



NLR TP 96513

Materiaalkeuze voor vliegende gasturbines

H.J. Kolkman

DOCUMENT CONTROL SHEET

	ORIGINATOR'S REF. NLR TP 96513 U		SECURITY CLASS. Unclassified
ORIGINATOR National Aerospace Laboratory NLR, Amsterdam, The Netherlands			
TITLE Materiaal keuze voor vliegende gasturbines			
PRESENTED AT 15 oktober 1996 tijdens de themadag "NON-Ferro Metalen en Mobiliteit: Materiaalkeuze en Duurzamer Functionaliteit", Autotron, Rosmalen.			
AUTHORS H.J. Kolkman	DATE 960822	pp ref 7 4	
DESCRIPTORS Materiaalkeuze voor vliegende gasturbines Aircraft maintenance Gas turbine engines Corrosion prevention Heat resistant alloys Engine failure Projective coatings Engine parts Steels Environment effects Stress corrosion			
ABSTRACT			

Inhoudsopgave

Materiaalkeuze voor compressoren	3
Corrosiemechanisme	3
Proeven	5
Praktijkvoorbeelden voor rotor en stator	6
Praktijkvoorbeelden voor andere componenten	6
Conclusie	7
Referenties	7
2 Tabellen	
3 Figuren	

Materiaalkeuze voor vliegende gasturbines

Dr.ir. H.J. Kolkman

Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam

Het gebruik van non-ferrometalen in de heetste delen van straalmotoren spreekt vanzelf. In compressoren van straalmotoren - met temperaturen tot 600 °C - worden echter zowel ijzerlegeringen als non-ferrometalen gebruikt. Op grond van mechanische eigenschappen en gewicht verdienen titanium- en nikkellegeringen hier de voorkeur. Dat er toch veel ijzerlegeringen gebruikt worden, komt vanwege de prijs bij nieuwbouw. Anders dan de naam suggereert, zijn bij gebruik echter vaak kostbare maatregelen nodig om roestvaste (en andere) stalen componenten te beschermen tegen corrosie. Initiatie van vermoeiingsscheuren op corrosieputten en spanningscorrosiescheurgroei kunnen uiteindelijk leiden tot vliegtuigongevallen en andere grote schades, zoals met voorbeelden geïllustreerd zal worden. Titanium- en nikkellegeringen zijn in deze toepassing immuun voor corrosie.

In een straalmotor vinden ongeveer dezelfde processen plaats als in een automotor, maar dan ruimtelijk gescheiden. In de *compressor* wordt de inlaatlucht onder druk gebracht door ronddraaiende kranen van rotorbladen, afgewisseld door kranen van stilstaande statorvanen. In de *verbrandingskamer(s)* wordt brandstof ingespoten. In de *turbine* wordt de energie van het decomprimerende gas via ronddraaiende kranen van rotorbladen (weer afgewisseld door kranen van stilstaande statorvanen) omgezet in rotatie van een as. Hiermee worden bij een straalvliegtuig de compressor en hulpapparatuur aangedreven, bij een helikopter bovendien de rotor(en) en bij een turboprop ook de propeller. De voortstuwing van een straalvliegtuig wordt verzorgd door de stuwdruk van de uitstromende gasstraal.

In de *turbine* van een straalmotor kunnen metaaltemperaturen tot 1100 °C heersen. Het gebruik van nikkel- en kobalt-legeringen is hier en in de *verbrandingskamer* vanzelfsprekend. Daarentegen is de *compressor* een interessant terrein om het gebruik van ferro- en non-ferrometalen te vergelijken. Afhankelijk van het type en de instelling van de motor varieert de einddruk tussen de 10 en 30 atmosfeer en de eindtemperatuur tussen 300 en 600 °C.

Gezien het thema "Materiaalkeuze en duurzame functionaliteit" zullen nu de materiaalkeuze voor de compressor en de corrosieproblemen bij het gebruik ervan aan de orde komen.

Materiaalkeuze voor compressoren

De globale samenstelling van de te noemen legeringen is gegeven in Tabel 1.

Er zijn nog industriële gasturbines in gebruik met compressorschoepen gemaakt van aluminium-legeringen. In de loop der tijden zijn de einddrukken en dus temperaturen steeds hoger geworden. Daarom zijn nu in een industriële turbine doorgaans alle compressortrappen gemaakt van een zelfde soort martensitische staal.

Voor een straalmotor is echter het gewicht van belang. Titanium-legeringen hebben dan de voorkeur voor de eerste compressortrappen, zoals bijvoorbeeld blijkt uit de specifieke treksterktes (treksterkte/soortelijk gewicht) bij kamertemperatuur in Tabel 2. Om nog meer gewicht te besparen worden bij de grote fanbladen (de bladen van de eerste compressortrappen) vaak een deel van het metaal vervangen door bijvoorbeeld rubber of een honingraat.

