

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-515748  
(P2004-515748A)

(43) 公表日 平成16年5月27日(2004.5.27)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>	F I	テーマコード (参考)
GO 1 N 29/20	GO 1 N 29/20	2 GO 4 7
GO 1 N 15/08	GO 1 N 15/08 H	
GO 1 N 29/00	GO 1 N 29/00 5 O 1	

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 35 頁)

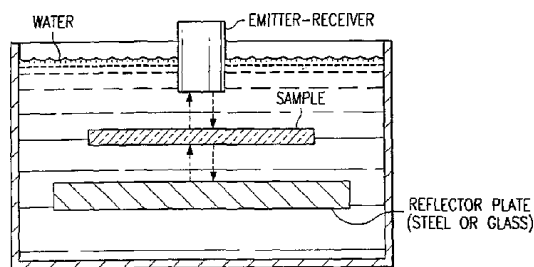
(21) 出願番号 特願2002-512674 (P2002-512674)	(71) 出願人 598028028 ロッキード マーティン コーポレイション Lockheed Martin Corporation アメリカ合衆国, バージニア 20110-4122, マナッサス, ゴッドウィン ドライブ 9500
(86) (22) 出願日 平成13年7月13日 (2001.7.13)	(74) 代理人 100066692 弁理士 浅村 皓
(85) 翻訳文提出日 平成15年1月10日 (2003.1.10)	(74) 代理人 100072040 弁理士 浅村 肇
(86) 国際出願番号 PCT/US2001/022156	(74) 代理人 100087217 弁理士 吉田 裕
(87) 国際公開番号 W02002/006814	
(87) 国際公開日 平成14年1月24日 (2002.1.24)	
(31) 優先権主張番号 60/218, 341	
(32) 優先日 平成12年7月14日 (2000.7.14)	
(33) 優先権主張国 米国 (US)	

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超音波を用いて複合材料の気孔度を検出するシステムと方法

(57) 【要約】

本発明は、サンプルの複合材料の一側側のみからサンプルの複合材料の気孔度を超音波で測定するものであって、サンプルの複合材料からのサンプル超音波信号を測定する段階と、サンプルの超音波信号をサンプルの複合材料の表面反響に対して正規化する段階と、サンプルの超音波信号からサンプルの背壁反響信号を分離する段階とを含む。次いで、サンプルの背壁超音波信号のサンプル周波数スペクトルが検出される。次に、本発明の方法とシステムとは、基準の複合材料から基準の超音波信号を測定する段階と、基準の超音波信号を基準の複合材料の表面反響から分離する段階とを含む。次いで、基準背壁超音波信号の基準周波数スペクトルが検出される。本発明は、更に、所定の周波数範囲に亘る基準周波数スペクトルに対するサンプル周波数スペクトルの比としてサンプルの超音波信号の超音波減衰度を取得する段階を含む。取得した超音波減衰度と所定の減衰基準とを比較することによって、サンプルの複合材料の気孔度を評価することができる。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

サンプル複合材料の一側のみアクセスすることによってサンプル複合材料の気孔度を超音波で測定する方法において、  
サンプル複合材料からサンプル超音波信号を測定する段階と、  
前記サンプル超音波信号を正規化する段階と、  
前記サンプル超音波信号からサンプル背壁反響信号を分離する段階と、  
前記サンプル背壁超音波反響のサンプル周波数スペクトルを検出する段階と、  
基準複合材料から基準超音波信号を測定する段階と、  
前記基準超音波信号を正規化する段階と、  
前記サンプル超音波信号から基準背壁反響信号を分離する段階と、  
前記基準背壁超音波信号の基準周波数スペクトルを検出する段階と、  
所定の周波数範囲に亘る前記基準周波数スペクトルに対する前記サンプル周波数スペクトルの比として前記サンプル超音波信号の超音波減衰度を取得する段階と、  
サンプルの複合材料の気孔度を評価するために前記の取得した超音波減衰度を所定の減衰基準に対して比較する段階とを含むことを特徴とするサンプル複合材料の気孔度を超音波測定する方法。

10

## 【請求項 2】

レーザ超音波信号発生機構を使用して前記サンプル超音波信号を発生させる段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波測定する方法。

20

## 【請求項 3】

中程度ないし高気孔度の複合材料における背壁反響の到来時間を確認するために前記サンプル超音波信号を空間平均化する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波測定する方法。

## 【請求項 4】

ウィンドウイング方法を使用して前記サンプル背壁反響信号を分離する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波測定する方法。

## 【請求項 5】

所定の周波数依存度基準に対する所定の周波数によって前記サンプル複合材料の気孔度を評価する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波測定する方法。

30

## 【請求項 6】

サンプル複合材料の表面反響に対して前記サンプル超音波信号を正規化する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波測定する方法。

## 【請求項 7】

サンプル複合材料によって反射あるいは拡散された第 1 のパルス化したレーザビームから位相変調した光線を集光することによってレーザ超音波信号として前記サンプル超音波信号を発生させ、更に光学増幅器を使用して集光光学装置によって集光された位相変調の光線を増幅する段階を更に含むことを特徴とする請求項 1 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波測定する方法。

40

## 【請求項 8】

サンプル複合材料の一側のみアクセスすることによってサンプル複合材料の気孔度を超音波により評価するシステムにおいて、  
サンプル複合材料からサンプル超音波信号を測定する指令と、  
サンプル複合材料の表面反響に対する前記サンプル超音波信号を正規化する指令と、  
前記サンプル超音波信号からサンプル背壁反響信号を分離する指令と、  
前記サンプル背壁超音波信号のサンプル周波数スペクトルを検出する指令と、  
基準複合材料から基準超音波信号を測定する指令と、

50

基準複合材料の表面反響に対して前記基準超音波信号を正規化する指令と、  
 前記サンプル超音波信号から基準背壁反響信号を分離する指令と、  
 前記基準背壁超音波信号の基準周波数スペクトルを検出する指令と、  
 所定の周波数範囲に亘って前記基準周波数スペクトルに対する前記サンプル周波数スペクトルの比として前記サンプル超音波信号の超音波減衰度を取得する指令と、  
 サンプル複合材料の気孔度を評価するために前記の取得した超音波減衰度を所定の減衰基準に対して比較する指令とを含むことを特徴とするサンプル複合材料の気孔度を超音波により測定するシステム。

【請求項 9】

レーザ超音波信号発生機構を使用して前記サンプル超音波信号を発生させる指令を更に含むことを特徴とする請求項 8 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波により測定するシステム。

10

【請求項 10】

中程度ないし高気孔度の複合材料における背壁反響の到来時間を確認するために前記サンプル超音波信号を空間平均化する指令を更に含むことを特徴とする請求項 8 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波により測定するシステム。

【請求項 11】

ウィンドウイング方法を使用して前記サンプル背壁反響信号を分離する指令を更に含むことを特徴とする請求項 8 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波により測定するシステム。

20

【請求項 12】

所定の周波数依存度基準に対する所定の周波数によって前記サンプル複合材料の気孔度を評価する指令を更に含むことを特徴とする請求項 8 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波により測定するシステム。

【請求項 13】

サンプル複合材料の表面反響に対して前記サンプル超音波信号を正規化する指令を更に含むことを特徴とする請求項 8 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波により測定するシステム。

【請求項 14】

サンプル複合材料によって反射あるいは拡散された第 1 のパルス化されたビームから位相変調した光線を集光することによってレーザ超音波信号として前記サンプル超音波信号を発生させる指令と、更に光学増幅器を使用して集光光学装置によって集光された位相変調の光線を増幅する指令とを含むことを特徴とする請求項 8 に記載されたサンプル複合材料の気孔度を超音波により測定するシステム。

30

【請求項 15】

サンプル複合材料の一侧のみにアクセスすることによってサンプル複合材料の気孔度を超音波で測定する方法を含み、ターゲット上の超音波による表面変位を検出する方法において、

ターゲットにおいて超音波表面変位を発生させる段階と、

ターゲットにおける超音波表面変位を検出するよう第 1 のパルス化したレーザビームを使用する段階と、

40

ターゲットによって拡散された第 1 のパルス化されたレーザビームから位相変調した光線を集光する段階と、

位相変調した光線が集光された後位相変調された光線を光学的に増幅する段階と、

集光された位相変調の光線の伝播軌道に少なくとも 1 つの光学的分離組立体を位置させることによって反射された位相変調の光線が光学増幅器にフィードバックされるのを阻止する段階と、

