

# APPLICATIONS DU SHOT PEENING

HUITIEME EDITION



**METAL IMPROVEMENT COMPANY, INC.**

Filiale de Curtiss-Wright Corporation

# S O M M A I R E

Tables de conversion .....	2-3
Introduction .....	5

## CHAPITRE 1: THÉORIE

Le procédé de shot peening .....	6
Les contraintes résiduelles de shot peening .....	7
Superposition des contraintes de service et résiduelles .....	8
Étude de cas : <i>Propagation de Fissure, NASA Langley</i> .....	8
Profondeur des contraintes résiduelles .....	9
Types de billes .....	9
Effet de la dureté des billes .....	9

## CHAPITRE 2: COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX

Aciers à hautes caractéristiques .....	10
Aciers cimentés .....	11
Étude de cas : <i>Vilebrequins de Hautes Performances</i> .....	11
Décarburation .....	11
Études de cas : <i>Réduction du Taux d'Austénite</i> .....	12
Fontes ADI .....	12
Les Fontes .....	12
Alliages d'aluminium .....	13
Étude de cas : <i>Aluminium 7075-T7651 à Haute Résistance</i> .....	13
Titane .....	14
Magnésium .....	14
Métallurgie des poudres .....	15
Étude de cas : <i>Engrenages Frittés à Haute Densité</i> .....	15

## CHAPITRE 3: PROCÉDÉS D'USINAGE

Effet sur la durée de vie .....	16
Soudage .....	16
Étude de cas : <i>Fatigue de Structures Offshore Soudées</i> .....	17
Étude de cas : <i>Rotors de Turbine de Compresseur HP</i> .....	17
Rectification .....	18
Dépôts métalliques .....	18
Anodisation .....	19
Étude de cas : <i>Couronne en Aluminium Anodisé</i> .....	19
Projection plasma .....	19
Électroérosion (EDM) .....	19
Usinage électrochimique (ECM) .....	20
Étude de cas : <i>Membranes d'Accouplements</i> .....	20

## CHAPITRE 4: FATIGUE DE FLEXION

Fatigue de flexion .....	21
Engrenages .....	21
Bielles .....	22
Vilebrequins .....	23
Étude de cas : <i>Vilebrequins de Moteurs Diesel</i> .....	23
Étude de cas : <i>Disques de Soufflante de Moteurs d'Avion</i> .....	23

## CHAPITRE 5: FATIGUE DE TORSION

Fatigue de torsion .....	24
Ressorts de compression .....	24
Arbres de sortie de puissance .....	25
Barres de torsion .....	25
Étude de cas : <i>Barres de Torsion Automobile</i> .....	25

## CHAPITRE 6: FATIGUE AXIALE

Fatigue axiale .....	26
Étude de cas : <i>Broches de Frein d'Urgence de Train</i> .....	26
Étude de cas : <i>Conduits d'Échappement d'APU</i> .....	26

## CHAPITRE 7: FATIGUE DE CONTACT

Rupture de Fretting .....	27
Étude de cas : <i>Ailettes et Aubes de Turbines</i> .....	27
Pitting .....	27
Grippage .....	28

## CHAPITRE 8: RUPTURE EN CORROSION

Rupture en corrosion .....	29
Corrosion sous tension (SCC) .....	29
Étude de cas : <i>Installations de Production Chimique</i> .....	30
Fatigue corrosion .....	30
Étude de cas : <i>Fragilisation sous Hydrogène</i> .....	30
Étude de cas : <i>Implants Médicaux</i> .....	31
Corrosion intergranulaire .....	31

## CHAPITRE 9: FATIGUE THERMIQUE & EFFETS DE LA TEMPÉRATURE

Effets de la température .....	32
Fatigue thermique .....	33
Étude de cas : <i>Nourrices de Centrales Thermiques</i> .....	33

## CHAPITRE 10: AUTRES APPLICATIONS

Formage par grenailage .....	34
Correction de forme .....	35
Écrouissage .....	35
Texturation de surface Peentex <sup>sm</sup> .....	36
Optimisation de l'état de surface .....	36
Étude de cas : <i> Tubes de Convoyage Pneumatique</i> .....	37
Étude de cas : <i>Industrie Alimentaire</i> .....	37
Corrosion exfoliante .....	38
Compactage des porosités .....	38

## CHAPITRE 11: PROCÉDÉS & SERVICES COMPLÉMENTAIRES

Alésages et surfaces internes .....	39
Double grenailage .....	39
Le procédé C.A.S.E. <sup>sm</sup> .....	40
Shot peening sur site .....	41
Grenailage sous contrainte .....	41
Modélisation des contraintes résiduelles PeenStress <sup>sm</sup> .....	42
Choc laser Lasershot <sup>sm</sup> .....	43
Clapets élastiques - Production .....	43
Publications techniques et hors séries .....	44
Traitement thermique .....	44

## CHAPITRE 12: CONTRÔLE DU PROCÉDÉ

Contrôle du procédé .....	45
Contrôle des billes .....	45
Contrôle de l'intensité .....	46
Contrôle du recouvrement .....	47
Machines automatiques de shot peening .....	48
Étude de cas : <i>Le SPCO pour Augmenter la Durée de Vie des Réacteurs</i> .....	49
Spécifier le shot peening .....	50

Publications techniques MIC .....	51-55
Liste des usines MIC .....	dos de couverture

CONVERSIONS APPROXIMATIVES DES DURETÉS EN RÉSISTANCE DES ACIERS

<i>Dureté Rockwell HRC</i>	<i>Dureté Brinell BHN</i>	<i>Dureté Vickers HV</i>	<i>Limite Élastique ksi</i>	<i>Limite Élastique MPa</i>
62	688	746	361	2489
61	668	720	349	2406
60	649	697	337	2324
59	631	674	326	2248
58	613	653	315	2172
57	595	633	305	2103
56	577	613	295	2034
55	559	595	286	1972
54	542	577	277	1910
53	525	560	269	1855
52	509	544	261	1800
51	494	528	253	1744
50	480	513	245	1689
49	467	498	238	1641
48	455	484	231	1593
47	444	471	224	1544
46	433	458	217	1496
45	422	446	211	1455
44	411	434	206	1420
43	401	423	201	1386
42	391	412	196	1351
41	381	402	191	1317
40	371	392	186	1282
39	361	382	181	1248
38	352	372	176	1214
37	343	363	171	1179
36	334	354	166	1145
35	325	345	162	1117
34	317	336	158	1089
33	309	327	154	1062
32	301	318	150	1034
31	293	310	146	1007
30	286	302	142	979
29	279	294	138	952
28	272	286	134	924
27	265	279	130	896
26	259	272	127	876
25	253	266	124	855
24	247	260	121	834
23	241	254	118	814
22	235	248	116	800
21	229	243	113	779
20	223	238	111	765



### CONVERSIONS USUELLES ASSOCIÉES AU SHOT PEENING

	<i>Du Système Métrique au Système Anglo-Saxon</i>	<i>Du Système Anglo-Saxon au Système Métrique</i>
<b>Longueur</b>	1 mm = 0,0394 in 1 m = 3,281 ft = 39,37 in	1 in = 25,4 mm 1 ft = 0,3048 m = 304,8 mm
<b>Surface</b>	1 mm <sup>2</sup> = 1,550 x 10 <sup>-3</sup> in <sup>2</sup> 1 m <sup>2</sup> = 10,76 ft <sup>2</sup>	1 in <sup>2</sup> = 645,2 mm <sup>2</sup> 1 ft <sup>2</sup> = 92,90 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup>
<b>Masse</b>	1 kg = 2,205 lbm	1 lbm = 0,454 kg
<b>Force</b>	1 kN = 224,8 lbf	1 lbf = 4,448 N
<b>Contrainte</b>	1 MPa = 0,145 ksi = 145 lbf/in <sup>2</sup>	1 ksi = 6,895 MPa

### ABRÉVIATIONS DIVERSES & CORRESPONDANCES

lbm = lb (mass)	lbf = lb (force)
k = kilo = 10 <sup>3</sup>	M = mega = 10 <sup>6</sup>
G = giga = 10 <sup>9</sup>	μ = micro = 10 <sup>-6</sup>
1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup> = psi
ksi = 1000 psi	μm = micron = 1/1000 mm

Module d'Young pour l'Acier (E) = 29 x 10<sup>6</sup> lbf/in<sup>2</sup> = 200 GPa

Accélération de la Gravité = 32,17 ft/s<sup>2</sup> = 9,81 m/s<sup>2</sup>

Masse Volumique de l'Acier = 0,283 lbm/in<sup>3</sup> = 7,832 kg/dm<sup>3</sup>





Metal Improvement Company, Inc. (MIC) est une filiale à 100 % de Curtiss-Wright Corporation. Fondée en 1946, MIC s'est spécialisée dans la sous-traitance du shot peening (grenaillage de précontrainte) dans de nombreuses industries comme un moyen de prévention des ruptures des matériaux métalliques. MIC dispose de sites de production en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest et des licences de procédés à travers le monde. De plus, MIC gère un réseau d'ateliers de traitements thermiques et produit des clapets élastiques. Une liste complète des unités MIC est imprimée au dos de la couverture de cette brochure.

Chaque unité MIC est capable de traiter des pièces de diverses formes, tailles et matériaux avec des contrôles opératoires très stricts. MIC ne cesse de développer de nouveaux équipements de grenaillage au summum de l'art, grâce à son expérience unique, construite sur plus de 50 ans dans ce domaine.

Metal Improvement Company, Inc. est le leader mondialement reconnu en développement d'applications et de contrôles utilisés pour le shot peening. Cette brochure « Applications du Shot Peening », huitième édition, remplace la septième édition comme étant le plus pertinent manuel d'ingénieur sur le procédé de shot peening contrôlé.

La traduction française littérale de shot peening est « grenaillage de précontrainte » mais son usage est peu pratique car elle entraîne un risque de confusion avec le « grenaillage » traditionnel (grit blasting). Le grenaillage, est une technique simple de préparation des surfaces par projection non contrôlée d'abrasifs métalliques. Le sablage (sand blasting) utilise des abrasifs non métalliques.

Chaque fois que l'expression « pièce grenillée » sera utilisée dans cette brochure, il faudra comprendre que cette pièce a été traitée par shot peening, ou si l'on préfère par grenaillage de précontrainte.

MIC dispose d'un média « Shot Peening Applications - The Video ». C'est un outil idéal pour les groupes de travail et réunions techniques, et plus particulièrement lorsqu'il est diffusé pendant une présentation par l'un de nos responsable des Services Techniques. Pour plus d'informations, vous êtes invités à contacter l'unité MIC la plus proche (voir au dos de la couverture), notre Siège International ou visiter notre nouveau site à l'adresse [www.metalimprovement.com](http://www.metalimprovement.com). La huitième édition est également disponible en anglais, allemand, espagnol et italien.

MIC est ravie de partager son expérience et son savoir-faire dans le domaine du shot peening, afin que les ingénieurs et les métallurgistes puissent être informés des avantages de ce traitement mécanique de surface. Nos responsables des Services Techniques sont disponibles pour vous assister dans la recherche de solutions des nombreux problèmes d'ingénierie qui peuvent être résolus par le shot peening.

Copyright © 2001  
par  
Metal Improvement Company, Inc.



## LE PROCÉDÉ DE SHOT PEENING

Le shot peening est un procédé d'érouissage à froid qui consiste à marteler la surface de la pièce avec de petites billes sphériques. Chaque bille frappant la surface agit comme la panne d'un minuscule marteau créant une petite dépression de forme arrondie en surface. Pour que cette empreinte soit créée, il est nécessaire que la couche en surface soit déformée plastiquement en tension (FIGURE 1-1). Sous la surface, le matériau comprimé tente de reprendre son volume initial, créant de ce fait des contraintes de compression de très fortes amplitudes (FIGURE 1-2). Le recouvrement des empreintes permet d'obtenir une contrainte résiduelle de compression uniforme.

Il est reconnu que les fissures ne vont pas s'initier ni se propager dans un volume en compression. Puisque la plupart des ruptures en fatigue et en corrosion sous tension ont la surface ou le voisinage de la surface pour origine, les contraintes résiduelles de compression introduites par le shot peening vont augmenter sensiblement la durée de vie des pièces métalliques. L'amplitude des contraintes résiduelles produites par le shot peening est sensiblement supérieure à la moitié de la limite élastique du matériau grenailé.

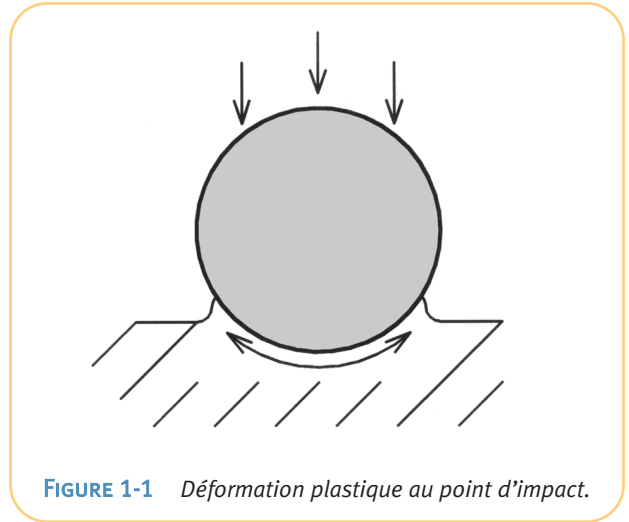


FIGURE 1-1 Déformation plastique au point d'impact.

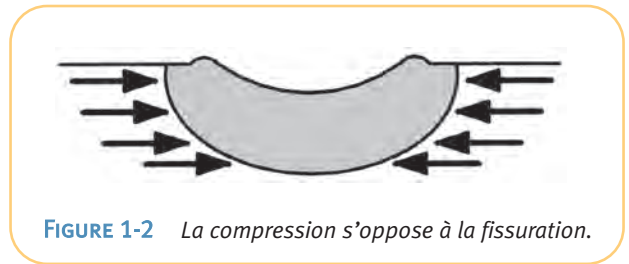


FIGURE 1-2 La compression s'oppose à la fissuration.

Le dénominateur commun de la plupart des modes de rupture à long terme est la contrainte de traction. Ces contraintes peuvent résulter de l'effet de sollicitations extérieures ou être résiduelles, c'est-à-dire permanentes, créées par des procédés de fabrication tels que le soudage, la rectification et l'usinage. Les contraintes de traction tendent à étirer la surface et peuvent entraîner des initiations de fissures (FIGURE 1-3). Les contraintes résiduelles de compression resserrent les joints de grains et retardent ou bloquent l'initiation de la fissuration. Puisque la propagation des fissures est freinée par la couche en compression, en augmentant la profondeur de la compression on augmente la résistance à la fissuration. Le shot peening est la méthode la plus économique et la plus pratique d'introduction de contraintes résiduelles de compression.

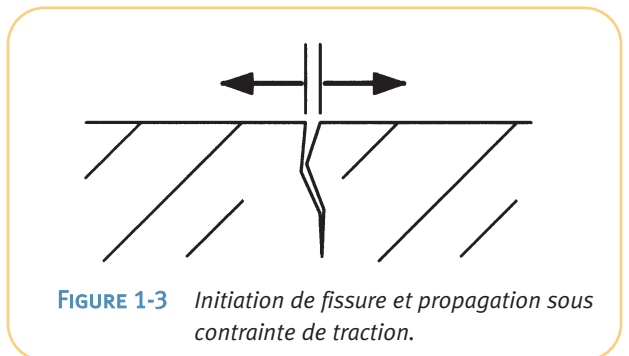
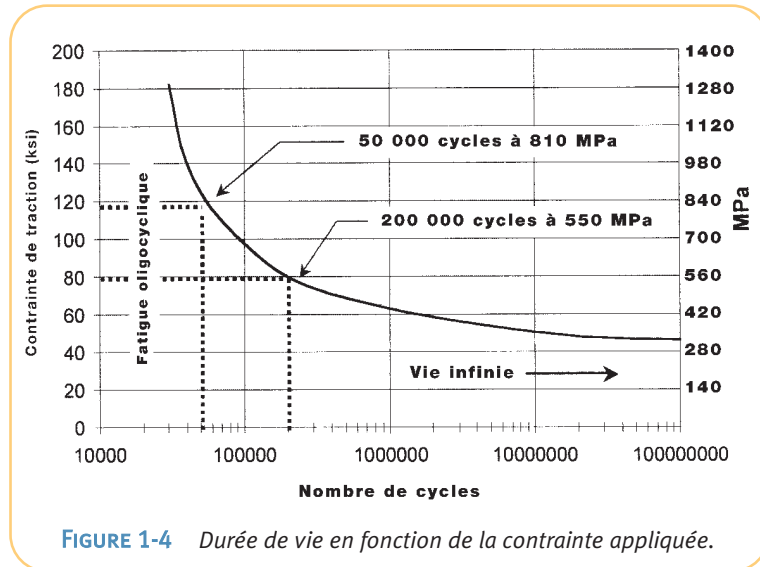


FIGURE 1-3 Initiation de fissure et propagation sous contrainte de traction.



Le shot peening est principalement utilisé pour combattre la fatigue des matériaux métalliques. Les indications suivantes se rapportent à la fatigue des métaux et à sa représentation typique sous forme de courbe de Durée de Vie en fonction de la Contrainte Appliquée telle que montrée en **FIGURE 1-4**.

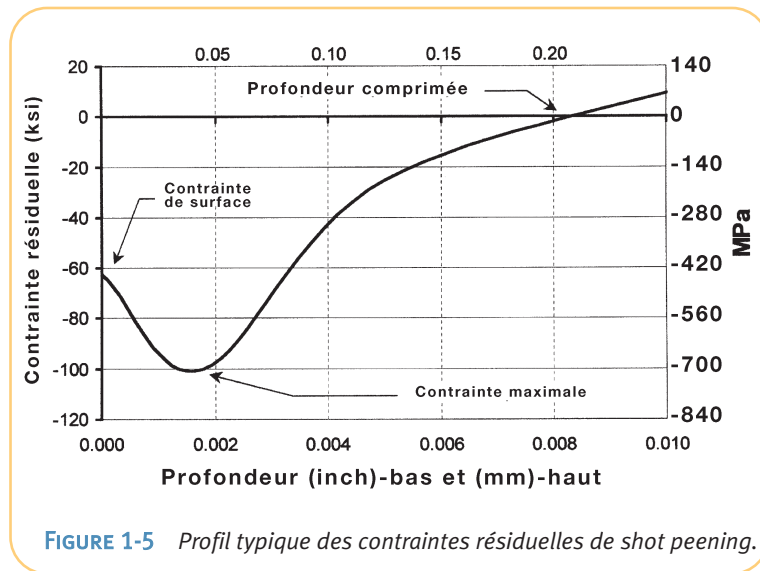
- Le chargement en fatigue est constitué de dizaines de milliers à quelques millions de cycles de sollicitations répétitives. Les sollicitations créent des contraintes de traction appliquées qui étirent la surface et tendent à la déchirer.
- Une réduction linéaire de la contrainte de traction appliquée induit une augmentation exponentielle de la durée de vie et du nombre de cycles en fatigue. Le graphique (**FIGURE 1-4**) montre qu'à 810 MPa la réduction du chargement de 32 % entraîne une augmentation de la durée de vie de 300 % (150 000 cycles).



**FIGURE 1-4** Durée de vie en fonction de la contrainte appliquée.

## LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DE SHOT PEENING

Les contraintes résiduelles introduites par le shot peening sont des contraintes de compression. Ces contraintes résiduelles de compression se retranchent des tensions appliquées et peuvent aller jusqu'à les annuler. De manière simple, moins il y a de tension, plus la durée de vie est élevée. Un profil typique des contraintes résiduelles de shot peening est montré en **FIGURE 1-5**.



**FIGURE 1-5** Profil typique des contraintes résiduelles de shot peening.

**Contrainte Maximale** - C'est la valeur de l'amplitude de la contrainte résiduelle de compression maximum. Elle se trouve habituellement en sous-couche, au voisinage de la surface. Plus l'amplitude de la contrainte maximale augmente, plus le matériau est résistant à la fissuration en fatigue.

**Profondeur Comprimée** - C'est la profondeur de la couche en compression résistant à la propagation de fissure. La profondeur de la couche peut être augmentée en augmentant l'énergie de l'impact de grenailage. Une couche plus profonde est généralement recherchée pour une meilleure résistance à la propagation.

**Contrainte de Surface** - Son amplitude est généralement plus faible que la Contrainte Maximale.





## SUPERPOSITION DES CONTRAINTES DE SERVICE ET RÉSIDUELLES

Lorsqu'un shot peening est réalisé sur une pièce et que celle-ci est soumise à des sollicitations extérieures, la surface de cette pièce ne subit que l'effet de la contrainte résultante entre les contraintes appliquées et les contraintes résiduelles. La **FIGURE 1-6** décrit un barreau sous flexion trois points qui crée un moment de flexion dont le maximum est en surface.

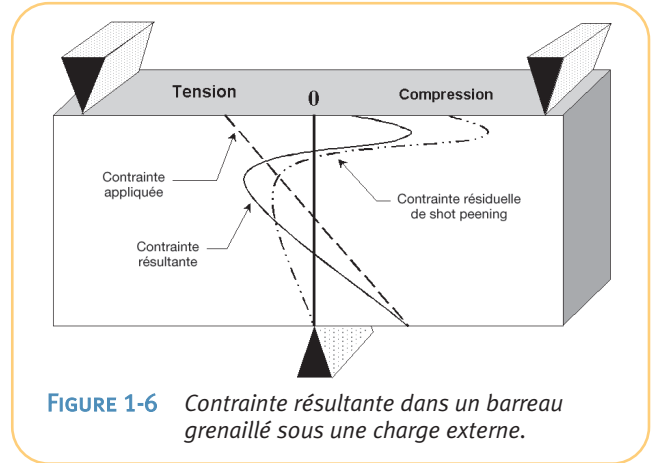
La diagonale en pointillés représente la contrainte de traction engendrée par le chargement extérieur. La courbe en tirets mixtes représente la contrainte résiduelle de compression du shot peening. La courbe continue qui est la courbe résultante des deux précédentes, montre une diminution sensible de la contrainte de traction en surface.

Le shot peening est très avantageux dans les deux cas suivants:

- concentrations de contraintes;
- matériaux à hautes caractéristiques.

Les concentrations de contraintes sont des rayons, entailles, trous, intersections de trous, cannelures, rainures de clavette, etc. Le shot peening introduit une contrainte locale de compression de forte amplitude pour contrecarrer le facteur de concentration de contrainte résultant de ces accidents géométriques.

Le shot peening est idéal pour les matériaux à hautes caractéristiques. La contrainte de compression est corrélative avec la résistance mécanique du matériau. Plus la limite élastique est élevée, plus l'amplitude de la contrainte résiduelle est forte. Les matériaux à hautes caractéristiques ont des structures cristallines plus rigides. Ces structures cristallines peuvent résister à des degrés de contrainte plus élevés et en conséquence conserver plus de contrainte résiduelle.



**FIGURE 1-6** Contrainte résultante dans un barreau grenailé sous une charge externe.

## ÉTUDE DE CAS

### PROPAGATION DE FISSURES, NASA LANGLEY

Les ingénieurs de la NASA ont étudié la propagation de fissure dans un alliage d'aluminium 2024-T3 avec et sans shot peening. Les éprouvettes étaient testées avec une fissure initiale de 1,3 mm et ensuite cyclées en fatigue jusqu'à rupture. Il est intéressant de noter que l'armée de l'air américaine tolère un endommagement maximum de 1,3 mm.

Il a été démontré que la propagation de fissure a été sensiblement retardée pour les éprouvettes grenillées. Comme le montrent les résultats suivants, sous une contrainte résultante de 104 MPa la durée de vie restante est augmentée de 237 %. A 138 MPa, la durée de vie restante est augmentée de 81 %.

Ces conditions d'essais sont amplifiées volontairement en comparaison des conditions réelles d'utilisation. Les conditions réelles ne doivent normalement pas présenter de fissures initiales et doivent présenter des augmentations de leur durée de vie encore meilleures.

