

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4117902号
(P4117902)

(45) 発行日 平成20年7月16日 (2008. 7. 16)

(24) 登録日 平成20年5月2日 (2008. 5. 2)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 N 23/20 (2006. 01)	GO 1 N 23/20
FO 2 C 7/00 (2006. 01)	FO 2 C 7/00 D
FO 2 K 3/00 (2006. 01)	FO 2 K 3/00

請求項の数 36 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願平7-529685	(73) 特許権者	506076684
(86) (22) 出願日	平成7年5月3日 (1995. 5. 3)		プロト マニファクチュアリング リミ テッド
(65) 公表番号	特表平10-503839		カナダ エヌオーアール 1エルO オン タリオ オールドキャッスル ソーラー クレッシェント 2 1 7 5
(43) 公表日	平成10年4月7日 (1998. 4. 7)	(74) 代理人	100059959
(86) 国際出願番号	PCT/US1995/005488		弁理士 中村 稔
(87) 国際公開番号	W01995/031715	(74) 代理人	100067013
(87) 国際公開日	平成7年11月23日 (1995. 11. 23)		弁理士 大塚 文昭
審査請求日	平成14年5月7日 (2002. 5. 7)	(74) 代理人	100082005
審判番号	不服2006-4096 (P2006-4096/J1)		弁理士 熊倉 禎男
審判請求日	平成18年3月6日 (2006. 3. 6)	(74) 代理人	100065189
(31) 優先権主張番号	08/245, 011		弁理士 穴戸 嘉一
(32) 優先日	平成6年5月18日 (1994. 5. 18)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 疲労制限金属部品の有効寿命を測定し且つ延ばす方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

3 5 1 5 kg f / c m² (5 0 0 0 0 ポンド / 平方インチ) より大きい残留圧縮応力を有して製造され、疲労関連破損を受ける個々の金属部品を使用状態から外すときを定めるために金属部品群を管理する方法であって、

(1) 部品群から個々の金属部品を選択し、

(2) X線回折技術を使用して1つまたはそれ以上の応力集中領域における選択された個々の金属部品の表面の残りの残留圧縮応力を測定し、

(3) 1つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力が所定値以下に落ちたら、選択された個々の金属部品を使用状態から外すことを特徴とする金属部品群を管理する方法。

【請求項 2】

残りの残留圧縮応力の所定値がゼロであることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

残りの残留圧縮応力の所定値が製造時の部品における残留圧縮応力の 1 0 0 パーセント未満の所定パーセントであることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

金属部品がガスタービンまたはジェットエンジンに使用される回転部品であることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

金属部品がディスクまたはドラムロータであることを特徴とする請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

所定部品についての残りの残留圧縮応力を測定するために部品群から所定部品を選択すべきかどうか、および選択すべきときを定めるために、部品群における個々の部品についての時間にわたって発生された残りの残留圧縮応力測定値を使用して所定部品の有効寿命を予測するのに使用することができるデータベースを構成することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

製造時の個々の部品の残留圧縮応力を知り、製造時の個々の部品の残留圧縮応力レベルおよび部品群における個々の部品についての時間にわたって発生された残りの残留圧縮応力を使用してデータベースを構成することを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 8】

製造時の個々の部品を初めに使用状態に置く前、或いは置いた後すぐに、個々の部品の残留圧縮応力を測定することを特徴とする請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

個々の部品について規格または設計基準を定め又は、再び定めるのを助けるために上記データベースを使用することを特徴とする請求項 7 に記載の方法。

【請求項 10】

$3515 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ (50000 ポンド / 平方インチ) より大きい残留圧縮応力を有して製造され、使用中に疲労関連破損を受ける部品群中の個々の金属部品の有効寿命を延ばすために金属部品群を管理する方法であって、

20

(1) 部品群からの個々の金属部品を使用状態から外し、

(2) X 線回折技術を使用して 1 つまたはそれ以上の応力集中領域において個々の金属部品の表面の残りの残留圧縮応力を測定し、

(3) 1 つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力を所定値と比較し、

(4) 残りの残留圧縮応力が所定値より高いままであるなら、個々の金属部品を使用状態に戻すか、或いは

(5) 残りの残留圧縮応力が所定値以下であるなら、個々の金属部品を再加工して残留圧縮応力を所定値より高い再加工レベルまで増大させ、次いで個々の金属部品を使用状態に戻すことを特徴とする金属部品群を管理する方法。

30

【請求項 11】

個々の金属部品を使用状態から永久的に外さなければならなくなるまで、個々の金属部品について工程 (1) ないし (5) を周期的に繰り返すことを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

残りの残留圧縮応力の所定値は、製造時の部品における残留圧縮応力の 100 パーセント未満の所定パーセントであることを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

【請求項 13】

金属部品がガスタービンまたはジェットエンジンに使用される回転部品であることを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

40

【請求項 14】

金属部品がディスクまたはドラムロータであることを特徴とする請求項 13 に記載の方法。

【請求項 15】

再加工レベルが製造時の金属部品の残留圧縮応力の少なくとも 50 パーセントであることを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

【請求項 16】

再加工レベルが製造時の金属部品の残留圧縮応力の少なくとも 80 パーセントであることを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

50

【請求項 17】

再加工レベルが製造時の金属部品の残留圧縮応力と同じであることを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

【請求項 18】

再加工レベルが製造時の金属部品の残留圧縮応力と同じであることを特徴とする請求項 14 に記載の方法。

【請求項 19】

所定部品についての残りの残留圧縮応力を定めるために部品群から所定部品を選択すべきかどうか、および選択すべきときを定めるために、部品群における個々の部品についての時間にわたって発生された残りの残留圧縮応力測定値を使用して所定部品の有効寿命を予知するのに使用することができるデータベースを構成することを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