ターゲットにおける超音波表面変位を表わすデータを取得するために位相変調した光線処理する段階と、

サンプル複合材料の一侧のみにアクセスすることによってサンプル複合材料の気孔度を超

50

音波によって測定する段階とを含み、  
 前記の超音波による測定する段階が、  
 サンプル複合材料からサンプル超音波信号を測定する指令と、  
 サンプル複合材料の表面反響に対して前記サンプル超音波信号を正規化する指令と、  
 前記サンプル超音波信号からサンプル背壁反響信号を分離する指令と、  
 前記サンプル背壁超音波信号のサンプル周波数スペクトルを検出する指令と、  
 基準複合材料から基準超音波信号を測定する指令と、  
 基準複合材料の表面反響に対して前記基準超音波信号を正規化する指令と、  
 前記サンプル超音波信号から基準背壁反響信号を分離する指令と、  
 前記基準背壁超音波信号の基準周波数スペクトルを検出する指令と、  
 10 所定の周波数範囲に亘って前記基準周波数スペクトルに対する前記サンプル周波数スペクトルの比として前記サンプル超音波信号の超音波減衰度を取得する指令と、  
 サンプル複合材料の気孔度を評価するために前記の取得した超音波減衰度を所定の減衰基準と比較する指令とを含むことを特徴とするターゲットの超音波表面変位を検出する方法。

10

20

30

40

50

【請求項 16】

レーザ超音波信号発生機構を使用して前記サンプル超音波信号を発生させる段階を更に含むことを特徴とする請求項 15 に記載されたターゲットの超音波表面変位を検出する方法。

【請求項 17】

中程度ないし高気孔度の複合材料における背壁反響の到来時間を確認するために前記サンプル超音波信号を空間平均化する段階を更に含むことを特徴とする請求項 15 に記載されたターゲットの超音波表面変位を検出する方法。

【請求項 18】

ウィンドウイング方法を使用して前記サンプル背壁反響信号を分離する段階を更に含むことを特徴とする請求項 15 に記載されたターゲットの超音波表面変位を検出する方法。

【請求項 19】

所定の周波数依存性基準に対する所定の周波数によって前記サンプル複合材料の気孔度を評価する段階を更に含むことを特徴とする請求項 15 に記載されたターゲットの超音波表面変位を検出する方法。

【請求項 20】

サンプル複合材料の表面反響に対して前記サンプル超音波信号を正規化する段階を更に含むことを特徴とする請求項 15 に記載されたターゲットの超音波表面変位を検出する方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

(発明の技術分野)

本発明は、広い意味で、材料(特に複合材料)の非破壊検査装置および方法に係わり、特に複合材料の一侧のみにアクセスすることによって複合材料の気孔度を超音波で測定する装置と方法とに関するものである。

【0002】

(発明の背景)

本出願は、「超音波を用いて複合材料の気孔度を検出するシステムと方法」と題する米国特許仮出願第 60 / 218341 号(2000 年 7 月 4 日出願)(参考のために、その記載内容全体を本明細書の記載として援用する)に対して優先権を主張するものである。

【0003】

さらに、本出願は、「超音波レーザ検査のための方法と装置」(1999 年 6 月 30 日出願)と題する米国特許出願第 09 / 343920 号(参考のために、その記載内容全体を本明細書の記載として援用する)に関連がある。また、本出願は「後集光(ポストコレクシオン)光学増幅を使用して超音波表面変位を検出する方法と装置」(1999 年 10 月

10日出願)と題するトーマス・イー・ドレーク氏の米国特許出願第09/416399号(参考のために、その記載内容全体を本明細書の記載として援用する)に関係がある。

【0004】

最近、高度の複合構造体の使用が航空宇宙、自動車、およびその他多数の産業において巨大な成長を具現している。複合材料は顕著な性能向上を提供しているが、それらは製造工程において厳しい品質管理作業を必要とする。特に、非破壊評価法(NDE)は、複合材料の構造上の完全性を評価するために、例えば、介在物、積層剥離、および気孔度を検出するために必要である。しかしながら、従来のNDE法は極めて時間がかかり、労働集約型で、かつ費用が高む。その結果、検査作業は逆に複合構造体に関わる製造コストを増大させている。

10

【0005】

複合構造体の構造上の完全性を評価するために各種の方法やシステムが提案されている。レーザを用いて超音波を発生させ、検出する一つの方法がモンシャリン氏他の米国特許第5608166号(1997年3月4日発行)(以下'166号特許と称する)に開示されている。'166号特許は、対象物に超音波を発生させるためのパルス化した第1変調レーザビーム、および超音波を検出するためにパルス化した第2レーザビームの使用を開示している。次いで、第2レーザビームからの位相変調した光線が対象物の表面における超音波運動を表わす信号を得るために復調される。この方法の欠点は、パルス化した第1レーザビームを変調しなければならないことである。

【0006】

繊維強化されたポリマー基体複合材料は、その高強度と軽量の故に各種分野で極めて有利であることが証明された。特に航空機産業において、これらの材料の使用が着実に増加している。しかしながら、ポリマー基体複合材料は、積層剥離、介在物および気孔のような欠陥の存在について、取付け前に検査する必要がある。

20

【0007】

気孔とは製造過程で複合材料中に形成された空洞の存在である。超音波の減衰度を測定することによって気孔度のレベルを測定する。超音波技術は複合材料における気孔度を評価するための最善の技術であることが判明した。残念ながら、それは2つの背壁反響(エコー)のように、信号における二種類の反響を利用する自動照合技術を使用することが常に可能というわけではない。このことは、ある場合には、気孔度が高すぎて、かろうじて1つの反響しか観察されないことがあるためである。気孔度の測定は1つの反響のみに依存しなければならない。したがって、積層剥離や介在物とは異なり、気孔度に対する超音波の応答性は周波数と振幅とによって左右される。このような特性は、各超音波システムが所定の気孔度レベルに対して異なる応答性を有することを意味する。したがって、各超音波システムは、或る気孔度レベルに対して較正を要する。

30

【0008】

気孔度を測定するために、二種類の技術、すなわち、反射透過超音波(RTTU)と透過超音波(TTU)が使用される。これらの方法では、サンプルを通して伝播した超音波の振幅と、基準サンプルを通して伝播した超音波の振幅とを比較する。RTTU技術において、使用される超音波反響は、鋼あるいはガラスのプレートからの反響である。図1は、この操作を示す。代って、TTU技術では、超音波反響は圧電エミッタから直接来る反響である。図2はTTU技術を示す。

40

【0009】

残念ながら、これらの技術は、水のような超音波接続体(カップラント)と、各複合パネルの両側へのアクセスとを必要とする。水と複合パネルの界面における超音波屈折は、圧電エミッタがサンプルの面に対して直角でない場合、超音波の方向を変えてしまう。気孔度はサンプル表面の全ての箇所では評価する必要がある。超音波システムは、超音波測定の隙間のないグリッド(網目)を形成するために、サンプルの表面上の複数箇所を動かす必要がある。グリッドの間隔は臨界気孔度欠陥サイズよりも小さくしなければならない。この要求条件が、彎曲表面を有するサンプルの走査を、高価かつ遅速にする。さらに、閉じた

50

箱に対するように、複合部分の二つの側へのアクセスが可能でない場合、そのような部分に対する気孔度の評価は、これらの技術を用いて行なうことができない。

【0010】

したがって、水あるいは類似の接続体を必要とする問題および複合材料の両側へのアクセスを必要とする問題を含む前記問題を是正する、複合材料の気孔度の測定および評価を行う方法とシステムに対する必要性が生じている。

【0011】

さらに、パルス化したレーザービームを変調する必要性、または、'166特許に存在するような問題と同様なその他の問題がなく、複合材料の気孔度を測定し、評価することのできる方法やシステムに対する必要性がある。

【0012】

(発明の概要)

本発明は、複合材料の一侧のみにアクセスすることによって、以前に開発された超音波システムや方法に付随する欠点や問題を実質的に排除あるいは低減化する、複合材料の気孔度を超音波によって測定する方法とシステムとを提供するものである。