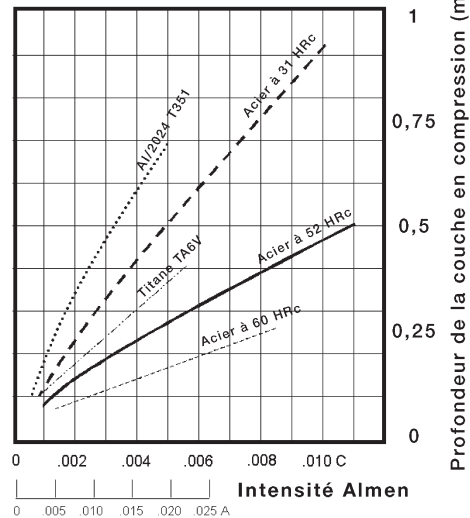
ÉPROUVETTES NON GRENAILLÉES			ÉPROUVETTES GRENAILLÉES			
Contrainte résultante	Nombre d'essais	Nombre de cycles	Contrainte résultante	Nombre d'essais	Nombre de cycles	Pourcentage d'augmentation
104 MPa	2	75 017	104 MPa	2	253 142	237%
138 MPa	3	26 029	138 MPa	3	47 177	81%

*Note sur la préparation des éprouvettes : une pré-entaille a été créée en surface par électroérosion. Les éprouvettes ont ensuite été sollicitées en fatigue jusqu'à ce que la fissure se propage sur une longueur de 1,3 mm. Les éprouvettes ont été grenillées uniquement après que la fissure ait atteint 1,3 mm. C'est le point de départ de cette étude (Ref 1.1)*



## PROFONDEUR DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES

La profondeur des contraintes résiduelles est influencée par la sélection des paramètres de shot peening et par la dureté du matériau (Réf. 1.2). La **FIGURE 1-7** montre la relation entre la profondeur de la couche comprimée et l'intensité de grenailage sur cinq matériaux : aciers de dureté 31 HRC, 52 HRC et 60 HRC, alliage d'aluminium 2024 T351 et alliage de titane TA6V. Les profondeurs obtenues sur des aciers de différentes duretés peuvent être interpolées.



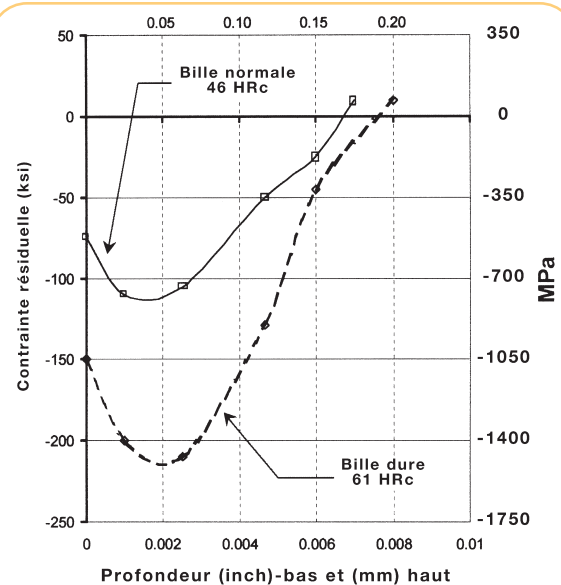
**FIGURE 1-7** Profondeur de la compression, en fonction de l'intensité Almen.

## TYPES DE BILLES

Les billes utilisées pour le shot peening (voir également le chapitre 12) sont de petites sphères d'acier coulé, de fil d'acier coupé rodé (en acier faiblement allié et en acier inoxydable), de céramique ou de verre. Le plus souvent, c'est la bille d'acier coulé ou de fil coupé rodé qui est employée. L'acier inoxydable est utilisé pour les applications où il faut éviter la contamination de la surface.

La bille en fil d'acier, coupé et rodé soigneusement pour obtenir une forme sphérique, est de plus en plus conseillée grâce à l'uniformité de son diamètre, de son état forgé et de sa longévité. Elle est disponible en différentes duretés et suivant une granulométrie encore plus serrée que pour la bille d'acier coulé.

Les billes de verre sont également sélectionnées lorsqu'il y a risque de pollution de la surface. Elles sont généralement plus petites et plus légères que les autres types de billes et peuvent être utilisées pour traiter les petits rayons à fond de filets de filetages ainsi que pour traiter des pièces délicates pour lesquelles de faibles intensités sont préconisées.



**FIGURE 1-8** Shot peening d'un acier 1045 (50 HRC et +), équivalent au XC 48 trempé revenu.

## EFFET DE LA DURETÉ DES BILLES

Il est largement reconnu que la dureté de la bille influe sur l'amplitude de la contrainte résiduelle (**FIGURE 1-8**). La dureté de la bille doit être au moins aussi dure que les pièces devant être traitées, excepté si le fini de surface est critique. Pour une grande partie des pièces en acier et en métaux non ferreux, ce critère est respecté avec une bille d'acier de dureté normale (45-52 HRC).

L'usage croissant d'aciers de haute résistance et de dureté élevée (50 HRC et au delà) se retrouve dans la sélection des billes dures (55-62 HRC).

### RÉFÉRENCES :

- 1.1 Dubberly, Everett, Matthews, Prabhakaran, Newman; *The Effects of Shot and Laser Peening on Crack Growth and Fatigue Life in 2024 Aluminum Alloy and 4340 Steel*, US Air Force Structural Integrity Conference, 2000
- 1.2 Fuchs; *Shot Peening Stress Profiles*
- 1.3 Lauchner, WESTEC Presentation March 1974, Northrup Corporation; Hawthorne, California

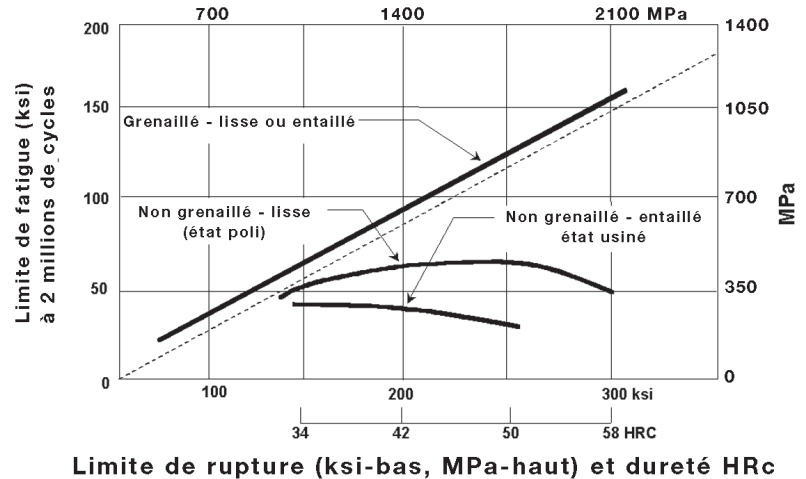


## ACIERS A HAUTES CARACTÉRISTIQUES

L'amplitude de la contrainte résiduelle induite par shot peening est un pourcentage de la limite de rupture et ce pourcentage augmente avec la résistance/dureté du matériau. Les matériaux les plus résistants/durs sont fragiles et sont très sensibles à l'effet d'entaille. Ces défauts peuvent être surmontés par le shot peening en autorisant l'emploi de métaux de très hautes caractéristiques pour des applications en fatigue. Les trains d'atterrissage aéronautiques sont souvent conçus en acier grenailé de 2000 MPa de résistance et plus. La **FIGURE 2-1** établit la relation entre le shot peening et l'emploi d'acier de plus hautes caractéristiques.

Sans le shot peening, la tenue optimale en fatigue des aciers usinés se situe aux alentours de 30 HRC. A des niveaux de résistances plus élevées, les métaux perdent leur tenue en fatigue à cause de leur plus grande sensibilité aux entailles et à leur fragilité. Par addition de contraintes résiduelles de compression, la tenue en fatigue des métaux augmente proportionnellement avec l'augmentation de leur résistance/dureté. A 52 HRC, la limite de fatigue des éprouvettes grenillées monte à 990 MPa, soit le double de celle des éprouvettes lisses/polies non grenillées (Réf. 2.1).

Les applications typiques qui prennent avantage de l'excellente tenue en fatigue des aciers de haute résistance/dureté sont les outillages portatifs électropneumatiques et à percussion. De plus, le comportement en fatigue des pièces grenillées n'est pas affecté par les petites entailles qui ont un effet néfaste sur les aciers de hautes caractéristiques (Réf. 2.2).



**FIGURE 2-1** Limite de fatigue en fonction de la limite de rupture.



## ACIERS CÉMENTÉS

La cémentation et la carbonituration sont des traitements thermiques qui créent des sous-couches très dures au voisinage de la surface. Elles font couramment 55 à 62 HRC. Les avantages du shot peening sur des aciers cémentés sont les suivants :

- des contraintes résiduelles de compression de fortes amplitudes, de l'ordre de -1400 MPa ou plus, assurent d'excellents gains en fatigue;
- l'influence néfaste de défauts de cémentation tels que l'oxydation intergranulaire est réduite.

Une dureté de bille de 55-62 HRC est recommandée pour les aciers cémentés et carbonitrurés pour obtenir des améliorations optimales de tenue en fatigue.

### ÉTUDE DE CAS

#### VILEBREQUINS DE HAUTES PERFORMANCES

Des vilebrequins de moteurs à 4 cylindres de hautes performances avaient des ruptures prématurées après quelques heures de fonctionnement à la puissance maximale du moteur. Des essais ont montré que les meilleurs résultats sont obtenus avec les vilebrequins cémentés et grenillés (FIGURE 2-2).

Les résultats sur des vilebrequins nitrurés et grenillés ont montré également de bonnes performances sans nécessité d'augmenter le diamètre des manetons (Réf. 2.3).

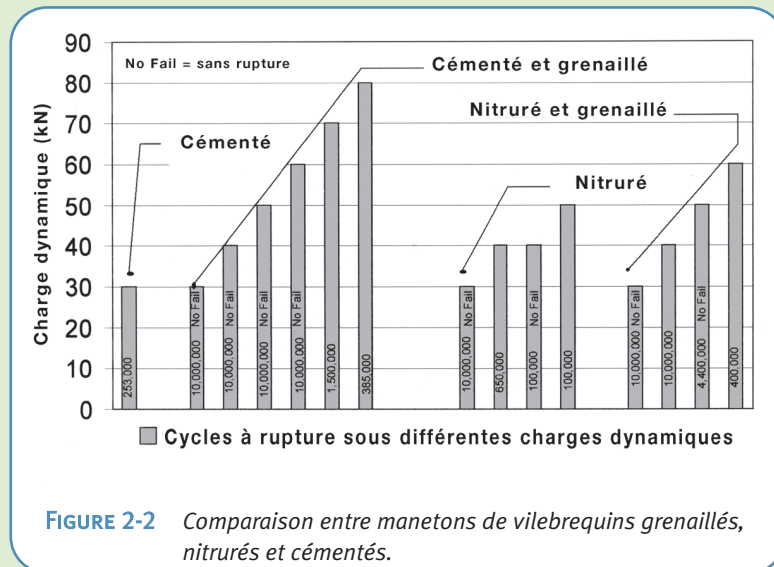


FIGURE 2-2 Comparaison entre manetons de vilebrequins grenillés, nitrurés et cémentés.

## DÉCARBURATION

La décarburation est la réduction du taux de carbone, en surface d'un acier, qui survient pendant le traitement thermique. Il a été montré que la décarburation peut réduire la résistance à la fatigue des aciers à hautes caractéristiques (1650 MPa et au-delà) de 70 % à 80 % et pour les aciers de plus faibles caractéristiques (1000 MPa) de 45 à 55 % (Réfs. 2.4, 2.5 et 2.6).

La décarburation est un phénomène de surface qui n'est pas lié à sa profondeur. Une profondeur décarburrée de 75 microns peut être aussi néfaste pour la tenue en fatigue qu'une profondeur décarburrée de 750 microns (Réfs. 2.4, 2.5 et 2.6).



Le shot peening a démontré son efficacité à restaurer presque intégralement la perte de tenue en fatigue due à la décarburation (Réf. 2.7). Comme la couche décarburée n'est pas aisément détectable, le shot peening peut fiabiliser la tenue des pièces si une décarburation est à craindre. Si un engrenage qui doit avoir une grande dureté en surface (58 HRC et plus) affiche des empreintes de grenailage anormalement profondes, alors la décarburation doit être suspectée.

La décarburation est souvent accompagnée d'un taux d'austénite résiduelle non recherché. Par écrouissage à froid, le shot peening réduit le taux d'austénite résiduelle.

ÉTUDE DE CAS

RÉDUCTION DU TAUX D'AUSTÉNITE RÉSIDUELLE D'UN ACIER 5120 CÉMENTÉ ET GRENAILLÉ AVEC UNE INTENSITÉ 0,04in. A/0,36 mm A

Profondeur (inches)	Profondeur (mm)	Austénite résiduelle (Volume %)	
		non grenailé	grenailé
0.0000	0.00	5	3
0.0004	0.01	7	4
0.0008	0.02	14	5
0.0012	0.03	13	6
0.0016	0.04	14	7
0.0020	0.05	14	7
0.0024	0.06	15	8
0.0028	0.07	15	9
0.0039	0.10	15	10
0.0055	0.14	12	10

(Réf 2.8)

FONTES ADI

Les progrès faits sur la fonte ADI (ductile austempérée) lui ont permis de remplacer des aciers forgés, moulés et soudés pour des applications industrielles. La fonte ADI a un rapport résistance/poids élevé et bénéficie d'une excellente tenue à l'usure. La fonte ADI a également remplacé l'aluminium pour certaines applications spécifiques car sa résistance est trois fois plus élevée en étant seulement 2,5 fois plus dense. Par le biais du shot peening, la limite de fatigue en flexion de la fonte ADI peut être augmentée jusqu'à 70 %. Ceci permet à certains types de fonte ADI d'égaliser les performances d'aciers cémentés pour les applications de type engrenage par exemple (Réf. 2.9).

LES FONTES

Il y a une demande accrue ces dernières années pour des fontes à graphite sphéroïdal qui puissent résister à des chargements en fatigue relativement élevés. Les pièces en fonte sont généralement utilisées sans usinage pour des applications où la surface brute de fonderie est soumise à des contraintes de chargement. La présence d'imperfections en peau de fonderie, sous la forme de petits trous, laitier ou paillettes de graphite, peuvent considérablement réduire la tenue en fatigue des fontes perlitiques à graphite nodulaire brut de fonderie. La limite d'endurance peut être réduite de 40 % en fonction de l'importance des imperfections de la peau de fonderie.



Le shot peening peut améliorer les propriétés du matériau lorsque de petites imperfections sur la peau de fonderie sont présentes, ce qui était le cas de chemises de moteurs diesel. Aux plus fortes intensités de grenailage utilisées lors des essais, la limite de fatigue n'était que de 6 % en dessous de celle des éprouvettes entièrement usinées. Ceci est à rapprocher de la chute de 20 % de la tenue des éprouvettes non grenillées brutes de fonderie. Visuellement, le shot peening donne un effet de polissage superposé à l'état de surface traditionnel de la peau de fonderie (Réf. 2.10).

## ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les alliages traditionnels à hautes caractéristiques (séries 2000 & 7000) sont utilisés depuis des décennies dans l'industrie aéronautique à cause de leur rapport résistance/poids élevé et de leur bonne réactivité au shot peening. De nouveaux alliages d'aluminium, qui réagissent tout aussi bien au shot peening, sont apparus, poussés par l'accroissement de leur utilisation, dans les applications aéronautiques et spatiales :

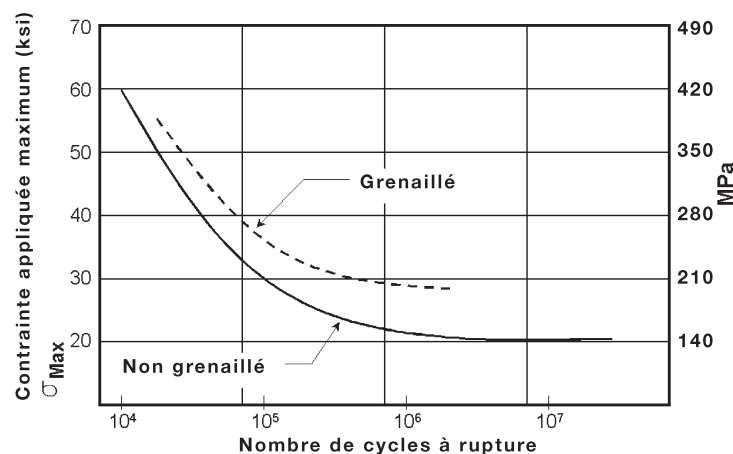
- alliages d'aluminium lithium (Al-Li) ;
- composites à matrice métallique (MMC) ;
- alliages d'aluminium coulé au silicium (Al-Si).

### ÉTUDE DE CAS

#### ALUMINIUM 7050-T7651 À HAUTE RÉSISTANCE

Les éprouvettes de fatigue ont été préparées à partir de barreaux d'alliage 7050-T7651. Les quatre faces de la partie centrale ont été grenillées. Les essais de fatigue ont été réalisés en mode flexion alternée ( $R=-1$ ). La courbe de fatigue des éprouvettes grenillées et non grenillées est illustrée en **FIGURE 2-3**. Le shot peening augmente approximativement d'un tiers la limite d'endurance. Même dans les zones où la

sollicitation se trouve être entre la limite d'endurance et la limite élastique, la tenue en fatigue est accrue par un facteur de 2,5 à presque 4 (Réf. 2.11).



**FIGURE 2-3** Courbes de fatigue de l'aluminium 7050-T7651 grenillé.



## TITANE

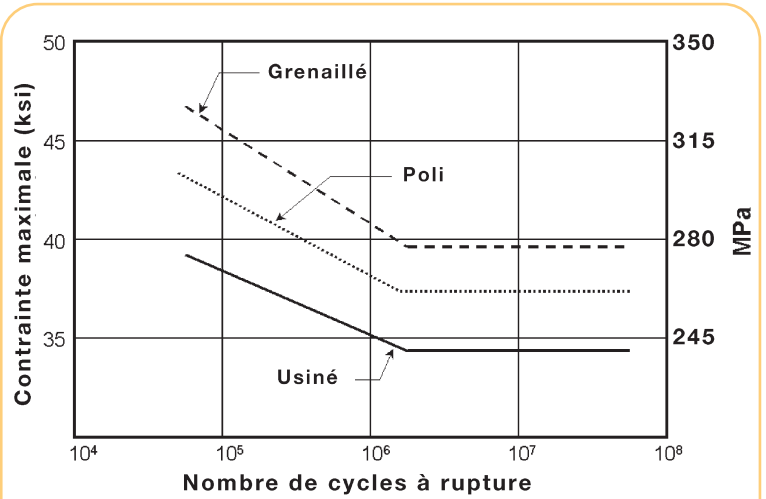
### Fatigue à grand nombre de cycles (HCF)

La HCF du titane, illustrée par la **FIGURE 2-4**, compare les performances de bielles en titane Ti6Al4V pour des moteurs de compétition européens. Les bielles sont usinées suivant différents procédés. Grâce au shot peening, la limite de fatigue est accrue de près de 20 % alors que la masse des bielles est réduite de quelques 40 % en comparaison avec les bielles en acier (Réf. 2.12).

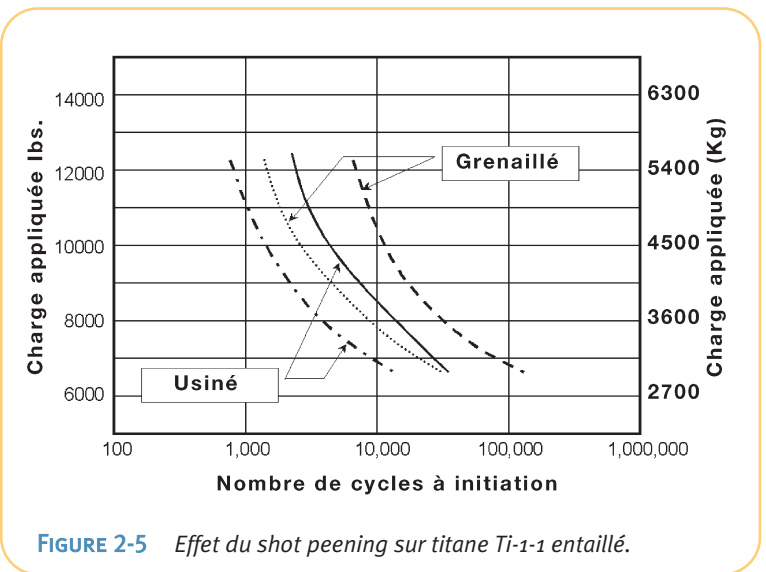
**Fatigue Oligocyclique (LCF)** Comme pour les autres matériaux, l'amélioration de la tenue en fatigue obtenue par shot peening augmente avec le nombre de cycles. La fatigue élastique est associée à des sollicitations faibles alors que la fatigue oligocyclique est associée à des sollicitations élevées. Ceci est clairement montré par les courbes de fatigue des **FIGURES 1-4 et 2-5**.

La **FIGURE 2-5** montre les effets du shot peening dans des alvéoles en queue d'aronde de disques de turbines aéronautiques (Réf. 2.13). Les deux courbes de référence correspondent à des états usinés non grenailés. Lorsque le shot peening est appliqué sur les éprouvettes qui tiennent le plus grand nombre de cycles, l'amélioration est sensiblement la plus forte. Rappelons que l'expression de la tenue en fatigue se fait sur des courbes exponentielles.

L'application la plus courante en fatigue oligocyclique du titane est sur les pièces tournantes de moteurs aéronautiques (disques, tambours et arbres), à l'exception des ailettes. Ces composants sont grenailés pour augmenter leur fiabilité. Chaque décollage et chaque atterrissage sont considérés comme un cycle de chargement.



**FIGURE 2-4** Tenue en fatigue du titane Ti6Al4V à l'état poli et grenailé.



**FIGURE 2-5** Effet du shot peening sur titane Ti-1-1 entaillé.

## MAGNÉSIUM

Les alliages de magnésium ne sont pas couramment utilisés pour les applications en fatigue. Toutefois, lorsqu'ils sont sélectionnés dans le cadre de la réduction de masse, des techniques spécifiques de shot peening peuvent être utilisées pour obtenir des gains de 25 à 35 % en limite d'endurance.



## MÉTALLURGIE DES POUDRES

Des paramètres de grenailage optimisés ont été développés pour augmenter la limite d'endurance des alliages d'aciers frittés de 22 % et la durée de vie par un facteur de 10 (Réf. 2.14). Les applications automobiles telles que les engrenages et les bielles sont de bons candidats pour le shot peening. Le shot peening est encore plus efficace sur les pièces de forte densité comme le sont les pièces frittées et forgées.

La densification de la surface après compactage par shot peening peut augmenter sensiblement la tenue en fatigue, spécialement pour les sollicitations en flexion. Le compactage de la surface permet de refermer les porosités en surface des pièces frittées pour une meilleure étanchéité.

### ÉTUDE DE CAS

#### ENGRENAGES FRITTÉS À HAUTE DENSITÉ

Faisant partie d'un vaste projet sponsorisé par le Ministère allemand de l'Éducation et de la Recherche, des aciers frittés issus de la métallurgie des poudres ont été testés en vue de leur introduction dans l'industrie des engrenages. Un acier fritté MSP4.0Mo-0.1Nb a été testé en comparaison à un acier 20MnCr5 usiné et cémenté. Le chargement en pied de dent a permis d'obtenir les résultats en fatigue à 2 millions de cycles qui suivent. Note : la référence 100 % correspond à l'acier forgé.

- Référence : 20MnCr5 non grenailé forgé : 100 %;
- MSP4.0Mo-0.1Nb non grenailé : 82 %;
- MSP4.0Mo-0.1Nb grenailé : 109 %.

Les essais ont montré que l'acier fritté non grenailé a une limite de fatigue de 18 % inférieure à celle de l'acier forgé cémenté. Le shot peening de l'acier fritté fait passer la limite d'endurance à 9 % au-dessus de celle de l'acier forgé (Réf. 2.15).

La demande des aciers frittés et forgés est en hausse depuis que la métallurgie des poudres a permis d'utiliser ces matériaux pour des applications très sollicitées. L'Ancorsteel 1000B avec 2 % de cuivre et 0,9 % de graphite a une limite d'endurance de 240 MPa à l'état non grenailé. Le shot peening permet d'augmenter sa limite d'endurance de 16 %, soit 280 MPa (Réf. 2.16).