10

【請求項 20】

製造時の個々の部品の残留圧縮応力を知り、製造時の個々の部品の残留圧縮応力および部品群における個々の部品についての時間にわたって発生された残りの残留圧縮応力を使用してデータベースを構成することを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

【請求項 21】

個々の部品を初めに使用状態に置く前、或いは置いた後すぐに、製造時の個々の部品の残留圧縮応力を測定することを特徴とする請求項 20 に記載の方法。

【請求項 22】

個々の部品についての規格または設計基準を定め又は再び定めるのを助けるために上記データベースを使用することを特徴とする請求項 20 に記載の方法。

20

【請求項 23】

$3515 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ (50000 ポンド / 平方インチ) より大きい残留圧縮応力を有して製造され、疲労関連破損を受ける金属部品を使用状態から外すべきときを定める方法であって、

(1) X線回折技術を使用して 1 つまたはそれ以上の応力集中領域において金属部品の表面の残りの残留圧縮応力を測定し、

(2) 1 つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力を所定値と比較し、

30

(3) 1 つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力が所定値より小さいなら、金属部品を使用状態から外すことを特徴とする金属部品を使用状態から外すべきときを定める方法。

【請求項 24】

残りの残留圧縮応力がゼロであることを特徴とする請求項 23 に記載の方法。

【請求項 25】

残りの残留圧縮応力の所定値が製造時の金属部品における残留圧縮応力の 100 パーセント未満の所定パーセントであることを特徴とする請求項 23 に記載の方法。

【請求項 26】

金属部品がガスタービンまたはジェットエンジンに使用される回転部品であることを特徴とする請求項 23 に記載の方法。

40

【請求項 27】

金属部品がディスクまたはドラムロータであることを特徴とする請求項 26 に記載の方法。

【請求項 28】

$3515 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ (50000 ポンド / 平方インチ) より大きい残留圧縮応力を有して製造され、使用中に疲労関連破損を受ける金属部品の有効寿命を延ばすための管理する方法であって、

(1) X線回折技術を使用して 1 つまたはそれ以上の応力集中領域において金属部品の表面の残りの残留圧縮応力を測定し、

50

(2) 1つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力を所定値と比較し、

(3) 残りの残留圧縮応力が所定値より高いままであるなら、金属部品を使用状態に戻すか、或いは

(4) 残りの残留圧縮応力が所定値以下であるなら、金属部品を再加工して残留圧縮応力を所定値より高い再加工レベルまで増大させ、次いで金属部品を使用状態に戻すことを特徴とする金属部品を管理する方法。

【請求項29】

金属部品を使用状態から永久的に外さなければならなくなるまで、個々の金属部品について工程(1)ないし(4)を周期的に繰り返すことを特徴とする請求項28に記載の方法

10

【請求項30】

残りの残留圧縮応力の所定値は、製造時の部品における残留圧縮応力の100パーセント未満の所定パーセントであることを特徴とする請求項28に記載の方法。

【請求項31】

金属部品がガスタービンまたはジェットエンジンに使用される回転部品であることを特徴とする請求項28に記載の方法。

【請求項32】

金属部品がディスクまたはドラムロータであることを特徴とする請求項31に記載の方法

20

【請求項33】

再加工レベルが製造時の金属部品の残留圧縮応力の少なくとも50パーセントであることを特徴とする請求項28に記載の方法。

【請求項34】

再加工レベルが製造時の金属部品の残留圧縮応力の少なくとも80パーセントであることを特徴とする請求項32に記載の方法。

【請求項35】

再加工レベルが製造時の金属部品の残留圧縮応力と同じであることを特徴とする請求項28に記載の方法。

【請求項36】

再加工レベルが製造時の金属部品の残留圧縮応力と同じであることを特徴とする請求項32に記載の方法。

30

【発明の詳細な説明】

発明の分野

本発明は一般に疲労制限金属部品の有効寿命を管理する方法に関する。また、本発明は疲労制限金属部品の有効寿命を測定して延ばす方法に関する。より詳細には、本発明は個々の部品の臨界表面における残留圧縮応力を測定することによって疲労制限金属部品の有用な有効寿命を測定するための非破壊的技術を使用した管理方法に関する。本発明の方法を使用して、残留圧縮応力が所定値以下に減じたら、金属部品を使用状態から外すか、或いは再加工してその残留圧縮応力を増大する。本発明によれば、疲労制限金属部品の残りの有効寿命を非破壊的に測定するための信頼性のある手段を提供することによって疲労制限金属部品を含むタービンエンジンおよび他の機械の管理および作動における安全性および経済性両方を高めることができる。本発明は特に、航空機エンジンを含むガスタービンエンジン等における疲労制限金属部品群を管理するようになっている。このような部品における残留圧縮応力を管理し且つ測定する本発明の方法を使用して、部品の有効寿命を延ばすことができるように残留圧縮応力を増大したり復帰させたりするために部品を再加工するのに適した時期(すなわち、残留引張総力亀裂開始からの永久的悪化の前)を定めることが可能である。本発明の方法を使用して、例えばジェットエンジンまたはタービンエンジンに使用される部品群の全体有効寿命を安全性の顕著な低下なしに最大にすることができる。実際、本発明は航空機および他の産業のために高い安全性および経済性をもたらす