Bij stijgende temperatuur verslechteren de mechanische eigenschappen van titanium-legeringen sterk (zie bijvoorbeeld de laatste kolom in Tabel 2). Daarom bestaan de hogere compressortrappen in moderne straalmotor doorgaans uit nikkel superlegeringen en de eerste trappen uit titanium-legeringen. In oudere straalmotoren zijn deze primaire componenten doorgaans van ijzerlegeringen gemaakt. Daarnaast worden in alle straalmotoren veel ijzerlegeringen gebruikt voor secundaire componenten. Met ijzerlegeringen in compressoren blijken vaak corrosieproblemen op te treden:

Corrosiemechanisme

Een compressor verwerkt grote hoeveelheden lucht. Daarmee passeren veel verontreinigingen. Tijdens de vlucht worden zouten in de compressor afgezet. Bij stilstand trekken de hygroscopische zouten vocht aan. De zoute druppels worden verzuurd door luchtverontreinigingen. Aldus worden ideale omstandigheden voor electrochemische corrosie geschapen. De eigenlijke corrosie vindt plaats bij stilstand, omdat in het grootste deel van de compressor bij bedrijf geen water in vloeibare vorm aanwezig kan zijn.

De chloride-ionen van de zouten tasten lokaal de beschermende oxidehuid van roestvaste stalen aan. De zo ontstane corrosieputten beïnvloeden de werking van de motor nauwelijks. Het grote gevaar is dat er vermoeiingsscheuren op de putten initiëren. Een afgebroken blad of vaan richt een enorme schade aan in de erachter liggende trappen van een snel draaiende compressor.

Behalve putcorrosie kunnen ook andere vormen van electrochemische corrosie optreden zoals spleetcorrosie, galvanische corrosie en spanningscorrosie. Noodzakelijke voorwaarden voor spanningscorrosiescheurgroei zijn de aanwezigheid van een trekspanning, een corrosief milieu en een materiaal dat gevoelig is voor spanningscorrosie. Veel roestvaste en andere stalen zijn gevoelig voor spanningscorrosie in een milieu met chlorides.

In West Europa treden meer corrosieproblemen op dan elders vanwege het corrosieve milieu (zout, vocht, luchtverontreiniging). Zoals uit Fig. 1 blijkt zijn ook voor een bestaande motor (waarvoor de materialen min of meer vast liggen) diverse tegenmaatregelen mogelijk. Een minder corrosiebestendig materiaal kan gecoat worden [1]. Door het "wassen" van compressoren worden de zouten verwijderd [2,3], althans voor de in de gasstroom (en dus bij wassen in de waterstroom) geplaatste onderdelen. Beter is het om een corrosiebestendig materiaal te kiezen.

Proeven

Voor spanningscorrosie bestaan standaard-proeven. Verder is het gebruikelijk dat motorfabrikanten nieuwe motoren in een testbank op corrosie beproeven door bijvoorbeeld gedurende een week zeezout in een werkende motor te injecteren. Daarbij komen echter lang niet alle corrosieproblemen aan het licht, waarschijnlijk omdat waterige corrosie in de praktijk niet bij bedrijf, maar tijdens stilstand optreedt. Die stilstand wordt niet of zeer onvoldoende gesimuleerd. Het NLR beschikt over een installatie voor het beproeven van compressoronderdelen onder gesimuleerde bedrijfsomstandigheden. Verblijf in die installatie wordt regelmatig afgewisseld met verblijf in een klimaatkast om stilstand te simuleren. De resultaten zijn als volgt samen te vatten:

* In ijzerlegeringen (403; 410; 440C; AMS 355; 17-4 PH) trad in verschillende mate putcorrosie op (en voor 410 ook uniforme corrosie).

* Genoemde ijzerlegeringen werden doorgaans goed beschermd door opofferende coatings. Dit zijn elektrisch geleidende coatings die onedeler zijn dan de te beschermen legering. Deze coatings zijn vaak wel gevoelig voor erosie.

* In titanium-legeringen (Ti 6-4; Ti 6-2-4-6; Ti 8-1-1) en nikkel superlegeringen (Inconel 625, 718 en X-750; Incoloy 901; Waspaloy) trad - in tegenstelling tot ijzerlegeringen - geen putcorrosie op.

Deze waarnemingen zijn in overeenstemming met de praktijk.

