux axes de réflexion : l'approche produit (matière, forme, exigences de traitement...), l'approche procédé (conditions de chauffe et de refroidissement, conception de l'inducteur...).

APPROCHE PRODUIT
Le matériau traité
Le matériau intervient dans l'apparition éventuelle de défauts par ses propriétés métallurgiques :

- D'élaboration : résistance au grossissement du grain par le calmage, propreté inclusionnaire, graphitisation des fontes, maîtrise des additions (cas du bore de trempabilité).
- De structure initiale : homogénéité, ségrégations, structure en bande, constituants globulisés difficile à solubiliser.
- Son état de contraintes résiduelles.
- Ses défauts de surface : décarburation, replis.
- Ses défauts internes : alignement d'inclusions, porosités des produits moulés.
- Sa composition chimique en éléments d'alliage et en éléments résiduels. L'excès de trempabilité est aussi préjudiciable qu'un défaut de trempabilité.

Tableau 1 : Type de défauts pouvant être imputés à la qualité du matériau		
Qualités du produit		
Facteur	Défaut possible	Surveillance, spécifications, corrections
Composition chimique non conforme au-dessus des tolérances maxi	Tapure	• Limiter la teneur en impuretés (soufre et phosphore). Dans les fontes, risque lié à l'eutectique phosphoreux. Cas des fontes lamellaires P%=0,12 max, Cas des fontes GS P%=0,04 max
	Tapure	• Vérifier que la teneur en carbone et en éléments d'alliages s'inscrivent bien dans la fourchette demandée • Privilégier les nuances à trempabilité réduite type HL ou HH de la norme EN 10 083.
	Tapure	• Contrôler la valeur de Ms, son abaissement en fonction des teneurs en carbone et éléments d'addition à un effet défavorable.
Composition chimique non conforme en dessous des tolérances mini	Dureté Profondeur	• Vérifier teneur en carbone et éléments d'alliage • Vérifier la trempabilité dans le cas des aciers au bore (vérification du bore actif)
Propreté inclusionnaire et taux de soufre et phosphore trop élevés	Tapure	• Fixer les teneurs en inclusion et répartition, exclure les alignements
Microstructure initiale non conforme : ségrégations, structures en bandes, concentrations de carbure	Tapure Dureté	• Préciser les exigences, faire réaliser les recuits nécessaires, taux de corroyage imposé • Éviter les traitements sur brut de laminage

Tableau 1 : Type de défauts pouvant être imputés à la qualité du matériau (suite)

Qualités du produit		
Facteur	Défaut possible	Surveillance, spécifications, corrections
Microstructure initiale non conforme : cémentite globulisée.	Dureté Profondeur	<ul style="list-style-type: none"> · Ajuster les temps de chauffe et la température à la structure · Effectuer des recuits de normalisation préalables.
Microstructure initiale non conforme : taux de carbone combiné insuffisant dans les fontes.	Dureté	<ul style="list-style-type: none"> · Spécifier les taux de perlite dans la matrice des fontes grises (surtout sphéroïdales type FGS 500-7) · Effectuer une passe de préchauffe tenant lieu de traitement de perlitisation (efficacité à vérifier)
Mauvaises conditions de forgeage ou laminage initial : présence de replis de forge ou de laminage, de concentrations d'inclusions et/ou de calamine, grains grossiers	Tapure Brûlure	<ul style="list-style-type: none"> · Fixer les exigences · Contrôler les produits
Défauts de fonderie : micro-retassures, concentration d'eutectique, forme du graphite, amas de graphite (lamellaire ou nodulaire dégénéré).	Tapure Brûlure	<ul style="list-style-type: none"> · Fixer les exigences et effectuer les contrôles
Décarburation ⁽¹⁾ liée au process en amont	Tapure Dureté	<ul style="list-style-type: none"> · Exclure toute décarburation
Contraintes résiduelles, état de contrainte initial : cas du vieillissement des fontes grises ⁽²⁾ .	Déformation Tapure	<ul style="list-style-type: none"> · Imposer les gammes d'élaboration et recuits, stabiliser si nécessaire. · Privilégier les trempes sur pièces non vieilles.
Structure du graphite dans le cas des fontes grise	Tapure Crique de chauffage	<ul style="list-style-type: none"> · Préciser la répartition du graphite (exclure par exemple le type D)
Dureté initiale élevée (cas des fontes, cas des aciers trempés revenus)	Crique de chauffage	<ul style="list-style-type: none"> · Limiter la dureté HB. Cas des fontes GS HB maxi 280
Présence de concentration d'éléments fusibles (eutectiques)	Crique de chauffage Brûlure	<ul style="list-style-type: none"> · Fixer les tolérances de quantité d'eutectique phosphoreux
Acier peu ou mal calmé (à grain contrôlé)	Surchauffe	<ul style="list-style-type: none"> · Spécifier la qualité d'élaboration, doser les éléments résiduels de calage (Al et Si)
Élaboration de l'acier, cas des aciers au bore	Dureté Profondeur- Surchauffe	<ul style="list-style-type: none"> · Le bore précipité sous la forme de carbures ou de nitrures n'a pas d'effet sur la trempabilité · Vérifier que le bore est en solution solide avec le fer
Recarburation	Dureté-Tapure	<ul style="list-style-type: none"> · Contrôler le produit avant traitement
Contraintes résiduelles	Déformation	<ul style="list-style-type: none"> · Stabiliser avant trempe