40

50

ことができる。

発明の背景

ガスタービンまたはジェットエンジンの疲労制限金属部品または金属疲労または疲労を受ける他の機械部品を、作動中の破損を回避するために注意深く管理しなければならない。例えば、作動中のジェットエンジンの臨界部品の破損により寿命の損失または他の大惨事の結果をまねく。現在、航空機産業（商業的および軍用的）では、金属疲労に因る可能性のある大惨事的破損を防ぐために疲労制限機械部品の管理に使用される３種類の管理技術または方法がある。これらの方法の各々は有効なデータに基づいて安全性および経済性の問題のバランスをとろうとするものである。例えば、３つの共通に使用される管理方法を一般に開示しているＳ．スレッシュの「金属の疲労」、４９９ ５０２（１９９１）を参照せよ。

10

しばしば「セーフライフ」方法と称するこれらの方法のほとんどの伝統的管理はエンジン製造業者による分析および匹敵できる経験により設定される推定疲労寿命に基づいている。この方法は全部品群における最も短い寿命の部品が破損するものと思われる箇所を推定しようとするものである。適当な安全性限界を考慮した後、その部品について任意の退去点が採用される。この退去点は通常、全取外しサイクルまたは時間で測定される。部品が退去点に達すると、この部品を使用状態から外し、切り離してそれ以上の非公認の使用を防ぐ。一般には最も大きい安全性限界を考慮するが、このような部品の著しい経済的に有用な有効寿命が失われる。事実上、この「セーフライフ」方法は全部品群における最も弱い部品の寿命の推定に基づいており、またこの推定により制御される。

20

いくらかさほど伝統的でない管理技術はいわゆる「フェイルセーフ」方法である。この方法では、同様の部品群における実際の部品（すなわち、コンプレッサ、タービンまたはエンジンに使用されるディスクまたはドラムロータ）で初めの亀裂が検出される全累積有効時間またはサイクル（どれも短い）により最大有効時間またはサイクルが定められる。部品がこのような亀裂を生じると、その累積有効寿命（時間またはサイクルとして）を使用して部品群におけるすべての同様な部品の有効寿命を定める。部品が早期に亀裂を生じると後でわかる場合、その部品を使用して群の許容可能な有効寿命限度を再設定（および短縮）する。部品がその許容可能な有効寿命に達すると、その部品を使用状態から外し、切り離してそれ以上の使用を防ぐ。実際、この「フェイルセーフ」方法もまた全部品群における実際の最も弱い部品に基づいており、またこの部品により制御される。多くの部品はこの最も弱い部品のものを越えて残っている安全／有用な有効寿命の多くの時間をまだ有している。しかし、これらの部品の有用な安全有効寿命を確実に定めることができないので、これらの部品を安全性のために使用状態から外さなければならない。この「フェイルセーフ」方法は一般に、関連した部品群において低サイクル疲労亀裂が検出された円熟した機隊用の航空路産業に使用されている。十分な使用状態データが生じなかった場合、より伝統的な「セーフライフ」方法が一般に使用される。しかしながら、各方法において、多くの残っている安全／信頼性使用時間を有する部品を使用状態から外す。

30

より最近、米国空軍は幾つかのエンジン部品の管理のためのさほど伝統的でない管理技術、いわゆる「原因用退去」方法を首尾よく採用した。この方法では、例えば、蛍光染料浸透または磁粉探傷技術を使用して亀裂について部品を非破壊的に調べる。亀裂が観察されると、その部品だけをすぐに使用状態から退去させる。他の部品については、これらが退去部品以上の累積有効時間を有していても、これらの他の部品を実際に亀裂を生じるまで使用し続ける。安全に作動するには、この方法は個々の部品の周期的な頻繁の点検を必要とする。一般に、部品が古くなると、点検頻度が増すはずである。いずれの場合にも、点検頻度は、点検間の期間が、検出可能な亀裂が実際の破損点まで更に悪化するのに通常必要とされる時間より、好ましくはかなりの差だけ少ないような程度でなければならない。この方法では、個々の部品の点検のためにより頻繁に取外しすることになるが、個々の部品の最大寿命を達成するか、或いは少なくとも近づくことに基づいた潜在的節約が非常に大きい。この方法の主な欠点は、この方法が部品における実際の亀裂の検出に依存していることである。かくして、この方法は一般に、亀裂を確実に且つ一貫して検出することが

40

50

できない部品には適していない。亀裂が形成すると、部品は、実際、これが好機に使用状態から外さなければ、結局は破損、恐らく、大惨事的破損になるような永久的な不可逆な欠陥を有したしまう。更に、この方法は、勿論、検出可能な亀裂の初めの発生と部品の破損との間の普通の時間が比較的短い場合には使用に適していない。しかも、亀裂の発生後すぐに実際の破損が通常起こらないような部品では、このような亀裂が点検後すぐに生じるなら、実際の作動中の破損の恐れが簡単に高まる。なぜなら、部品が欠陥を伴って作動される時間の長さが最大になるからである。従って、この方法は、「セーフライフ」および「フェイルセーフ」方法と比較して、高い安全性リスクを有する。この高いリスクは、恐らく小さいが、まだ顕著である。亀裂が形成したら、部品が使用状態に留まるのが長ければ長いほど、大惨事的破損のリスクが大きくなる。

10

従って、亀裂開始が始まる前、或いは少なくとも、実際の亀裂を観察することができる前（すなわち、永久的且つ不可逆的損失が始まる前）に疲労制限金属部品の残りの有効または有用寿命を測定する非破壊的方法を提供するのが望ましい。また、作動中、金属部品の破損のリスクを著しく増すことなしに疲労制限金属部品の有効または有用寿命を高める方法を提供することが望ましい。このような方法は（商業的および軍用的）航空機産業のために高い安全性および経済性を提供する。本発明のこの方法は一般にこのような改良方法をなす。