#### RÉFÉRENCES :

- 2.1 Horger; *Mechanical and Metallurgical Advantages of Shot Peening – Iron Age Reprint 1945*
- 2.2 Hatano and Namitki; *Application of Hard Shot Peening to Automotive Transmission Gears, Special Steel Research Laboratory, Daido Steel Company, Ltd., Japan.*
- 2.3 Challenger; *Comparison of Fatigue Performance Between Engine Crank Pins of Different Steel Types and Surface Treatments, Lucas Research Center, Solihull, England, July 1986*
- 2.4 *Properties and Selection, Metals Handbook, Eighth Edition, Vol. 1, pp. 223-224.*
- 2.5 Jackson and Pochapsky; *The Effect of Composition on the Fatigue Strength of Decarburized Steel, Translations of the ASM, Vol. 39, pp. 45-60.*
- 2.6 Bush; *Fatigue Test to Evaluate Effects of Shot Peening on High Heat Treat Steel - Lockheed Report No. 9761.*
- 2.7 Gassner; *Decarburization and Its Evaluation by Chord Method, Metal Progress, March 1978, pp. 59-63.*
- 2.8 *Internal Metal Improvement Co. Memo*
- 2.9 Keough, Brandenburg, Hayrynen; *Austempered Gears and Shafts: Tough Solutions, Gear Technology March/April 2001, pp. 43-44.*
- 2.10 Palmer; *The Effects of Shot Peening on the Fatigue Properties of Unmachined Pearlitic Nodular Graphite Iron Specimens Containing Small Cast Surface Imperfections, BCIRA Report #1658, The Casting Development Centre, Alvechurch, Birmingham, UK.*
- 2.11 Oshida and Daly; *Fatigue Damage Evaluation of Shot Peened High Strength Aluminum Alloy, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University, Syracuse, NY*
- 2.12 *Technical Review, Progress in the Application of Shot-Peening Technology for Automotive Engine Components, Yamaha Motor Co., Ltd., 1998.*
- 2.13 McGann and Smith; *Notch Low Cycle Fatigue Benefits from Shot Peening of Turbine Disk Slots.*
- 2.14 Sonsino, Schlieper, Muppmann; *How to Improve the Fatigue Properties of Sintered Steels by Combined Mechanical and Thermal Surface Treatments, Modern Developments in Powder Metallurgy, Volume 15 - 17, 1985.*
- 2.15 Link, Kotthoff; *Suitability of High Density Powder Metal Gears for Gear Applications; Gear Technology, January/February 2001.*
- 2.16 O'Brian; *Impact and Fatigue Characterization of Selected Ferrous P/M Materials, Annual Powder Metallurgy Conference, Dallas, TX. May 1987.*





## EFFET SUR LA DURÉE DE VIE

Les procédés d'usinage ont un effet sensible sur la tenue en fatigue des pièces métalliques. Leurs effets peuvent être bénéfiques ou néfastes. Les procédés néfastes sont le soudage, la rectification, l'usinage grossier, le formage, etc. Ces procédés mettent la surface en tension. La superposition des contraintes résiduelles de traction et des charges appliquées accélère les ruptures en fatigue comme le montre la **FIGURE 1-6** (page 8).

Les procédés d'usinage bénéfiques incluent les durcissements de surface car ils induisent généralement des contraintes résiduelles de compression en surface. Le tonnelage, le polissage et le galetage sont des procédés qui améliorent la surface en éliminant les défauts et les micro-concentrations de contraintes apparues pendant les opérations d'usinage. Le galetage traditionnel produit des contraintes résiduelles de compression mais son emploi se limite aux géométries cylindriques. Le shot peening n'a pas de limitation d'ordre géométrique et est généralement la solution la plus économique.

L'effet des contraintes résiduelles est démontré dans l'exemple suivant. Un essai sur attache de voilure aéronautique a montré que l'initiation de la fissure survenait à 60 % de la vie estimée de la pièce. Les défauts ont été éliminés et la surface a été grenillée. L'attache a ensuite été testée en fatigue jusqu'à 300 % de son potentiel de vie sans fissuration, malgré une réduction d'épaisseur dans la zone critique (Réf. 3.1).

## SOUDEAGE

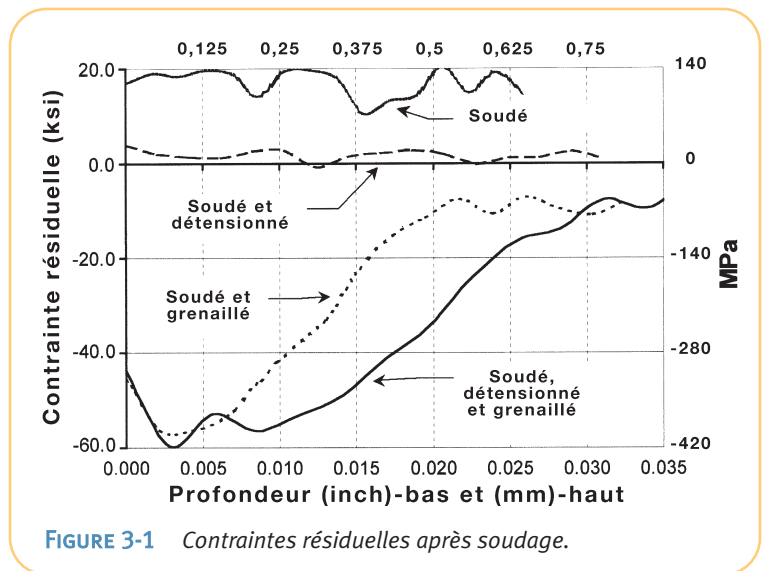
Le soudage crée des contraintes de traction, parce que la soudure est alimentée par un métal d'apport en fusion, c'est-à-dire à l'état le plus chaud et le plus dilaté. Il fusionne ensuite avec le métal de base, qui est sensiblement moins chaud. La soudure refroidit rapidement et tend à se rétracter pendant le refroidissement. Le métal de base, étant moins chaud et donc plus résistant, interdit au métal d'apport de se rétracter. Le résultat est que la soudure refroidie est étirée par le métal de base. La zone affectée thermiquement (ZAT) est généralement le point le plus affecté par les contraintes de traction. Ceci explique pourquoi les ruptures s'y initient le plus souvent. Des hétérogénéités dans le cordon de soudure, dans sa composition chimique et sa géométrie, des porosités, etc. agissent comme des concentrations de contraintes dont les effets s'additionnent aux tensions résiduelles et aux charges appliquées pour initier des fissures de fatigue.

Comme montré en **FIGURE 3-1**, le shot peening est extrêmement efficace pour inverser les contraintes de traction qui induisent des fissures de fatigue en contraintes bénéfiques de compression.

La **FIGURE 3-1** montre également les variations de contraintes résiduelles de soudage, avant et après détensionnement et shot peening (Réf. 3.2). Les

tensions introduites par le soudage s'ajoutent aux sollicitations externes. La combinaison de ces contraintes accélère l'apparition de fissures de fatigue dans les joints soudés.

Lorsque la soudure est détensionnée à 620 °C pendant une heure, les tensions résiduelles se relaxent. Cette diminution des contraintes de traction entraîne une amélioration du comportement en fatigue.



**FIGURE 3-1** Contraintes résiduelles après soudage.



Si la soudure est grenillée au lieu d'être seulement détensionnée, alors il y a redistribution des contraintes de tension en compression. Cela entraîne une résistance bien meilleure à l'amorçage et à la propagation des fissures.

La **FIGURE 3-1** montre que la séquence de production optimale pour le soudage est la relaxation de contrainte suivie d'un shot peening. Le détensionnement des contraintes induit un adoucissement de la soudure tel que des contraintes résiduelles plus profondes peuvent être obtenues après shot peening.

### ÉTUDE DE CAS

#### FATIGUE DE STRUCTURES OFFSHORE SOUDÉES

Un programme de recherche norvégien a conclu que la combinaison du meulage du pied de cordon et du shot peening donne les gains en fatigue les plus importants. Ceci correspond à plus de 100 % d'augmentation de la limite de fatigue de la soudure à 1 million de cycles (Réf. 3.3). D'autres essais montrent que l'amélioration de la limite d'endurance augmente avec la limite élastique du matériau de base.

Conditions	Limite de fatigue 1 million de cycles
Matériau de base	340 MPa
Soudé, meulé et grenillé	300 MPa
Soudé et meulé	180 MPa
Brut de soudage	140 MPa

Le manuel édité par la Société de Soudure Américaine (AWS) met en garde les lecteurs de bien considérer les contraintes résiduelles de traction du soudage dans le cas où la structure soudée est soumise à des sollicitations en fatigue telles que décrites dans ce qui suit : «Des contraintes locales dans une structure peuvent résulter exclusivement de charges externes ou bien elles peuvent être la combinaison de contraintes externes et résiduelles. Les contraintes résiduelles ne sont pas cycliques, mais elles s'additionnent ou se retranchent des contraintes de service suivant leur signe. Pour cette raison, il peut être avantageux d'introduire des contraintes résiduelles de compression dans les assemblages soudés lorsqu'un chargement cyclique externe est supposé».

L'emploi du shot peening pour augmenter la résistance à la fatigue et à la corrosion sous tension des assemblages soudés est reconnu officiellement par des organisations telles que :

- American Society of Mechanical Engineers (Réf. 3.4);
- American Bureau of Shipping (Réf. 3.5);
- American Petroleum Institute (Réf. 3.6);
- National Association of Corrosion Engineers (Réf. 3.7).

### ÉTUDE DE CAS

#### ROTORS DE TURBINE DE COMPRESSEUR HP

Deux sociétés leaders dans la production de moteurs à réaction aéronautiques produisent également des rotors de compresseurs haute pression. Des pièces sont usinées séparément à partir de titane forgé TA6V et ensuite assemblées par soudage. Les essais ont donné les résultats suivants :

Brut de soudage	4 000 cycles*
Soudé et poli	6 000 cycles
Soudé et grenillé	16 000 cycles

\* En terminologie des moteurs aéronautiques, un cycle est égal au chargement correspondant à un décollage de l'avion pour lequel il a été configuré.

Initialement, le shot peening était utilisé comme une assurance additionnelle contre les avaries. Après de nombreuses années de service sans défaillance, et couplé avec des innovations dans les contrôles du procédé, le shot peening a été incorporé en tant qu'outil de conception pour les définitions avancées des réacteurs (Réf. 3.8).

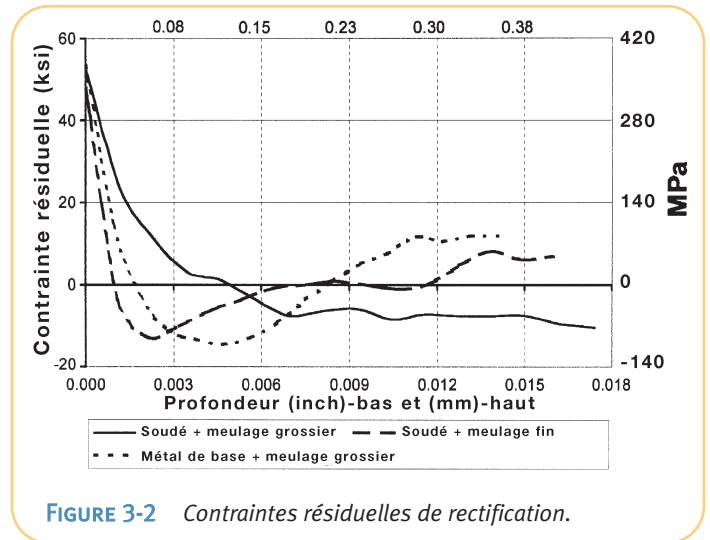


## RECTIFICATION

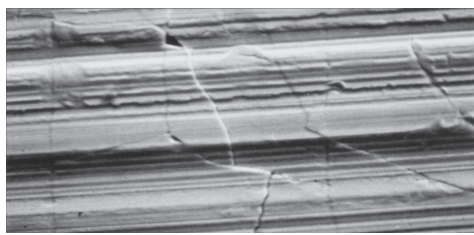
La rectification et le meulage introduisent naturellement des contraintes résiduelles de traction à cause des élévations de température locales générées pendant sa mise en œuvre. Le métal en contact avec les grains abrasifs s'échauffe localement et se dilate. Le métal surchauffé est moins résistant que le métal adjacent et se plastifie en compression. Au refroidissement, le métal se contracte. Cette contraction est partiellement bridée par le métal adjacent et elle génère une tension résiduelle. Quelles que soient leur amplitude, ces tensions vont avoir un effet néfaste sur la tenue en fatigue et en corrosion sous tension.

La **FIGURE 3-2** illustre les contraintes résiduelles de traction générées par différents procédés de rectification (Réf. 3.9). Un acier faiblement allié 1020, équivalent au XC18, traité à 500-600 MPa, avec et sans soudure, a subi deux types de meulage, grossier et fin. La **FIGURE 3-2** montre que les procédés de meulage génèrent des tensions de fortes amplitudes en surface, avec une profondeur plus forte pour le meulage grossier.

Le shot peening, après meulage ou rectification, transformera les tensions résiduelles en compressions, avec le même bénéfice, avec et sans soudure.



**FIGURE 3-2** Contraintes résiduelles de rectification.



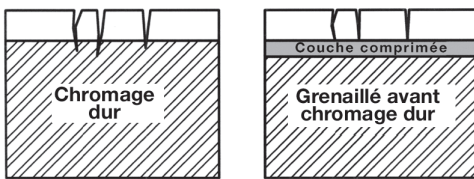
**FIGURE 3-3** Microfissures sur chrome dur.

## DÉPÔTS MÉTALLIQUES

De nombreuses pièces sont grenillées avant chromage et dépôt de nickel pour contrecarrer leur effet néfaste sur la tenue en fatigue. La chute de résistance en fatigue de ces dépôts s'explique par la microfissuration de la couche fragile en surface, par la fragilisation par hydrogène ou par les contraintes de traction résiduelles.

La **FIGURE 3-3** est une micrographie grossissement x1200 montrant un réseau de fines craquelures qui apparaissent typiquement sur un chromage dur (Réf. 3.10). Sous sollicitations en fatigue, ces microfissures peuvent se propager dans le métal de base et conduire à des ruptures en fatigue.

Lorsque le métal est grenillé, le risque de voir ces fissures se propager dans le métal de base est nettement réduit. La **FIGURE 3-4** schématise ce concept sous chargement dynamique externe supposé.



**FIGURE 3-4** La compression bloque la propagation des microfissures.

Le schéma de gauche montre les microfissures se propageant dans le métal de base. Le schéma de droite montre que lorsque la surface est grenillée, les contraintes de compression bloquent la propagation des microfissures.

Le shot peening avant revêtement est recommandé sur les pièces sollicitées dynamiquement en fatigue. Pour les pièces qui nécessitent une durée de vie illimitée sous sollicitations dynamiques, les spécifications fédérales américaines QQ-C-320 et MIL-C-26074 appellent un grenillage de précontrainte avant un dépôt de chrome ou de nickel. D'autres types de revêtements durs tel que le nickel électrolytique peuvent également avoir un effet néfaste sur la limite d'endurance.



## ANODISATION

L'anodisation dure est une autre application pour laquelle le shot peening améliore la résistance à la fatigue. Les bénéfices sont similaires à ceux obtenus pour les dépôts durs dans la mesure où celui-ci est réalisé avant l'anodisation.

### ÉTUDE DE CAS

#### COURONNE EN ALUMINIUM ANODISÉ

Des couronnes en alliage d'aluminium AlZnMgCu 0.5 avec des dents extérieures, ont été testées dans le but de comparer l'anodisation avec et sans shot peening. La couronne dentée avait un diamètre extérieur de 612 mm et une limite élastique de 490 MPa. L'anodisation dure avait une épaisseur de 20 microns.

Des essais de flexion plane ont été conduits pour définir la charge correspondant à une probabilité de 10 % de rupture à 1 million de cycles. Le tableau suivant montre les résultats obtenus (Réf. 3.11).

Grenaillé	Anodisation chromique	Chargement (10% de rupture)
Non	Non	30 KN
Oui	Non	41 KN
Non	Oui	20 KN
Oui	Oui	48 KN

## PROJECTION PLASMA

Les revêtements par projection plasma sont principalement utilisés pour des applications qui demandent une excellente résistance à l'usure. Le shot peening a montré son efficacité en tant que préparation de surface avant projection plasma pour des applications sur pièces cyclées en fatigue. Le shot peening a également été utilisé après revêtement plasma pour améliorer l'état de surface et pour compacter des porosités en voisinage de la surface.

## ÉLECTROÉROSION (EDM)

L'électroérosion est essentiellement un procédé d'enlèvement de matière par étincelage sans effort de coupe. La température produite par l'arc pour dissoudre le métal crée une couche de refusion solidifiée sur le métal de base. Cette couche est fragile et présente des tensions élevées comparables à celles produites par le soudage. L'intérêt du shot peening est de restaurer les propriétés de tenue en fatigue initiales en gommant les effets néfastes de l'électroérosion. La **FIGURE 3-5** montre les effets du shot peening sur l'usinage électrochimique, l'électroérosion et l'électropolissage. Pour faciliter sa lecture, ce diagramme doit être lu dans le sens des aiguilles d'une montre. Les limites d'endurance de ces trois procédés sont comparées avec et sans shot peening.

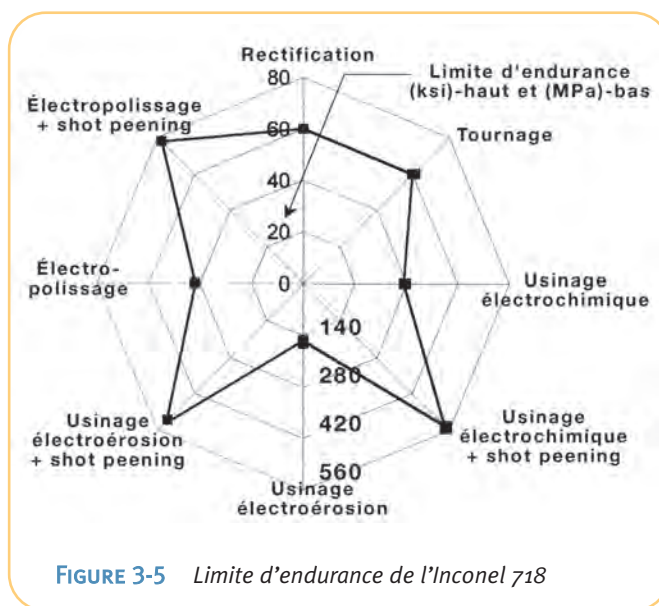


FIGURE 3-5 Limite d'endurance de l'Inconel 718



## USINAGE ÉLECTROCHIMIQUE (ECM)

Le principe de l'usinage électrochimique est basé sur la dissolution contrôlée du matériau par contact avec un agent chimique puissant dans un champ électrique. Une réduction des propriétés en fatigue est généralement attribuée à l'adoucissement et à des imperfections en surface créées par des attaques préférentielles aux joints de grains. Un shot peening réalisé après usinage peut faire plus que restaurer les propriétés en fatigue comme illustré en **FIGURE 3-5** (page 19), (Réf. 3.12).

### ÉTUDE DE CAS

#### MEMBRANES D'ACCOUPLLEMENTS

Les membranes d'accouplements métalliques sont souvent utilisées pour les turbomachines. Par le jeu de la flexion des membranes, ces accouplements compensent le désalignement de la ligne d'arbre. Cette flexion rotative, qui n'est autre qu'une sollicitation cyclique, pose des problèmes de tenue en fatigue. Des chercheurs ont conclu que l'usinage électrochimique peut produire des pièces géométriquement proches de la perfection. Toutefois, ils ont découvert, grâce à des observations sous microscope à balayage électronique, que de minuscules cavités peuvent apparaître en surface à cause de l'usinage électrochimique. Ces cavités, apparemment, génèrent des micros concentrations de contraintes qui conduisent directement à des ruptures prématurées. Le shot peening après usinage électrochimique a très nettement amélioré la limite d'endurance de ces membranes (Réf. 3.13 & 3.14).

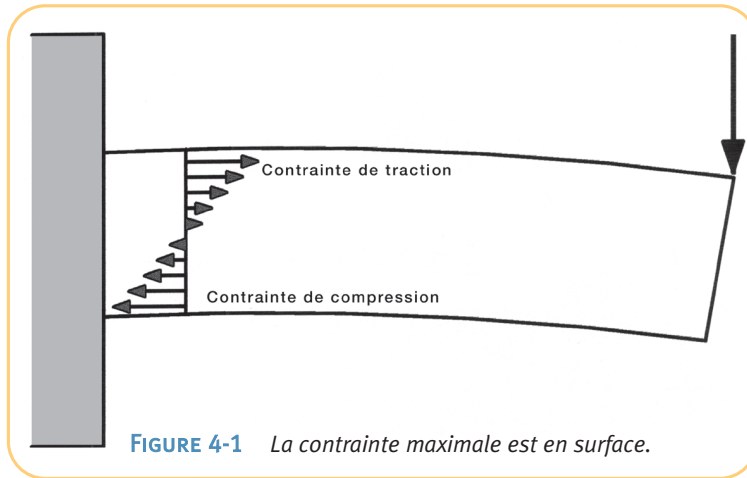
#### RÉFÉRENCES :

- 3.1 *Internal Metal Improvement Co. Memo*
- 3.2 *Molzen, Hornbach; Evaluation of Welding Residual Stress Levels Through Shot Peening and Heat Treating, AWS Basic Cracking Conference; Milwaukee, WI; July 2000*
- 3.3 *Haagensen; Prediction of the Improvement in Fatigue Life of Welded Joints Due to Grinding, TIG Dressing, Weld Shape Control and Shot peening. " The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.*
- 3.4 *McCulloch; American Society of Mechanical Engineers, Letter to H. Kolin, May 1975.*
- 3.5 *Stern; American Bureau of Shipping, Letter to G. Nachman, July 1983.*
- 3.6 *Ubben; American Petroleum Institute, Letter to G. Nachman, February 1967.*
- 3.7 *N.A.C.E Standard MR-01-75, Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Material for Oilfield Equipment, National Association of Corrosion Engineers.*
- 3.8 *Internal Metal Improvement Co. Memo*
- 3.9 *Molzen, Hornbach; Evaluation of Welding Residual Stress Levels Through Shot Peening and Heat Treating, AWS Basic Cracking Conference; Milwaukee, WI; July 2000*
- 3.10 *Metallurgical Associates, Inc; "Minutes" Vol.5 No.1, Winter 1999; Milwaukee, WI*
- 3.11 *Internal Metal Improvement Co. Memo*
- 3.12 *Koster, W.P., Observation on Surface Residual Stress vs. Fatigue Strength, Metcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio. Bulletin 677-1, June 1977*
- 3.13 *Calistrat; Metal Diaphragm Coupling Performance, Hydrocarbon Processing, March 1977*
- 3.14 *Calistrat; Metal Diaphragm Coupling Performance, 5th Turbomachinery Symposium, Texas A&M University, October 1976*



## FATIGUE DE FLEXION

La fatigue de flexion est le mode de rupture par fatigue le plus courant. Le shot peening est bien adapté à ce type de sollicitation parce que les contraintes de traction les plus élevées sont en surface. La **FIGURE 4-1** représente une poutre encastrée chargée en flexion. La flexion de la poutre génère un étirement de la surface supérieure qui induit des contraintes de traction. Tout rayon ou changement de géométrie sur la surface supérieure générerait des concentrations de contraintes.



**FIGURE 4-1** La contrainte maximale est en surface.

La flexion alternée crée un cycle de chargement en traction compression. C'est le mode de chargement en fatigue le plus destructif. Les fissures de fatigue s'initient et se propagent durant les phases de traction du cycle.



**FIGURE 4-2** Montage couronne et pignon.

## ENGRENAGES

Le shot peening des engrenages est une application très répandue. Les engrenages de différentes dimensions et de différentes conceptions sont le plus souvent grenailés pour augmenter la tenue en fatigue de flexion en pied de dents. L'engrènement d'une dent d'engrenage est équivalent à l'exemple de la poutre encastrée. Le chargement, créé par le contact des dents, génère une contrainte de flexion au pied de la dent, en dessous du point de contact, **FIGURE 4-3**.

Les engrenages sont couramment grenailés après trempe ou après durcissement superficiel. L'augmentation de dureté induit une augmentation

proportionnelle des contraintes résiduelles. L'amplitude de contrainte résiduelle maximale, après shot peening sur pignon cémenté, peut se situer entre -1200 et -1600 MPa, en fonction des paramètres de cémentation et de shot peening, **FIGURE 4-4**. On utilise généralement des billes d'acier dur (55-62 HRC) lorsque l'on grenaille des pignons cémentés. Cependant, des billes d'acier de dureté réduite (45-52 HRC) peuvent être employées lorsque les surfaces cémentées requièrent moins de modifications de la surface des flancs de dents.



**FIGURE 4-3** Vue polarisée des contraintes appliquées.



L'amplitude des contraintes résiduelles sera environ moitié moindre que celle introduite par des billes dures.

Le moyen optimal pour améliorer la tenue au pitting des flancs de dents est d'introduire des contraintes résiduelles de compression suivies par un rodage, un tonnelage ou une finition de surface isotrope (Isotropic Finishing). Il faut être attentif à ne pas retirer plus de 10 % de la couche précontrainte par le shot peening. Les procédés qui éliminent les empreintes de shot peening permettent de distribuer les efforts de contacts sur une plus grande surface et de diminuer les pressions de contacts.

Metal Improvement Co. propose un double procédé de shot peening et de superfinition appelé C.A.S.E.<sup>SM</sup> qui permet d'augmenter de 500 % la résistance au pitting d'engrenages. Nous vous invitons à vous référer au chapitre 11 pour des informations complémentaires et des photos micrographiques sur ce procédé.