⁽¹⁾ L'effet d'une décarburation sur la formation des tapures s'explique par la mise en extension de la zone décarburee par la sous-couche durcie qui elle se trouve en compression. ⁽²⁾ Des observations (étude USA) ont montré que des pièces en fonte grise laissées 60 jours à la température ambiante voient leur résistance à la traction augmenter de 12 % (sans effet sur la dureté) laissant craindre des écarts de comportement lors de leur durcissement par trempe.

Tableau 2 : Défauts produit rencontrés avec les fontes

Qualités du produit traité (spécificité aux fontes grises lamellaires ou GS)		
Type de défaut avant trempe	Type de défaut résultant après trempe	Actions possibles sur les réglages
Taux de perlite insuffisant	Microstructure non conforme Points doux Dureté	<ul style="list-style-type: none"> · Ajuster la température et les temps de chauffage (puissance et vitesse de défilement) · Effectuer une passe de recuit de perlitisation (préchauffe)
Modèle et répartition du graphite (amas, graphite dégénéré, type D...)	Tapure	Aucune
Forte ségrégation d'eutectique phosphoreux	Tapure - Brûlure	Aucune
Équivalent carbone trop élevé	Tapure	Aucune
Décarburation	Tapure - Point doux - Dureté faible	Aucune
Microretassures	Tapure - Brûlure - Fusion locale	Aucune

La géométrie du produit traité

Cf. Tableau 3.

Tableau 3 : Type de défauts pouvant être imputés à la qualité géométrique du produit traité

Facteurs géométrie du produit traité		
Facteur	Défaut possible	Surveillance, spécifications, corrections
État de surface : rugosité d'usinage, états de surface des parties brutes des pièces forgées et produits laminés, porosités des pièces de fonderie	Tapure	<ul style="list-style-type: none"> · Imposer la rugosité, exclure les défauts
Rayons et chanfreins insuffisants	Tapure - Brûlure	<ul style="list-style-type: none"> · Imposer au plan les valeurs raisonnées (figure 1)
Accidents géométriques débouchant : trous, rainures de clavette, gorges	Tapure - Brûlure	<ul style="list-style-type: none"> · Atténuer les angles de débouchage · Compenser les variations de forme par obturation avec un matériau non magnétique · Limiter les zones de sortie de profil près des extrémités et variations de section à forte concentration de contraintes
Qualité des centres de rotation pour les présentations entre pointes	Déformation	<ul style="list-style-type: none"> · Vérifier les alignements et le dimensionnement des trous de centre dans le cas des traitements entre pointes
Rectitude et stabilité du produit traité (cas des défilés horizontaux ou verticaux)	Déformation Traitement hétérogène	<ul style="list-style-type: none"> · Cas des pièces longues : imposer et vérifier les déformations préalables · S'assurer que les demi-produits n'ont pas subi de redressages sans détensionnement ultérieur
Épaisseurs des parois faibles et non uniformes	Crique de chauffage Surchauffe - Brûlure	<ul style="list-style-type: none"> · Préchauffer et/ou refroidir les parois opposées au chauffage
Écarts de section	Crique de chauffage Surchauffe Brûlure - Tapure	<ul style="list-style-type: none"> · Compenser les masses, attention aux rebouclages des courants · Remontées de liquide de trempe au niveau de la zone chauffée (principalement en défilé)
Arcs électriques entre pièce et inducteur	Brûlure Surchauffe Tapure	<ul style="list-style-type: none"> · Surveiller le couplage inducteur pièce, réduire la tension sur l'inducteur (réglage du circuit de sortie), isoler les spires de l'inducteur avec un enduit (projection d'alumine, peinture, tissus réfractaires) · Mettre à la masse l'inducteur
Bavures, absence de chanfreins (cas des rainures de clavettes et trous débouchant)	Brûlure	<ul style="list-style-type: none"> · Ébavurer, chanfreiner

Définition du profil de trempe

Cf. Tableau 4.