【0013】

本発明は、複合材料の一侧へのアクセスのみを要する、レーザー超音波のような超音波技術によって複合材料の気孔度を測定する方法とシステムを提供するものである。本発明方法とシステムは、サンプル材料の背壁反響の振幅を基準サンプルの背壁反響の振幅と比較することによって、気孔度と相関する超音波の減衰度を評価する。本発明方法とシステムは、さらに、気孔度に関係のない現象によって引き起こされる振幅の変動を排除するために、基準反響(レーザー超音波に対する基準反響、すなわち表面反響)に従って信号の振幅を正規化することを含む。

【0014】

本発明の別の観点によれば、サンプル複合材料の一侧側(いっそくがわ)のみから、サンプル複合材料の気孔度を超音波で測定する方法とシステムが提供される。本発明方法は、サンプル複合材料からのサンプル超音波信号を測定する段階と、サンプル複合材料の表面反響に対してサンプル超音波信号を正規化する段階と、サンプルの背壁反響信号をサンプル超音波信号から分離する段階とを含む。次いで、サンプルの背壁超音波信号のサンプル周波数スペクトルが検出される。次に、本発明方法とシステムは、基準複合材料から基準超音波信号を測定する段階と、基準超音波信号を基準複合材料の表面反響に対して正規化する段階と、前記サンプル超音波信号から基準背壁反響信号を分離する段階とを含む。次いで、前記基準背壁超音波信号の基準周波数スペクトルが検出される。さらに、本発明は、所定の周波数範囲に亘る基準周波数スペクトルに対するサンプルの周波数スペクトルの比としてサンプル超音波信号の超音波減衰度を取得する段階を含む。予め定められた減衰基準に対して前記取得した超音波減衰度を比較することによって、サンプル複合材料の気孔度を評価することができる。

【0015】

本発明の技術的な特徴は、複合材料の背壁反響の振幅を用い、それを基準複合材料から測定した背壁反響振幅と比較することである。本発明は、気孔に直接関係しない何らかの作用に起因する振幅の変動を排除するために、基準反響(レーザー超音波の場合、表面の反響である)に対して、全ての超音波信号(基準サンプル反響を含む)を正規化する。

【0016】

本発明の別の技術的な特徴は、背壁反響の位置を容易に識別するために、超音波トレース(痕跡)の空間平均化を用いることである。本発明は、ウィンドウ化技術(windowing techniques)を用いて、サンプルの背壁反響および基準背壁反響の完全な周波数スペクトルを計算することを含む。これら2つのスペクトルの比が周波数の関数として超音波減衰度を規定する。本発明は、被検材料に対して先に設定された基準に対する気孔度を評価し、または、気孔度レベルと相関する超音波減衰度の周波数依存性を使用するために、所定周波数における超音波減衰度を用いる。

10

20

30

40

50

## 【0017】

本発明およびその利点を完全に理解するために、添付図面を用いて以下の説明を行なう（図中、同じ符号は同じ特徴を示す）。

## 【0018】

（好適例の詳細な説明）

本発明の好適例が、図3～図10に示されている（図中、同種部分および対応部分に対して同じ符号を用いている）。

## 【0019】

図3は、離れたターゲット（目標物）20に対する発生レーザービーム14と共軸線関係の検出レーザービーム16とを表わす送入レーザービーム12を含む超音波装置10を示している。発生レーザービーム14は、ターゲット20に超音波表面変形形態で熱弾性膨張を発生させ、その変形がターゲット20から離れる方向に指向された位相変調光線18によって表わされている検出レーザービーム16を変調させ、拡散させ、かつ反射させる。

10

## 【0020】

図4は超音波レーザー検査を実行する装置21の基本構成要素をブロック線図の形で示している。装置21は発生レーザー22と、検出レーザー24と、干渉計230と、任意の光学プロセッサ235と、光学スキャナ240と、集光光学装置31と、システム制御装置32と、データ取得および処理装置34とを含む。発生レーザー22と検出レーザー24とは、それぞれ発生レーザービーム14と検出レーザービーム16とを発生させ、それらは光学スキャナ240によって、典型的には複合材料であるターゲット20上に導かれる。発生レーザー22はターゲット20の表面に対して直角に材料において圧縮超音波を発生させる。圧縮超音波は複合材料が発生レーザービーム14を吸収するにつれて、該複合材料が熱弾性膨張する結果得られるものである。

20

## 【0021】

発生レーザー22はターゲット材料のアブレーション（蒸発）または分解を起こすことなくターゲット20の表面に容易に吸収される周波数のものでなければならず、超音波による表面変形を誘発するのに適当なパルス持続時間のものでなければならない。例えば、100ナノ秒のパルスに対して10.6ミクロンの波長のビームを発生させるために横励起大気圧（TEA）CO<sub>2</sub>レーザーを使用することができる。レーザーのパワーはターゲットに対して、例えば0.25ジュールのパルスを送るに十分なものでなければならず、それには400Hzのパルス繰り返し速度で作動している100ワットのレーザーを必要としうる。発生レーザーは熱としてターゲットの表面に吸収され、それによってアブレーションを起こすことなく熱弾性膨張を発生させるべきものである。

30

## 【0022】

検出レーザー24は超音波による表面の変位を誘発させないのに十分なパルス持続性のものでなければならない。例えば、Nd:YAGレーザーを使用することができる。このレーザーのパワーは、例えば100ミリジュールで、100マイクロ秒のパルスを送るに十分なものでなければならず、それは1キロワットのレーザーを必要としうる。

## 【0023】

「後集光光学増幅を使用して超音波による表面の変位を検出する方法と装置」と題するトーマス・イー・ドレーク二世の米国特許第6122060号（2000年9月19日発行；本発明は、部分的にその優先権を主張する）（以下、ドレーク特許と称する）は、更にターゲットの表面において超音波による表面の変位を検出するためにパルス化した第1レーザービームを発生させるために検出レーザーを含む前記システムを記載している。集光光学装置は、ターゲットによって反射または拡散されたパルス化した第1レーザービームから位相変調した光線を集光する。光学増幅器は集光光学装置によって集光された位相変調の光線を増幅する。干渉計は位相変調した光線を処理し、少なくとも1つの出力信号を発生させる。プロセッサはターゲットにおける超音波による表面の変位を示すデータを取得するために少なくとも1つの出力信号を処理する。本発明はドレーク特許に関連する目標のために開発されたもので、そのような環境において使用しうる。したがって、ドレーク特許

40

50

に記載された技術情報を本明細書の記載として援用する。

【0024】

本発明は、複合部分の気孔度を評価するために背壁反響のみを使用して超音波減衰を測定する。この方法は、サンプルの一侧のみにアクセス（接近）するだけでよい超音波技術に対して有用である。図5A、図5Bに関し、図5Aでは、低気孔度の複合材料において、図5Bでは中程度ないし高気孔度の複合材料においてレーザ超音波を使用して取得した超音波信号を示す。

【0025】

超音波減衰測定のある局面は気孔度評価に対しては周知の技術である。超音波減衰度の評価およびソリッドステートの材料を特性化するために超音波減衰度を使用することは、周波数の関数として減衰度を計算するために周波数スペクトルの比を使用する概念と同様に当該技術分野で周知である。周知の技術は小さい超音波減衰度の変動を測定する。これらの測定はサンプルの一侧のみから実行されるが、水による結合が必要であり、サンプルの表面は研磨する必要がある。気孔度を評価するために超音波減衰度を使用する殆どの場合において、TTU技術あるいはRTTU技術が使用されている。双方の方法共減衰度を評価するために2つの背壁反響の比を使用している。

10

【0026】

図5A、図5Bに関し、図5Aでは低気孔度の複合材料からの超音波信号を、図5Bにおいては中位ないし高気孔度の複合材料から取得した超音波信号を示している。単一の背壁反響を使用することの問題の一つは、もしも測定された信号の振幅が気孔度以外の別の要素によって影響を受けるとすれば、気孔度の測定が虚偽の読み取りを行いうることである。超音波信号は何らかの方法で正規化する必要がある。この目的に対して、気孔度によって影響されない超音波信号を使用することができる。レーザ超音波の場合には、この反響は表面反響と称される。この反響は熱膨張によって発生する表面の変位によって生成される。表面反響は超音波からは発生しない。それは、均質な材料におけるレーザ超音波発生と検出システムのフラットな周波数応答性とを想定すれば、検出システムによって集光された光線の質と発生機構の効率に直接比例している。たとえこれらの条件が完全に適合していなくても、表面による正規化は第1の近似化において反射性および発生の変動並びに測定入射角の変動に対して良好な是正を行なう。図6は表面反響を使用したレーザ超音波信号の正規化の一例を示す。

