

L'ACIER 32CrMoV13 NITRURE PROFOND POUR APPLICATIONS AERONAUTIQUES

D. GIRODIN (SNR Roulements) - JY. MORAUX (AUBERT et DUVAL)

Résumé :

Les roulements pour les applications aéronautiques sont soumis à des conditions de fonctionnement de plus en plus sévères (températures et vitesses de rotations élevées, lubrification déficiente ou polluée, glissement, intégration de fonctions annexes) ainsi qu'à des exigences de fiabilité, de réduction de poids, de coûts de fabrication et de maintenance., qui nécessitent une évolution des aciers pour répondre à ces exigences.

Ces contraintes fonctionnelles et économiques se répercutent sur les matériaux ce qui nécessite la mise en œuvre de solutions métallurgiques adaptées et fiables.

L'acier 32CrMoV13 nitruré profond, en raison des propriétés intéressantes de la couche nitrurée (fins précipités durcissants, contraintes résiduelles de compression) et d'une ténacité élevée à coeur est un matériau bien adapté pour la fabrication de roulements aéronautiques, particulièrement ceux présentant une forte intégration ou une section mince et soumis à des conditions sévères de vitesse, de température et de lubrification.

Zusammenfassung :

Die Lager für Luftfahrtanwendungen müssen unter immer schwierigeren Bedingungen funktionieren (Hohe Lasten und Temperaturen, Mangelschmierung, Verschmutzung, Gleiten der Wälzkörper, Funktionsintegration). Desweiteren steigen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit, Gewichtsverringern und Reduzierung der Fertigungs- und Wartungskosten. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit den Stahl weiter zu entwickeln.

Die Funktionsbedingungen sowie die ökonomischen Bedingungen für den Stahl erfordern die Einführung von geeigneten, zuverlässigen neuen Lösungen.

Der Stahl 32CrMoV13 mit hoher Nitriertiefe ist wegen der Werkstoffeigenschaften der nitrierten Schicht (sehr feine Struktur, Druckspannungen) sowie einer hohen Zähigkeit des Kerns als Werkstoff für Luftfahrtlager sehr gut geeignet. Hier besonders wenn mehrere Funktionen integriert werden oder die Lager einen dünnen Querschnitt haben oder besonders ungünstigen Drehzahlen, Temperaturen oder Schmierbedingungen ausgesetzt sind.

INTRODUCTION

Les roulements pour applications aéronautiques sont des éléments fonctionnant dans des conditions sévères de sollicitation qui nécessitent des matériaux dont les propriétés doivent être adaptées en conséquence.

Dans les turboréacteurs les roulements tournent à grande vitesse, sont soumis à des températures de service élevées, tandis que les systèmes de transmission requièrent des roulements à forte capacité de charge, pouvant résister aux vibrations et aux déformations de structures auxquels ils sont exposés. Dans tous les cas, les évolutions de conception doivent prendre en compte la réduction des coûts de fabrication et de maintenance ainsi que la réduction du poids.

Par ailleurs, parce que ce sont des composants de sécurité, une durée de vie et un niveau de fiabilité extrêmement élevés sont nécessaires.

D'autre part, l'évolution actuelle des moteurs aéronautiques vers des rapports puissance / poids plus élevés implique une augmentation des vitesses et températures de fonctionnement des roulements dont la section est amincie et la conception intégrée.

Des vitesses de rotation de l'ordre de 3 à 4×10^6 NDM associées à la nécessité d'utiliser des serrages importants induisent des contraintes de tractions élevées qui peuvent conduire à une rupture de bague avec les aciers trempés à cœur [1-3]. De plus, dans ces conditions le roulement ne fonctionne pas en permanence en régime de lubrification à film complet (E.H.D) suralimenté mais en régime mixte ou limite (au moins pendant les périodes transitoires) favorable à la fatigue superficielle [4-5].

En conséquence, les matériaux utilisés doivent répondre à une combinaison de propriétés pas toujours compatibles telles que résistance mécanique et ténacité élevées, tenue à chaud, résistance à l'usure, voire à la corrosion, durée de vie en fatigue de roulement, etc ...