Des augmentations de limite de fatigue de 30 % et plus à 1 million de cycles sont courantes sur certains types d'engrenages. Les organismes et spécifications suivantes autorisent l'augmentation de la charge admissible à la fatigue par flexion de dents après shot peening contrôlé.

- Lloyds Register of Shipping : 20 % d'augmentation (Réf. 4.2).
- Det Norske Veritas : 20 % d'augmentation (Réf. 4.3).
- ANSI/AGMA 6032-A94 Marine Gearing Specification : 15 % d'augmentation.

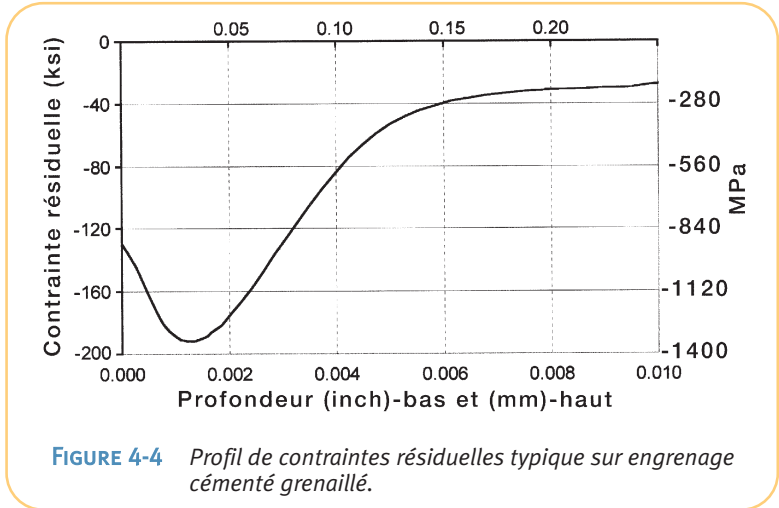


FIGURE 4-4 Profil de contraintes résiduelles typique sur engrenage cimenté grenailé.

## BIELLES

Les bielles sont de parfaits exemples de composants métalliques travaillant en fatigue, puisque chaque révolution du moteur correspond à un cycle de chargement. Les zones critiques de rupture de la plupart des bielles sont les rayons adjacents à la tête de bielle de part et d'autre du corps. La FIGURE 4-5 montre une analyse des contraintes par éléments finis, avec le maximum de contraintes indiqué en rouge.

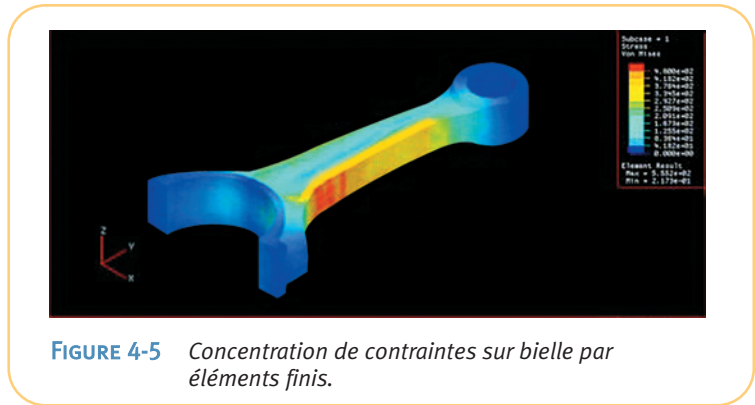


FIGURE 4-5 Concentration de contraintes sur bielle par éléments finis.

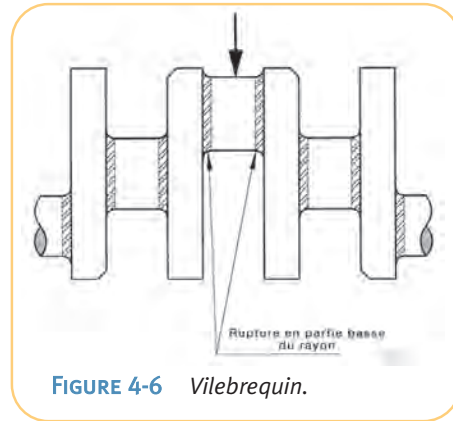
La méthode de shot peening la plus économique est de grenailier les pièces brut de forge, de fonderie, ou issues de métallurgie des poudres avant tout usinage des alésages ou des faces. Cela élimine les opérations de masquage qui en augmenteraient le coût. Une surface rugueuse en compression a de meilleures propriétés en fatigue qu'une surface lisse en traction (ou sans contrainte résiduelle), si bien que la plupart des surfaces grenailées ne nécessitent pas de préparation ni de post-opération.



## VILEBREQUINS

Dans la plupart des cas, tous les rayons d'un vilebrequin sont grenailés. Cela inclut les paliers et les manetons comme le représente la **FIGURE 4-6**. La zone qui subit le plus de contrainte sur un vilebrequin est le rayon de raccordement des manetons. La zone la plus chargée d'un vilebrequin de moteur est la partie basse du congé de maneton. La contrainte est maximale dans cette zone lors du cycle d'explosion des gaz, lorsque que le maneton est au point mort haut. Les fissures par fatigue s'initient couramment dans les congés de raccordement et se propagent au travers de la section du vilebrequin jusqu'au congé de raccordement adjacent du maneton, entraînant des ruptures brutales.

L'expérience a montré l'efficacité du shot peening sur les vilebrequins en aciers forgés, aciers moulés, fontes nodulaires, fontes ductiles austénitiques. Des accroissements de limites d'endurance de 10 à 30 % sont autorisés par le Det Norske Veritas Norvégien lorsque les congés de raccordement sont grenailés sous conditions contrôlées (Réf. 4.5).



**FIGURE 4-6** Vilebrequin.

### ÉTUDE DE CAS

#### VILEBREQUINS DE MOTEURS DIESEL

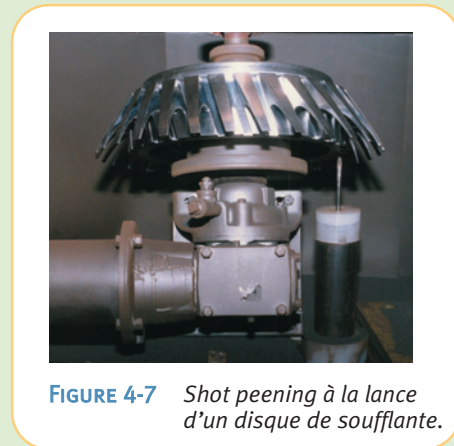
Des essais de flexion quatre points ont été effectués sur un échantillon provenant d'un vilebrequin de moteur diesel. Le matériau était un acier inoxydable à précipitation structurale Armco 17-10 Ph. Le cahier des charges de ce vilebrequin était de dépasser cent millions de cycles sans rupture. Les limites d'endurance des échantillons non grenailés et grenailés ont été mesurées à 1 milliard de cycles. La limite d'endurance du matériau non grenailé était de 293 MPa contre 386 MPa pour le matériau grenailé, soit une augmentation de l'ordre de 30 % (Réf. 4.6).

### ÉTUDE DE CAS

#### DISQUES DE SOUFLANTE DE MOTEURS D'AVION

En 1991 les Autorités Fédérales Aéronautiques américaines (FAA) ont émis une directive de navigabilité qui imposait l'inspection de fissures dans le disque de soufflante basse pression. Plus de 5 000 moteurs étaient en service sur des avions d'affaire aux États Unis et en Europe.

La FAA à imposé l'inspection des moteurs pour lesquels les encoches en queue d'aronde des disques de soufflante n'avaient pas été grenailées à la lance après usinage. Ces moteurs devaient réduire leur durée de vie en service de 10 000 cycles à 4 100 cycles de décollages et d'atterrissages. Les disques qui, avant d'avoir atteint 4 100 cycles, étaient repris avec un shot peening à la lance suivant l'AMS 2432 (Shot Peening Contrôlé par Ordinateur), se voyaient accorder une extension de leur potentiel de 3 000 cycles (Réf. 4.7). Une opération typique de shot peening à la lance sur disque de soufflante est représentée sur la **FIGURE 4-7**. Voir aussi le chapitre 11 «Grenailage des alésages et des cavités».



**FIGURE 4-7** Shot peening à la lance d'un disque de soufflante.

#### RÉFÉRENCES :

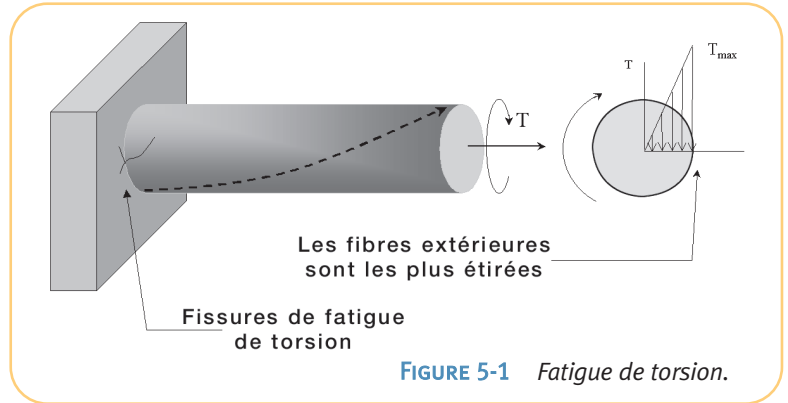
- 4.1 Figure 4-2, Unigraphics Solutions, Inc. website ([www.ugsolutions.com/www.solid-edge.com](http://www.ugsolutions.com/www.solid-edge.com)), June 2000
- 4.2 Letter to W.C. Classon, Lloyds Register of Shipping, May 1990
- 4.3 Sandberg; Letter to Metal improvement Company, Det Norske Veritas, September 1983
- 4.4 Figure 4-5, Unigraphics Solutions, Inc. website ([www.ugsolutions.com/www.solid-edge.com](http://www.ugsolutions.com/www.solid-edge.com)), June 2000
- 4.5 Sandberg; Letter to Metal improvement Company, Det Norske Veritas, September 1983
- 4.6 Internal Metal Improvement Co. Memo
- 4.7 FAA Issues AD on TFE73, Aviation week & Space Technology; April 22, 1991





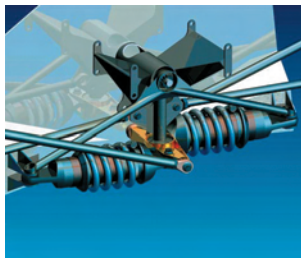
## FATIGUE DE TORSION

Le shot peening est bien adapté à la fatigue de torsion puisque le maximum de contraintes de traction se situe en surface. Le chargement en torsion crée des contraintes dans les deux directions, longitudinale et tangentielle, de sorte que le maximum de contraintes est incliné de 45 degrés par rapport à l'axe longitudinal de la pièce. La **FIGURE 5-1** représente une barre pleine, chargée en torsion et avec les fissures caractéristiques d'un chargement en torsion alternée.



**FIGURE 5-1** Fatigue de torsion.

Les matériaux à faibles caractéristiques mécaniques tendent à se rompre en torsion dans le plan de cisaillement perpendiculaire à l'axe longitudinal, car ils sont moins résistants au cisaillement qu'à la traction. Les matériaux à hautes caractéristiques mécaniques tendent à casser à 45 degrés par rapport à l'axe longitudinal car ils sont moins résistants à la traction qu'au cisaillement.



**FIGURE 5-2** Montage de ressorts de compression.

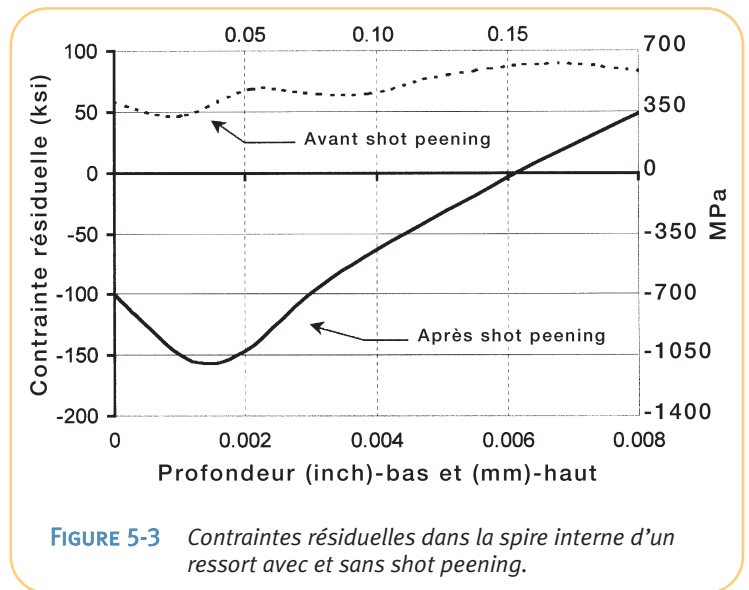
## RESSORTS DE COMPRESSION

Les ressorts de compression sont soumis à de grands nombres de cycles de fatigue et sont l'une des applications les plus largement utilisées du shot peening. Le fil du ressort se vrille lorsque le ressort est comprimé, ce qui a pour effet de créer des contraintes de torsion. En plus des sollicitations en fatigue, l'enroulement du fil génère des contraintes résiduelles de traction néfastes sur le diamètre intérieur du ressort. La **FIGURE 5-2** montre les profils de contraintes résiduelles après enroulement et après shot peening.

Le fil du ressort en acier au

chrome-silicium de diamètre de 6,25 mm analysé en **FIGURE 5-3** a une limite à la rupture de 1800 MPa. La contrainte résiduelle de traction générée par l'enroulement sur la surface interne est de +480 MPa et est la cause première de la rupture à 80 000 cycles (Réf. 5.2).

Le shot peening a inversé le signe des contraintes résiduelles de traction en les remplaçant par des contraintes de compression jusqu'à -1050 MPa. Cela équivaut à 60 % de la limite à la rupture du fil, et il en résulte une durée de vie supplémentaire de 500 000 cycles sans rupture.



**FIGURE 5-3** Contraintes résiduelles dans la spire interne d'un ressort avec et sans shot peening.



On réalise habituellement une opération de revenu après grenailage sur les ressorts. Le revenu a un rôle stabilisateur sur le procédé de fabrication des ressorts, en éliminant les problèmes potentiels de calibrage qui peuvent survenir pour certains types de ressorts grenailés. Le revenu est opéré approximativement à 200 °C pendant 30 minutes sur les ressorts en acier au carbone, c'est à dire en dessous de la température de revenu du fil. Au-delà de 230 °C les contraintes résiduelles de shot peening commencent à se relaxer.

D'autres types de ressorts se prêtent bien au shot peening. La rupture en fatigue va s'initier au point où la superposition des contraintes appliquées et des contraintes résiduelles est maximale. Les ressorts de torsion cassent généralement depuis la surface extérieure près du raccordement de la tête, tandis que les ressorts de traction cassent généralement de l'intérieur du crochet. Les autres types de ressorts pouvant bénéficier du shot peening sont les ressorts à lames, les ressorts torsadés, les ressorts plats, etc...

## ARBRES DE SORTIE DE PUISSANCE

Les arbres de sortie de puissance sont employés pour transmettre une puissance en sortie de boîte sur un organe externe par rotation. Cela crée un chargement en torsion sur l'élément en rotation. La plupart des arbres de sortie de puissance supportant également des charges en porte-à-faux, ce sont des applications idéales pour le shot peening. Ainsi que le représente la **FIGURE 5-4**, les zones de rupture classiques des arbres de sortie sont les cannelures, les rainures, les rayons de raccordement, les rainures de clavettes.

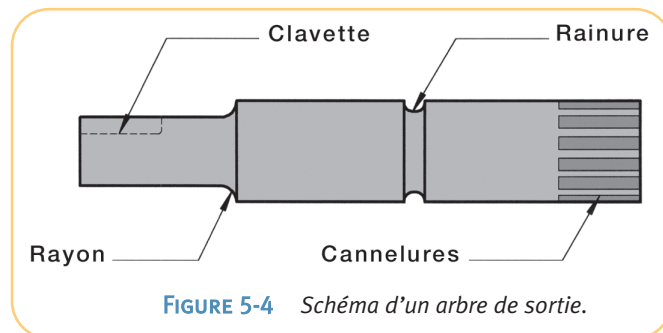


FIGURE 5-4 Schéma d'un arbre de sortie.

## BARRES DE TORSION

Les barres de torsion et les barres anti-dévers sont des éléments de structure couramment utilisés dans des systèmes de suspension, et autres systèmes assimilés. Elles permettent d'obtenir une meilleure stabilité en s'opposant aux mouvements de roulis. Lorsqu'elles sont utilisées dans des organes soumis à des efforts répétés comme les suspensions de véhicules, le shot peening offre des avantages de réduction de masse et d'augmentation de durée de vie.

### ÉTUDE DE CAS

#### BARRES DE TORSION AUTOMOBILE

L'industrie automobile utilise des barres de torsion creuses comme moyen de réduction de masse. Le shot peening est appliqué sur la surface extérieure, là où les contraintes sont maximales. Sur les applications fortement chargées (camions utilitaires, véhicules à 4 roues motrices et de tourisme, etc.) les fissures peuvent également s'initier sur le diamètre intérieur qui est lui aussi sollicité en torsion.

MIC est capable de grenailer des diamètres intérieurs en utilisant ses technologies de shot peening à la lance. Cela permet d'obtenir les contraintes résiduelles indispensables sur toute la longueur des barres de torsion/barres anti-dévers.

#### RÉFÉRENCES :

- 5.1 Figure 5-2, Unigraphics Solutions, Inc. website ([www.ugsolutions.com](http://www.ugsolutions.com) / [www.solid-edge.com](http://www.solid-edge.com)), June 2000  
 5.2 Lanke, Hornbach, Breuer; Optimization of Spring Performance Through Understanding and Application of Residual Stress; Wisconsin Coil Spring Inc., Lambda Research, Inc., Metal Improvement Co. Inc.; 1999 Spring Manufacturer's Institute Technical Symposium; Chicago, IL May 1999



## FATIGUE AXIALE

La fatigue axiale est moins courante que les autres mécanismes de rupture en fatigue. Un échantillon lisse sous chargement axial est soumis à des contraintes uniformes sur toute sa section. De ce fait, les résultats en fatigue d'éprouvettes lisses grenillées et chargées axialement ne font généralement pas apparaître d'augmentation sensible de la tenue en fatigue, contrairement à la flexion et à la torsion pour lesquelles les contraintes sont maximales en surface.

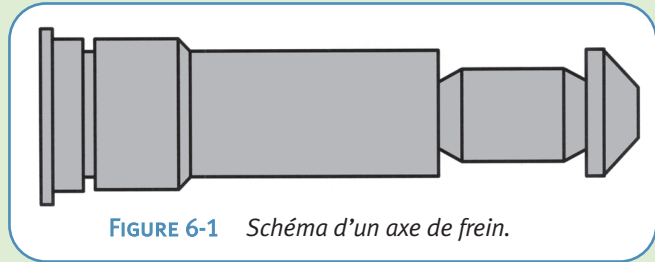
Le chargement axial pur est rare car généralement associé à de la flexion. Le shot peening est efficace sur des composants sollicités axialement lorsqu'il y a des changements de géométrie qui entraînent des concentrations de contraintes. Rainures, traces d'usinage, alésages et congés de raccordement sont des exemples typiques de sites potentiels d'amorçages de fissures.

### ÉTUDE DE CAS

#### BROCHES DE FREIN D'URGENCE DE TRAIN

La **FIGURE 6-1** représente un élément de frein hydraulique de Métro. Les gorges près de l'extrémité chanfreinée ont été conçues pour casser en cas de surcharge axiale. Des ruptures prématurées ont mis en évidence la présence d'un chargement de flexion additionnel. La simulation expérimentale

des chargements de traction et de flexion a donné des durées de vie comprises entre 150 000 et 2,6 millions de cycles. Le shot peening de cette broche de frein a permis à toutes les pièces testées de dépasser 6 millions de cycles sans aucune rupture (Réf. 6.1).



**FIGURE 6-1** Schéma d'un axe de frein.

### ÉTUDE DE CAS

#### CONDUITS D'ÉCHAPPEMENT D'APU

Ces APU (Unité de Puissance Auxiliaire) sont utilisées pour fournir de la puissance à l'avion au sol lorsque les moteurs principaux sont à l'arrêt. Les conduits d'échappement tubulaires en aluminium 8009 sont constitués d'éléments soudés bout à bout, et sont soumis à de hautes températures.

Des essais de fatigue en traction ondulée d'éprouvettes brutes de soudage ont montré une limite de fatigue de 156 MPa à 3 000 cycles.

Un shot peening à la bille de verre des soudures a permis d'obtenir une limite de fatigue de 180 MPa, soit une d'augmentation de 13 %. (Réf. 6.2).

#### RÉFÉRENCES :

- 6.1 RATP, Cetim; Saint Etienne, France, 1996
- 6.2 Internal Metal Improvement Co. Memo



## RUPTURE DE FRETTING

Le fretting survient lorsque deux éléments fortement chargés ont une surface en contact avec des micros déplacements relatifs. Ces mouvements relatifs d'amplitudes microscopiques génèrent des décolorations, du micro écaillage et éventuellement de la fatigue de surface. Les fins oxydes abrasifs qui se sont développés participent à l'endommagement des surfaces. D'autres mécanismes de rupture comme le fretting corrosion (usure induite par petits déplacements) ou le fretting fatigue (fatigue induite par petits déplacements) accompagnent généralement les ruptures par fretting.

Le shot peening est utilisé pour empêcher le fretting et éventuellement les ruptures de fretting, en texturant la surface avec une rugosité non directionnelle. Cela induit une augmentation de la dureté de surface, très sensible sur certains matériaux, et des contraintes résiduelles de compression. Cette couche en compression protège la surface contre l'initiation et la propagation des fissures de fretting fatigue qui prennent naissance sur les défauts de surface résultants du fretting.

Le fretting fatigue peut survenir lorsqu'une pièce en rotation est emmanchée serré sur un arbre. Les vibrations et/ou les micros déplacements de l'arbre peuvent faire que les aspérités créées par l'emmanchement se soudent et s'arrachent. Les surfaces en contact vont s'oxyder en prenant l'apparence de "poudre rouillée" des aciers après fretting.

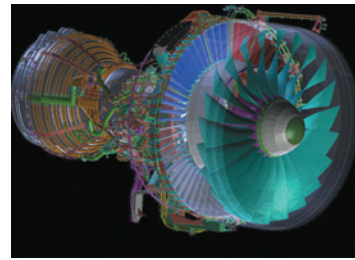


FIGURE 7-1 Perspective d'un réacteur d'avion.

### ÉTUDE DE CAS

#### AILETTES ET AUBES DE TURBINES

Un cas de fretting très usuel est le pied des ailettes de turbomachines. Le shot peening est généralement utilisé pour prévenir les ruptures par fretting de ces pieds d'ailettes. Ainsi que le représente la FIGURE 7-2, les pieds d'ailettes ont souvent une forme caractéristique en pied de sapin.

L'ajustage serré combiné aux conditions de chargement nécessite le grenailage des surfaces en contact pour éviter les ruptures par fretting.

La plupart des pieds d'ailettes de turbines et de compresseurs sont grenailés en tant que pièces d'origine neuves et re-grenailés lors des opérations de maintenance afin de restaurer le potentiel de tenue en fatigue, perdu par le fretting. Les disques et les roues qui supportent les ailettes, doivent aussi être grenailés.

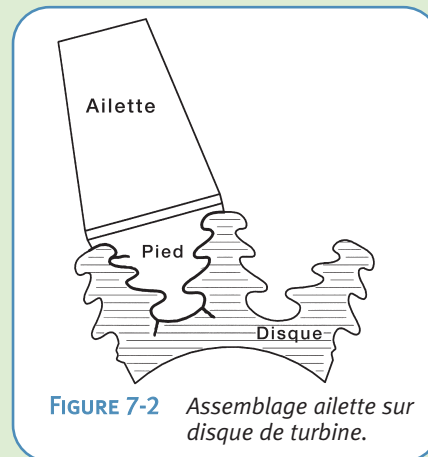


FIGURE 7-2 Assemblage ailette sur disque de turbine.