発明の概要

本発明は疲労制限金属部品群の管理方法に関する。また、本発明は個々の疲労制限金属部品の残りの有効寿命の検出方法に関する。本発明により管理すべき金属部品としては、製造時の残留圧縮応力の比較的高いレベルを有し、疲労関連破損を受ける金属部品がある。製造時のこのような金属部品の比較的高い残留圧縮応力は、使用した実際の製造方法および/または残留圧縮応力を高めるために実際の製造後のショットピーニング方法または他の低温加工方法による金属部品の後の加工の結果である。好ましくは、製造時の残留圧縮応力は約 5 0 0 0 0 ~ 2 0 0 0 0 0 ポンド/平方インチの範囲、より好ましくは、約 1 5 0 0 0 0 ~ 1 8 0 0 0 0 ポンド/平方インチの範囲である。これらの範囲より高いまたは低い残留圧縮応力を有する部品は、もちろん、本発明の方法により管理することができる。しかしながら、製造時の部品はそれらの所期の使用のために十分な残留圧縮応力を有すべきである。本発明の方法を使用して、このような金属部品の管理における安全性および経済性の向上が期待される。

20

30

金属部品における疲労破損は、ほとんど常に、高い応力環境にさらされる金属部品の表面層に発生される亀裂から生じる。亀裂形成の可能性を減じるには、このような金属部品の製造において、金属の結晶構造の臨界表面層における初めの残留応力が比較的高い圧縮（しばしば 1 7 0 0 0 0 ポンド/平方インチまたはそれ以上まで）状態にあるように多大の注意が払われる。高い荷重および作動温度の条件下で作動中、部品の残留圧縮応力は時間にわたって次第に減少する。残留圧縮応力がゼロに達すると、この傾向が継続してこれらの領域における残留引張応力を増大させる。残留引張応力は材料の表面の極限引張強度以上のレベルまで時間にわたって増大し、亀裂が生じる。使用状態にある部品のこのような亀裂は臨界長さに達するまで広がり、このとき、大惨事的破損が起こる。本発明は顕著な残留引張応力、従って亀裂開始をもたらす条件を回避する金属部品を管理する方法を提供する。高い応力集中領域における残留圧縮応力を監視し、金属部品を圧縮応力の条件下に保持することによって、本発明管理基準としての予期された或いは実際の亀裂形成に依存しない管理プログラムを提供する。

40

本発明の方法では、非破壊的技術（すなわち、X線回折）を使用して関連金属部品における残りの残留圧縮応力を測定する。個々の部品の残留圧縮応力が所定値以下に落ちると、その部品だけ、さらにの注意のために効果的にフラッグで警告する。所定値より低い残留圧縮応力を有する金属部品では、本質的に2つのオプションがある。第1オプションでは、金属部品は使用状態から永久的に外されるだけである。第2オプションでは、金属部品を再加工してその残留圧縮応力を高め、次いで使用状態に戻す。本発明の方法を使用してこのような金属部品を周期的に評価することによって、金属部品の全群の有効寿命を安全

50

且つ効率的に最大にすることができる。

所定値より高い残留圧縮応力を有する金属部品については、その部品の残りの有効寿命を定めることができる。測定された残留圧縮応力と所定値との差が大きければ大きいほど、その部品の残りの有効寿命が大きくなるはずである。このような情報は特定のエンジンまたは応用に使用する部品を調和させる（すなわち、匹敵できる残りの有効寿命を有する部品を調和させる）際に、域いは定期的取外しおよび保守を予定するために（特に部品群についてのかなりの経歴的データが時間にわたって有効になる場合に）有用であるはずである。

本発明の一目的は、残留圧縮応力の比較的高いレベルを有して製造され、疲労関連破損を受ける個々の金属部品を使用状態から外すときを定めるために金属部品群を管理する方法であって、

10

- （１）部品群から個々の金属部品を選択し、
- （２）Ｘ線回折技術を使用して１つまたはそれ以上の応力集中領域における選択された個々の金属部品の表面の残りの残留圧縮応力を定め、
- （３）１つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力が所定値レベル以下に落ちたら、選択された個々の金属部品を使用状態から外すことを特徴とする金属部品群を管理する方法を提供することである。

本発明の他の目的は残留圧縮応力の比較的高いレベルを有して製造され、使用中に疲労関連破損を受ける部品群中の個々の金属部品の有効寿命を延ばすために金属部品群を管理する方法であって、

20

- （１）部品群からの個々の金属部品を使用状態から外し、
- （２）Ｘ線回折技術を使用して１つまたはそれ以上の応力集中領域において個々の金属部品の表面の残りの残留圧縮応力を測定し、
- （３）１つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力を所定値と比較し、
- （４）残りの残留圧縮応力が所定値より高いままであるなら、個々の金属部品を使用状態に戻すか、或いは
- （５）残りの残留圧縮応力が所定値であるか或いはそれ以下であるなら、個々の金属部品を再加工して残留圧縮応力を所定値レベルより高く増大させ、次いで個々の金属部品を使用状態に戻すことを特徴とする金属部品群を管理する方法を提供することである。

30

本発明は好ましくは同様な種類の金属部品の大群を管理する方法に向けられているが、個々の金属部品を試験するのにも使用することができる。かくして、例えば、本発明は定期的な或いは予定した予防保守の一部として、或いは故障により必要とされる修復または取外し手順中、金属部品をそれらの予期有効寿命全体にわたってスポット点検するするのにも使用することができる。かくして、本発明の更に他の目的は残留圧縮応力の比較的高いレベルを有して製造され、疲労関連破損を受ける部品群中の個々の金属部品の有効寿命を延ばすために金属部品群を管理する方法であって、