C'est la raison pour laquelle les aciéristes et les fabricants de roulements définissent pour chaque application le meilleur produit pour lequel les propriétés métallurgiques et mécaniques sont optimisées. Ceci est obtenu grâce à la composition, au procédé d'élaboration et au traitement thermique de l'acier, mais également à travers le procédé de fabrication des éléments du roulement qui peut s'il est conduit de manière appropriée introduire des caractéristiques complémentaires bénéfiques telles que le fibrage, le profil de contraintes résiduelles et la microstructure.

Dans cet article, nous décrivons les développements et mises au point réalisés sur l'acier 32CrMoV13 nitruré profond en matière de composition et de traitement thermo-chimique de manière à optimiser ses propriétés d'usage, lesquelles sont comparées à celles des aciers à roulement utilisés pour les applications aéronautiques tels que M50, M50NiL et X.20WCr10

L'ACIER 32CRMOV13 NITRURE

Certaines contraintes relatives aux roulements aéronautiques exposées précédemment (intégration de fonction annexes, section mince, grande vitesse, glissement ou lubrification limite ou polluée) requièrent un acier dur en surface et tenace à cœur, c'est à dire un acier traité superficiellement.

Les aciers utilisés actuellement ne répondent pas de manière satisfaisante, principalement en matière de fatigue superficielle, mais également en raison des déformations consécutives au traitement thermique qui nécessitent des surépaisseurs matière et des reprises d'usinage importantes sur pièces après traitement (2 à 3 dixièmes de mm).

Le choix de l'acier 32CrMoV13 nitruré (utilisé par ailleurs en mécanique) pour des applications roulement a été justifié par les raisons suivantes :

- L'azote, de manière analogue au carbone produit un durcissement des aciers, soit par effet de solution solide interstitielle, soit par effet de précipitation de nitrures ou carbonitrures [6]. Les 2 effets se produisent simultanément au cours du traitement de nitruration ce qui provoque un durcissement important et une mise en compression de la couche nitrurée [8].
- La solubilité de l'azote est améliorée par la présence d'éléments d'alliages tels que le manganèse, le chrome et le vanadium [7]. La solubilité de l'azote dans les aciers de nitruration est améliorée à hauteur de 0,3% par addition de Cr, Mn et Mo, comparativement à celle limitée permise dans les aciers au carbone.
- L'azote retarde de manière importante l'adoucissement au revenu des aciers au chrome en modifiant la nature des précipités.
- La résistance à la fatigue structurale augmente avec la profondeur nitrurée en liaison avec le profil de contraintes résiduelles en compression [9-11] qui de plus ne se relaxent pas sous chargement cyclique.
- La tenue à l'endommagement superficiel (usure, micro-écaillage en lubrification déficiente) et en sous-couche (fatigue de roulement en lubrification EHD) constatée sur des engrenages est bonne, à condition toutefois que le profil de dureté soit compatible avec le cisaillement maximal de Hertz [11].
- La réalisation du traitement de nitruration à relativement basse température (500 – 600°C) sur structure prétraitée doit permettre de limiter les déformations tout en préservant une grande stabilité structurale et mécanique à l'échauffement.

CARACTERISTIQUES DE L'ACIER DE BASE

L'acier 32CrMoV13 présente des caractéristiques mécaniques intéressantes après trempe et revenu à haute température (trempe huile 900 – 950°C + revenu 625 – 650°C), en particulier une ténacité élevée supérieure à celle de l'acier M50NiL cémenté.

La composition de cet acier normalisé selon AMS 6481 est donnée dans le tableau 1 et les caractéristiques mécaniques à température ambiante figurent dans le tableau 2.

Il convient de noter que la résistance mécanique a été limitée à 1280MPa en raison d'une baisse de ténacité observée lorsque la résistance devient supérieure à 1300MPa.

Cet acier est peu sensible au vieillissement et les caractéristiques mécaniques demeurent stables à haute température, même après des maintiens de longue durée à 450°C (Tableau 3).

D'autre part, le procédé d'élaboration VIM-VAR utilisé permet d'obtenir la propreté inclusionnaire requise pour la fatigue de roulement et améliore également la limite d'endurance en flexion rotative et la résilience [12].

Propriétés de la couche nitrurée

En liaison avec les conditions de fonctionnement sévères appliquées aux roulements aéronautiques, de bonnes propriétés mécaniques et d'endurance sont nécessaires à la fois pour la surface et la sous couche.