20

30

【0027】

本発明による方法における次の段階は背壁反響の到来時間を確認することである。図5(A)においては、第1の背壁反響が容易に確認される。他方、図5(B)の場合には、背壁反響の確認は容易でない。背壁反響の正確な時間を確認するためには、気孔度の欠陥に対する逆拡散（バックスキヤタリング）によって起因する擬似反響を排除するために超音波信号は空間平均化することができる。所定位置における空間平均化した信号は各々の時間に対して近隣の位置における信号の値を平均化することによって得られる。例えば、位置(50, 50)における空間平均化した信号は、もしも5×5の開核が使用されるとすれば、各々の時間に対して、位置(48, 48)および(52, 52)間の超音波信号の値を平均化することによって得られる。空間平均化は背壁反響の時間を確認するためにのみ使用される。空間平均化した信号の背壁反響の到来時間はサンプルの厚さが変動する場合背壁反響を正確にウィンドウングするために非平均化信号に対して使用される。

40

【0028】

図7(A)、(B)は、中程度ないし高気孔度の複合材料における背壁反響の到来時間を確認するための空間平均化の結果を示す。特に、図7(A)は空間平均化のない超音波信号を示し、一方図7(B)は9×9の開核による空間平均化を使用した同じ位置における超音波信号を示す。背壁反響の到来時間が判明すると、この反響は残りの信号から分離する必要がある。反響はウィンドウング技術を用いて分離される。所定の材料と受取られた信号のタイプとに応じて、種々のタイプのウィンドウング技術を使用しうる。

【0029】

50



図 8 は図 7 ( A ) に示す背壁反響の分離状態を示す。表面反響が干渉しないように検出された時間ウィンドウ内の図 7 ( B ) に示す最大の分析信号を使用してウィンドウ位置が得られた。特に、図 8 は従来のウィンドウング技術を使用して残りの信号から背壁反響を分離することの効果を示す。次いで、背壁反響の周波数スペクトルが計算される。次いで、この周波数スペクトルは基準信号の周波数スペクトルによって除算される。基準信号は、現在分析されている信号に対して先に説明したものと同一実験手順および同一信号処理段階を使用して取得される。基準信号は極めて低い気孔度を備え、現在検査されているサンプルと同じ厚さを有するサンプル材料からつくられた初期サンプルから得られる。

【 0 0 3 0 】

図 9 は基準反響と図 8 に示す背壁反響の周波数スペクトルを示す。図 9 において、基準反響の周波数スペクトルは実線 4 0 で示され、図 6 に示す反響の周波数スペクトルは点線 4 2 で示されている。二つのスペクトルの比は周波数の関数として超音波の減衰度を提供する。気孔度を評価するには、所定の周波数における超音波減衰度は所定の基準と比較することが可能で、あるいは減衰度の周波数依存性を利用することができる。

10

【 0 0 3 1 】

図 1 0 は本発明による気孔度測定のために超音波減衰度測定を実行するのに要する段階を示す。図 1 0 は複合材料の気孔度を評価するための本発明による方法のフローチャート 5 0 を示す。ブロック 5 2 を参照すれば、本発明は複合材料からの超音波信号を測定する段階を含む。これは基準複合材料と、サンプル複合材料との双方に対して実行される。次いで、本発明はそれぞれの材料の表面反響の振幅に関して、ブロック 5 4 においてこれらの信号の測定値の各々を正規化することを含む。ブロック 5 6 は正規化された双方の超音波信号に対して背壁反響を検出する段階を示す。次いで、ブロック 5 8 において、正規化され、測定された信号の各々の周波数スペクトルを計算する段階を通してプロセスは継続する。ブロック 6 0 は正規化された基準背壁反響の周波数スペクトルによって信号の周波数スペクトルを除算する段階を説明している。この結果、ブロック 6 2 に示すように、サンプル複合材料の気孔度を評価するために、所定周波数における超音波減衰度測定が行われるか、あるいは減衰周波数依存性が得られる。

20

【 0 0 3 2 】

図 1 0 に示す方法は手動で、あるいは図 1 および図 2 並びにドレイクの特許に示すシステムのようなコンピュータおよび関連の超音波感知システムを介して自動的に実行することができる。したがって、本発明は指令を自動的に完全に実行することが可能で、かつ必要なデータの記憶および前述のプロセスを実行する作動能力を保有することが可能なシステムを網羅している。

30

【 0 0 3 3 】

本発明を詳細に説明してきたが、特許請求の範囲に記載の本発明の精神や範囲から逸脱することなく各種の変更、代替および改変を行いうることを理解すべきである。

【 図面の簡単な説明 】

【 図 1 】

複合材料の気孔度を評価するための従来技術による方法を示す。

【 図 2 】

複合材料の気孔度を評価するための従来技術による方法を示す。

40

【 図 3 】

発生レーザビームと、それに対して共軸線関係の検出レーザビームとの使用を示す。

【 図 4 】

超音波レーザ検査を実行するための装置の基本要素を示すブロック線図である。

【 図 5 】

A および B は、低気孔度の複合材料からの超音波信号と中程度ないし高気孔度の複合材料から取得した超音波信号とを示す。

【 図 6 】

表面反響を使用したレーザ / 超音波信号の正規化の一例を示す。

50

【図7】

AおよびBは、中程度ないし高気孔度の複合材料における背壁反響の到来時間を確認するため空間平均化した結果を示す。

【図8】

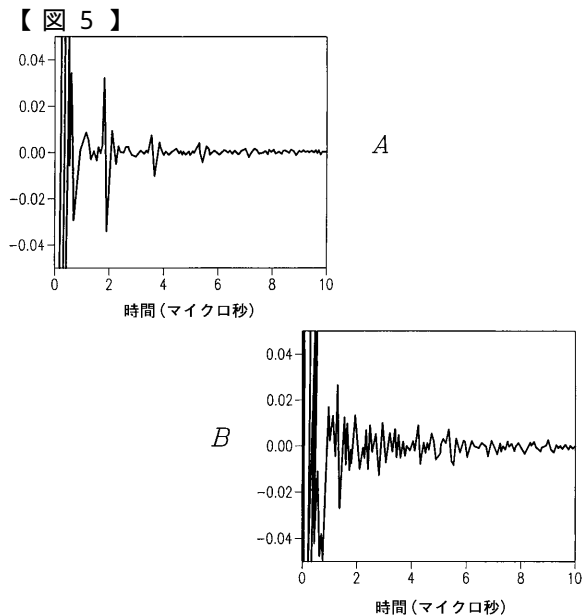
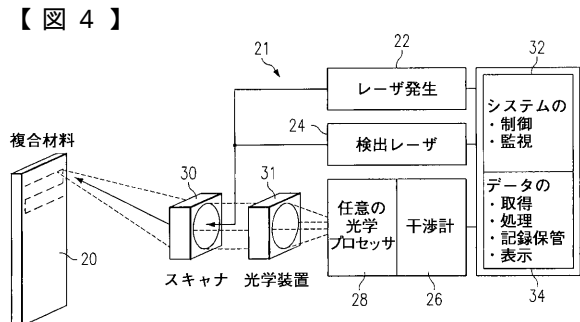
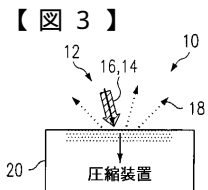
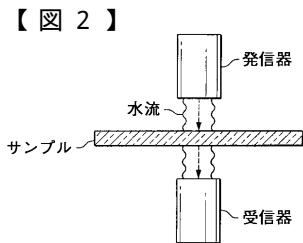
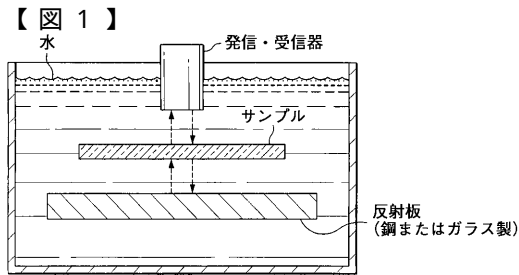
本発明による、複合材料に対する背壁反響の分離を示す。