- （１）Ｘ線回折技術を使用して１つまたはそれ以上の応力集中領域において金属部品の表面の残りの残留圧縮応力を測定し、

40

- （２）１つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力を所定値と比較し、

- （３）１つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力が所定値より小さいなら、金属部品を使用状態から外すことを特徴とする金属部品群を管理する方法を提供することである。

本発明の更に他の目的は残留圧縮応力の比較的高いレベルを有して製造され、使用中に疲労関連破損を受ける金属部品の有効寿命を延ばす管理する方法であって、

- （１）Ｘ線回折技術を使用して１つまたはそれ以上の応力集中領域において金属部品の表面の残りの残留圧縮応力を測定し、

- （２）１つまたはそれ以上の応力集中領域において測定された残りの残留圧縮応力を所定値と比較し、

50

(3) 残りの残留圧縮応力が所定値レベルより高いままであるなら、金属部品を使用状態に戻すか、或いは

(4) 残りの残留圧縮応力が所定値であるか或いはそれ以下であるなら、金属部品を再加工して残留圧縮応力を所定値レベルより高い再加工レベルまで増大させ、次いで金属部品を使用状態に戻すことを特徴とする金属部品群を管理する方法を提供することである。

本発明のこれらおよび他の目的および利点は本明細書および図面を考察することから明らかになるであろう。

図面の説明

第1図は残留圧縮応力を定めるべき応力集中領域を示すジェットエンジンの代表的なディスクを示している。

10

第2図は異なる荷重および温度条件下で作動するタービンディスクについての有効時間の関数としての残留圧縮応力の代表的なプロットを示している。

発明の詳細な説明

本発明は一般に疲労制限金属部品の有効寿命を管理する方法、および疲労制限金属部品の有効寿命を管理し且つ延長させる方法に関する。本発明の方法は個々の部品の臨界表面における残留圧縮応力を定めることによって疲労制限金属部品の残っている有用な有効寿命を測定する非破壊的技術を用いている。残留圧縮応力を個々の部品の残っている有効寿命に相関付けることができる。残留圧縮応力が所定値以下に落ちなければ、部品を使用状態に戻すのがよい。残留圧縮応力が所定値に達するか、或いは所定値以下に落ちれば、部品を永久的に使用状態から外すのがよい。或いは、望むんで適切なら、残留圧縮応力を所定値以上のレベルまで、好ましくは初めに製造されたときの部品の圧縮応力に近似する値まで増大させるように部品を再加工し、次いで部品を使用状態に戻すのがよい。

20

高応力環境にさらされた金属部品の表面層に発生された亀裂から疲労破損が生じることが十分に実証されている。例えば、破損は通常、このような部品における応力集中領域に亀裂が形成されるために起こる。第1図はこのような部品、具体的には、ガスタービンエンジンに使用するディスク10を示している。このようなディスクの破損はしばしば、Z形またはファートリースロット14の内径または底部12のような高応力集中領域の表面層に形成する亀裂によって引き起こされる。これらのZ形またはファートリースロットはコンプレッサおよびタービンブレード(図示せず)を取りつけるために使用される。亀裂形成の可能性を減じるために、通常、金属の結晶構造の臨界表面層における残留応力が高圧縮状態にあるようにこのような部品の製造に非常に注意が払われる。例えば、約17000ポンド/平方インチ程度の残留圧縮応力を有する第1図に示すもののようなタービンディスクが一般に製造される。タービンエンジンにおける作動中(すなわち、高荷重および作動温度の条件)、残留圧縮応力が第2図に示すように時間にわたって次第に減少する。第2図の(20、22、24、26、28を付した)曲線はガスタービンエンジンに使用される異なるタービンディスク10(すなわち、異なる段階)についてのものである。このようなエンジンでは、各ディスクは作動中、異なる荷重/温度条件にさらされる。かくして、残留圧縮応力の減少率は各ディスクすなわち段階ごとに異なる。残留圧縮応力がゼロに達すると、残留引張応力がこれらの領域に生じる。時間にわたって、残留引張応力は材料の表面の最終強度以上のレベルまで増大し、そして亀裂が始まる。使用中の部品におけるこのような亀裂は臨界長さに達するまで広がり、この時に大惨事的な破損が起こる。

30

40

本発明の方法は表面における亀裂の初期の形成を防ぐために応力集中領域における残留圧縮応力を監視する。本発明の方法によれば、性質上の圧縮から引張への応力変化の前に部品を使用状態から外すことによって、或いは応力を圧縮状態に維持することによって、表面亀裂が形成されないか、或いは少なくとも著しく低い率で形成されるように個々の部品を使用することができる。本発明の方法によれば、増大破損または安全上のリスクなしに部品の最大有効寿命を達成することができる。しかも、本発明の方法によれば、増大破損または安全上のリスクなしに個々の有効寿命を著しく延ばすことができる。

実際、或る種類の金属部品について、X線回折技術を使用して個々の部品の表面層にお

50

る残留圧縮応力を1つまたはそれ以上の応力集中領域において測定する。測定する実際の領域は通常、約1.27 cm (2/4インチ) 宛～約2.54 cm (1インチ) 宛の範囲であるが、望むなら、もっと小さいあるいは大きい領域を使用することができる。測定値(または複数の値または平均値)は測定値と比べられる。測定値が所定値より大きいと、部品を使用状態に戻すのがよい。しかしながら、測定値がこの所定値に等しいか或いは所定値以下に落ちると、部品を幾つかの方法で処理するのがよい。第1のオプションでは、部品を使用状態から永久的に外すのがよい。このような場合、部品を切り離すか、或いは他の方法で印付けしてそれ以上の非公認の使用を防ぐ。第2オプションでは、部品をその圧縮応力を増大するように再加工し、次いで使用状態に戻すのがよい。通常、このような部品を一定回数すなわちサイクル数(他の破損機構が支配するまで、或いは部品がもはや設計基準または規格に合わなくなるまで)、再加工し、使用状態に戻すことができる。このような部品を再加工する許容可能なサイクル数一般に、ケースバイケースで定められる。第1図に示すディスクのような或る部品では、一般に、部品がその寸法上の微小構造安定性を保持するかぎり、使用/再加工サイクルを繰り返すことができる。