L'azote introduit en phase ferritique pendant le procédé de nitruration forme 2 zones en surface des pièces traitées (Figure 1):

- une couche de combinaison (ou couche blanche révélée par attaque nital), d'une épaisseur de 20 à 30 μm composée de nitrures de fer $\text{Fe}_4\text{N} - \gamma$ et $\text{Fe}_{2.3}(\text{C},\text{N}) - \epsilon$ de dureté élevée mais fragile. Des excroissances intergranulaires de nitrures peuvent aussi être présentes dans la zone de transition avec la couche de diffusion. Cette couche incompatible avec l'application roulement est éliminée systématiquement des surfaces fonctionnelles.
- une couche de diffusion au-delà de la couche de combinaison formée de nitroferrite (azote en solution solide interstitielle dans la ferrite) et de très fins nitrures apparaissant sous forme de disques d'une centaine d'Angstroems de diamètre assimilables à des zones de Guinier-Preston, identifiés comme étant de type CrN (Figure 2). Cette zone comporte également de longs liserés de cémentite (aussi appelés "cheveux d'anges") se développant parallèlement à la surface. L'épaisseur de cette couche de diffusion peut varier selon les paramètres du traitement.

La nituration gazeuse réalisée dans la plage 525 – 575°C pendant une durée de l'ordre de 100h induit les transformations métallurgiques à l'échelle microstructurale exposées ci-dessus qui entraînent des modifications macroscopiques des caractéristiques mécaniques :

- durcissement important de la couche superficielle (dureté en surface comprise entre 730 et 830 HV30) sur une profondeur de 0,55 à 0,75mm (définie de manière conventionnelle à 100HV supérieure à la dureté à cœur) sur pièces finies après enlèvement de la couche de combinaison. Un profil typique de dureté est présenté figure 3 comparativement à celui du M50NiL cémenté.
- génération d'un profil de contraintes résiduelles de compression principalement lié à la formation des nitrures qui provoque un gonflement de la matrice ferritique lequel selon le principe d'équilibre mécanique de la pièce induit le champ de contraintes observé (figure 4). Les contraintes résiduelles ont été mesurées par diffraction de rayons X dans la direction circonférentielle sur une piste de roulement à billes rectifiée et superfinie. Le niveau élevé de contraintes de compression sur les 10 premiers microns est du à l'écroissage de rectification, la remontée entre 100 et 200 μm de profondeur est vraisemblablement à mettre en relation avec la précipitation plus importante dans cette zone.

Les propriétés mécaniques de la couche nitrurée sont conservées de manière analogue à celle de l'acier de base (propriétés à cœur) après 100h de maintien à 450°C (Tableau 3).

D'autre part, la dureté à chaud de la couche nitrurée (zone de surface) est comparable à celle de l'acier M50 (Figure 5).

Durée de vie en fatigue de roulement

L'aptitude à résister à la fatigue de roulement est une exigence primordiale pour un acier à roulement, aussi bien en ce qui concerne la fatigue en sous-couche que la fatigue superficielle. La fatigue en sous-couche, observée dans des conditions de lubrification EHD (lubrification surabondante, bonne rugosité des éléments en contact assurant un film lubrifiant complet et une séparation complète des surfaces) est liée à la propreté inclusionnaire et ne constitue pas le mode d'endommagement critique pour les aciers refondus.

Cependant, le contact de roulement en conditions EHD sans glissement est caractérisé par un champ de contraintes en sous couche, pouvant être approché de manière satisfaisante par la théorie de Hertz, dont le maximum est lié à la charge appliquée. Les caractéristiques mécaniques dans la couche nitrurée ainsi que sa profondeur, de la même manière que pour les couches cémentées, doivent donc être ajustées en fonction du champ de contraintes appliqué.

Pour cela, une méthode de détermination du profil des micro-limites d'élasticité en compression dans la couche nitrurée, basée sur des mesures de nano-indentation, a été développée [13] (Figure 6). La comparaison du profil de cisson de friction déduit de ces micro-limites d'élasticité avec le profil des contraintes de chargement (cisson de Tresca) permet alors d'évaluer les risques potentiels d'endommagement en sous couche. En particulier la limite d'endurance H1 [14-15] correspondant à la pression de Hertz en dessous de laquelle la durée de vie est infinie a été évaluée à 3750 MPa si l'on intègre les contraintes résiduelles de compression de la couche nitrurée (figure 7), alors que cette limite est de 2400 MPa dans le cas de l'acier M50.