Praktijkvoorbeelden voor rotor en stator

De compressor-rotor (bladen + wielen) en -stator van moderne straalmotoren zijn doorgaans gemaakt van titanium- en nikkellegeringen. Voor oudere straalmotoren zijn dat ijzerlegeringen. Alle hieronder genoemde praktijkvoorbeelden slaan op nu nog in gebruik zijnde types motoren:

* De rotor en stator van de axiale compressor van een bepaald type helicoptermotor bestaan uit ongecoat 17-4 PH staal. Vermoeding uitgaande van een corrosieput in een vaan leidde tot het afbreken van die vaan en de verwoesting van alle achterliggende trappen van een compressor na slechts 800 gebruiksuren in 3 jaar. Bij de daarop volgende inspectie van andere compressoren moesten een aantal rotortrappen wegens *putcorrosie* worden afgekeurd. Enkele rotoren werden als proef gecoat, maar de coating werd snel weggeërodeerd. De oplossing was dat de motoren dagelijks (na de laatste vlucht) in plaats van wekelijks worden gewassen. Dat is al jaren geheel afdoende, maar geeft wel een grote werklast.

* De wielen (disks) van de compressoren van de straalmotoren van een marine-patrouillevliegtuig zijn gemaakt van een martensitisch staal (410), gecoat met NiCd. De rotorbladen zijn van het eerder genoemde 17-4 PH staal. Er wordt wekelijks gewassen. Desondanks moeten bij onderhoud na 3000 bedrijfsuren veel disks en rotorbladen worden afgekeurd wegens ontoelaatbare *putcorrosie*.

* De compressorrotor en stator van de motor van de F16 van de Koninklijke Luchtmacht zijn gemaakt van drie verschillende titanium- en vijf verschillende nikkellegeringen. Genoemde primaire componenten zijn ongecoat en worden niet gewassen (behalve in gedemonteerde toestand tijdens werkplaatsbezoek). Er zijn dan ook vaak zoutafzettingen te zien, maar na 18 jaar is nog nooit *putcorrosie* (of een andere vorm van corrosie) geconstateerd.

Praktijkvoorbeelden voor andere componenten

Uit kostenoverwegingen zijn in - voor zover bekend - iedere straalmotor diverse ogenschijnlijk minder belangrijke onderdelen van verschillende soorten ijzerlegeringen gemaakt.

* *Spanningscorrosie* in een penntje van een paar tientjes veroorzaakte uiteindelijk het neerstorten van een vliegtuig [4]. De penntjes waren gemaakt van Nitronic 60 staal. De oplossing was vervanging door de nikkel superlegering IN 625.

Er zijn vele honderden van deze motoren over de hele wereld in gebruik. Opvallend is dat het probleem zich het eerst in Nederland voordeed. Dit kan verklaard worden met de corrosieve omgeving, zoals al onder *corrosiemechanisme* werd besproken.

* Verliezen door het terugstromen van lucht via openingen tussen de tips van de rotorbladen en de binnenwand van een compressor moeten voorkomen worden. Daarom zijn die binnenwanden voor elke trap voorzien van een afdichting,

waar de bladen op inslijten. Voor een bepaalde straalmotor bestaat de afdichting uit "felt metal" (een vlechtwerk van Ni-Cr draad) dat in een ring is gesoldeerd. 100 % hechting is niet vereist, zodat zout via het felt metal tot de ringen kan doordringen op plaatsen waar geen soldeer zit. Voor de middelste trappen traden problemen op omdat stukken felt metal door van de ringen afkomstige corrosieproducten naar binnen werden gedrukt. Alleen voor die middelste trappen waren de ringen gemaakt van 340 staal, voor de overige trappen zijn non-ferrometalen gebruikt en traden geen problemen op.

* In een straalmotor kunnen diverse stangenstelsels voorkomen, bijvoorbeeld om de stand van enkele kranen statorvanen te regelen of om de grootte van de uitstroomopening te wijzigen. De stangenstelsels hebben kogellagers. Vaak gaat het om kogels van 440 C (een martensitisch staal) en een lagerschaal van de nikkel superlegering IN 718. Of men hier nu moet spreken van *spleetcorrosie*, *galvanische corrosie* of *putcorrosie* is moeilijk te zeggen, maar de lagers gaan soms vastzitten doordat de ruimte tussen de kogel en de schaal lokaal wordt opgevuld door volumineuze corrosieproducten van de stalen kogel. De lagerschaal van IN 718 corrodeert niet (Fig. 2). De problemen zijn al jaren geleden middels proeven door het NLR voorspeld.

* Van een straalmotor wordt lucht uit een hogere compressortrap afgetapt ten behoeve van de conditionering van ruimtes in het vliegtuig. Het pijpwerk is vaak van roestvast staal. Spanningscorrosie werd gevonden in koppelingen en klembanden van een bepaald type vliegtuig.