残留圧縮応力が所定値以上だが、この所定値に近い幾つかの場合には、残留圧縮応力が所定値以下に落ちるのを待つのではなく、その部品をその時に再加工するのが好ましい。例えば、部品が再加工を必要とする前に比較的短い有効寿命(例えば、ゼロポンド/平方インチを有する15000時間における第2図の曲線22を参照)のみを有することを測定残留圧縮応力が示唆すれなら、部品を使用状態に戻し、次いでほんの短い時間後に再加工するのに非計画的な取外しを必要とするのではなく、現在の計画的な可動停止/取外し中に部品を再加工するのがより経済的である。この変更方法が或る場合に適切であって、望ましいかどうかは、大部分、部品が所定値以下に落ちる前に予期された有効寿命により決まる。予期された残りの有効寿命が短い(それにより再測定のために非計画的な取外しを必要とする)なら、残りの有効寿命を有していても、その部品を再加工するのがより経済的である。このような場合、所定値はその部品のみについて効果的に増大される。

当業者はわかるように、任意の種類 of 部品についての残留圧縮応力の所定値は少なくとも部分的に、初めに製造されたときの部品の残留圧縮応力、部品の特有の物理的且つ冶金学的特性、部品を使用する環境および任意の適切な安全要因により決まる。異なる部品群については、部品の設計が異なり、且つ使用中、異なる応力にさらされるため、この所定値は恐らく異なるであろう。同じだが異なる条件および環境で作動する部品群もまた異なる所定値を有することもある。しかも、或る部品では、異なる応力集中領域は異なる所定値を有することがある。例えば、金属部品の異なる領域は通常、異なる応力レベルにさらされ、すなわち、これらの異なる応力レベルを受け、従って異なる率で圧縮応力の変化を受ける。このような場合、初めに所定値に達する領域は通常、部品の配置を制御する。必要ではないが、金属部品を使用状態に設置する前に、或いはその後すぐに金属部品の初めの圧縮残留応力を測定するか、或いは他の方法で知ることが一般に好ましい。初めに製造したときの部品の残留圧縮応力は、規格に合う部品のみを使用し、残りの残留圧縮応力の後の測定の基準をなす。しかも、かかる初めの残留圧縮応力データを本発明の方法により発生されたデータと共に使用して部品規格および設計基準を適切に定めることができたり、再び定めたりすることができる。

所定値を絶対数(例えば、残留圧縮応力のための適当な単位 of 特定値)として、或いは相対数(例えば、始めに製造したときの残留圧縮応力と比較したときの部品の残りの圧縮応力のパーセンテージ)として表すことができる。しかも、或る部品群のための所定値は多くの経歴データが有効になるにつれて時間にわたって変化することがある。例えば、新しく設計された部品では、比較的高い所定値を使用して高い安全性のために予期せぬ破損から保護することが望ましい。しかしながら、有効寿命データが有効になると、顕著な安全性または破損関連問題がこの部品群に見られなければ、所定値を減少させることが適切である。所定の部品群についての所定値を時間にわたって注意深く調整することによって、作動安全性を維持しながら、最適な値に近づけることが可能であるべきである。

或る場合には、約ゼロポンド/平方インチ(または他の適切な単位)の所定値または残留

10

20

30

40

50

圧縮応力の 100% 減少（すなわち、応力が性質上圧縮から引張へ移動する点）が適切である。ゼロポンド/平方インチまたは 100% 減少を管理基準として使用することは、例えば、部品の再加工が実用的でないか、或いは期待されない場合に部品の有効寿命を最大にするのに適切である。しかしながら、殆どの場合、ゼロポンド/平方インチより大きく、或いは 100% 減少より小さい値の所定値が安全性の考慮に基づいて一般に好ましく且つ適切である。このような高い所定値は残留圧縮応力のすべて或いは一部を復帰すべき部品の再加工が期待されない場合に特に好ましい。しかしながら、或る場合には、ゼロポンド/平方インチより小さいか或いは 100% 減少より大きい所定値が適切であることもある。