Des essais de fatigue au banc, concernant plusieurs types de contact et de roulements ainsi que des conditions de lubrification et de fonctionnement différentes ont été réalisés afin de qualifier la couche nitrurée.

En conditions de lubrification EHD, les résultats obtenus sur butées à billes (banc SNR FB2), sur roulements à billes à gorge profonde 6309 et sur roulements à rouleaux cylindriques NJ212 (banc d'essai standard "S") sont rassemblés dans le tableau 4 ainsi que les conditions d'essai. Pour tous ces essais, les corps roulants sont en acier 100Cr6 ou M50.

Les essais de contact bille / plan réalisés sur machine SNR FB2 sous pression de contact élevée (pression de Hertz = 4200MPa), dans des conditions de lubrification, de température et de charge parfaitement maîtrisées permettent de déterminer la durée de vie en fatigue de roulement intrinsèque du matériau. La durée de vie L10 (correspondant à un taux de survie de 90% des bagues testées) de l'acier 32CrMoV13 est comparable à celle des aciers refondus trempés dans la masse 100Cr6 et M50 et supérieure à celle des aciers de cémentation refondus (M50NiL, X20WCr10) utilisés classiquement pour les roulements aéronautiques.

Les essais sur roulements réalisés en conditions de lubrification en film complet et sous une pression de Hertz de 3300MPa montrent une durée de vie des roulements en acier 32CrMoV13 2 à 3 fois supérieure à celle de roulements en acier M50 et M50NiL pris en référence.

Des essais de butées à billes réalisés sur machine SNR FB2 en régime de lubrification limite (film lubrifiant incomplet, charge transmise essentiellement par les aspérités en contact) sous une pression de contact de 2500 MPa ont montré que le comportement de l'acier 32CrMoV13 est excellent contrairement à l'acier M50NiL qui présente une tendance marquée à la pelade (tableau 5).

Lorsque le lubrifiant est pollué par des débris solides métalliques ou céramiques, la durée de vie est réduite de manière importante et des écaillages superficiels sont initiés au niveau des empreintes générées sur la surface de roulement par le passage de ces particules dans le contact. La durée de vie de l'acier 32CrMoV13 nitruré en présence d'indentations artificielles de type Vickers de diagonales 280 μm , réalisées sur la piste de roulement de butées FB2 est supérieure à celle des aciers M50 et M50NiL (tableau 6).

Dans ce cas, comme précédemment pour la lubrification limite, ceci traduit en particulier l'influence bénéfique des contraintes résiduelles de compression.

Expérience industrielle

Plusieurs séries de bagues de roulements de palier de moteurs aéronautiques (roulements à 3 ou 4 points de contact, bague extérieure mince ou structurale et bague intérieure intégrée de palier haute vitesse) ont été fabriquées. La maîtrise des procédés d'élaboration de l'acier, de nitruration et de fabrication des bagues permet d'obtenir une grande reproductibilité des caractéristiques métallurgiques et mécaniques (tableau 7).

La dureté en surface et la profondeur nitrurée sont conformes aux valeurs spécifiées, avec de faibles dispersions. En ce qui concerne les variations dimensionnelles et les ovalités mesurées sur bagues de diamètre moyen 125 mm et d'épaisseur 5,5 mm, celles-ci sont limitées et très peu dispersées, ce qui autorise une reprise en rectification minimale des pièces après traitement (de l'ordre de 70 - 80 μm), permettant de garantir une épaisseur nitrurée supérieure à 0,550 mm.

CONCLUSIONS :

En raison des excellentes caractéristiques mécaniques et tribologiques de la couche nitrurée et de la bonne ténacité du matériau à cœur, l'acier 32CrMoV13 nitruré profond est un matériau prometteur pour remplir les exigences des roulements aéronautiques opérant dans des conditions sévères telles que grande vitesse, haute température, conditions de lubrification limite ou polluée. Sa grande ténacité à cœur permet aussi d'utiliser cet acier pour la conception intégrée de roulements de forme complexe, ainsi que pour des roulements de grand diamètre à section mince.

Enfin, la réduction des déformations lors du traitement de nitruration permet de réduire les coûts d'usinage.

Remerciements : les auteurs remercient le Laboratoire GEMPPM de l'INSA de Lyon pour les analyses MET et les caractérisations par nano-indentation.