## PITTING

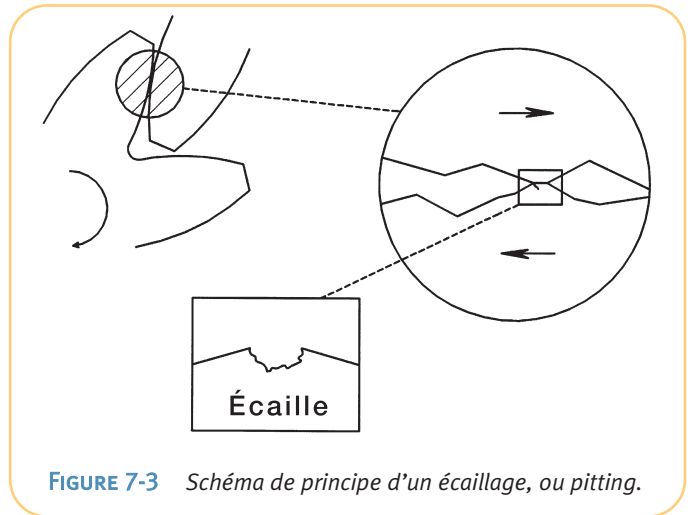
La résistance à la fatigue de contact appelée pitting ou écaillage est primordiale pour tous ceux qui conçoivent des engrenages et autres pièces subissant des contacts de roulement et/ou de glissement. La fatigue de contact est le facteur limitant dans la conception de beaucoup d'engrenages. Bien qu'indésirables, les défaillances par fretting surviennent en plus graduellement et leurs conséquences sont moins catastrophiques que les ruptures en flexion de dents.



Le pitting s'initie à cause de la pression de contact de Hertz et de la contrainte de glissement près du cercle primitif. Lorsque les aspérités des surfaces entrent en contact, le chargement devient une combinaison complexe de contraintes de Hertz et de traction. Lorsque le contact se répète, une microfissure peut s'initier. La fissure va progresser jusqu'à ce que l'écaillage se sépare de la dent laissant un petit cratère en surface.

De mauvaises conditions de lubrification entraînent une augmentation du risque de rupture par pitting. Cela survient lorsque le film lubrifiant n'est pas assez épais pour séparer les surfaces et que des contacts se font entre les aspérités. La **FIGURE 7-3** représente un flanc de dent d'engrenage et le mécanisme qui génère le pitting (Réf. 7-2).

Le shot peening a fait la preuve de sa plus grande efficacité lorsqu'il est suivi par un procédé de finition de l'état de surface. L'élimination des aspérités de shot peening permet une distribution des contacts sur une plus grande surface. L'épaisseur de la couche retirée lors de la finition ne doit pas dépasser 10 % de l'épaisseur précontrainte. Nous vous invitons à vous référer au chapitre 11 pour voir des micrographies de surfaces après grenailage et après finition isotropique de surface par procédé C.A.S.E.<sup>SM</sup>.



**FIGURE 7-3** Schéma de principe d'un écaillage, ou pitting.

## GRIPPAGE

Le grippage est une forme avancée d'usure adhérente qui se produit sur des matériaux en contact glissant sans ou avec une lubrification insuffisante. Dans les premiers stades, cela s'apparente à de l'usure (scuffing). Les forces adhésives mises en jeu créent des déformations plastiques et entraînent la soudure froide des aspérités en contact. Des particules métalliques se détachent et les fragments sont déplacés massivement entre les surfaces. Dans les cas sévères, le grippage apparaît.

Le shot peening peut être efficace sur les surfaces qui grippent, particulièrement lorsque les matériaux durcissent par écrouissage. La surface écrouie à froid présente également des empreintes de shot peening qui agissent comme des réservoirs de lubrifiant. Le shot peening a montré son efficacité contre le grippage pour les matériaux suivants : Inconel 718 & 750, Monel K-500 et alliages d'aciers inoxydables, titane et aluminium.

### RÉFÉRENCES :

- 7.1 Figure 7-1, Unigraphics Solutions, Inc. website ([www.ugsolutions.com](http://www.ugsolutions.com) / [www.solid-edge.com](http://www.solid-edge.com)), June 2000  
 7.2 Hahlbeck; Milwaukee Gear; Milwaukee, WI / Powertrain Engineers; Pewaukee, WI



## RUPTURE EN CORROSION

Les ruptures en traction associées à la corrosion peuvent dériver de contraintes de traction statiques ou cycliques. Dans les deux cas, l'environnement contribue à la rupture. Des environnements tels que l'eau de mer et les gaz agressifs des puits de pétrole sont autant de challenges pour les métallurgistes. Dans la plupart des cas, l'agressivité de ces environnements augmente avec la température.

## CORROSION SOUS TENSION (SCC)

Les ruptures par corrosion sous tension (CST, SCC) sont le plus souvent associées à des contraintes de traction statiques. Ces contraintes statiques peuvent être des contraintes appliquées (comme des brides boulonnées) ou des contraintes résiduelles résultantes des procédés de fabrication (comme le soudage). Pour que la SCC survienne, trois facteurs doivent être présents :

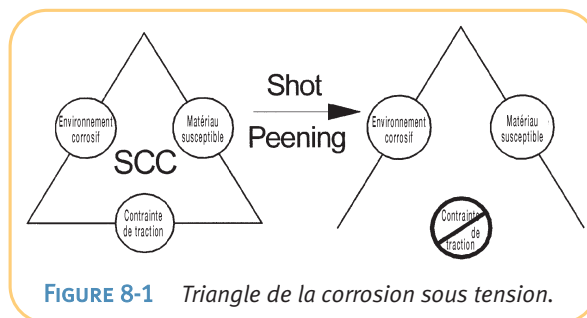
- contrainte de traction;
- sensibilité du matériaux;
- environnement corrosif.

La **FIGURE 8-1** représente le triangle de la corrosion sous tension, dans lequel chaque branche doit être présente pour que la SCC apparaisse.

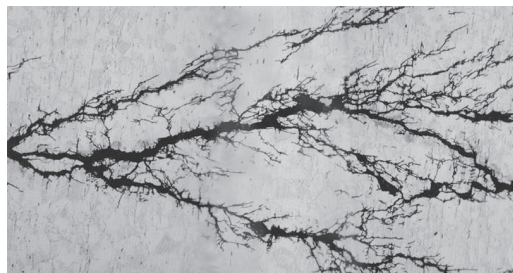
La couche de compression créée par le shot peening supprime la branche «contrainte de traction» du triangle de SCC. Sans contrainte de traction, les risques de rupture par SCC sont éliminés. Voici une liste partielle des alliages susceptibles de ruptures par SCC :

- aciers inoxydables austénitiques;
- certains alliages d'aluminium des séries 2000 & 7000;
- certains alliages à base nickel;
- certains aciers à haute résistance;
- certains alliages de cuivre.

La **FIGURE 8-2** montre une fissure de SCC. Pour les aciers austénitiques de la série 300, la représentation en “bras de rivière” est typique de la SCC. Elle est souvent utilisée lors d'analyse de rupture de ce matériau.



**FIGURE 8-1** Triangle de la corrosion sous tension.



**FIGURE 8-2** Rupture en corrosion sous tension d'un acier inoxydable austénitique.



ÉTUDE DE CAS

**INSTALLATIONS DE PRODUCTION CHIMIQUE**

Le shot peening a été employé pour réduire les coûts de fabrication d'équipements de production chimique. Lorsque de l'ammoniaque ou des solutions chlorées sont utilisées, un matériau économique, mais sensible à la SCC, peut être sélectionné s'il est grenailé plutôt qu'un matériaux plus onéreux et non susceptible à la SCC. Malgré le coût additionnel du shot peening, le coût de construction reste plus faible qu'en employant un alliage plus cher.

Le tableau ci-dessous démontre l'efficacité du shot peening pour combattre la corrosion sous tension pour divers alliages d'aciers inoxydables. Une contrainte équivalente à 70 % de la limite d'élasticité des matériaux a été appliquée. (Réf. 8.2).

Matériau	Grenailé oui / non	Durée d'essai en heures
316 SS	non	11,3 heures à rupture
316 SS	oui	1000 heures sans fissure
318 SS	non	3,3 heures à rupture
318 SS	oui	1000 heures sans fissure
321 SS	non	5 heures à rupture
321 SS	oui	1000 heures sans fissure

**FATIGUE CORROSION**

La fatigue corrosion est un mode de rupture en environnement corrosif associé à un chargement cyclique. La limite d'endurance peut être réduite de 50 % ou plus lorsque des alliages sensibles sont utilisés en environnement corrosif.

ÉTUDE DE CAS

**FRAGILISATION SOUS HYDROGÈNE**

L'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) est couramment présent dans les puits de forage d'hydrocarbures. La limite d'endurance de certains alliages métalliques baisse sévèrement en présence d'H<sub>2</sub>S. Les résultats d'essais suivants illustrent la réponse d'un acier inox 17-4 PH durci par précipitation, et exposé à l'H<sub>2</sub>S, avec et sans shot peening (Réf. 8.3).

% de la limite élastique	Usiné (heures à rupture)	Usiné et grenailé (heures à rupture)
30	29,8 heures	720 heures sans rupture
40	37,9 heures	561 heures
50	15,4 heures	538 heures
60	15,2 heures	219 heures

Essais en conformité avec NACE TM-01-77



## ÉTUDE DE CAS

## IMPLANTS MÉDICAUX

La science médicale continue d'évoluer en remplaçant des organes humains endommagés ou manquants. Les implants médicaux et les fixations associées doivent être légers et très résistants. De plus le corps humain contient des fluides corrosifs pour la plupart des matériaux techniques.

Le shot peening est utilisé avec succès pour combattre à la fois la fatigue des métaux et la fatigue corrosion des alliages d'aciers inoxydables et de titane.

## CORROSION INTERGRANULAIRE

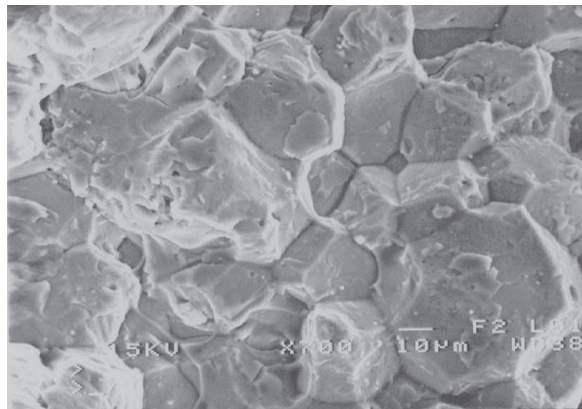
Lors de l'opération de revenu des aciers inoxydables austénitiques, les carbures de chrome précipitent aux joints de grains. Il en résulte un appauvrissement en chrome des régions adjacentes aux joints de grains. La résistance à la corrosion est donc diminuée, et l'alliage devient sensible à la corrosion intergranulaire (sensibilisation).

Lorsque le shot peening est réalisé avant la sensibilisation, les grains sont affinés en surface et la quantité de joints de grains est considérablement augmentée. Cela produit un très grand nombre de site de nucléation pour la précipitation des carbures de chrome. La précipitation aléatoire des carbures de chrome ne permet pas à la corrosion de se développer suivant un chemin continu.

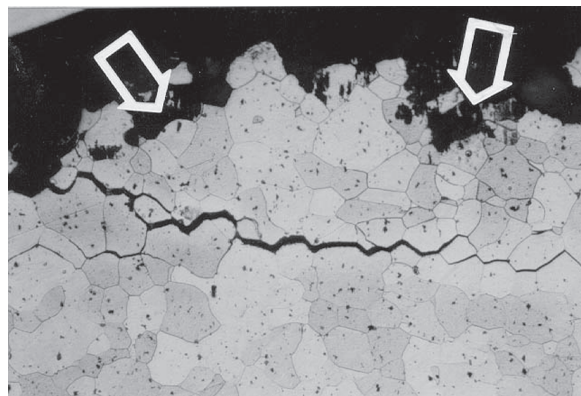
On a pu recenser des augmentations significatives à la résistance à la corrosion intergranulaire, grâce au shot peening avant sensibilisation. Aucun bénéfice n'a été observé lorsque le shot peening est réalisé après la sensibilisation.

La **FIGURE 8-3A** est une image par microscopie électronique d'une corrosion intergranulaire.

La **FIGURE 8-3B** montre une fissuration primaire en sombre et une fissuration secondaire qui se propage dans les joints de grains.



**FIGURE 8-3A** Vue au microscope d'une corrosion intergranulaire.



**FIGURE 8-3B** Fissuration primaire et fissuration secondaire d'une corrosion intergranulaire.

## RÉFÉRENCES :

- 8.1 Figure 8-2, <http://corrosion.ksc.nasa.gov/html/stresscor.htm>, May 2001
- 8.2 Kritzler; *Effect of Shot Peening on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels*, 7th International Conference on Shot Peening; Institute of Precision Mechanics; Warsaw, Poland, 1999
- 8.3 Gillespie; *Controlled Shot Peening Can Help Prevent Stress Corrosion*, Third Conference on Shot Peening; Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1987
- 8.4 Figures 8-3A & 8-3B, <http://corrosion.ksc.nasa.gov/html/stresscor.htm>, May 2001





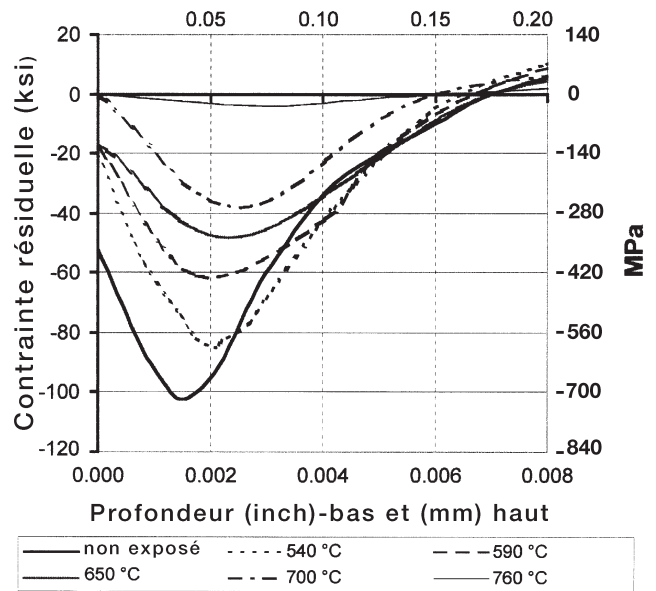
## EFFETS DE LA TEMPÉRATURE

Chauffer des pièces après shot peening nécessite une attention particulière. L'amplitude des contraintes résiduelles de compression relaxée dépend de la température, du temps, et du matériau. La **FIGURE 9-1** montre sur un Inconel 718 (Réf. 9.1) l'effet croissant de relaxation des contraintes résiduelles lorsque la température augmente. L'Inconel 718 est couramment utilisé pour des applications à hautes températures dans les moteurs d'avion.

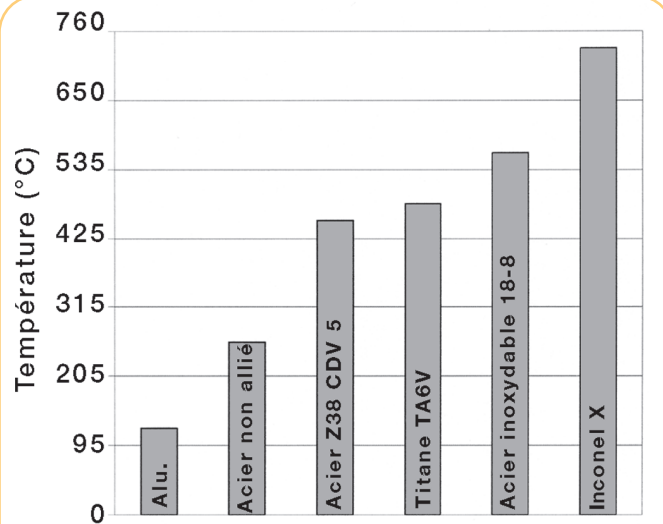
La température de relaxation des contraintes est une propriété physique de chaque matériau. La **FIGURE 9-2** décrit quelques matériaux et la température à partir de laquelle les contraintes résiduelles commencent à se relaxer. Dans bien des cas d'application du shot peening contre la fatigue, la température de service des pièces est supérieure à ces limites basses de température, bien que les gains en fatigue soient réels. La température de service est alors généralement inférieure à la température de relaxation complète des contraintes résiduelles du matériau.

Dans les exemples suivants le shot peening suivi d'un traitement thermique est couramment incorporé à la fabrication :

- ressorts - On réalise habituellement une opération de revenu afin d'améliorer les caractéristiques des ressorts. Veuillez vous référer au chapitre 5 - Fatigue de torsion;
- pièces chromées ou nickelées - Il est courant de les grenailer avant le dépôt. Le shot peening est requis pour la résistance à la fatigue, et pour résister à la fragilisation par l'hydrogène. Veuillez vous référer au chapitre 3 - Procédés d'usinage. Les dépôts galvanoplastiques incluent généralement une opération de revenu à 175-205 °C pendant quelques heures.



**FIGURE 9-1** Profils de contraintes résiduelles sur Inconel 718 après 100 heures d'exposition à hautes températures.



**FIGURE 9-2** Températures approximatives de début de relaxation des contraintes résiduelles.



## FATIGUE THERMIQUE

La fatigue thermique des métaux fait référence à des ruptures générées par des cycles de chargements thermiques avec des échauffements et des refroidissements non homogènes. L'échauffement ou le refroidissement rapide d'une pièce métallique induit de forts gradients thermiques dans la section de la pièce, entraînant des dilatations et des contractions irrégulières. Les contraintes générées peuvent aller jusqu'à plastifier le métal lorsqu'une zone chauffée tend à se dilater alors qu'elle est bridée par une autre section plus épaisse et plus froide de la pièce.

La fatigue thermique se différencie de la fatigue à température par son mode de chargement. Les chargements cycliques en fatigue thermique sont dus aux gradients de dilatation alors que dans le cas de la fatigue à température, les contraintes sont dues à des charges appliquées. Les deux modes de sollicitations peuvent être superposés en cas de charges appliquées sous chocs thermiques.

### ÉTUDE DE CAS

#### NOURRICES DE CENTRALES THERMIQUES

D'importantes fissures par fatigue thermique ont été découvertes sur huit nourrices d'eau chaude (bâches d'alimentation) en centrale thermique. Ces composants sont à la fois soumis à de hautes températures et à de la fatigue thermique. Les démarrages et les arrêts sont à l'origine de la fatigue thermique. La température d'utilisation continue se situe dans la fourchette 250-350 °C.

Les fissures étaient circonférencielles et se situaient dans les zones affectées thermiquement des soudures entre la chambre et les faisceaux de tubes. La fissuration par fatigue était attribuée aux années de service et aux 747 démarrages et arrêts de l'installation. Cela était préoccupant pour la durée de vie restante des centrales.

Les zones fissurées ont été meulées et grenillées de précontrainte. Des inspections approfondies ont montré qu'aucune nouvelle fissure par fatigue ne s'était développée après cinq années de fonctionnement et 150 cycles de démarrages et d'arrêts (Réf. 9.2)

#### RÉFÉRENCES :

- 9.1 *Surface Integrity, Tech Report, Manufacturing Engineering; July 1989*
- 9.2 *Gaucher; EDF Feedback on French Feedwater Plants Repaired by Shot Peening and Thermal Stresses Relaxation Follow-Up, Welding and Repair Technology for Fossil Power Plants; EPRI, Palo Alto, CA; March 1994*



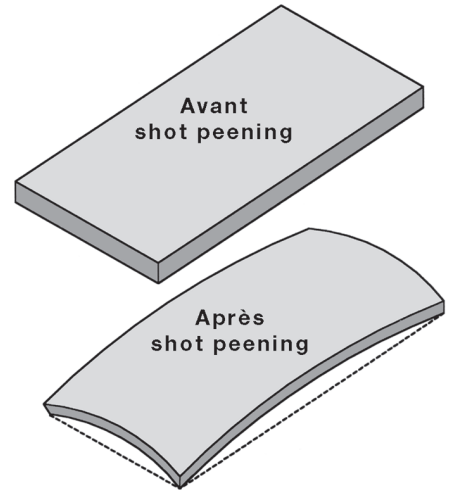
## FORMAGE PAR GRENAILLAGE

Le peen forming, ou formage par grenailage, est le procédé préféré de formage de profils aérodynamiques des panneaux de voilure d'avion. C'est un procédé sans matrice, réalisé à température ambiante. Il est idéal pour former des panneaux de voilure et d'empennage, même pour les plus gros avions. Il s'utilise idéalement pour former les courbures dont les rayons se situent dans le domaine élastique du métal. Il s'agit de grands rayons de courbure, sans changement brutal de forme.

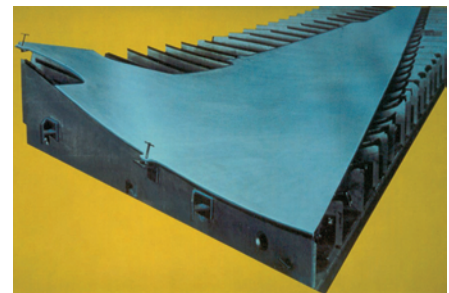
Les contraintes résiduelles de compression étirent la surface grenillée dans son domaine élastique ainsi que le montre la **FIGURE 10-1**. La surface grenillée va prendre une courbure convexe et va mettre la surface concave en compression. Les panneaux de voilure d'avion ont typiquement de grandes surfaces et de relativement faibles épaisseurs. Les contraintes résiduelles de shot peening développent des forces de flexion énormes sur ces grandes surfaces. Il est généralement possible de travailler ces panneaux pour obtenir la forme requise lorsque le shot peening est correctement défini et contrôlé.

Un procédé de peen forming bien conçu pour des exigences de courbures variables, s'accommodera des variations d'épaisseurs, des découpes, des nervures, des raidisseurs, ainsi que des déformations préexistantes. La **FIGURE 10-2** montre un panneau de voilure qui possède des formes multiples sur sa longueur. Le panneau est positionné sur un gabarit de contrôle qui permet d'en vérifier la forme.

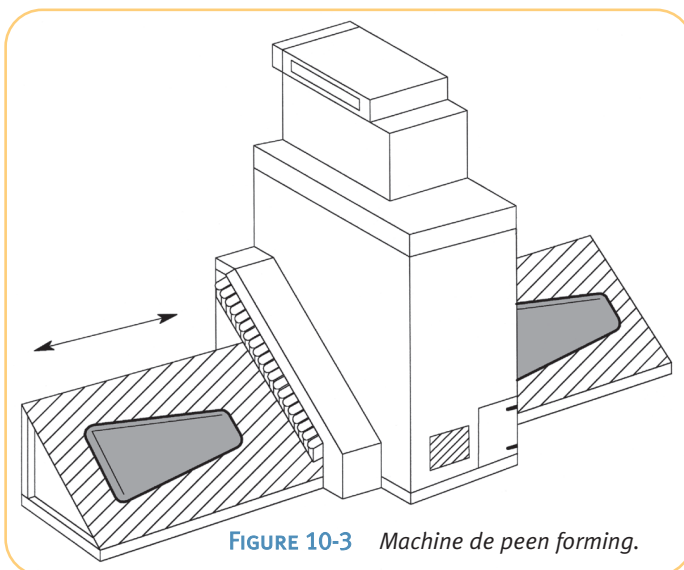
Le peen forming est généralement réalisé sur une machine roulante à défilement (**FIGURE 10-3**).



**FIGURE 10-1** Plaque mince, avant et après shot peening.



**FIGURE 10-2** Panneau de voilure formé par peen forming.



**FIGURE 10-3** Machine de peen forming.

Les avantages du peen forming sont les suivants :

- pas de matrice de formage nécessaire ;
- procédé réalisé à température ambiante ;
- les modifications ultérieures de la forme des panneaux de voilure peuvent être réalisées aisément en adaptant le procédé de peen forming. Il n'y a donc pas de coûteuses modifications des matrices de formage ;
- la mise en forme par peen forming étant obtenue grâce aux contraintes résiduelles, il en résulte que les pièces ainsi formées ont une meilleure résistance à la fatigue de flexion et à la corrosion sous tension ;
- les panneaux formés par grenailage présentent des contraintes résiduelles de compression sur les faces concaves et convexes.



La majorité des avions actuels équipés de panneaux de voilure aérodynamique en alliages d'aluminium utilisent le procédé de peen forming.

Metal Improvement Company a développé des techniques de modélisations numériques qui permettent de faire des études de faisabilité et des conceptions originales. Le programme utilise les données de conception 3D et, se basant sur les niveaux de courbures bi-directionnelles, calcule et définit les caractéristiques du peen forming. Il exporte également les données numériques afin de finaliser les paramètres de grenailage nécessaires pour obtenir les courbures. Un avantage significatif de ces modélisations est de permettre à Metal Improvement Company d'assister les concepteurs de panneaux de voilure dès les premiers stades de la conception (FIGURE 10-4). Ces techniques permettent de savoir, à priori, si les courbures aérodynamiques demandées sont compatibles avec des procédés de fabrication économiquement avantageux.