【図9】

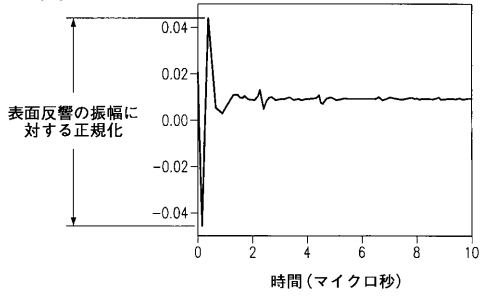
基準背壁反響と、図8に示すサンプルの背壁反響との周波数スペクトルを示す。

【図10】

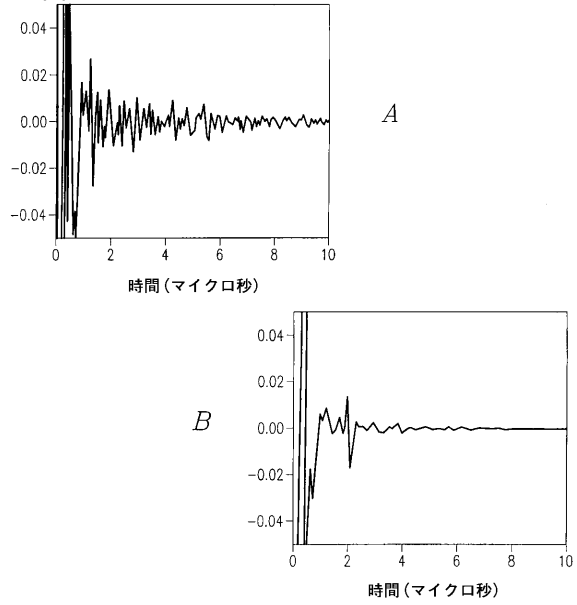
本発明の一実施例による、気孔度測定のために超音波減衰度測定を実行する段階を示す。



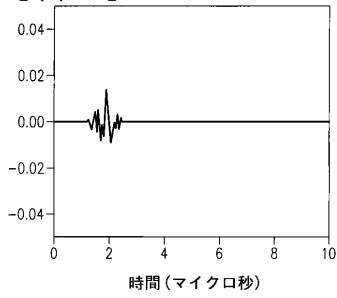
【 図 6 】



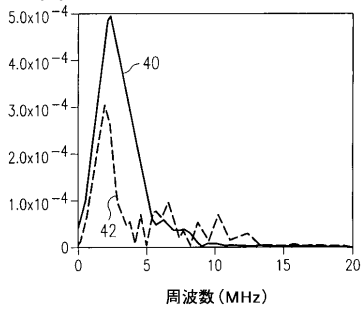
【 図 7 】



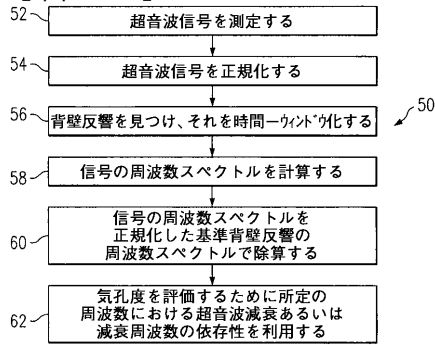
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



## 【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
24 January 2002 (24.01.2002)

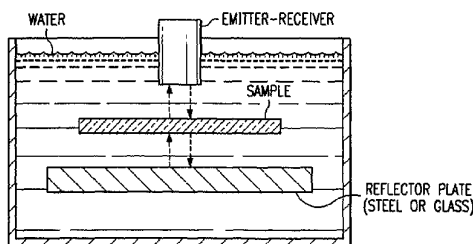
PCT

(10) International Publication Number  
WO 02/06814 A2

- (51) International Patent Classification: G01N 29/00 (74) Agent: HULSEY, William, N.; Hughes & Luce, L.L.P., Suite 2800, 1717 Main Street, Dallas, TX 75210 (US).
- (21) International Application Number: PCT/US01/22156
- (22) International Filing Date: 13 July 2001 (13.07.2001) (81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZW.
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data: 60/218,341 14 July 2000 (14.07.2000) US
- (71) Applicant: LOCKHEED MARTIN CORPORATION [US/US]; 6801 Rockledge Drive, Bethesda, Maryland 20817 (US).
- (72) Inventors: DUBOIS, Marc; 40 Stoney Creek Drive, Clifton Park, NY 12065 (US). LORRAINE, Peter, W.; 876 Heather Lane, Niskayuna, NY 12309 (US). DRAKE, Thomas, E., Jr.; 2418 5th Avenue, Fort Worth, TX 76110 (US). FILLKINS, Robert, J.; 122 Pilling Drive, Fonda, NY 12068 (US). DEATON, John, B., Jr.; 1112 Merlin Drive, Niskayuna, NY 12309 (US).
- (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Published:  
— without international search report and to be republished upon receipt of that report

[Continued on next page]

(54) Title: A SYSTEM AND METHOD OF DETERMINING POROSITY IN COMPOSITE MATERIALS USING ULTRASOUND



(57) Abstract: The invention provides for ultrasonically measuring the porosity in a sample composite material by accessing only one side of the sample composite material and includes the steps of measuring a sample ultrasonic signal from the sample composite material, normalizing the sample ultrasonic signal relative to the surface echo of the sample composite material, and isolating a sample back-wall echo signal from the sample ultrasonic signal. A sample frequency spectrum of the sample back-wall ultrasonic signal is then determined. Next, the method and system include the steps of measuring a reference ultrasonic signal from a reference composite material, normalizing the reference ultrasonic signal relative to the surface echo of the reference composite material, and isolating a reference back-wall echo signal from the sample ultrasonic signal. A reference frequency spectrum of the reference back-wall ultrasonic signal is then determined. The invention further includes deriving the ultrasonic attenuation of the sample ultrasonic signal as the ratio of the sample frequency spectrum to the reference frequency spectrum over a predetermined frequency range. Comparing the derived ultrasonic attenuation to predetermined attenuation standards permits evaluating the porosity of the sampled composite material.

WO 02/06814 A2

**WO 02/06814 A2**



---

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

WO 02/06814

PCT/US01/22156

I

A SYSTEM AND METHOD OF DETERMINING POROSITY IN COMPOSITE  
MATERIALS USING ULTRASOUND

TECHNICAL FIELD OF THE INVENTION

5 The present invention relates generally to an apparatus and method of non-destructive evaluation of materials, especially composite materials, and more particularly, to an apparatus and method for ultrasonically measuring the porosity of a composite material by accessing only one side of the composite material.

10 BACKGROUND OF THE INVENTION

This application claims priority to U.S. Provisional Application Serial No. 60/218,341, filed July 14, 2000 entitled "A SYSTEM AND METHOD FOR DETECTING POROSITY OF A COMPOSITE MATERIAL USING ULTRASONICS," and is incorporated herein by reference in its entirety.

15 Additionally, this application is related to and incorporates by reference U.S. Patent Application entitled "METHOD AND APPARATUS FOR ULTRASONIC LASER TESTING" filed on June 30, 1999, which was accorded Serial No. 09/343,920. Additionally, this application is related to and incorporates by reference U.S. Patent Application No. 09/416,399, filed on October 10, 20 1999, entitled "METHOD AND APPARATUS FOR DETECTING ULTRASONIC SURFACE DISPLACEMENTS USING POST-COLLECTION OPTICAL AMPLIFICATION" to Thomas E. Drake.

In recent years, the use of advanced composite structures has experienced tremendous growth in the aerospace, automotive, and many other commercial industries. While composite materials offer significant 25 improvements in performance, they require strict quality control procedures in the manufacturing processes. Specifically, non-destructive evaluation ("NDE") methods are required to assess the structural integrity of composite structures; for example, to detect inclusions, delaminations and porosities. Conventional NDE methods, however, are very slow, labor-intensive, and costly. 30 As a result, testing procedures adversely increase the manufacturing costs associated with composite structures.

Various methods and systems have been proposed to assess the structural integrity of composite structures. One method to generate and detect 35 ultrasound using lasers is disclosed in U.S. Patent 5,608,166, issued March 4, 1997, to Monchalin et al. (the "'166 Patent"). The '166 Patent discloses the use of a first modulated, pulsed laser beam for generating ultrasound on a work piece and a second pulsed laser beam for detecting the ultrasound. Phase modulated light from the second laser beam is then demodulated to obtain a 40 signal representative of the ultrasonic motion at the surface of the work piece. A disadvantage associated with this approach is that the first pulsed laser beam must be modulated.