Références bibliographiques :

- [1] Harris, I.A., Ragen M.A. and SPITZER R.F., "The effect of hoop and material residual stress on the fatigue life of high speed rolling bearings" Tribology Transactions, 35, 1, pp 194-198, 1992.
- [2] Pearson P.K., "Fracture and fatigue of high hardness bearing steels under low tensile stresses" SAE technical paper series 901628 International off-Mighway & powerplant congress and exposition Milwaukee, Wisconsin, September 10-13, 1990.
- [3] Averbach, B.L., "Fracture of bearing steels", Metal progress, December 1980, pp 19-24.
- [4] Averbach, B.L. and Bamberger, E.N., "Analysis of bearing incidents in aircraft gas turbine mainshaft bearings", Tribology Transaction, 34 ; 2, pp 241-247, 1991.
- [5] Averbach, B.L., Van Pelt, S.G., Pearson, P.K. and Bamberger, E.N., "Surface initiated spalling fatigue in M50 and M50 NiL bearings", Lubrication engineering, vol.47, 10, pp 837-843, 1991.
- [6] Pickering, F.B., "Physical metallurgy and the design of steels", Applied Sciences Publishers, 1983.
- [7] Pickering, F.B., "Some beneficial effects of nitrogen in steel", Proceeding the high nitrogen steel conference, Lille, 1988.
- [8] Spies, H.J., Oettel, M. and Bergner, D. "Relations between mechanical properties and microstructure of nitride layers on iron based materials", Proc 6th International Symposium - "high purity materials in Science and Technology", Dresden, 1985.
- [9] Mittermeijer, I.J., "Die beziehung zwischen makro- und mikroeigenspannungen und die mechanischen eigenschaften randschichtgehärterer stähle", H.T.M., vol.39, 1, pp 16-29, 1984
- [10] Barralis, J., Castex, L. and Chaize, J.C., "Influence des conditions de traitement sur la distribution des phases et des contraintes résiduelles dans les couches nitrurées", Mémoires et Etudes Scientifiques - Revue de Métallurgie, 83, n° 12, pp 629-642, 1986.
- [11] Castex, L., Barralis, J. and Chaize, J.C., "Etude de la tenue en fatigue de l'acier 32CDV13 nitruré", Mémoires et Etudes Scientifiques - Revue de métallurgie, 84, n°1, pp 13-23, 1987.
- [12] Dubois.P., Moraux.J.Y., "Perspective et évolution des aciers et de leurs traitements thermiques dans les transmissions et équipements aéronautiques", Traitement Thermique, n°318, pp 65-69, 1999.
- [13] El Ghazal, H., " Study of microstructural and mechanical properties of case hardened 16NiCrMo13 and nitrided 32CrMoV13 steels – Application to the estimation of the rolling fatigue life", Thèse, INSA de Lyon, 1999.
- [14] Lamagnère, P., Fougère, R., Lormand, G., Vincent, A., Girodin, D., Dudragne, G., Vergne, F., "A physically based model for endurance limit of bearing steels", Journal of Tribology, vol. 120, pp 421-426, 1998.
- [15] Vincent, A., Lamagnère, P., Lormand, G., Fougères, R., Girodin, D., Dudragne, G., "Approche physique de la limite d'endurance des aciers à roulement", Journées de printemps de la Société Française de Métallurgie, Senlis, 27-28 mai 1998.

Tabelle 1 - Chemische Zusammensetzung von Stahl 32CrMoV13 in %

Tableau 1 - Composition chimique de l'acier 32CrMoV13 en %

	Eléments (%)					
	C	Cr	Mo	V	Mn	Si
32CrMoV13						
AMS 6481	0,29 – 0,36	2,80 – 3,30	0,70 – 1,20	0,15 – 0,35	0,40 – 0,70	0,10 – 0,40

Tabelle 2 - Bedingungen der Wärmebehandlung und mechanische Eigenschaften bei Umgebungstemperatur

Tableau 2 - Conditions de traitement et propriétés mécaniques à température ambiante

Temp. de Revenu °C	Dureté HV50	Caractéristiques de traction			Résilience Charpy J / cm ²	Ténacité K _{1C} MPa√m
		Rm (MPa)	Rp 0,2 (MPa)	Allongemt %		
625 - 650	≤ 400	1180 - 1280	≥ 1000	≥ 15	≥ 70	≥ 100
640	375	1235	1060	18	140	154
620	405	1310	1140	18	125	134