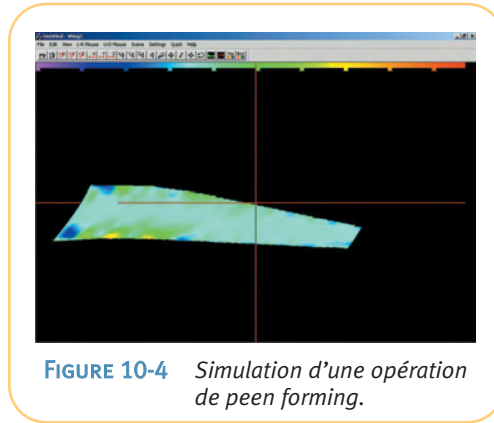


FIGURE 10-4 Simulation d'une opération de peen forming.

## CORRECTION DE FORME

Le shot peening, comme pour le peen forming, peut être utilisé pour corriger des géométries. Cela est obtenu en ne grenillant que des zones sélectionnées de la pièce, afin que le chargement en surface, généré par les contraintes résiduelles de compression, redonne à la pièce sa forme souhaitée. Quelques exemples :

- redressage d'arbres de transmission ou de vilebrequins;
- correction de concentricité de couronnes;
- ajustement de longerons d'ailes d'avion;
- correction des déformations après soudage.

Le procédé de peen forming évite les contraintes résiduelles de traction néfastes, générées par les autres procédés de redressage, et n'introduit en surface que des contraintes résiduelles de compression bénéfiques.

## ÉCROUISSAGE

Un grand nombre de matériaux et d'alliages ont la propriété de durcir par écrouissage à froid. Le shot peening peut générer des augmentations substantielles de duretés en surface pour certains alliages des matériaux suivants :

- Acier inoxydable;
- Aluminium;
- Acier inoxydable au manganèse;
- Inconel;
- Stellite;
- Hastelloy.

Cela peut être particulièrement intéressant pour les pièces qui ne peuvent être traitées thermiquement, mais qui requièrent une bonne résistance à l'usure en surface. Le tableau ci-dessus montre quelques exemples d'augmentations de dureté de surface par shot peening.

Matériaux	Avant shot peening	Après shot peening	Gain en %
Laiton à douilles	50 HRB	175 HRB	250
Inox 304	243 HV	423 HV	74
Inox 316L	283 HV	398 HV	41
Inox (manganèse)	23 HRC	55 HRC	139
Inconel 625	300 HV	500 HV	67
Stellite	42 HRC	54 HRC	29
Hastelloy C	18 HRC	40 HRC	122 *
Hastelloy C	25 HRC	45 HRC	80 **

\* État forgé \*\* État moulé

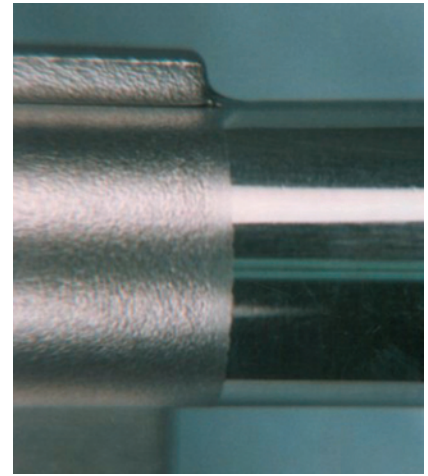


## TEXTURATION DE SURFACE PEENTEX<sup>SM</sup>

Le shot peening peut aussi être utilisé pour créer un grand nombre de finitions de surface d'esthétiques différentes. MIC dispose d'une grande variété de tailles et de types de médias de projection qui vont des plus fines billes de verre jusqu'à de grosses billes d'acier faiblement allié ou d'acier inoxydable. En mettant en œuvre un procédé soigneusement contrôlé, MIC est capable de produire des finitions architecturales uniformes, reproductibles, et plus résistantes aux dommages mécaniques du fait de l'écrouissage.

Les finitions par shot peening ont été utilisées pour texturer des objets d'art, des rampes d'escaliers et des mains courantes, des halls d'entrées, des façades d'immeubles, des constructions métalliques, et un grand nombre d'autres applications pour leur aspect visuel. MIC recommande de comparer visuellement différentes finitions sur des échantillons. La **FIGURE 10-5** est une main courante avec une finition Peentex<sup>SM</sup> particulière (côté gauche de la **FIGURE 10-5**) afin de dépolir la finition non texturée brillante (côté droit).

Une surface texturée est capable de masquer les rayures, les imperfections, qui sinon seraient très visibles sur une surface usinée ou rectifiée. Les moules utilisés pour la fabrication de pièces plastiques sont souvent grenillés pour masquer les défauts de surface. La texture du moule va devenir l'image miroir sur la surface de la pièce en plastique.



**FIGURE 10-5** Comparaison entre Peentex<sup>SM</sup> à gauche et état poli à droite.

## OPTIMISATION DE L'ÉTAT DE SURFACE

Les surfaces dites techniques sont celles qui sont texturées afin d'améliorer les caractéristiques de surface. Quelques applications potentielles de surfaces produites par shot peening sont listées ci-dessous :

- dans la plupart des cas une surface texturée possède un coefficient de frottement (glissement) plus faible qu'une surface non texturée. Cela vient du fait que la surface de contact est réduite aux "sommets" des impacts de shot peening ;
- dans certaines applications, les "vallées" des impacts de grenailage permettent la rétention des agents de lubrification, ce qui n'est pas le cas pour des surfaces lisses ;
- dans certains cas une surface texturée non directionnelle est préférable à une surface usinée unidirectionnelle. L'efficacité a été prouvée pour certaines applications d'étanchéité ;
- pour certaines applications de moules, une surface texturée a moins d'effets d'adhérence, ce qui favorise les propriétés de démoulage.



ÉTUDE DE CAS

TUBES DE CONVOYAGE PNEUMATIQUE

Les tubes de convoyage pneumatique peuvent aller jusqu'à 250 mm de diamètre, et ils sont généralement réalisés en acier inox ou en aluminium. Ils sont utilisés pour transporter des granules de plastique dans les usines de moulage de divers produits ou dans des sites de mélange et de distribution. Les granules transportés se dégradent lorsqu'ils frottent sur la surface intérieure des tubes. La vitesse des granules génère de la friction, de la chaleur et des pertes de production.

En utilisant une variante de Peentex<sup>SM</sup> qui produit des impacts directionnels, MIC propose une surface texturée orientée qui réduit significativement la formation des longs filaments appelés cheveux d'anges. Ces derniers génèrent des pertes et/ou des contaminations de productions qui se chiffrent en milliers de tonnes par an. Le shot peening directionnel s'est montré beaucoup plus efficace que les autres traitements internes des tubes. Souvent plus économique, et il peut également être réalisé sur site. L'état de surface orienté a en outre l'avantage d'être fortement écroui (lorsqu'il s'agit de tubes en aluminium ou en inox), ce qui augmente la durée de vie du tube.



FIGURE 10-6 Unité de production utilisant des tubes à texture orientée.

Type de traitement	Filaments (g) par tonne convoyée
Shot Peening directionnel	35 g
Usinage fin	108 g
Spirale usinée interne	144 g
État sablé	157 g
Revêtement polyuréthane	159 g
Rayures moyennes	306 g

Le tableau rapporte les résultats d'essais de six différents traitements internes de tubes. La plus faible valeur de filaments en grammes par tonne convoyée est recherchée. Le shot peening orienté ne génère qu'un tiers des filaments produits par la finition la plus proche (Réf. 10.1).

ÉTUDE DE CAS

INDUSTRIE ALIMENTAIRE

L'industrie laitière et fromagère a mis en évidence que les cratères de grenailage peuvent avantageusement remplacer d'autres traitements de surface. La surface texturée après shot peening présente généralement un plus faible coefficient de frottement, ce qui est nécessaire au démoulage des fromages en contact avec les surfaces alimentaires. Les empreintes agissent comme des réservoirs à lubrifiants pour la graisse ou d'autres substances. C'est ce qui permet aux produits laitiers de glisser facilement dans les moules, sur les sommets des empreintes de shot peening.

Des tests ont montré que les surfaces grenillées atteignent ou dépassent les exigences de propreté microbiologiques. Cela vient du fait que les impacts sphériques ne permettent pas aux bactéries de s'amasser ni de se reproduire.

Les états de surface rugueux, obtenus par projection d'abrasifs, par sablage, ou par des médias cassés, se montrent moins faciles à nettoyer et les bactéries ont une beaucoup plus forte tendance à s'y amasser et à s'y reproduire (Réf. 10.2). Les billes de verre comme les billes d'acier inox sont utilisées avec succès pour cette application.

La FIGURE 10-7 représente un moule à fromage de forme tubulaire. MIC a texturé avec succès beaucoup d'autres géométries et formes de moules à fromage.

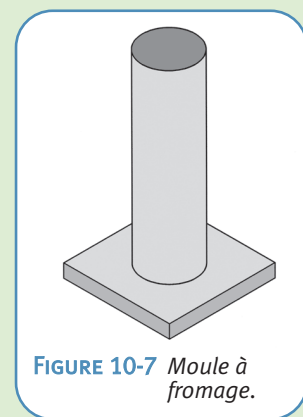


FIGURE 10-7 Moule à fromage.



## CORROSION EXFOLIANTE

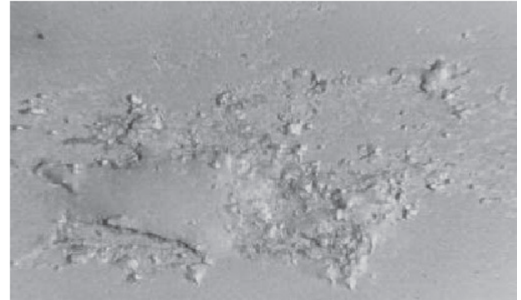
Beaucoup d'avions commerciaux sont âgés de plus de 20 ans. En définitive, la sécurité des avions les plus âgés dépend de la qualité de la maintenance qu'ils ont reçue. Un vieux Boeing 737 a dépressurisé brutalement à 7300 m d'altitude lorsqu'un tronçon de 6 m de fuselage s'est arraché en plein vol. La cause de cette rupture catastrophique était la corrosion et la fatigue du métal (Réf. 10.3).

MIC a développé un procédé appelé Search Peening<sup>sm</sup> afin de localiser la corrosion en surface et au voisinage de la surface. La corrosion exfoliante est une forme de corrosion intergranulaire qui se développe le long des joints de grains. Elle est caractérisée par le délaminage de fines couches d'aluminium en présence de corrosion entre les couches. Elle se retrouve généralement autour des rivets à cause du couple galvanique entre métaux de nature différente.

La surface se cloque vers l'extérieur, comme le montre la **FIGURE 10-8**. Dans les cas les plus sévères, la corrosion est confinée sous la surface.

Lorsque la corrosion apparaît, le technicien de maintenance peut l'éliminer manuellement par un sablage ou par d'autres moyens. Un shot peening est alors appliqué pour compenser la perte de limite d'endurance due au retrait de matière. Une corrosion en sous-couche peut alors apparaître sous forme de cloques. Si cette corrosion supplémentaire apparaît, elle est éliminée et le Search Peening<sup>sm</sup> est répété jusqu'à ce que plus aucune cloque ne se produise après shot peening.

MIC peut réaliser le Search Peening<sup>sm</sup> sur site dans les hangars de réparation aéronautique. Les zones critiques de l'avion sont, avant de débiter le travail, masquées par des opérateurs de shot peening expérimentés.



**FIGURE 10-8** Corrosion exfoliante.

## COMPACTAGE DES POROSITÉS

La porosité de surface a longtemps été un problème qui a lourdement pénalisé l'industrie de la fonderie et de la métallurgie des poudres. Les hétérogénéités en surface des matériaux peuvent être améliorées en martelant la surface avec des médias de shot peening. En augmentant l'intensité (énergie de l'impact), le grenailage permet aussi de mettre en évidence des lacunes importantes entre les grains, et du délaminage au voisinage de la surface.

### RÉFÉRENCES :

- 10.1 Paulson; *Effective Means for Reducing Formation of Fines and Streamers in Air Conveying Systems*, Regional Technical Conference of the Society of Plastics Engineering; 1978, Flo-Tronics Division of Allied Industries; Houston, TX
- 10.2 Steiner, Maragos, Bradley; *Cleanability of Stainless Steel Surfaces With Various Finishes*; Dairy, Food, and Environmental Sanitation, April 2000
- 10.3 Eckersley; *The Aging Aircraft Fleet*, IMPACT; Metal Improvement Co.



## ALÉSAGES ET SURFACES INTERNES

Lorsque la profondeur d'un alésage d'une pièce est plus grande que le diamètre de cet alésage, il ne peut pas être correctement grenailé par une méthode externe. Une lance de grenailage ou un déflecteur de grenaille oscillant doit être utilisé sous des conditions de contrôle très strictes (FIGURE 11-1). De petits trous de diamètres allant jusqu'à 2,4 mm sur des disques de turbine aéronautique ont été grenailés en production en utilisant la méthode du déflecteur de grenaille interne. Les applications potentielles du shot peening interne incluent :

- trous de tirants et de frettes;
- cylindres hydrauliques;
- corps de pales d'hélicoptère;
- tubes de forage;
- hélices d'avion;
- trous de lubrification d'arbres de transmission;
- ancrages de pales de disques de turbine et de compresseur.

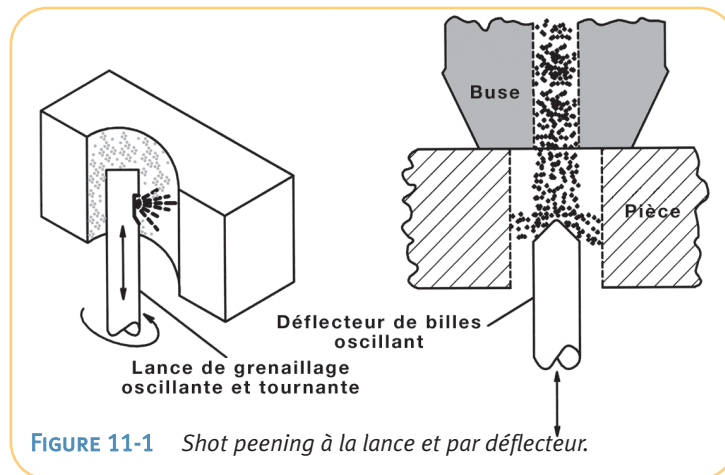


FIGURE 11-1 Shot peening à la lance et par déflecteur.

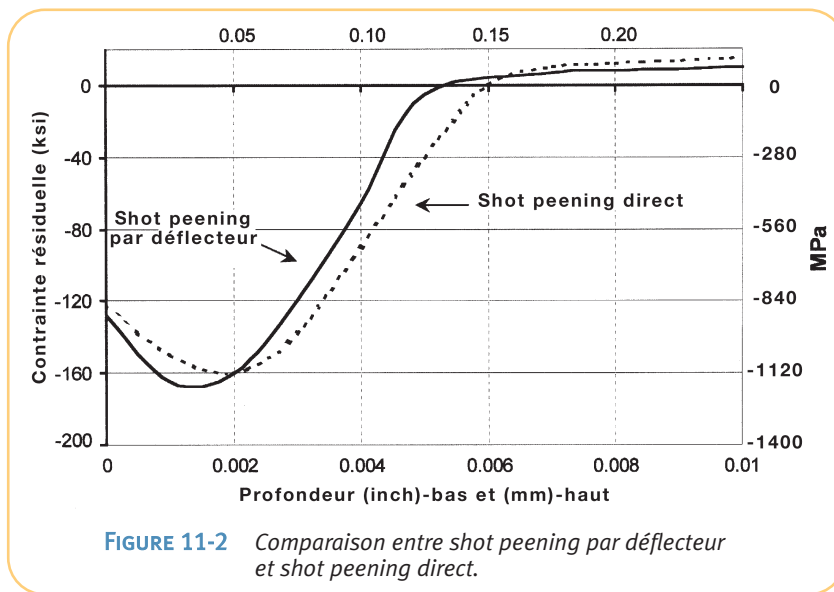


FIGURE 11-2 Comparaison entre shot peening par déflecteur et shot peening direct.

MIC a développé une technique de vérification de l'intensité de shot peening pour les petits trous. La FIGURE 11-2 montre les résultats d'une étude faite sur un disque de turbine aéronautique. La comparaison est faite entre le profil des contraintes résiduelles sur une surface externe grenailée avec un système conventionnel à buse, et le profil des contraintes à l'intérieur d'un petit diamètre grenailé en utilisant la méthode du déflecteur. En

utilisant la même taille de grenaille, le même taux de recouvrement, et la même intensité, les profils des contraintes résiduelles obtenus par les deux méthodes sont pratiquement superposables (Réf 11.1).

## DOUBLE GRENAILLAGE

Le double grenailage (ou Dura Peen<sup>sm</sup>) est utilisé pour augmenter si nécessaire les performances en fatigue par rapport à un grenailage réalisé en une seule opération. Les augmentations de durée de vie en fatigue dues au shot peening dépassent généralement 300 %, 500 % et plus.

Lors du traitement par double grenailage, les résultats du grenailage en simple opération sont souvent doublés, triplés, voir plus.





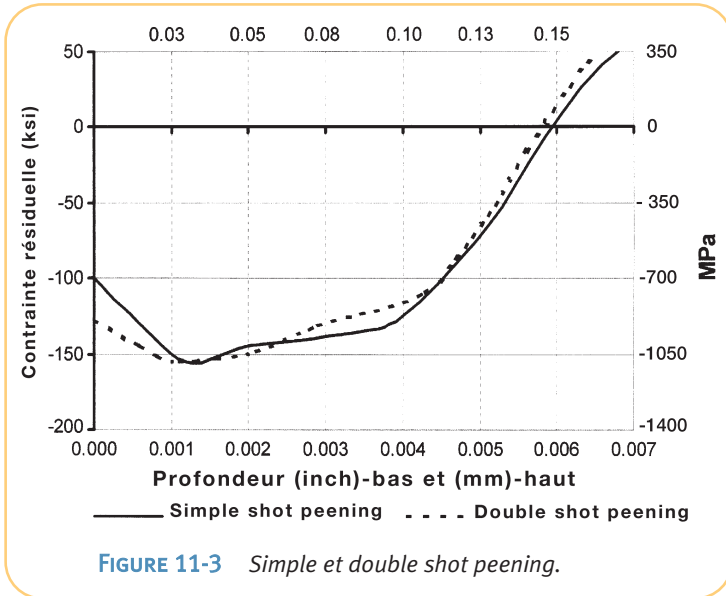


FIGURE 11-3 Simple et double shot peening.

La FIGURE 11-3 montre approximativement -200 MPa de compression supplémentaire sur la surface lorsque le double grenailage est exécuté sur un acier à ressort au chrome silicium (Réf. 11.2).

Le double grenailage est le plus souvent réalisé en grenillant la même surface une deuxième fois avec une plus petite bille à une intensité réduite. Le second grenailage aplanit par martelage les aspérités créées par le premier traitement, conduisant à une amélioration de l'état de surface. L'écrasement de ces aspérités entraîne un accroissement des contraintes de compression en surface. Les FIGURES 11-4 et 11-5 montrent les états de surface d'un simple et d'un double grenailage à un agrandissement de 30x dont les profils de contraintes apparaissent dans le graphique de la FIGURE 11-3.

L'objectif est d'augmenter la contrainte résiduelle de compression de la couche en surface, car c'est en surface que s'initie la fissure de fatigue. En comprimant encore plus la couche superficielle, la surface devient plus résistante aux fissures de fatigue.



FIGURE 11-4 Texture de surface après simple shot peening

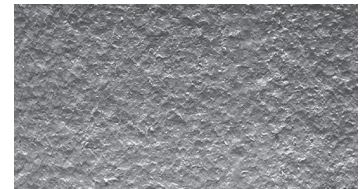


FIGURE 11-5 Texture de surface après double shot peening.

## LE PROCÉDÉ C.A.S.E.<sup>SM</sup>

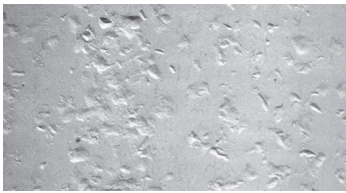
Le procédé C.A.S.E.<sup>sm</sup> consiste en un traitement de shot peening suivi d'une finition isotrope. La finition isotrope supprime les aspérités laissées par le traitement de grenailage via des techniques de polissage par vibration tout en maintenant l'intégrité de la contrainte résiduelle de compression en surface. Le procédé utilise une solution chimique spécialement conçue pour réduire le temps de traitement, le rendant réalisable sur des productions en grandes séries.

C.A.S.E.<sup>sm</sup> a été conçu pour les surfaces qui exigent à la fois une excellente résistance à la fatigue et un excellent état de surface afin de supporter de fortes pressions de contact. C.A.S.E.<sup>sm</sup> s'est montré performant pour améliorer la résistance au pitting et au micropitting des engrenages. Beaucoup de conceptions d'engrenages sont limitées par la fatigue au pitting comme étant le facteur critique en termes de sollicitations.

Le shot peening s'effectue sur les flancs et pieds de dents et la finition isotrope se concentre sur les flancs. Les améliorations de l'état de surface permettent une meilleure répartition des charges en surface ce qui réduit ainsi les pressions de contact et augmente la résistance au pitting.

Les engrenages de transmission utilisés dans l'aéronautique, l'automobile et les engins tous terrains sont des applications idéales pour le procédé C.A.S.E.<sup>sm</sup>. Ils sont conçus pour supporter très longtemps des moments de flexion au pied élevés et des pressions de contact importantes sur les flancs de dents. Ce procédé a donné d'excellents résultats dans toutes ces industries.



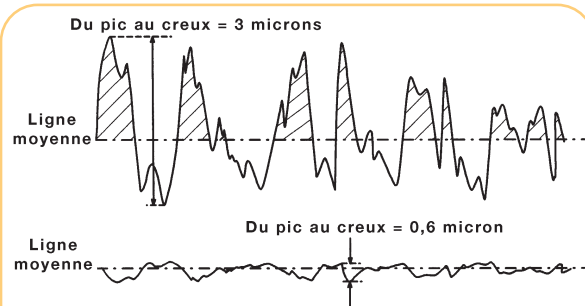


**FIGURE 11-6** *Texture de surface après procédé C.A.S.E.<sup>sm</sup>.*

La **FIGURE 11-6** montre une finition typique du procédé C.A.S.E.<sup>sm</sup> agrandie 30 fois. L'état de surface grenailé serait semblable à la **FIGURE 11-4**. Le procédé est conçu pour laisser quelques dépressions de la finition grenailée pour assurer une bonne rétention de lubrifiant.

Des états de surface de 0,4 µmRa ou mieux sont réalisables sur engrenages cémentés. La **FIGURE 11-7** montre un profil typique de rugosité d'un engrenage cémenté après shot peening et

après la finition isotrope du procédé C.A.S.E.<sup>sm</sup>. La hauteur maximale du profil (distance entre les saillies et les creux) de la finition grenailée est de 2,9 µm. Après la finition isotrope, celle-ci descend à 0,6 µm. La rugosité Rsk, qui mesure la dissymétrie d'un profil de rugosité par rapport à sa valeur moyenne, est alors négative et peut approcher -1,1 car le procédé élimine tous les pics pour ne garder qu'un plateau parsemé de fonds d'empreintes de shot peening.



**FIGURE 11-7** *Texture de surface après shot peening et après le procédé C.A.S.E.<sup>sm</sup>.*

## SHOT PEENING SUR SITE

Les grandes structures qui sont montées sur site ou celles dont la taille excède les limites de transport peuvent être grenailées par des équipes d'opérateurs expérimentés avec des équipements mobiles. Des équipes réalisent le shot peening dans le monde entier en respectant les mêmes critères de qualité que dans les usines MIC. Les relevés d'intensité Almen, le contrôle du recouvrement et des médias de grenailage certifiés sont utilisés comme décrit dans le chapitre 12 - Contrôle du procédé.

Exemples d'applications réalisées avec succès avec un équipement de chantier :

- fabrications soudées (réservoirs sous pression, corps de broyeurs, coques de bateaux, réservoirs de stockage de produits chimiques, ponts) ;
- réparation d'avion et élimination de la corrosion (panneaux de voilure, trains d'atterrissage, autres composants chargés dynamiquement) ;
- composants de centrale électrique (tubes d'échangeur thermique, rotors et stators de turbine, grandes aubes de turbine) ;
- industries diverses (aciéries, papeteries, mines).

## GRENAILLAGE SOUS CONTRAINTE

Le grenailage sous contrainte permet de développer une contrainte résiduelle de compression supplémentaire offrant plus de résistance aux fissures de fatigue. Alors que le double grenailage offre des améliorations de la couche superficielle, le grenailage sous contrainte développe de plus fortes contraintes de compression dans toute la couche affectée.