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

2

PCT/US01/22156

Fiber-reinforced polymer-matrix composite materials have been proved of great interest in various fields for their high strength and low weight. In the aircraft industry in particular, the use of these materials increases steadily. However, polymer-matrix composites also must be inspected before installation for the presence of defects such as delaminations, inclusions, and porosity.

Porosity is the presence of voids created in composites during manufacturing. Measurement of ultrasonic attenuation provides a measurement of porosity level. Ultrasonic techniques were found to be the best technique to assess porosity level in composites. Unfortunately, it is not always possible to use a self-referencing technique exploiting two different echoes in the signal, like two back-wall echoes. This is because in some cases, the porosity is so high that barely one echo is observed. Porosity measurements must rely on only one echo. Therefore, unlike delamination and inclusions, the ultrasonic response to porosity is frequency and amplitude dependent. This characteristic means that each ultrasonic system has a different response to a given porosity level. Therefore, each ultrasonic system must be calibrated relative to certain porosity levels.

Two different techniques are used to measure porosity: reflected through transmission ultrasound (RTTU) and through transmission ultrasound (TTU). These methods compare the amplitude of an ultrasonic wave that has propagated through a sample with the amplitude of an ultrasonic wave that has propagated through a reference sample. The ultrasonic echo used is the one reflected from a steel or glass plate in the RTTU technique. FIGURE 1 depicts this operation. Alternatively, in the TTU technique, ultrasonic echo is the echo coming directly from the piezoelectric emitter. FIGURE 2 illustrates the TTU Technique

Unfortunately, these techniques require an ultrasonic couplant, such as water and access to both sides of each composite panels. Ultrasonic refraction at the water/composite interface changes the ultrasonic wave direction when the piezoelectric emitter is not normal to the sample surface. Porosity must be evaluated at all points over the sample surface. The ultrasonic system must be moved at several positions over the sample surface to form a tight grid of ultrasonic measurements. The grid spacing must be smaller than the size of a critical porosity defect. The normalcy requirement makes the scanning of samples having curved surfaces expensive and slow. Moreover, when the two sides of a composite part are not accessible, such as for a closed box, porosity evaluations for such parts simply cannot be made using these techniques.

Therefore, a need has arisen for a method and system that permit making porosity measurements and evaluations of composite materials, which corrects the problems identified above, including the problems of needing water or similar couplant or access to both sides of the composite material.

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

3

PCT/US01/22156

Moreover, there is the need for a method and system that permit making porosity measurements and evaluations of composite materials without the need to modulate a pulsed laser beam or other similar problems such as those existing with the '166 Patent.

5 SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention provides a method and system for ultrasonically measuring the porosity in a composite material by accessing only one side of the composite material that substantially eliminates or reduces disadvantages and problems associated with previously developed ultrasonic systems and  
10 methods.

The present invention provides a method and system to measure porosity in composite material by ultrasonic techniques, such as laser ultrasound, which method only requires access to one side of the composite material. The method and system evaluate ultrasonic attenuation that correlates with  
15 porosity, by comparing the amplitude of the sample material back-wall echo to the amplitude of the back-wall echo of a reference sample. The method and system further involves normalizing the signal amplitude according to a reference echo (for laser-ultrasound, the surface echo) to eliminate amplitude variations caused by phenomena not related to porosity.

According to another aspect of the invention, there is provided a method and system for ultrasonically measuring the porosity in a sample composite material by accessing only one side of the sample composite material. The method includes the steps of measuring a sample ultrasonic signal from the sample composite material, normalizing the sample ultrasonic signal relative  
25 to the surface echo of the sample composite material, and isolating a sample back-wall echo signal from the sample ultrasonic signal. A sample frequency spectrum of said sample back-wall ultrasonic signal is then determined. Next, the method and system include the steps of measuring a reference ultrasonic signal from a reference composite material, normalizing said reference  
30 ultrasonic signal relative to the surface echo of the reference composite material and isolating a reference back-wall echo signal from said sample ultrasonic signal. A reference frequency spectrum of said reference back-wall ultrasonic signal is then determined. The invention further includes deriving the ultrasonic attenuation of the sample ultrasonic signal as the ratio of the  
35 sample frequency spectrum to the reference frequency spectrum over a predetermined frequency range. Comparing the derived ultrasonic attenuation to predetermined attenuation standards permits evaluating the porosity of the sampled composite material.

A technical feature of the present invention is the use of the back-wall  
40 echo amplitude of a composite material and comparing it to the back-wall echo amplitude measured from a reference composite material. The present invention normalizes all ultrasonic signals (including reference sample echo) relative

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)



WO 02/06814

PCT/US01/22156

4

to a reference echo (in the case of laser-ultrasound, the surface echo) to eliminate amplitude variations caused by any effects not directly related to porosity

Another technical feature of the present invention is the use of spatial averaging of the ultrasonic traces to easily identify the position of the back wall echo. The present invention includes calculating the full frequency spectra of the sample back wall echo and of the reference back wall echo using windowing techniques. The ratio of these two spectra provides the ultrasonic attenuation as a function of frequency. The present invention uses the ultrasonic attenuation at a given frequency to evaluate porosity relatively to standards established previously for the material inspected, or to use the frequency dependency of ultrasonic attenuation to correlate with porosity level.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

For a more complete understanding of the present invention and the advantages thereof, reference is now made to the following description taken in conjunction with the accompanying drawings in which like reference numerals indicate like features and wherein:

FIGURES 1 and 2 show prior art methods of evaluating porosity in composite materials;

FIGURE 3 illustrates the use of a generation laser beam and a detection laser beam coaxial therewith;

FIGURE 4 is a block diagram showing the basic components of an apparatus for performing ultrasonic laser testing;

FIGURE 5 shows an ultrasonic signal from a low porosity composite and an ultrasonic signal obtained from a medium-to-severe porosity composite;

FIGURE 6 shows an example of laser-ultrasound signal normalization using the surface echo;

FIGURE 7 presents the result of spatial averaging to identify the arrival time of a back-wall echo in a medium-to-severe porosity composite.

FIGURE 8 presents the isolation of the back-wall echo for a composite material according to the present invention;

FIGURE 9 presents the frequency spectra of a reference back-wall echo and of the sample back-wall echo of FIGURE 8; and

FIGURE 10 shows the steps for performing ultrasonic attenuation measurements for porosity measurements according to one embodiment of the present invention.

#### DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENT

Preferred embodiments of the present invention are illustrated in FIGURES 3 through 10 of the drawings, like numerals being used for like and corresponding parts of the various drawings.

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

5

PCT/US01/22156

FIGURE 3 illustrates ultrasonic configuration 10, including incoming laser beam 12 which represents a generation laser beam 14 and a coaxial detection laser beam 16 upon a remote target 20. Generation laser beam 14 causes thermoelastic expansion in the target 20 in the form of ultrasonic surface deformations, which deformations modulate, scatter and reflect detection laser beam 16, represented by the phase-modulated light 18 directed away from target 20.

FIGURE 4 illustrates in block diagram form the basic components of an apparatus 21 for performing ultrasonic laser testing. Apparatus 21 comprises a generation laser 22, a detection laser 24, an interferometer 230, an optional optical processor 235, an optical scanner 240, collection optics 31, systems controller 32, and data acquisition and processing apparatus 34. Generation laser 22 and detection laser 24 generate a generation laser beam 14 and a detection laser beam 16, respectively, which are directed by optical scanner 240 upon a target 20, which is typically a composite material. The generation laser 22 produces a compressional ultrasonic wave in the material normal to the surface of the target 20. The compressional ultrasonic wave is the result of thermoelastic expansion of the composite material as it absorbs generation laser beam 14.

The generation laser 22 must be of a frequency that is readily absorbed into the surface of target 20 without causing ablation or breaking down the target material, and it must be of the appropriate pulse duration to induce ultrasonic surface deformations. For example, a transverse-excited atmospheric ("TEA") CO<sub>2</sub> laser can be used to produce a 10.6-micron wavelength beam for a 100-nanosecond pulse. The power of the laser must be sufficient to deliver, for example, a 0.25-joule pulse to the target, which may require a 100-watt laser operating at a 400 Hz pulse repetition rate. The generation laser should be absorbed as heat into the target surface thereby causing thermoelastic expansion without ablation.

The detection laser 24 must be of sufficient pulse duration to not induce ultrasonic surface displacements. For example, a Nd:YAG laser can be used. The power of this laser must be sufficient to deliver, for example, a 100 millijoule, 100-microsecond pulse, which may require a one-kilowatt laser.