上述のように、残留圧縮応力は在来の X 線回折技術を使用して非破壊的に測定される。好ましくは残留圧縮応力は持運び可能な X 線回折設備を使用して測定される。このような X 線設備および技術の例は米国特許第 5,125,016 号（1992 年 6 月 12 日）；タイラおよびタナカの「疲労亀裂チップに近い残留応力」（日本鉄鋼協会の第 19 会報；411 18（1979））、ハーティングおよびブリッチェの「X 線回折による三次元残留応力状態の深さ依存性を定める非破壊的方法」（J. Phys. D: Appl. Phys., 1814 16（1993））；カーン等の「変形された単結晶ニッケル系超合金 SS R 99 における格子不一致のクリープ変形誘発変化の X 線研究」（39 Acta Metall. Mater., 2783-94（1991））（これらのすべては参照によりここに組入れられる）に見ることができる。本発明において一般に好ましい持運び可能 X 線設備は例えばエネルギー技術社（P. O. ボックス 22996、レキシントンドライブ、ノックスビル、テネシー 37933）またはアメリカンストレス技術社（61 マクマレイロード、ピッツバーグ、ペンシルバニア 15241）から商業的に得られる。また、他の種類および設計の X 線回折設備または技術を本発明で使用することもできる。通常、このような測定は最小限、計画的取外し中や、他の保守の場合に行うべきである。しかしながら、或る場合には、規則的に計画した保守の場合より頻繁に、特に広範囲な有効寿命経歴に欠ける新しく設計された部品群の早期有効寿命中にかかる測定を行うのが望ましいこともある。通常、残留圧縮応力のかかる測定は取外し中に個々の部品について行われる。しかしながら、幾つかの部品については、完全な取外しを行うことなしに必要な測定を行うことが可能である。上述のように、残留圧縮応力の X 線回折測定は高応力集中領域（例えば、第 1 図に示すディスク 10 のファートリスロット 14 の底部 12）において行うべきである。一般に、高応力集中領域は亀裂形成が観察されたか、或いはより起こりそうである領域である。しかしながら、所定の部品における高応力集中領域ごとに、特にかかる領域が同様な荷重/温度条件下で作動される場合にこのような測定を行うことは必要でない。第 1 図におけるディスクの場合、各スロット 14 の底部ではなく、0 度、90 度、180 度および 270 度に位置決めされたファートリスロット 14 の底部 12 において測定を行ってもよい。これらの夫々の位置における個々の測定値または個々の測定値の平均が所定値に匹敵する。データベースが生じると、所定の部品（または他の部品群）についての測定数および位置を適切に変更することができる。

部品が一旦、その所定値に達するか、あるいはそれ未満に落ちるとこの部品を使用状態から永久的に外すか、或いは再加工してその残留圧縮応力を所定値より高いレベルまで増大し、次いで使用状態に戻すのがよい。例えば、ゼロポンド/平方インチの所定値を使用して、第 2 図における曲線 28 により表したディスクは約 10000 時間の使用後に使用状態から外すか、或いは再加工すべきであり、曲線 24、26 で表したディスクは約 15000 時間の使用後に使用状態から外すか、或いは再加工すべきであり、曲線 20（特に）、22（より少ない程度）で表したディスクは約 15000 時間より大きい有効寿命を有する。好ましくは、このような再加工部品における残留圧縮応力は製造時の元の残留圧縮応力に近似するレベルまで戻される。このような部品の再加工は残留圧縮応力を増大したり達成したりする在来の手順を使用して行うことができる。このような方法としては、例えば、表面を低温加工するショットピーニング方法および他の方法（例えば、ハンマーピーニング方法、圧延方法またはバニシング方法）がある。例えば、デーリの「米国にお

10

20

30

40

50

る制御ショットピーニング技術の状況」(237 41)(衝撃表面処理(Meguid, Ed)における衝撃処理方法についての国際会議)、デリチジアの「進歩したショットピーニング技術による疲労寿命の向上」(92製造エンジニアリング、85 87(1984))を参照せよ。もちろん、このような再加工は残留応力亀裂からいずれかの永久破壊が起こる前に行わなければならない。かくして、かかる再加工が期待される場合、管理基準として好ましく使用される所定値は再加工が期待されない場合より高い(すなわち、残留圧縮応力の高い所定値である)。このような場合に管理基準を高く設定することによって、検出可能でないかも知れない亀裂形成が起こるような条件から更に離れ、それにより高い安全性の限界をもたらす。再加工により残留圧縮応力を初めに製造したときの部品における残留圧縮応力の少なくとも50パーセントまで増大させることが一般に好ましい。より好ましくは、残留圧縮応力のための再加工レベルは初めに製造したときの値の少なくとも80パーセントである。更に好ましくは、再加工レベルは初めに製造したときの値に匹敵する。本発明の方法は一般に、残留圧縮応力のすべてまたは一部を復帰させるのに金属部品をいつ最適に再加工するべきかを定める手順を提供することによって金属部品の有効寿命を最大にすることができる。ショットピーニングのような再加工技術が再加工領域における金属部品の寸法を増大させるので、過剰の再加工は実際のところ有効寿命を減少させる。かくして、設計規格から外れる金属部品の可能性は再加工する回数の関数として増大する。本発明は最小の再加工回数で最大の有効寿命を得ることができる手順を提供する。もちろん、所定の部品についての適切な所定値を設定するときに、寸法安定性に作用する再加工効果を考慮すべきである。

金属部品群の管理のための本発明の方法は現在使用されている管理方法についての顕著な改良を提供する。「セーフライフ(安全寿命)」および「フェイルセーフ」方法の両方は群のうちの最も弱い部品における亀裂形成の予言値または統計値のいずれかに基づいた予期有効寿命に依存している。これらの方法では、有効寿命は個々の部品については評価されない。かくして、部品の大多数はまだ有用且つ有意な有効寿命を有しながら、退去される。「原因用退去」方法は所定の部品における実際の亀裂形成の観察に依存している。亀裂形成が一旦観察されると、部品は使用状態から外される。運悪く、亀裂形成を観察することができる、部品を追加の有効寿命のために修復したり再加工したりすることができない。更に、少なくとも、幾つかの場合、管理基準として実際の亀裂形成を待つことにより、安全性リスクが顕著になる。本発明の方法は不可逆の亀裂開始または形成が起こる前に十分観察可能である管理基準(すなわち、所定値に匹敵する残留圧縮応力)を与えることによって改良管理手順を提供する。本発明の方法を使用して、このような部品の最大有効寿命を安全且つ効果的に得ることができる。本発明の方法を使用して、少なくとも幾つかの部品を再加工して残留圧縮応力を増大し、使用状態に戻し、それにより安全性を妥協することなしに高い効率をもたらすことができる。実際、本発明の方法は、管理基準が実際の或いは予期される亀裂形成ではなく、残留圧縮応力の基づいているので、現在使用されている管理方法と比較して向上された効率および向上された安全性を達成するものと思われる。実際の或いは予期される亀裂形成ではなく、残留圧縮応力を管理基準として使用することにより、安全性の限界が恐らく著しく高められるものと思われる。