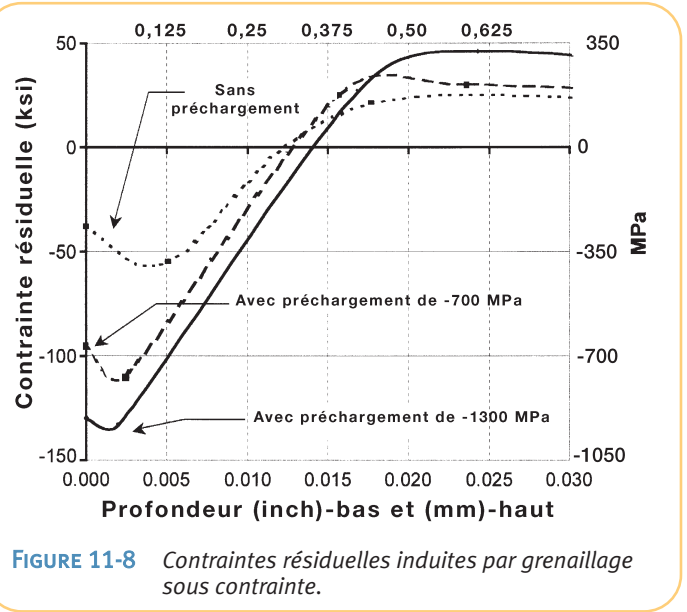
Pour réaliser un grenailage sous contrainte, la pièce doit être placée sous un chargement avant grenailage dans la même direction que celui qu'elle subira en service. Les ressorts de traction doivent être tendus, les ressorts de compression doivent être comprimés et les barres de torsion doivent être chargées en torsion. Cela entraînera une contrainte résiduelle de compression maximale et orientée s'opposant à la contrainte cyclique de service de même direction.

Le gain de contrainte de compression est obtenu par le préchargement élastique de la pièce pendant le shot peening. Lorsque les médias frappent la surface, la couche en surface s'allonge davantage sous l'effet du préchargement.



L'allongement plus important entraîne des contraintes résiduelles plus intenses lorsque les couches de métal déformé tendent à revenir à leurs longueurs initiales.

La **FIGURE 11-8** montre la contrainte de compression supplémentaire qui est obtenue sur un acier 50CrV4 par grenailage sous contrainte (Réf. 11-4). Le graphique démontre que plus le préchargement est élevé, plus la contrainte résiduelle est importante. Lorsque le grenailage doit être réalisé sous contrainte, son coût de mise en œuvre augmente à cause de la réalisation des outillages spécifiques et de la mise en préchargement des pièces avant grenailage.



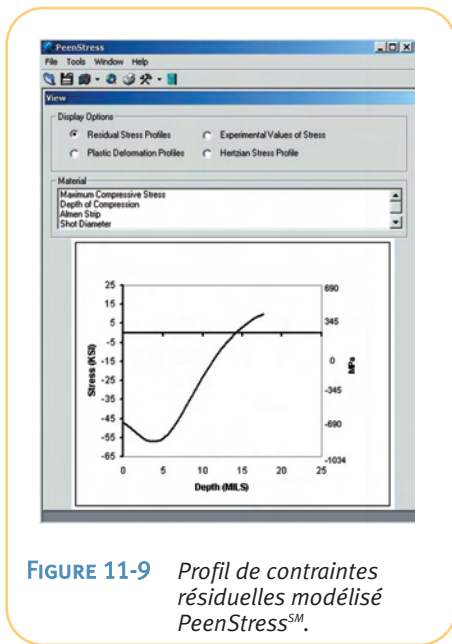
**FIGURE 11-8** Contraintes résiduelles induites par grenailage sous contrainte.

## MODÉLISATION DE LA CONTRAINTE RÉSIDUELLE PEENSTRESS<sup>SM</sup>

Pour définir des paramètres de grenailage appropriés, MIC doit intégrer de nombreux critères. Une des considérations les plus critiques est la prédiction du profil de la contrainte résiduelle après shot peening. Les facteurs suivants influencent le profil de contrainte résiduelle final :

- matériau, traitement thermique, et dureté ;
- géométrie de la pièce ;
- bille (taille, matière, dureté et intensité de grenailage) ;
- traitement simple, double, ou sous contrainte.

Depuis plus de 50 ans, MIC sélectionne avec succès des paramètres de shot peening. Récemment, MIC a développé en interne un logiciel appelé Peenstress<sup>SM</sup> qui est utilisé pour optimiser les résultats du shot peening.



**FIGURE 11-9** Profil de contraintes résiduelles modélisé PeenStress<sup>SM</sup>.

Peenstress<sup>SM</sup> possède une vaste base de données de matériaux et de conditions de traitements thermiques dans laquelle l'utilisateur peut faire son choix. Après avoir sélectionné le bon matériau associé à son traitement thermique, l'utilisateur définit les principaux paramètres du shot peening qui sont :

- le diamètre de la bille ;
- la matière et la dureté de la bille ;
- l'intensité Almen de grenailage.

Comme sur la **FIGURE 11-9**, Peenstress<sup>SM</sup> trace graphiquement la courbe modélisée calculée sur la base des données introduites. En changeant les paramètres de shot peening, l'utilisateur peut optimiser le traitement de shot peening pour obtenir les résultats souhaités. Peenstress<sup>SM</sup> contient également une importante base de données de profils de contraintes obtenus par la méthode de diffraction des rayons X. Ces points expérimentaux peuvent ensuite être superposés pour valider les courbes modélisées. Ce programme est particulièrement utile lorsque l'on grenaille des pièces de faibles épaisseurs pour déterminer au préalable la profondeur de compression afin de réduire au minimum le risque de déformation.

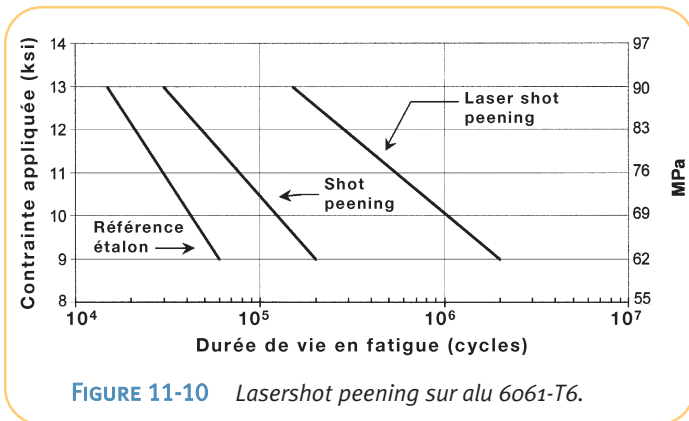
## CHOC LASER LASERSHOT<sup>SM</sup>

Le Lasershot<sup>sm</sup> peening, ou choc laser, utilise des ondes de choc pour introduire une contrainte résiduelle de compression. L'avantage principal de ce procédé est l'introduction d'une contrainte de compression très profonde avec un écrouissage minimal. Des profondeurs de précontrainte dépassant 1 mm sur des aciers cémentés et 2,5 mm sur des alliages d'aluminium sont couramment obtenues.

Les méthodes conventionnelles de grenailage ne peuvent atteindre qu'un tiers de ces profondeurs. Un autre centre d'intérêt est la relaxation thermique de la contrainte résiduelle obtenue qui est moins

importante que celle générée par un shot peening mécanique sur des alliages comme le titane, l'inconel, etc.. (Réf. 11.5).

Metal Improvement Company a activement participé à un groupe de recherche et développement coopératif (CRADA) avec le Laboratoire National Lawrence Livermore (USA) pour développer ce procédé. Le procédé utilise un laser solide Nd : Glass (verre dopé au néodyme) de forte énergie et à fort cadencement de tirs. Ce laser est utilisé avec un manipulateur robotisé cinq axes qui permet de traiter une grande variété de pièces.



Les bénéfices d'une couche de compression résiduelle exceptionnellement profonde sont présentés dans la **FIGURE 11-10**. La courbe de fatigue montre les résultats d'essais en fatigue d'éprouvettes en aluminium 6061-T6. Ces essais comparatifs ont été effectués avec des éprouvettes de références, des éprouvettes grenillées mécaniquement et des éprouvettes traitées par choc laser (Réf. 11.6).

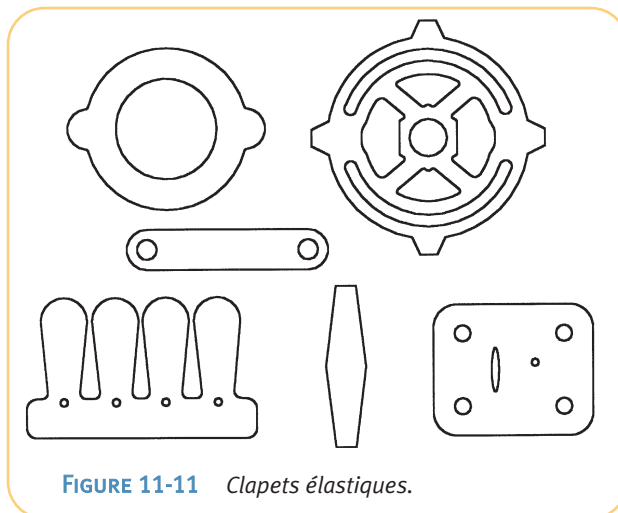
## CLAPETS ÉLASTIQUES – PRODUCTION

Metal Improvement Company fabrique des clapets élastiques utilisés dans les compresseurs, les pompes et moteurs à combustion. Les clapets élastiques sont des pièces estampées de haute précision qui fonctionnent dans des conditions particulièrement difficiles. De strictes tolérances de fabrication sont requises pour réaliser une forme plane et offrir une résistance à la fatigue en flexion et aux charges de contacts élevées.

MIC emploie les techniques de finition Stress-Lite<sup>sm</sup> qui sont conçues pour produire un état de surface spécifique et des arêtes arrondies nécessaires pour la durée de vie de la pièce. Pour des applications très chargées, le Stress-Lite<sup>sm</sup> peut être associé au shot peening.

Les résultats suivants comparent la performance de clapets élastiques traités avec Stress-Lite<sup>sm</sup> et avec ou sans shot peening (Réf. 11.7) :

- estampé : 47 000 cycles;
- Stress-Lite<sup>sm</sup> : 62 000 cycles;
- Stress-Lite<sup>sm</sup> + shot peening : 194 000 cycles.



La **FIGURE 11-11** représente une sélection des nombreuses formes complexes de clapets fabriqués par MIC.



## PUBLICATIONS TECHNIQUES & HORS SÉRIES

MIC possède une grande collection de publications techniques concernant la fatigue et la corrosion des métaux, et le shot peening. Les hors séries disponibles sont listés à la fin de cette brochure technique. Nous vous invitons à prendre contact avec le service technique de la division MIC la plus proche ou à visiter notre site web [www.metalimprovement.com](http://www.metalimprovement.com) si vous souhaitez un complément d'information concernant le shot peening.

## TRAITEMENT THERMIQUE

Metal Improvement Company possède un réseau d'unités de traitement thermique des métaux. Ces usines sont listées au dos de la couverture. Afin de vous offrir le meilleur service en fonction de vos besoins en traitement thermique comme en shot peening, MIC vous proposera des solutions originales de sous-traitance et de production.

### RÉFÉRENCES :

- 11.1 *Happ; Shot Peening Bolt Holes in Aircraft Engine Hardware; 2nd International Conference on Shot Peening; Chicago, IL May 1984*
- 11.2 *Lanke, Hornbach, Breuer; Optimization of Spring Performance Through Understanding and Application of Residual Stress; Wisconsin Coil Spring Inc., Lambda Research, Inc., Metal Improvement Co. Inc.; 1999 Spring Manufacturer's Institute Technical Symposium; Chicago, IL May 1999*
- 11.3 *Metallurgical Associates, Inc; Waukesha, WI 1999*
- 11.4 *Muhr; Influence of Compressive Stress on Springs Made of Steel Under Cyclic Loads; Steel and Iron, December 1968*
- 11.5 *Prevey, Hornbach, and Mason; Thermal Residual Stress Relaxation and Distortion in Surface Enhanced Gas Turbine Engine Components, Proceedings of ASM/TMS Materials Week, September 1997, Indianapolis, IN*
- 11.6 *Thakkar; Tower Automotive fatigue study 1999*
- 11.7 *Ferrelli, Eckersley; Using Shot Peening to Multiply the Life of Compressor Components; 1992 International Compressor Engineering Conference, Purdue University*



## CONTRÔLE DU PROCÉDÉ

Le shot peening contrôlé diffère de la majorité des procédés de fabrication dans le fait qu'il n'y a pas de méthode non destructive pour confirmer qu'il a été réalisé en accord avec les spécifications. Les techniques telles que l'analyse par diffraction des rayons X nécessitent qu'une pièce soit sacrifiée pour obtenir un profil des contraintes en profondeur. Pour s'assurer que les spécifications du shot peening ont bien été respectées sur des lots en production, les contrôles de procédé suivants doivent être assurés en permanence :

- media de grenailage ;
- intensité Almen ;
- recouvrement ;
- machines et équipements de production.

MIC satisfait ou dépasse les critères de qualité les plus sévères ainsi que les normes et spécifications établies pour toutes les industries, y compris aéronautiques et automobiles. MIC est certifié et/ou est conforme aux normes ISO 9002 et QS 9000.

## CONTRÔLE DES BILLES

### Formes acceptables



### Formes inacceptables

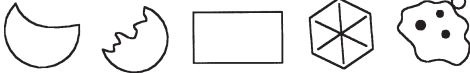


FIGURE 12-1 Formes des billes.

La FIGURE 12-1 montre les formes acceptables et inacceptables des média. Le média de grenailage doit être de forme globalement

sphérique. Lorsque le média casse sous l'impact, les débris doivent être éliminés pour éviter d'endommager la surface. La FIGURE 12-2A (agrandissement x100) met en évidence les endommagements et les sites potentiels d'amorçage de fissuration en surface causés par l'utilisation de billes cassées.

La FIGURE 12-2B (agrandissement x100) montre à quoi doit ressembler une surface correctement grenillée.

Le diamètre des billes doit être uniforme. L'énergie de l'impact transmise par le média est fonction de sa masse et de sa vitesse. Une bille plus grosse a une masse et une énergie d'impact plus forte. Si un mélange de billes de tailles différentes est utilisé pour le grenailage, les plus grosses billes créeront des zones de compressions résiduelles plus profondes. La couche en compression sera hétérogène et entraînera des résultats en fatigue incohérents. La FIGURE 12-3A montre un lot de billes de taille et de forme correctes. La FIGURE 12-3B montre des billes inacceptables.



FIGURE 12-2A Endommagement en surface créé par des billes cassées.

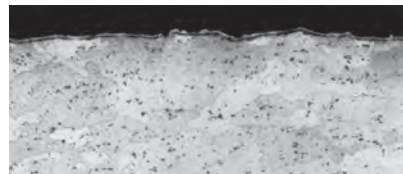


FIGURE 12-2B État de surface typique avec des billes de bonne qualité.



FIGURE 12-3A Billes de bonne qualité pour le shot peening.



FIGURE 12-3B Billes inacceptables de mauvaise qualité.



Pour éliminer correctement des billes trop grosses et trop petites, MIC utilise un système de tamisage dynamique. Pour éliminer correctement les billes cassées, on introduit les billes dans un séparateur à spirales intérieures ouvertes et extérieures enveloppantes. Le système est basé sur le différentiel de vitesse entre les billes sphériques qui roulent et les billes cassées qui avancent par à-coups. L'alimentation des billes se fait par une goulotte au sommet du cône de la **FIGURE 12-4**. Les billes tombent dans la trémie conique, puis dans la spirale intérieure. Les billes sphériques prendront assez de vitesse pour s'éjecter dans la spirale extérieure et pourront ainsi être recyclées. Les billes cassées roulant très mal resteront dans la spirale intérieure d'où elles seront éliminées.



**FIGURE 12-4** Système de tri pour billes de shot peening.

## CONTRÔLE DE L'INTENSITÉ

L'intensité du shot peening est la mesure de l'énergie du flot de billes.

C'est un des moyens essentiels pour assurer la reproductibilité de procédé. L'énergie du flot de billes est en relation directe avec la contrainte de compression qui est introduite dans une pièce. L'intensité peut être augmentée en utilisant de plus grandes billes et/ou en augmentant la vitesse du jet de billes. Les autres variables à considérer sont l'angle d'incidence et les types de billes.

L'intensité est mesurée en utilisant des éprouvettes Almen. Une éprouvette Almen est une plaquette d'acier à ressort SAE1070 qui est grenillée sur un côté seulement. La contrainte résiduelle de compression du grenillage fera fléchir l'éprouvette Almen qui formera un arc convexe par rapport à la surface grenillée (**FIGURE 12-5**). La hauteur de la flèche de l'éprouvette Almen est fonction de l'énergie du jet de billes et sa mesure est très fiable.

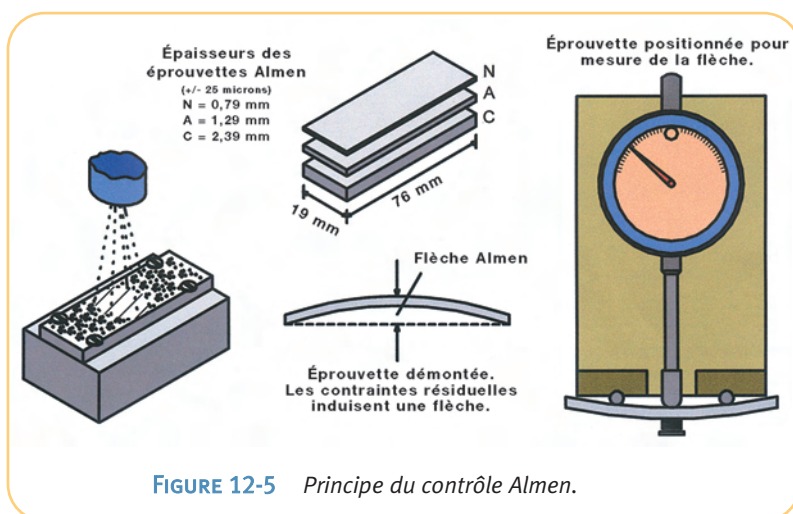
Il existe trois types d'éprouvette Almen qui sont utilisées en fonction de l'application du grenillage. Plus on utilise un shot peening intense, plus l'éprouvette Almen utilisée est épaisse :

- éprouvette "N" : épaisseur = 0,79 mm ;
- éprouvette "A" : épaisseur = 1,29 mm ;
- éprouvette "C" : épaisseur = 2,39 mm.

L'intensité Almen est la hauteur de la flèche mesurée par un comparateur Almen suivie par la désignation de l'éprouvette Almen. La désignation appropriée pour 0,30 mm de hauteur de flèche en utilisant une éprouvette

"A" est F 0,30A (ou plus usuellement F 30A). Le domaine d'utilisation d'une éprouvette Almen est de 0,10 à 0,60 mm. En pratique, une éprouvette Almen plus épaisse est souvent utilisée si l'intensité est au-dessus de 0,50 mm.

Pour la même intensité de grenillage, la flèche obtenue avec une éprouvette "N" est approximativement 3 fois celle obtenue avec une éprouvette "A" qui est elle-même environ 3 fois celle obtenue avec une éprouvette "C".



**FIGURE 12-5** Principe du contrôle Almen.



Les éprouvettes Almen sont montées sur des blocs Almen qui sont fixés sur une pièce rebutée ou sur un outillage mécano soudé de forme approchante (FIGURE 12-6). Les blocs Almen doivent être installés dans les zones où la vérification de l'énergie de l'impact est cruciale. L'intensité réelle est vérifiée et enregistrée avant de traiter la première pièce de chaque lot. Cela permet de vérifier que la machine de grenailage est correctement réglée et fonctionne en conformité avec le procédé approuvé. A la fin du traitement du lot de pièces, l'intensité est vérifiée de nouveau pour s'assurer que les paramètres de traitement n'ont pas dérivé. Dans le cas de longs cycles de traitement, des vérifications d'intensité seront exécutées en cours de production en fonction des exigences de qualité.



FIGURE 12-6 Montage porte éprouvette Almen.

**Saturation (vérification de l'intensité) :** la vérification initiale d'un procédé pendant son développement nécessite d'établir une courbe de saturation. Le temps de saturation est défini au premier point de la courbe à partir duquel en doublant le temps d'exposition, la hauteur d'arc n'augmentera pas de plus de 10 %. La courbe de saturation est définie en grenillant une série d'éprouvettes Almen dans une machine pré-réglée afin de définir le temps de saturation.

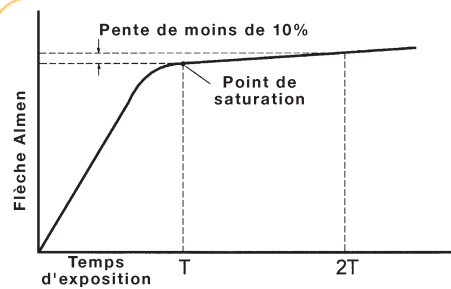


FIGURE 12-7 Courbe de saturation.

La FIGURE 12-7 montre qu'en doublant le temps de grenailage de l'éprouvette Almen (2T) par rapport au temps initial (T) la hauteur de l'arc Almen augmente de moins de 10 %. Cela signifie que le processus atteint la saturation au temps T. La saturation établit l'intensité réelle du jet de grenailles dans une zone précise de la pièce et pour un réglage machine spécifique.

Il est important de ne pas confondre la saturation avec le recouvrement. Le recouvrement est décrit dans le prochain paragraphe comme étant le pourcentage de la surface couverte par les empreintes de grenailage. La saturation est utilisée pour trouver le temps d'exposition définissant l'intensité. La saturation et le recouvrement ne se produisent pas nécessairement en même temps. Ceci est dû au fait que le recouvrement est déterminé sur la surface de la pièce réelle qui est plus ou moins dure. La saturation est déterminée en utilisant des éprouvettes Almen qui sont en acier à ressort SAE1070 traitées à 44-50 HRC.

## CONTRÔLE DE RECouvreMENT

Le recouvrement complet d'une surface grenillée est essentiel à la mise en œuvre d'un shot peening de haute qualité. Le recouvrement est le ratio entre la surface initiale et la surface couverte par les empreintes du shot peening. Le recouvrement ne doit jamais être en dessous de 100 % car les fissures de corrosion sous tension et de fatigue peuvent se développer dans une zone non grenillée qui n'est pas enchâssée dans un volume comprimé si minime soit-elle. Les FIGURES 12-8A et 12-8B ci-contre montrent un recouvrement complet et un recouvrement partiel.

Si le recouvrement spécifié est supérieur à 100 % (par exemple 150 %, 200 %) cela signifie que le temps de traitement sera le temps pour réaliser 100 % multiplié par ce facteur. Un recouvrement de 200 % double donc le temps de traitement pour 100 % de recouvrement.

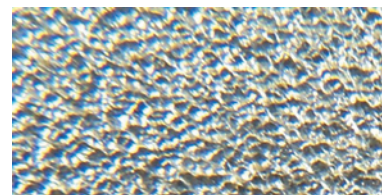


FIGURE 12-8A Recouvrement complet de shot peening.

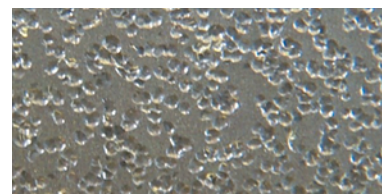


FIGURE 12-8B Recouvrement partiel de shot peening.





**PEENSCAN® (Vérification du recouvrement)** - La détermination du taux de recouvrement du shot peening est assez facile sur des matériaux de faibles duretés car les impacts sont très visibles. Une loupe à grossissement x10 est parfaitement adéquate dans ce cas. Dans de nombreuses applications, la détermination de recouvrement est plus difficile. Alésages, petits rayons, matériaux durs et grandes surfaces à traiter sont autant de difficultés supplémentaires dans la détermination de recouvrement.

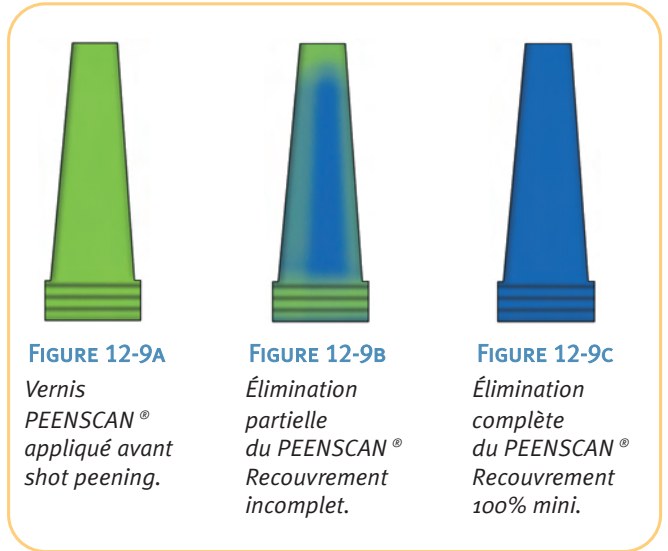
C'est la raison pour laquelle MIC a développé le procédé PEENSCAN® utilisant un vernis fluorescent DYESCAN®. PEENSCAN® est idéal pour mesurer l'uniformité et le taux de recouvrement dans des conditions difficiles. La couleur fluorescente jaune vert n'est pas visible dans des conditions d'éclairage normal et le contrôle doit être fait sous lumière UV.