De koppelingen zijn gemaakt van onder andere 301 staal en IN 718. *Spanningscorrosie* trad alleen op in het 301 staal. Dit is geïllustreerd in Fig. 3, waar een las te zien is tussen 301 en IN 718. Alleen het 301 staal (geëts) vertoont scheuren. De voor spanningscorrosie

benodigde spanning en corrosieve omgeving waren afkomstig van respectievelijk de inwendige druk en de getransporteerde lucht.

De klembanden zijn gemaakt van 301 of van 21-6-9 staal. In beide stalen trad *spleetcorrosie* en *spanningscorrosie* op. Hier was de trekspanning afkomstig van het aantrekken van de band en van de volumineuze corrosieproducten die de wanden van de spleet uit elkaar drukten. Het corrosieve milieu kwam van buiten.

* In een bepaalde motor werd Ti 4-6 plaatwerk vast gezet met behulp van bouten en onderleggingen van 321 en 347 staal. Rotatie van de ringen werd verhinderd door een omgezet lipje dat in een gaatje in het plaatwerk viel. De bouten werden geborgd door ze aan de onderleggingen te lassen. Soms raakten bouten toch los. Dit werd geweten aan *putcorrosie* in de las. De bouten werden vervangen door bouten van de nikkel superlegering IN 625.

In alle hier genoemde gevallen werden op de breukvlakken en in spleten onder andere natrium, chloor en zwavel gevonden. Dezelfde elementen werden aangetroffen in de spleet tussen kogel en lagerschaal. Een en ander is in overeenstemming met het corrosie mechanisme in Fig. 1.

Conclusie

Het gebruik van ijzerlegeringen in compressoren van straalmotoren geeft in de Westeuropese omgeving vaak ernstige corrosieproblemen, zowel voor de primaire als secundaire componenten. Onder gelijke omstandigheden treden deze problemen niet op bij gebruik van titanium- en nikkellegeringen.

Referenties

1. H.J. Kolkman: 'Coatings for Gas Turbine Compressors' pp. 224-230 in "Materials Development in Turbo-Machinery"; The Institute of Metals, London, 1989.
2. H.J. Kolkman: 'Vernieuwde wasmiddelen voor gasturbines vallen vies tegen'; PT Processtechniek, jaargang 46, december 1991.
3. H.J. Kolkman: 'Performance of Gas Turbine Compressor Cleaners'; ASME paper 92-GT-360.
4. H.J. Kolkman, G.A. Kool en R.J.H. Wanhill: 'Vliegtuigongeval veroorzaakt door spanningscorrosie', Materialen, sept/okt 1994, nr. 5.

Tabel 1 Globale samenstelling van genoemde legeringen in gewichtsprocent

	Fe	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Cu	C	overig
RR 58	1,0	1,2				0,1	basis	2,5		1,5 Mg
403, 410	basis		12						0,05-0,15	
430	basis		17						0,12	
440C	basis		17	0,5					0,95-1,20	
Greek Ascoloy	basis	2,0	13						0,17	3,0 W
AM-355	basis	4,5	15,5	3,0					< 0,15	
301	basis	8,0	18						< 0,15	
321	basis	10	18			< 0,7			< 0,08	
347	basis	12	18		< 1,35				< 0,08	
17-4-PH	basis	4,0	17					4,0	< 0,07	
Nitronic 60	basis	8,5	17						0,07	8,0 Mn 0,14 N 4,0 Si
21-6-9	basis	20	6,5							9 Mn 0,28 N
Ti 6-4						basis	6,0			4,0 V
Ti 6-2-6-4				6,0		basis	6,0			4,0 Zr 2,0 Sn
Ti 8-1-1				1,0		basis	8,0			1,0 V
Inconel 625	3,0	basis	22	9,0	3,6					
Inconel 718	18	basis	19	3,0	5,0	0,8	0,6			
X-750	7,0	basis	15		1,0	2,5	0,7			
Incoloy 901	35	basis	13	6,0		2,5				
Waspaloy	< 2,0	basis	19,5	4,3		3,0	1,3		0,08	13,5 Co

Tabel 2 Specifieke treksterktes

Legering	Type	Spec. treksterkte ($\text{MPa}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^3$) bij:	
		18 °C	550 °C
Ti 6-4	titanium legering	0,24	0,11
Ti 8-1-1		0,23	0,14
RR 58	aluminium legering	0,155	< 0,02
Incoloy 901	nikkel superlegering	0,15	0,13
Greek Ascoloy	martensitisch staal	0,14	0,08