Tableau 4 : Définition du profil de trempe		
Type de défaut avant trempe	Type de défaut résultant après trempe	Actions possibles
Profil de démarrage ou de fin de trempe trop brutal ⁽¹⁾	Déformation Tapure	· Modifier pour obtenir une pente douce (Figure 2)
Arrêt de trempe dans une zone accidentée (trou, rainure...)	Tapure (figures 4 et 5)	· Modifier le profil
Traitement de parties concaves peut être à l'origine d'un accroissement de la température due à la concentration géométrique des flux thermiques de la zone traitée	Surchauffe - Fusion - Tapure	· Compenser si possible les volumes par des objets en matériau non magnétique · Mettre en place des douches complémentaires
Épaisseur de traitement exigée au plan trop importante par rapport à l'acier utilisé et à la plage de fréquence disponible	Surchauffe - Sous chauffe- Profil Tapures - Déformation	· Employer un inducteur linéaire Compenser les volumes par des objets en matériau non magnétique · Réflexion autour du choix de l'acier à revoir

⁽¹⁾ Ce phénomène est surtout sensible sur les matériaux relativement fragiles (fontes et aciers moulés), on observe des fissures dans la zone non trempée à la limite de celle-ci par suite de sa mise en extension par la fin de trempe fortement comprimées. Il faut alors faire en sorte que la fin de trempe soit la plus progressive possible.

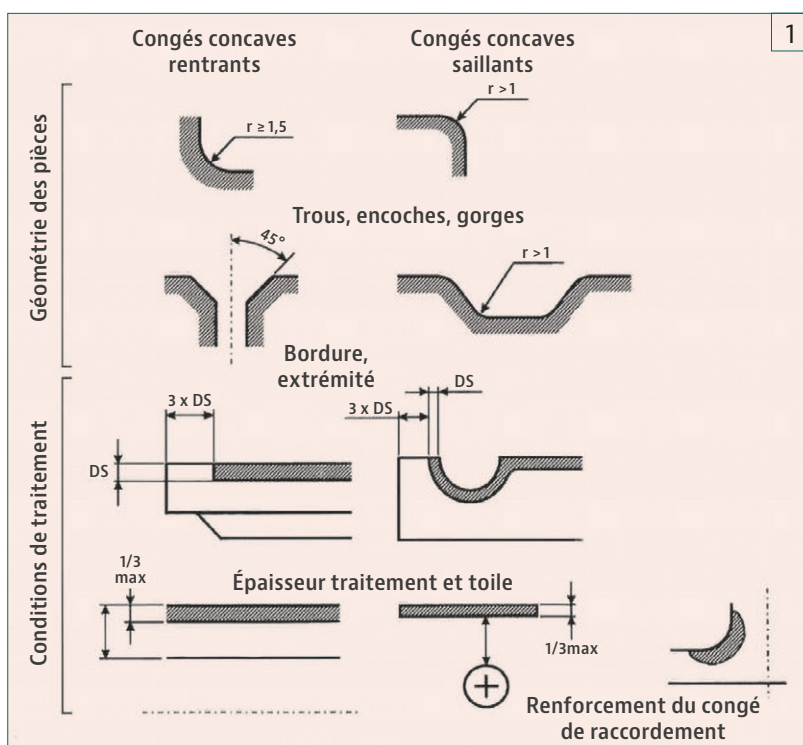


Figure 1 : Préconisations de conditions de traitement en fonction du profil demandé et de la géométrie des pièces.

Figure 2 : Proposition de profils de trempe en vue de limiter les déformations.

Figure 3 : Tapure de trempe au niveau d'une sortie de profil.