Le revêtement peut être appliqué en immersion, au pinceau ou par pulvérisation sur la pièce à analyser. La surface recouverte est ensuite grenillée et les billes lors de l'impact enlèvent le vernis fluorescent à un taux proportionnel au taux de recouvrement réel. Lorsque la pièce est à nouveau contrôlée sous lumière UV, les hétérogénéités de recouvrement apparaissent clairement. Les paramètres de shot peening peuvent alors être ajustés jusqu'à ce que la procédure PEENSCAN® confirme l'oblitération complète de la zone concernée.

Les FIGURES 12-9A à 12-9C montrent le principe du procédé PEENSCAN®. Les figures sont des simulations informatiques d'une pale de turbine, en vert est représenté le vernis fluorescent

(jaune vert fluo sous UV). A mesure que le vernis (en vert) est enlevé par les impacts du shot peening, le matériau (en bleu) est de plus en plus visible jusqu'à indiquer le recouvrement complet.

Le procédé de contrôle PEENSCAN® a montré qu'il était très supérieur au contrôle à la loupe à grossissement x10.



**FIGURE 12-9A**  
Vernis PEENSCAN® appliqué avant shot peening.

**FIGURE 12-9B**  
Élimination partielle du PEENSCAN® Recouvrement incomplet.

**FIGURE 12-9C**  
Élimination complète du PEENSCAN® Recouvrement 100% mini.

## MACHINES AUTOMATIQUES DE SHOT PEENING

Dans le monde entier, les unités MIC sont équipées de machines de shot peening automatisées et similaires. Lorsque cela est demandé, ce réseau permet une duplication ou un transfert efficace, économique et fiable d'un procédé de shot peening entre deux usines MIC.

MIC propose également le shot peening contrôlé par ordinateur (SPCO). Le SPCO est destiné aux pièces critiques qui nécessitent un enregistrement des données en complément de notre Certificat de conformité aux spécifications de shot peening (AMS-S-13165, MIL-S-13165C, AMS 2430, NFL 06831/832, etc.). Les pièces critiques qui intègrent le shot peening dès la conception doivent utiliser le SPCO tel que spécifié dans la norme AMS 2432 par exemple.



MIC a développé des machines auto-contrôlées par ordinateur qui sont capables de contrôler, de réguler et de documenter les paramètres suivants du procédé de grenailage :

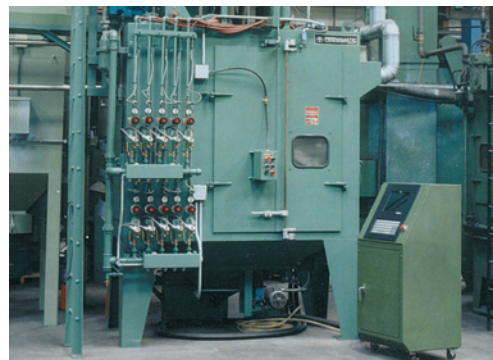
- pression d'air et débit de billes à chaque buse ;
- vitesse de rotation et débit de billes de chaque turbine ;
- vitesse de rotation et/ou de translation de la pièce ;
- vitesse de déplacement des buses ;
- temps de cycle.

Ces paramètres sont en permanence surveillés et comparés aux valeurs limites programmées. Si une dérive est détectée, la machine va automatiquement s'arrêter dans la seconde et indiquera la nature et l'étendue de la défaillance. La machine ne pourra pas reprendre son cycle tant que les paramètres machine ne seront pas corrigés.

Un rapport imprimé de l'historique du traitement est disponible en fin de cycle SPCO. Toute interruption du procédé est enregistrée sur ce document. Ce rapport est archivé par le service qualité MIC et reste disponible pour consultation. La **FIGURE 12-10A** montre une machine SPCO utilisée pour le shot peening d'alésages intérieurs de pièces aéronautiques. La **FIGURE 12-10B** est une machine SPCO multi-buses. Ces deux photos montrent sur le côté des machines leur unité de commande et de contrôle.



**FIGURE 12-10A** Machine auto-contrôlée à lance pour shot peening des alésages.



**FIGURE 12-10B** Machine de shot peening auto-contrôlée multi-buses.

## ÉTUDE DE CAS

### LE SPCO POUR AUGMENTER LA DURÉE DE VIE DES RÉACTEURS

Le SPCO a connu un vif intérêt lorsque la FAA a évalué l'augmentation du potentiel d'un réacteur aéronautique de 700 à 1 500 cycles de vol entre deux révisions. Ce gain a permis à ce moteur conçu pour des avions militaires de rentrer sur le marché de l'aviation civile.

Il y avait très peu de possibilités d'amélioration sans modifier la conception, aussi le fabricant du moteur a choisi d'appliquer le shot peening pour augmenter la durée de vie des disques de turbine et des plaques de refroidissement. Le SPCO a permis de s'assurer que tous les paramètres de production de ces pièces critiques étaient soigneusement contrôlés et reproduits avec précision (Réf. 12.1).



## SPÉCIFIER LE SHOT PEENING

La **FIGURE 12-11** montre le schéma d'un arbre cannelé monté sur deux paliers dans un ensemble mécanique. Les cannelures extérieures et les rayons adjacents sont des zones typiques d'initiation de fissures de fatigue de flexion et/ou de torsion. Dans ce cas, le bureau d'études doit spécifier le shot peening au plan comme suit :

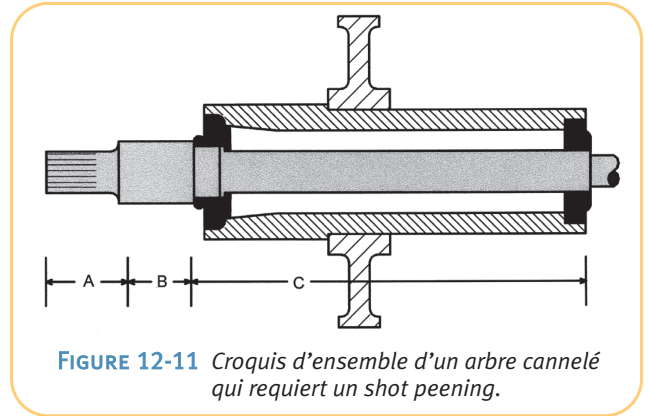
- zone A : à grenailler impérativement ;
- zone B : débordement autorisé ;
- zone C : masquage imposé.

Les informations suivantes doivent apparaître sur le plan :

- shot peening des cannelures et des rayons adjacents en utilisant une bille MI 110H (BA 300 D) avec intensité de 0,006" - 0,009" A (F 15-22A) ;
- 100 % de recouvrement minimum sur les cannelures contrôlé par PEENSCAN® ;
- débordement acceptable sur le plus grand diamètre adjacent ;
- masquage des portées de roulement et de la zone centrale de l'arbre ;
- shot peening suivant la norme AMS-S-13165.

Il est important de noter que si un contrôle non destructif est demandé, celui-ci devra être fait avant shot peening. Le shot peening a tendance à masquer et/ou à fermer les petites fissures en surface, ce qui fausse les résultats du contrôle non destructif.

Metal Improvement Company a plus de cinquante ans d'expérience dans l'étude des choix paramétriques du shot peening. MIC excelle dans le choix des types de billes et des intensités appropriés pour toutes les applications en corrosion sous tension et/ou en fatigue. Les services techniques MIC du monde entier sont listés au dos de la couverture de cette documentation technique.



**FIGURE 12-11** Croquis d'ensemble d'un arbre cannelé qui requiert un shot peening.

### RÉFÉRENCES :

12.1 Internal Metal Improvement Co. Memo



1. "Shot Peening of Engine Components"; J. L. Wandell, MIC, Paper N<sup>o</sup> 97 ICE-45, ASME 1997.
2. "The Application of Microstructural Fracture Mechanics to Various Metal Surface States"; K. J. Miller and R. Akid, University of Sheffield, UK.
3. "Development of a Fracture Mechanics Methodology to Assess the Competing Mechanisms of Beneficial Residual Stress and Detrimental Plastic Strain Due to Shot Peening"; M. K. Tufft, General Electric Company, International Conference on Shot Peening 6, 1996.
4. "The Significance of Almen Intensity for the Generation of Shot Peening Residual Stresses"; R. Hertzog, W. Zinn, B. Scholtes, Braunschweig University and H. Wohlfahrt, University GH Kassel, Germany.
5. "Computer Monitored Shot Peening: AMEC Writes New AMS Specification"; Impact: Review of Shot Peening Technology, Metal Improvement Company, Inc., 1988.
6. "Three Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Shot-Peening Induced Residual Stresses"; S. A. Meguid, G. Shagal and J. C. Stranart, University of Toronto, Canada, and J. Daly, Metal Improvement Company, Inc.
7. "Instrumented Single Particle Impact Tests Using Production Shot: The Role of Velocity, Incidence Angle and Shot Size on Impact Response, Induced Plastic Strain and Life Behavior"; M. K. Tufft, GE Aircraft Engines, Cincinnati, OH., 1996.
8. "Predicting of the Residual Stress Field Created by Internal Peening of Nickel-Based Alloy Tubes"; N. Hamdane, G. Inglebert and L. Castex, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France.
9. "Three Innovations Advance the Science of Shot Peening"; J. S. Eckersley and T. J. Meister, MIC, Technical Paper, AGMA, 1997.
10. "Tech Report: Surface Integrity"; Manufacturing Engineering, 1989.
11. "Optimization of Spring Performance Through Understanding and Application of Residual Stresses"; D. Hornbach, Lambda Research Inc., E. Lanke, Wisconsin Coil Spring Inc., D. Breuer, Metal Improvement Company, Inc.
12. "Plastically Deformed Depth in Shot Peened Magnesium Alloys"; W. T. Ebiara, U. S. Army, N. F. Fiore and M. A. Angelini, University of Notre Dame.
13. "Improving the Fatigue Crack Resistance of 2024-T351 Aluminium Alloy by Shot Peening"; E. R. del Rios, University of Sheffield, and M. Trooll and A. Levers, British Aerospace Airbus, England.
14. "Fatigue Crack Initiation and Propagation on Shot-Peened Surfaces in a 316 Stainless Steel"; E. R. del Rios, A. Walley and M. T. Milan, University of Sheffield, England, and G. Hammersley, Metal Improvement Company.
15. "Characterization of the Defect Depth Profile of Shot Peened Steels by Transmission Electron Microscopy"; U. Martin, H. Oettel, Freiberg University of Mining and Technology, and I. Altenberger, B. Scholtes and K. Kramer, University Gh Kassel, Germany.
16. "Essais Turbomeca Relatifs au Grenailage de l'Alliage Base Titane TA6V"; A. Bertoli, Turbomeca, France.
17. "Effect of Microstrains and Particle Size on the Fatigue Properties of Steel"; W. P. Evans and J. F. Millan, The Shot Peener, Vol. II, Issue 4.
18. "Overcoming Detrimental Residual Stresses in Titanium by the Shot Peening Process"; T. J. Meister, Metal Improvement Company, Inc.
19. "The Effect of Shot Peening on Calculated Hydrogen Surface Coverage of AISI 4130 Steel"; I. Chattoraj, National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur, India, and B. E. Wilde, The Ohio State University, Columbus, OH. Pergamon Press plc, 1992.
20. "Effect of Shot Peening on Delayed Fracture of Carburized Steel"; N. Hasegawa, Gifu University, and Y. Watanabe, Toyo Seiko Co. Ltd., Japan.
21. "New Studies May Help an Old Problem. Shot Peening: an Answer to Hydrogen Embrittlement?"; J. L. Wandell, Metal Improvement Company, Inc.



22. "The Effects of Shot Peening on the Fatigue Behaviour of the Ni-base Single Crystal Superalloy CMSX-4"; J. Hou and W. Wei, University of Twente, Netherlands.
23. "Effect of Shot Peening Parameters on Fatigue Influencing Factors"; A. Niku-Lari, IITT, France.
24. "Weld Fatigue Life Improvement Techniques" (Book); Ship Structure Committee, Robert C. North, Rear Admiral, U. S. Coast Guard, Chairman.
25. "Controlled Shot Peening as a Pre-Treatment of Electroless Nickel Plating"; G. Nickel, Metal Improvement Company, Electroless Nickel '95.
26. "Effects of Surface Condition on the Bending Strength of Carburized Gear Teeth"; K. Inoue and M. Kato, Tohoku University, Japan, S. Lyu, Chonbuk National University, Republic of Korea, M. Onishi and K. Shimoda, Toyota Motor Corporation, Japan, 1994 International Gearing Conference.
27. "Aircraft Applications for the Controlled Shot Peening Process"; R. Kleppe, MIC, Airframe/Engine Maintenance and Repair Conference and Exposition, Canada, 1997.
28. "Prediction of the Improvement in Fatigue Life of Weld Joints Due to Grinding, TIG Dressing, Weld Shape Control and Shot Peening"; P. J. Haagensen, The Norwegian Institute of Technology, A. Drigen, T Slind and J. Orjaseter, SINTEF, Norway.
29. "Increasing Fatigue Strength of Weld Repaired Rotating Elements"; W. Welsch, Metal Improvement Company, Inc.
30. "B 737 Horizontal Stabilizer Modification and Repair"; Alan McGreal, British Airways and Roger Thompson, Metal Improvement Company, Inc.
31. "Residual Stress Characterization of Welds Using X-Ray Diffraction Techniques"; J. A. Pinault and M. E. Brauss, Proto Manufacturing Ltd., Canada and J. S. Eckersley, Metal Improvement Company, Inc.
32. "Towards a Better Fatigue Strength of Welded Structures"; A. Bignonnet, Fatigue Design, Mechanical Engineering Publications, London, England.
33. "ABB Bogie Shot-Peening Demonstration: Determination of Residual Stresses in a Weld With and Without Shot-Peening"; P. S. Whitehead, Stresscraft Limited, England.
34. "The Application of Controlled Shot Peening as a Means of Improving the Fatigue Life of Intramedullary Nails Used in the Fixation of Tibia Fractures"; M. D. Schafer, State University of New York at Buffalo.
35. "Improvement in the Fatigue Life of Titanium Alloys"; L. Wagner and J. K. Gregory, Advanced Materials and Processes, 1997.
36. "Effet du Grenaillage sur la Tenue en Fatigue Vibratoire du TA6V"; J. Y. Guedou, S.N.E.C.M.A., France.
37. "Fretting Fatigue and Shot Peening"; A. Bignonnet et al., International Conference of Fretting Fatigue, Sheffield, England, 1993.
38. "Influence of Shot Peening on the Fatigue of Sintered Steels under Constant and Variable Amplitude Loading"; C. M. Sonsino and M. Koch, Darmstadt, Germany.
39. "Evaluation of the Role of Shot Peening and Aging Treatments on Residual Stresses and Fatigue Life of an Aluminum Alloy"; H. Allison, Virginia Polytechnic Institute, VA.
40. "A Survey of Surface Treatments to Improve Fretting Fatigue Resistance of Ti-6Al-4V"; I. Xue, A. K. Koul, W. Wallace and M. Islam, National Research Council, and M. Bibby, Carlton University, Canada, 1995.
41. "Gearing Up For Higher Loads"; Impact - Review of Shot Peening Technology, Metal Improvement Company, Inc.
42. "Belleville Disk Springs"; Product News, Power Transmission Design, 1996.
43. "Improvement in Surface Fatigue Life of Hardened Gears by High-Intensity Shot Peening"; D. P. Townsend, Lewis Research Center, NASA, Sixth International Power Transmission Conference, 1992.



44. "Review of Canadian Aeronautical Fatigue Work 1993-1995"; D. L. Simpson, Institute for Aerospace Research, National Research Council of Canada.
45. "A Review of Australian and New Zealand Investigations on Aeronautical Fatigue During the Period of April 1993 to March 1995"; J. M. Grandage and G. S. Jost, editors, Department of Defense, Australia and New Zealand.
46. "Shot Peening to Increase Fatigue Life and Retard Stress Corrosion Cracking"; P. Dixon Jr., Materials Week, American Society for Metals, 1993.
47. "The Effect of Hole Drilling on Fatigue and Residual Stress Properties of Shot-Peened Aluminum Panels"; J. Chadhuri, B. S. Donley, V. Gondhalekar, and K. M. Patni, Journal of Materials Engineering and Performance, 1994.
48. "Shot Peening, a Solution to Vibration Fatigue"; J. L. Wandell, MIC, 19th Annual Meeting of The Vibration Institute, USA, 1995.
49. "GE Dovetail Stress Corrosion Cracking Experience and Repair"; C. DeCesare, S. Koenders, D. Lessard and J. Nolan, General Electric Company, Schenectady, New York.
50. "Arresting Corrosion Cracks in Steam Turbine Rotors"; R. Chetwynd, Southern California Edison.
51. "Rotor Dovetail Shot Peening"; A. Morson, Turbine Technology Department, General Electric Company, Schenectady, NY.
52. "Stress Corrosion Cracking: Prevention and Cure"; Impact - Review of Shot Peening Technology, MIC 1989.
53. "The Application for Controlled Shot Peening for the Prevention of Stress Corrosion Cracking (SCC)"; J. Daly, Metal Improvement Company, Inc., NACE Above Ground Storage Tank Conference, 1996.
54. "The Use of Shot Peening to Delay Stress Corrosion Crack Initiation on Austenitic 8Mn8Ni4Cr Generator End Ring Steel"; G. Wigmore and L. Miles, Central Electricity Generating Board, Bristol, England.
55. "Steam Generator Shot Peening"; B&W Nuclear Service Company, Presentation for Public Service Electric & Gas Company, 1991.
56. "The Prevention of Stress Corrosion Cracking by the Application of Controlled Shot Peening"; P. O'Hara, Metal Improvement Company, Inc.
57. "Designing Components Made of High Strength Steel to Resist Stress Corrosion Cracking Through the Application of Controlled Shot Peening"; M. D. Shafer, Department of Mechanical Engineering, Buffalo, NY, The Shot Peener, Volume 9, Issue 6.
58. "Shot Peening for the Prevention of Stress Corrosion and Fatigue Cracking of Heat Exchangers and Feedwater Heaters"; C. P. Diepart, Metal Improvement Company, Inc.
59. "Shot Peening: a Prevention to Stress Corrosion Cracking – a Case Study"; S. Clare and J. Wolstenholme
60. "Thermal Residual Stress Relaxation and Distortion in Surface Enhanced Gas Turbine Engine Components"; P. Prevey, D. Hornbach and P. Mason, Lambda Research, AMS Materials Week, 1997.
61. "EDF Feedback Shot-Peening on Feedwater Plants Working to 360 °C – Prediction Correlation and Follow-up of Thermal Stresses Relaxation"; J. P. Gauchet, EDF, J. Barrallier, ENSAM, Y. LeGuernic, MIC, France.
62. "EDF Feedback on French Feedwater Plants Repaired by Shot Peening and Thermal Stresses Relaxation Follow-up"; J. P. Gauchet and C. Reversat, EDF, Y. LeGuernic, MIC, J. L. LeBrun, LM# URA CNRS 1219, L. Castex and L. Barrallier, ENSAM, France.
63. "Effect of Small Artificial Defects and Shot Peening on the Fatigue Strength of Ti-Al-4V Alloys at Elevated Temperatures"; Y. Kato, S. Takafuji and N. Hasegawa, Gifu University, Japan.



64. "Investigation on the Effect of Shot Peening on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of Superalloy"; C. Yaoming and W. Renzhi, Institute of Aeronautical Materials, Beijing, China.
65. "Effect of Shot Peening and Post-Peening Heat Treatments on the Microstructure, the Residual Stresses and Deuterium Uptake Resistance of Zr-2.5Nb Pressure Tube Material"; K. F. Amouzouvi, et al, AECL Research, Canada.
66. "Transmission Components, Gears – CASE Finishing"; Metal Improvement Company, Inc.
67. "Steam Generator Peening Techniques"; G. M. Taylor, Nuclear News, 1987.
68. "Shot Peening Versus Laser Shock Processing"; G. Banas, F.V. Lawrence Jr., University of Illinois, IL.
69. "Lasers Apply Shock for Strength"; J. Daly, Metal Improvement Company, Inc., The Update, Page 6, Ballistic Missile Defense Organization, 1997.
70. "Surface Modifications by Means of Laser Melting Combined with Shot Peening: a Novel Approach"; J. Noordhuis and J. TH. M. De Hosson, Acta Metall Mater Vol. 40, Pergamon Press, UK.
71. "Laser Shock Processing of Aluminium Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour"; P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, H. P. Lieurade, Materials Science and Engineering, Elsevier Science S.A. 1996, UK.
72. "Laser Peening of Metals – Enabling Laser Technology"; C. B. Dane and L. A. Hackel, Lawrence Livermore National Laboratory, and J. Daly and J. Harrison, Metal Improvement Company, Inc.
73. "Laser Induced Shock Waves as Surface Treatment of 7075-T7351 Aluminium Alloy"; P. Peyre, P. Merrien, H. P. Lieurade, and R. Fabbro, Surface Engineering, 1995.
74. "Effect of Laser Surface Hardening on Permeability of Hydrogen Through 1045 Steel"; H. Skrzypek, Surface Engineering, 1996.
75. "Stop Heat from Cracking Brake Drums"; Managers Digest, Construction Equipment, 1995.
76. "The Ultra-Precision Flappers... Shot Peening of Very Thin Parts"; Valve Division, Impact – a Review of Shot Peening Technology, Metal Improvement Company, Inc., 1994.
77. "The Aging Aircraft Fleet: Shot Peening Plays a Major Role in the Rejuvenation Process"; Impact – Review of Shot Peening Technology, Metal Improvement Company, Inc.
78. "Sterilization and Sanitation of Polished and Shot-Peened Stainless-Steel Surfaces"; D. J. N. Hossack and F. J. Hooker, Huntingdon Research Centre, Ltd., England.
79. "Shot Peening Parameters Selection Assisted by Peenstress Software"; Y. LeGuernic, Metal Improvement Company, Inc.
80. "Process Controls: the Key to Reliability of Shot Peening"; J. Mogul and C. P. Diepart, MIC, Industrial Heating, 1995.
81. "Innovations in Controlled Shot Peening"; J. L. Wandell, Metal Improvement Company, Inc., Springs, 1998.
82. "Computer Monitored Shot Peening, an Update"; J. R. Harrison, Metal Improvement Company, Inc., 1996 USAF Aircraft Structural Integrity Conference.
83. "Shot Peening of Aircraft Components – NAVAIR Instruction 4870.2"; Naval Air System Command, Department of the Navy, USA.
84. "A Review of Computer-Enhanced Shot Peening"; J. Daly and J. Mogul, Metal Improvement Company, Inc., The Joint Europe-USA Seminar on Shot Peening, USA, 1992.
85. "Shot Peening – Process Controls, the Key to Reliability"; J. Mogul and C. P. Diepart, Metal Improvement Company, Inc.
86. "The Implementation of SPC for the Shot Peening Process"; Page 15, Quality Breakthrough, a Publication for Boeing Suppliers, 1993.



87. "Peenstress Software Selects Shot Peening Parameters"; Y. LeGuernic and J. S. Eckersley, Metal Improvement Company.
88. "The Development of New Type Almen Strip for Measurement of Peening Intensity on Hard Shot Peening"; Y. Watanabe et al, Gifu University, Japan.
89. "Interactive Shot Peening Control"; D. Kirk, International Conference on Shot Peening 5, 1993.
90. "Shot Peening: Techniques and Applications"; (Book) K. J. Marsh, Editor, Engineering Materials Advisory Services Ltd., England.
91. "Evaluation of Welding Residual Stress Levels Through Shot Peening and Heat Treating"; M. Molzen, Metal Improvement Co., Inc, D. Hornbach, Lambda Research, Inc.
92. "Effect of Shot Peening of Stress Corrosion Cracking on Austenitic Stainless Steel"; J. Kritzler, Metal Improvement Co., Inc.
93. "An Analytical Comparison of Atmosphere and Vacuum Carburizing Using Residual Stress and Microhardness Measurements"; D. Breuer, Metal Improvement Co., Inc, D. Herring, The Herring Group, Inc., G. Lindell, Twin Disc, Inc., B. Matlock, TEC, Inc.