本発明の方法は有効寿命中に金属部品のコンピュータ追跡を増大するのに理想的に適している。しかも、本発明の方法から発生されるデータ(すなわち、残留圧縮応力)および個々の部品の有効寿命および経歴に関するデータを使用して金属部品用の管理データベースを生じることができる。このようなデータベースの経歴基準が成長すると、所定の部品の有効寿命を確実に予言することが可能である。かくして、このようなデータベースが生じられると、各取外しまたは他の保守の間、各部品の圧縮応力を測定することが必要ではない。部品の全有効寿命または経歴が著しく短いなら(データベースにおける経歴データから求めた場合)、圧縮応力の測定を遅らすことができる。幾つかの設定可能なパラメータに近似する有効寿命または経歴(これもデータベースにおける経歴データから求めた場合)を有するこのような部品のみが測定され且つ所定値に匹敵する実際の圧縮応力を有することが必要とされる。例えば、所定の部品については、データベースは、10000時間

以上の有効寿命を有する部品のみが常に所定値に近似するか或いはそれより低い残留圧縮応力を有することを示すかも知れない。このような場合、この値より大きい有効寿命を有する部品のみが定期取外し中に測定される残留圧縮応力を有することが必要である。もちろん、異常を有する部品または極度の使用状態にさらされた部品は集積有効寿命にかかわらず評価されるべきである。しかも、データベースの連続効力およびその予言的能力を確認するために短い有効寿命を持つ部品における幾つかのスポットチェックを少なくとも行うことが賢明である。所定値より低い残留圧縮応力を非常に有していそうにもない部品の実際の測定を回避することによって、かなりの節約を達成することができる。もちろん、この可能性を予言するのに使用される方法は効果的であり且つ安全であると証明されなければならない。

10

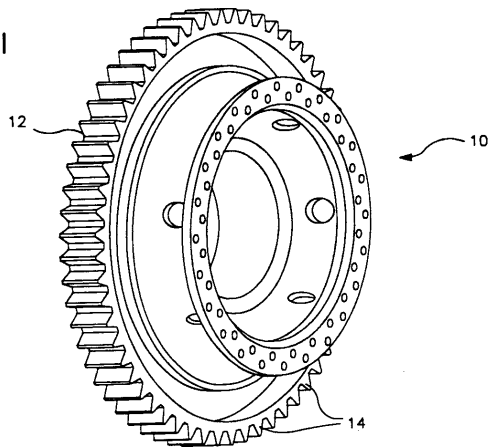
しかしながら、本発明の方法はこのような金属部品のすべての非破壊的試験を置換しようとするものではない。当業者はわかるように、本発明の方法は、表面層における残留圧縮応力および残留引張応力レベルと共通に関連された亀裂開始機構に関係される破損および欠陥を管理するようになっている。特にこのような部品の有効寿命において早期に（すなわち、いわゆる「初期の廃却率期間中」）他の種類の破損および／または破損機構を確認する他の非破壊的試験方法は適切な場合に継続すべきである。上記の管理データベースにおける他の破壊的試験手順からのこのようなデータを組入れることにより、このような金属部品群の更に完全な追跡および管理を行うことができる。

更に、本発明の方法を使用して、略等しい残りの有効寿命（すなわち、略等しい残留圧縮応力）の部品と一緒に使用することができる。通常、個々のエンジンにおけるこのような取外し頻度は最も短い残りの有効寿命を有する部品により制御される。広く変化する残りの有効寿命の部品の使用を避けることによって、短い残りの有効寿命のみを有する単一の部品が必要とするエンジンの早期取外しを回避することができる。所定のエンジンにおける同様な残りの有効寿命を有する部品を調和させることによって、全部品群にわたる取外し頻度を減じることができる。

20

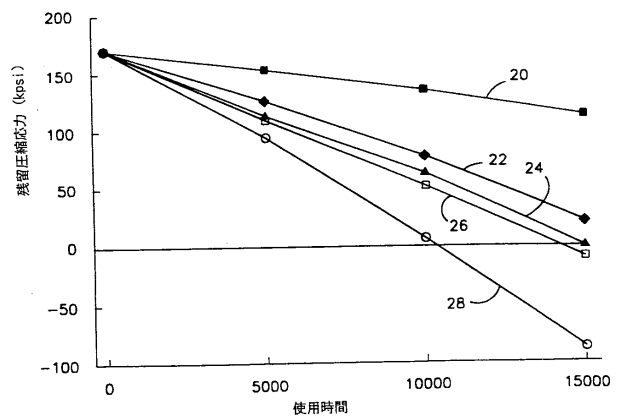
【図 1】

FIG. 1



【図 2】

FIG. 2



フロントページの続き

(74)代理人 100084009

弁理士 小川 信夫

(74)代理人 100086771

弁理士 西島 孝喜

(74)代理人 100084663

弁理士 箱田 篤

(72)発明者 バークレイ スタンリー ジー

アメリカ合衆国 フロリダ州 33477 ジュピター ノース ハイウェイ 1-1000 ユ
ニット 615

合議体

審判長 高橋 泰史

審判官 田邊 英治

審判官 黒田 浩一

(56)参考文献 特開平4-121637(JP,A)

特開平6-10613(JP,A)

特開平5-256731(JP,A)

特開平4-54312(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N23/00-23/227