Tabelle 3 - Entwicklung der mechanischen Eigenschaften nach dem Alterungsprozess

Tableau 3 - Evolution des propriétés mécaniques après vieillissement

	Couche nitrurée		Propriétés à coeur					
	surface	Profondeur	Dureté	Rm	Rp 0,2	A	Résilience Charpy (J)	
	HV10	mm	HV50	MPa	MPa	%	20°C	- 40°C
Brut	375	-	375	1245	1050	15	140	105
Nituré	815	0,65	373	1200	995	15,5	125	105
Vieilli								
350°C/100h	837	0,70	373	1195	985	15,5	145	115
450°C/100h	822	0,70	373	1195	985	16	145	125
550°C/20h	785	0,70	373	1185	985	15,5	145	130
550°C/100h	741	0,80	356	1150	945	16	155	130

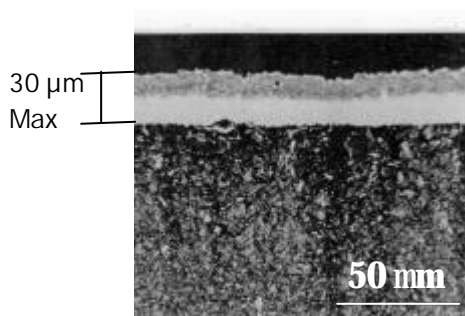


Bild 1 - Struktur der nitrierten Schicht
Figure 1 - structure de la couche nitrurée