Figure 4 : Tapure de trempe amorcée dans un trou à proximité de la zone trempée mise en extension et se propageant vers la couche durcie. © ECAM

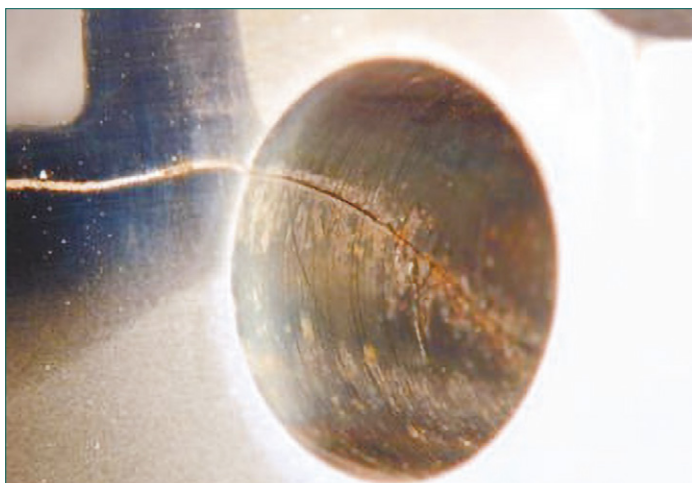


Tableau 5 : Type de défauts pouvant être imputés à la géométrie du couple produit traité et ensemble inducteur – douche.

Facteurs géométrie du couple produit traité et inducteur / douche		
Facteur	Défaut possible	Surveillance, spécifications, corrections
Manque de rigidité du positionnement de la pièce ou du support d'inducteur : risque de déplacement par attraction électromagnétique (forces de Lorentz)	Déformation Hétérogénéité de chauffage Brûlure par amorçages électriques	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité différente selon la fréquence employée et la puissance • Conception des montages : prise de pièce, rigidifier l'inducteur
Non respect du couplage pièce-inducteur	Tapure Profil - Surchauffe - Dureté	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôler les couplages lors des réglages et assurer la rigidité des montages
Repérage des points de départ chauffe	Profil - dureté	<ul style="list-style-type: none"> • Prendre des références fiables
Déformation de l'inducteur	Surchauffe Profil	<ul style="list-style-type: none"> • Construction rigide de l'inducteur. • Mettre en place des procédures de contrôle de l'inducteur : gabarits de contrôle, maintenance préventive

APPROCHE PROCÉDÉ**Géométrie et positionnement du couple produit traité et ensemble inducteur–douche**

Le couplage inducteur pièce (entrefer ou espace) entre la surface de la pièce et la surface de l'inducteur en regard est un facteur très important de constance des résultats. Il détermine le rendement de chauffage et a ainsi une influence directe sur l'épaisseur chauffée.

La douche doit aussi avoir une position fixe par rapport à la pièce et l'inducteur. Par conséquent, tout facteur ayant pour effet de faire varier le couplage pièce inducteur et position de la douche devra être surveillés. Il faut faire en sorte que la pièce soit toujours placée de

la même manière sans possibilité de modifier sa position au cours du cycle de traitement, que les dispositifs de positionnement de l'inducteur et de la douche soit également fiables et que toute déformation de cet ensemble ne soit pas possible. Les déformations sont aussi en relation avec la qualité mécanique du dispositif de maintien de la pièce durant l'opération de trempe. Les centrages ne doivent pas exercer d'effort important, ils doivent assurer une rotation parfaite. Les pièces longues seront éventuellement maintenues par des lunettes à suivre. Il faut également tenir compte des dilatations thermiques durant le chauffage pour que la pièce ne soit jamais mise en compression-flambage (Cf. **Tableau 5**).

Tableau 6 : Type de défauts pouvant être imputés aux conditions de chauffage.