U.S. Patent No. 6,122,060, entitled "METHOD AND APPARATUS FOR DETECTING ULTRASONIC SURFACE DISPLACEMENTS USING POST-COLLECTION OPTICAL AMPLIFICATION," issued to Thomas E. Drake, Jr. on September 19, 2000 (the "Drake Patent") and to which the present invention claims priority in part further describes the above-illustrated system to include a detection laser to generate a first pulsed laser beam to detect the ultrasonic surface displacements on a surface of the target. Collection optics to collect phase modulated light from the first pulsed laser beam either reflected or scattered by the target. An optical amplifier which amplifies the phase modulated light collected by the collection optics. An interferometer which processes the phase modulated

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

PCT/US01/22156

6

light and generates at least one output signal. A processor that processes the at least one output signal to obtain data representative of the ultrasonic surface displacements at the target. The present invention was developed for the effort relating to Drake and may be used in such an environment.

5 Accordingly, the technical information described in Drake is hereby incorporated by reference.

The present invention measures the ultrasonic attenuation using only a back-wall echo to evaluate porosity in composite parts. This procedure is useful for ultrasonic techniques requiring access to only one side of the sample. The first step is to acquire the ultrasonic signal. FIGURES 5A and 10 5B presents ultrasonic signals obtained using laser-ultrasound in a composite with low porosity, in FIGURE 5A, and in a composite with medium to severe porosity, in FIGURE 5B.

Certain aspects of ultrasonic attenuation measurement are well-known 15 techniques for porosity evaluation. Ultrasonic evaluation of attenuation and, using ultrasonic attenuation for solid-state material characterization, are understood, as is the idea of using the ratio of frequency spectra to calculate attenuation as a function of frequency is well known in the art. Known techniques measure small ultrasonic attenuation variations. These 20 measurements are performed from only one side of the sample, but water coupling is required and samples must have polished surfaces. In most cases of using ultrasonic attenuation to evaluate porosity, either TTU technique or RTTU technique are used. Both approaches use the ratio of two back wall echoes to evaluate attenuation.

FIGURES 5A and 5B show ultrasonic signals from a low porosity composite, 25 in FIGURE 5A, and ultrasonic signal obtained from a medium-to-severe porosity composite in FIGURE 5B. One difficulty with the use of a single back-wall echo is that if the amplitude of the measured signal is affected by another factor than porosity, porosity measurement can produce a false reading. The 30 ultrasonic signals need to be normalized in some manner. For this purpose, an ultrasonic signal that is not affected by porosity can be used. In the case of laser-ultrasound, this echo is called surface echo. This echo is produced by the surface displacement created by thermal expansion. The surface echo does not result from an ultrasonic wave. It is directly proportional to the 35 quantity of light collected by the detection system and to the efficiency of the generation mechanism, assuming laser-ultrasound generation in an homogeneous material and a flat-frequency response of the detection system. Even if these conditions are not perfectly matched, normalization by the surface provides in a first approximation a good correction for variations of 40 reflectivity and of generation and for variations of measurement incidence angle. FIGURE 6 shows an example of laser-ultrasound signal normalization using the surface echo.

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

7

PCT/US01/22156

The next step in the process of the present invention is to identify the arrival time of the back-wall echo. In FIGURE 5A, the first back-wall echo is easily identified. In the case of FIGURE 5B, on the other hand, the identification of the back-wall echo is not easy. To identify the exact time of the back-wall echo, the ultrasonic signals can be spatially averaged to eliminate the spurious echoes caused by backscattering on porosity defects. The spatially-averaged signal at a given position is obtained by averaging the values of the signals at neighbor positions for each time. For example, the spatial-averaged signal at position (50,50) is obtained by averaging for each time values the ultrasonic signals between position (48,48) and (52,54) if a kernel of 5x5 is used. The spatial averaging is used only to identify the time of the back-wall echo. The back-wall echo arrival time of the spatial-averaged signal is used on the non-averaged signal to window correctly the back-wall echo in case sample thickness varies.

FIGURES 7A and 7B present the result of spatially averaging to identify the arrival time of a back-wall echo in a medium-to-severe porosity composite. In particular, FIGURE 7A shows the ultrasonic signal without spatial averaging, while FIGURE 7B depicts the ultrasonic signal at the same position using spatial averaging with a 9x9 kernel. When the arrival time of the back-wall echo has been found. This echo must be isolated from the remaining of the signal. The echo is isolated using windowing techniques. Different types of windowing techniques may be used, according to the given material and the type of signal received

FIGURE 8 presents the isolation of the back-wall echo of FIGURE 7A. The window position was obtained using the maximum of the analytic signal of FIGURE 7B inside a time-window determined so that the surface echo does not interfere. In particular, FIGURE 8 shows the effect of isolating back-wall echo from the rest of the signal using classical windowing techniques. The frequency spectrum of the back-wall echo is then calculated. This frequency spectrum is then divided by the frequency spectrum of a reference signal. The reference signal is obtained using the same experimental procedure and the same signal-processing steps as the ones described previously for the signal currently analyzed. The reference signal is obtained from a pristine sample made of the same material with very low porosity and having the same thickness than the sample currently tested.

FIGURE 9 presents the frequency spectra of a reference echo and of the back-wall echo of FIGURE 8. In FIGURE 9, the frequency spectra of a reference echo is shown as solid line 40 and of the echo of FIGURE 6 is shown as dotted line 42. The ratio of the two spectra gives the ultrasonic attenuation as a function of frequency. To evaluate porosity, the ultrasonic attenuation at a given frequency can be compared to pre-determined standards or the frequency dependency of attenuation can be used.

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

8

PCT/US01/22156

FIGURE 10 shows the steps required to perform ultrasonic attenuation measurements for porosity measurements according to the present invention. FIGURE 10 shows flow diagram 50 of the process of the present invention for evaluating the porosity of a composite material. Referring to block 52, the present invention involves the step of measuring the ultrasonic signal from a composite material. This is done for both a reference composite material and a sample composite material. Then, the present invention involves normalizing each of these signal measurements, at block 54, with reference to amplitude of the respective materials' surface echoes. Block 56 references the steps of determining the back-wall echoes for both the normalized ultrasonic signals. Then, at block 58, the process continues through the steps of calculating the frequency spectrum of each of the normalized and measured signals. Block 60 accounts for the process step of dividing the frequency spectrum of the signal by the frequency spectrum of the normalized reference back-wall echo. This results in an ultrasonic attenuation measurement arising at a given frequency or dependency of attenuation frequency to evaluate the sample composite material's porosity, as block 62 depicts.

The process of FIGURE 10 may be performed manually or automatically through a computer and related ultrasonic sensing system, such as the system described in FIGURES 1 and 2 and in the Drake Patent. Accordingly, the present invention encompasses a system fully capable of automatically performing instructions and possessing the necessary data storage and manipulation capabilities to carry out the described process.

Although the present invention has been described in detail, it should be understood that various changes, substitutions and alterations can be made hereto without departing from the spirit and scope of the invention as defined by the appended claims.

WO 02/06814

9

PCT/US01/22156

WHAT IS CLAIMED IS:

- 1 1. A method for ultrasonically measuring the porosity in a sample  
2 composite material by accessing only one side of the sample composite  
3 material, comprising the steps of:  
4 measuring a sample ultrasonic signal from the sample composite material;  
5 normalizing said sample ultrasonic signal;  
6 isolating a sample back-wall echo signal from said sample ultrasonic  
7 signal;  
8 determining a sample frequency spectrum of said sample back-wall  
9 ultrasonic signal;  
10 measuring a reference ultrasonic signal from a reference composite  
11 material;  
12 normalizing said reference ultrasonic signal;  
13 isolating a reference back-wall echo signal from said sample ultrasonic  
14 signal;  
15 determining a reference frequency spectrum of said reference back-wall  
16 ultrasonic signal;  
17 deriving the ultrasonic attenuation of said sample ultrasonic signal as  
18 the ratio of said sample frequency spectrum to said reference frequency  
19 spectrum over a predetermined frequency range; and  
20 comparing said derived ultrasonic attenuation to predetermined  
21 attenuation standards for evaluating the porosity of the sampled composite  
22 material.
- 1 2. The method of Claim 1, further comprising the step of generating  
2 said sample ultrasonic signal using a laser ultrasonic signal generating  
3 mechanism.
- 1 3. The method of Claim 1, further comprising the step of spatially  
2 averaging said sample ultrasonic signal for identifying the arrival time of a  
3 back-wall echo in a medium-to-severe porosity composite.
- 1 4. The method of Claim 1, further comprising the step of isolating said  
2 sample back-wall echo signal using a windowing process.
- 1 5. The method of Claim 1, further comprising the step of evaluating the  
2 porosity of said sample composite material predetermined frequencies relative  
3 to pre-determined frequency dependency standards.