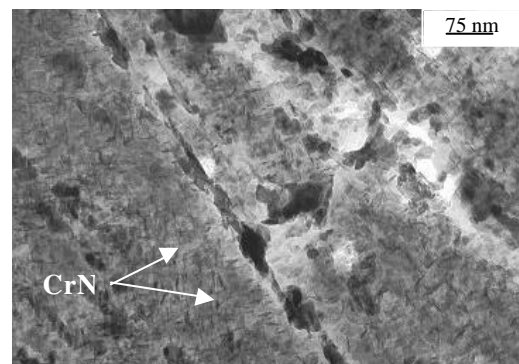


Bild 2 - Feine CrN Nadeln in der Diffusionszone

Figure 2 - précipités fins de CrN dans la zone de diffusion

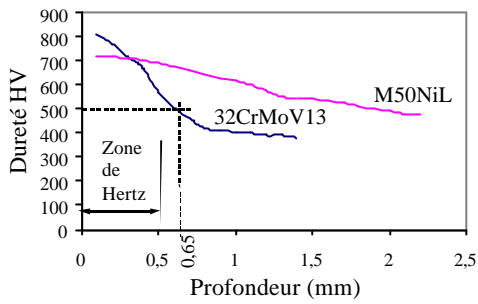


Bild 3 - Härteverlaufskurven
Figure 3 - Profils de dureté

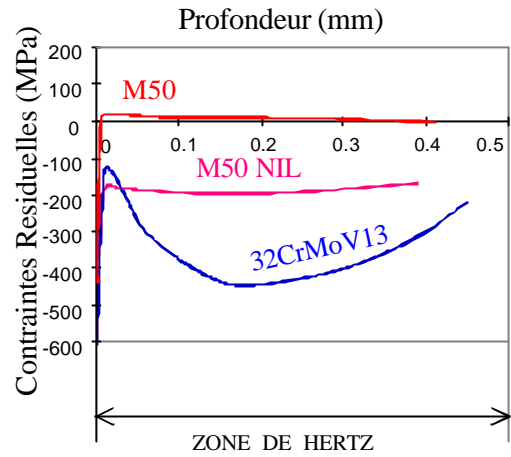


Bild 4 - Eigenspannungskurven
Figure 4 - Profils de contraintes résiduelles

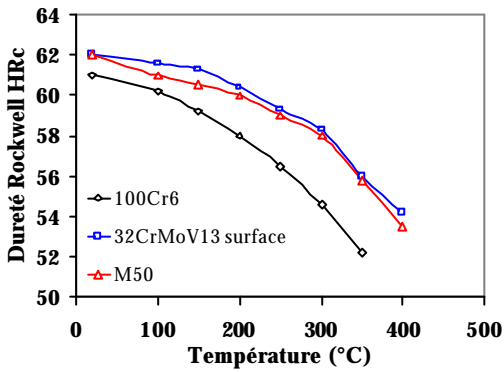


Bild 5 - Härte im heißen Zustand
Figure 5 - Dureté à chaud

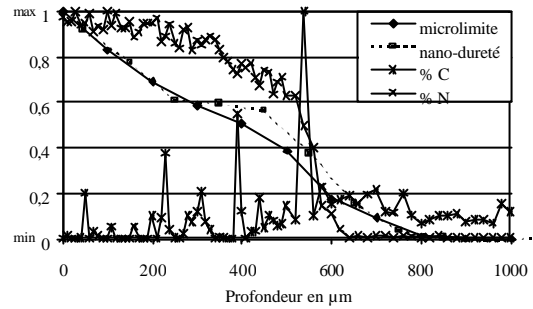


Bild 6 - Vergleich der analytischen und micromechanischen Eigenschaften
Figure 6 - comparaison des profils analytiques et micromécaniques

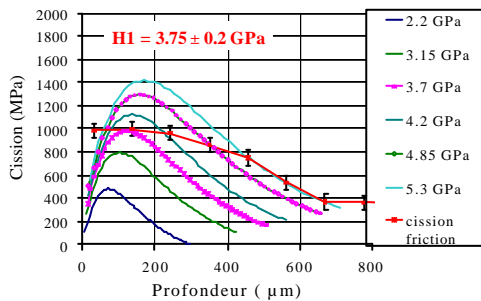


Bild 7 - Abschätzung der max. Flächenpressung für eine unendliche Lebensdauer H1 für nitrierten Stahl
Figure 7 - évaluation de la pression limite de durée de vie infinie H1 pour l'acier nituré

Tabelle 4 - Ermüdungslebensdauer unter EHD -Schmierungsbedingungen

Tableau 4 - Durée de vie en fatigue de roulement en conditions EHD

Type de roulement	Conditions d'essai	Acier	Durée de vie L ₁₀ (h)
Butée FB2	Vitesse 1500 t/min Charge axiale 1075 daN Pression Hertz 4200 MPa Lubrification huile ISO 46 à 40°C	32CrMoV13	≥ 1300
		100Cr6	≥ 1300
		M50	≥ 1300
		M50NiL	850
6309	Vitesse 2200 t/min Charge axiale 530 daN Charge radiale 1600 daN Pression Hertz 3200 MPa Lubrification huile ISO 46 à Temp. ambiante	W20WCr10	990
		32CrMoV13	3863
		M50	942
NJ212	Vitesse 1200 t/min Charge axiale 300 daN Charge radiale 4500 daN Pression Hertz 3100 MPa Lubrification huile ISO 46 à Temp. ambiante	32CrMoV13	1240
		M50	560
		M50NiL	980

Tabelle 5 - Ermüdungslebensdauer des Lagers unter Grenzschmierung

Tableau 5 - Durée de vie en fatigue de roulement sous lubrification limite

Acier	M50NiL	M50	32CrMoV13
Durée de vie L ₁₀ (h)	218 écaillage précoce 49 h (pelade)	> 900 écaillage 590 h	> 900 pas d'écaillage

Tabelle 6 - Versuche zur Wälzlagerermüdung mit künstlichen Indentationen in der Laufbahn

Tableau 6 - Essais de fatigue de roulement avec indentation artificielle de la piste

Acier	Diagonale Vickers (mm)	L ₁₀ (h)	Ecaillages (h)				
			M50	280	503	201	371
M50NiL	280	123	36	99	121	129	188
32CrMoV13	280	> 900	Pas d'écaillage				

Tabelle 7 – Massliche und metallurgische Eigenschaften der nitrierten Teile

Tableau 7 – Caractéristiques métallurgiques et dimensionnelles des pièces nitrurées

	Spécification	Valeur moyenne	Etendue
Profondeur brute (mm)	0,6 - 0,75	0,65	0,64 - 0,67
Profondeur finie (mm)	> 0,55	0,58	0,55 - 0,60
Couche blanche (μm)	> 35	30	
Dureté surface (HV)	720 - 830	805	800 - 810
Dureté à cœur (HV)	330 - 420	390	380 - 400
Gonflement diamètre (μm)	< 150	130	123 - 135
Dispersion gonflement (μm)		20	15 - 30
Ovalité (μm)	< 20	25	20 - 30