Facteurs conditions de chauffage		
Facteur	Défaut possible	Surveillance, spécifications, corrections
Température de fin de chauffage trop élevée	Tapure - Surchauffe Profil Structure	<ul style="list-style-type: none"> • Choisir une valeur de puissance spécifique convenable • Respecter la puissance et le temps (vitesse de défilement si trempe au défilé). Privilégier le temps sur la puissance
Écart de couplage (distance inducteur-pièce)	Profil - Dureté Surchauffe - Tapure	<ul style="list-style-type: none"> • Réglage et contrôles
Choix de la fréquence.	Surchauffe - Tapure Déformation	<ul style="list-style-type: none"> • La fréquence doit être adaptée aux profondeurs demandées
Défaillance des concentrateurs de champ (destruction thermique) ou mauvais choix des épaisseurs des tôles des concentrateurs à tôles magnétiques	Profil - Dureté	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité de la fixation des concentrateurs. • Procédure de contrôle périodique des inducteurs à l'aide de gabarits de contrôle • Optimiser le refroidissement des concentrateurs.
Écarts de rendement.	Profil - Dureté	<ul style="list-style-type: none"> • Vérifier les paramètres du circuit d'alimentation de l'inducteur
Fuites de champs par la géométrie de la pièce	Profil dureté Surchauffe	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuster le positionnement des concentrateurs s'il y a lieu • Maintenance
Conditions d'austénitisation insuffisantes	Dureté Structure	<ul style="list-style-type: none"> • Régler la puissance • Régler la vitesse de défilement ou le temps de chauffage (mettre alarme)
Spectre de chauffage non homogène (cas d'un défilé).	Dureté - Profil	<ul style="list-style-type: none"> • Régler le pas des spires, intervenir sur le nombre de spires, compenser les entrefers aux arrivées de courant (par croisement des arrivées de courant ou par isolation de l'entrefer) régler la vitesse de rotation. • Choisir un inducteur linéaire si les variations de section sont trop fortes.
Décarburation par surchauffe en milieu oxydant.	Tapure	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuster les conditions, envoyer un courant de gaz neutre (azote) sur la pièce.

Les conditions de chauffage

Elles sont déterminantes sur les résultats comme dans tout traitement thermique. Différentes circonstances sont possibles :

- Insuffisance d'austénitisation, la transformation martensitique sera incomplète et la dureté insuffisante.
- Austénitisation hétérogène, le niveau de dureté finale sera hétérogène.
- Excès de température : il y aura grossissement du grain, surchauffe, brûlure, fusion selon le niveau de température atteint, le facteur temps intervient dans une moindre mesure. Toutefois pour les périodes de chauffage statique, au démarrage d'un défilé par exemple il peut y avoir facilement un effet de surchauffe et de profondeur avec risques de tapure dans la zone chauffée mais également dans la zone voisine non chauffée mais mise en extension par la zone trempée. Les matériaux peu ductiles comme les

fontes grises ou les aciers moulés sont particulièrement sensibles à ce phénomène.

La conception de l'inducteur et les puissances appliquées sont des facteurs primordiaux. (Cf. **Tableau 6**)

Les conditions de refroidissement

Le refroidissement suivant le chauffage doit naturellement faire l'objet d'attentions importantes d'autant plus que les aciers employés sont généralement des nuances non ou peu alliés. Il faut tout d'abord bien dimensionner le circuit de refroidissement qui doit être capable d'évacuer les calories produites.

Le choix des paramètres débit et pression à l'arrosage sont essentiels. La qualité du fluide doit également faire l'objet d'un suivi constant : concentration de l'additif, température, propreté ou pollution, vieillissement (développement bactérien par manque d'aération). (Cf. **Tableau 7**)

Tableau 7 : Type de défauts pouvant être imputés aux conditions de refroidissement.

Facteurs conditions de refroidissement		
Facteur	Défaut possible	Surveillance, spécifications, corrections
Paramètres de douchage : pression-débit	Tapure - Surchauffe Profil- Structure	• Contrôler et mettre des alarmes
Concentration du fluide de trempe trop faible	Profil Dureté - Surchauffe - Tapure	• Contrôler les concentrations au réfractomètre pré-étalonné • Vérifier la propreté du fluide qui peut influencer la lecture
Température du fluide de trempe trop basse	Tapure - Profil - Dureté	• Thermostater le stockage du fluide
Retards douche non respectés	Profil - Dureté	• Respect des retards douche
Altération du fluide	Profil - Dureté - Surchauffe - Tapure Point doux	• Filtrer et vérifier le vieillissement du fluide
Conception de la douche	Dureté - Structure	• Dimensions, débits, type, nombre, incidence répartition des jets, dimension des orifices d'arrivée du fluide
Maintenance de la douche	Dureté - Profil	• Maintenance préventive : nettoyer, déboucher les orifices, surveiller l'entartrage et la propreté du fluide de trempe
Concentration du fluide de trempe trop forte	Dureté - Profondeur	• Contrôler les concentrations au réfractomètre pré-étalonné.
Température du fluide de trempe trop élevée	Dureté - Profondeur	• Contrôler la régulation de température du bain et mettre l'alarme • Maintenance des échangeurs. Dimensionner l'échangeur à la puissance dissipée. Attention au dimensionnement du bac de recyclage par rapport au débit massique nécessaire pour refroidir les pièces chauffées en prenant en compte la cadence de production désirée
Remontées d'eau vers l'inducteur durant la chauffe	Dureté	• Ajuster les débits, l'incidence des jets, l'écart entre douche et inducteur, vitesse de rotation de la pièce
Vieillissement du fluide de trempe	Dureté - Oxydation	• Maintenir : aération, ajout de bactéricides et fongicides • Mise en place d'une machine à laver en amont
Effet de revenu : autorevenu par le cœur dans le cas de trempe profonde ou par le réchauffage en trempe de proche en proche (défilé).	Dureté	• Allonger le temps de refroidissement • Modifier les réglages inducteurs douche (écartement), vitesse de rotation, pas des spires. • Mise en place d'une douche secondaire

Tableau 8 : Type de défauts pouvant être imputés à la conception de l'inducteur.

Facteurs conception de l'inducteur		
Facteur	Défaut possible	Surveillance, spécifications, corrections
Conception des concentrateurs et de leur positionnement	Dureté Profil	<ul style="list-style-type: none"> • Cas des concentrateurs en tôles : choisir les épaisseurs en fonction de la fréquence (problème de transparence à l'induction) • Mode de fixation sur les spires • Conditions de refroidissement et pollution. Maintenance
Impédance de l'inducteur	Profil	<ul style="list-style-type: none"> • En relation avec la tension et l'intensité sur l'inducteur
État des raccords du circuit de puissance	Profil	<ul style="list-style-type: none"> • Jouer sur le rendement et la tenue des composants du circuit oscillant
Dessin de l'inducteur : profil des spires, nombre de spires et écartement	Dureté Profil - Surchauffe	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuster par l'expérience et/ou la modélisation
Rendement de l'inducteur	Dureté Profil	<ul style="list-style-type: none"> • Choix de la qualité du cuivre, de l'épaisseur des parois du tube, du mode d'assemblage (privilégier la soudure TIG au brasage)
Fuites de champs par la géométrie de la pièce	Profil Dureté	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuster le positionnement des concentrateurs s'il y a lieu
Manque de rigidité de l'inducteur	Profil Arc (flash) Déformation	<ul style="list-style-type: none"> • Renforcement ou consolidation de l'inducteur
Rebouclage des courants au niveau de l'entrée et de la sortie de l'inducteur (figure 5)	Profil Dureté	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place d'artifice pour forcer les courants induits à circuler dans l'ensemble de la pièce

Figure 5.
Mise en évidence
d'un chauffage
hétérogène lié
à la conception
d'un inducteur.



Conception de l'inducteur

La conception de l'inducteur est sans doute le point le plus délicat, avec la conception des systèmes de refroidissement. Les moyens de modélisation disponibles permettent de mieux appréhender cette conception. Une fois cette conception optimisée les risques se situent en terme d'usure due à l'encrassement interne (tartre, circuit d'eau pollué) et externe notamment au niveau des éventuels concentrateurs de champ par les projections de liquide de refroidissement et des graisses présentes sur les pièces dans le cas où les pièces traitées ne sont pas lavées avant le chauffage par induction. Les sollicitations thermomécaniques conduiront dans le temps à des déformations qu'il faudra identifier à l'aide de mesures métrologiques et utilisation de gabarits de contrôle. Le remplacement d'un inducteur doit garantir les mêmes rendements, ou faire l'objet d'une vérification des résultats et ajustement éventuel des réglages. ■

BIBLIOGRAPHIE

- Chauffage superficiel par induction : *définitions pratiques des conditions d'austénitisation*, Guy Murry, Traitement Thermique, n° 343, Nov./Déc. 2002.
- *Fiches techniques défauts et anomalies*, Traitement Thermique.
- *Trempe superficielle par induction : quelques exemples d'anomalies*, Traitement Thermique, n° 343, Nov./Déc. 2002.

- *Troubleshooting cracking in induction hardening*, Valery I. Rudnev, Heat treating, august 2003.
- *Traitement de durcissement par trempe après chauffage superficiel par induction de pièces mécaniques*, Spécification TS1/Cetim, juin 1998.