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

10

PCT/US01/22156

1           6. The method of Claim 1, further comprising the step of normalizing  
2 said sample ultrasonic signal relative to the surface echo of the sample  
3 composite material.

1           7. The method of Claim 1, further comprising the step of generating  
2 said sample ultrasonic signal as a laser ultrasonic signal through the  
3 collection of phase modulated light from a first pulsed laser beam either  
4 reflected or scattered by the sample composite material and further amplifying  
5 the phase modulated light collected by the collection optics using an optical  
6 amplifier

1           8. A system for ultrasonically measuring the porosity in a sample  
2 composite material by accessing only one side of the sample composite  
3 material, comprising:  
4           instructions for measuring a sample ultrasonic signal from the sample  
5 composite material;  
6           instructions for normalizing said sample ultrasonic signal relative to  
7 the surface echo of the sample composite material;  
8           instructions for isolating a sample back-wall echo signal from said  
9 sample ultrasonic signal;  
10          instructions for determining a sample frequency spectrum of said sample  
11 back-wall ultrasonic signal;  
12          instructions for measuring a reference ultrasonic signal from a  
13 reference composite material;  
14          instructions for normalizing said reference ultrasonic signal relative  
15 to the surface echo of the reference composite material;  
16          instructions for isolating a reference back-wall echo signal from said  
17 sample ultrasonic signal;  
18          instructions for determining a reference frequency spectrum of said  
19 reference back-wall ultrasonic signal;  
20          instructions for deriving the ultrasonic attenuation of said sample  
21 ultrasonic signal as the ratio of said sample frequency spectrum to said  
22 reference frequency spectrum over a predetermined frequency range; and  
23          instructions for comparing said derived ultrasonic attenuation to  
24 predetermined attenuation standards to for evaluating the porosity of the  
25 sampled composite material.

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

11

PCT/US01/22156

1 9. The system of Claim 8, further comprising instructions for generating  
2 said sample ultrasonic signal using a laser ultrasonic signal generating  
3 mechanism.

1 10. The system of Claim 8, further comprising instructions for spatially  
2 averaging said sample ultrasonic signal for identifying the arrival time of a  
3 back-wall echo in a medium-to-severe porosity composite.

1 11. The system of Claim 8, further comprising instructions for isolating  
2 said sample back-wall echo signal using a windowing process.

1 12. The system of Claim 8, further comprising instructions for  
2 evaluating the porosity of said sample composite material predetermined  
3 frequencies relative to pre-determined frequency dependency standards.

1 13. The system of Claim 8, further comprising instructions for  
2 normalizing said sample ultrasonic signal relative to the surface echo of the  
3 sample composite material.

1 14. The system of Claim 8, further comprising instructions for  
2 generating said sample ultrasonic signal as a laser ultrasonic signal through  
3 the collection of phase modulated light from a first pulsed laser beam either  
4 reflected or scattered by the sample composite material and further amplifying  
5 the phase modulated light collected by the collection optics using an optical  
6 amplifier.

1 15. A method for detecting ultrasonic surface displacements on a target  
2 including method for ultrasonically measuring the porosity in a sample  
3 composite material by accessing only one side of the sample composite  
4 material, comprising the steps of:  
5 generating ultrasonic surface displacements at the target;  
6 using a first pulsed laser beam to detect the ultrasonic surface  
7 displacements at the target;  
8 collecting phase modulated light from the first pulsed laser beam  
9 scattered by the target;  
10 optically amplifying the phase modulated light after the phase modulated  
11 light has been collected;

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)



WO 02/06814

12

PCT/US01/22156

12 preventing reflected phase modulated light feedback into an optical  
13 amplifier with at least one optical isolation assembly placed in the path of  
14 propagation of the phase modulated light which has been collected;  
15 processing the phase modulated light to obtain data representative of  
16 the ultrasonic surface displacements at the target; and  
17 ultrasonically measuring the porosity in a sample composite material by  
18 accessing only one side of the sample composite material, said ultrasonically  
19 measuring comprising the steps of:  
20 instructions for measuring a sample ultrasonic signal from the sample  
21 composite material;  
22 instructions for normalizing said sample ultrasonic signal relative to  
23 the surface echo of the sample composite material;  
24 instructions for isolating a sample back-wall echo signal from said  
25 sample ultrasonic signal;  
26 instructions for determining a sample frequency spectrum of said sample  
27 back-wall ultrasonic signal;  
28 instructions for measuring a reference ultrasonic signal from a  
29 reference composite material;  
30 instructions for normalizing said reference ultrasonic signal relative  
31 to the surface echo of the reference composite material;  
32 instructions for isolating a reference back-wall echo signal from said  
33 sample ultrasonic signal;  
34 instructions for determining a reference frequency spectrum of said  
35 reference back-wall ultrasonic signal;  
36 instructions for deriving the ultrasonic attenuation of said sample  
37 ultrasonic signal as the ratio of said sample frequency spectrum to said  
38 reference frequency spectrum over a predetermined frequency range; and  
39 instructions for comparing said derived ultrasonic attenuation to  
40 predetermined attenuation standards to for evaluating the porosity of the  
41 sampled composite material.

1 16. The method of Claim 15, further comprising the step of generating  
2 said sample ultrasonic signal using a laser ultrasonic signal generating  
3 mechanism.

1 17. The method of Claim 15, further comprising the step of spatially  
2 averaging said sample ultrasonic signal for identifying the arrival time of a  
3 back-wall echo in a medium-to-severe porosity composite.

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

WO 02/06814

13

PCT/US01/22156

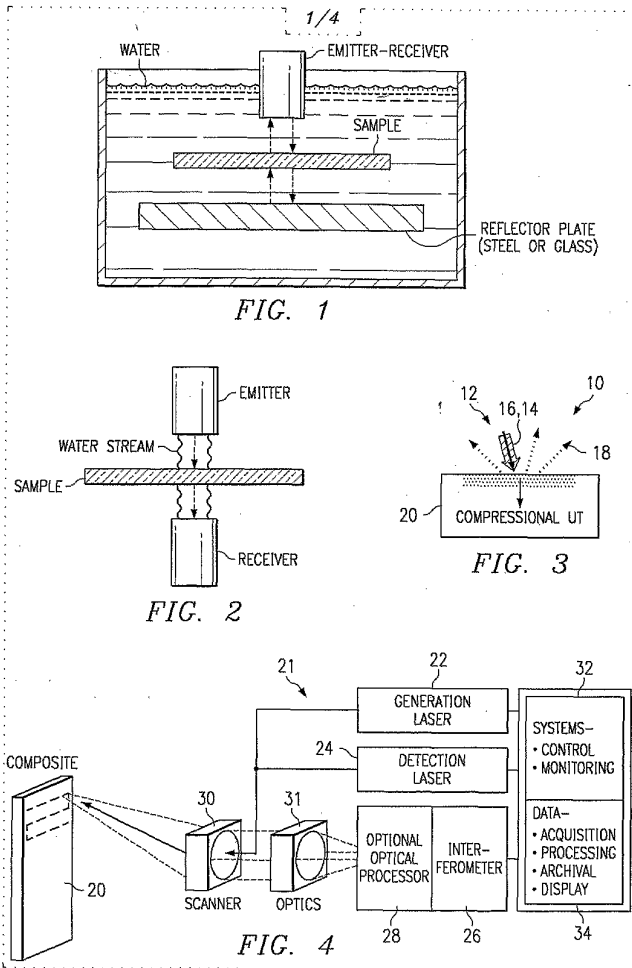
1           18. The method of Claim 15, further comprising the step of isolating  
2 said sample back-wall echo signal using a windowing process.

1           19. The method of Claim 15, further comprising the step of evaluating  
2 the porosity of said sample composite material predetermined frequencies  
3 relative to pre-determined frequency dependency standards.

1           20. The method of Claim 15, further comprising the step of normalizing  
2 said sample ultrasonic signal relative to the surface echo of the sample  
3 composite material.

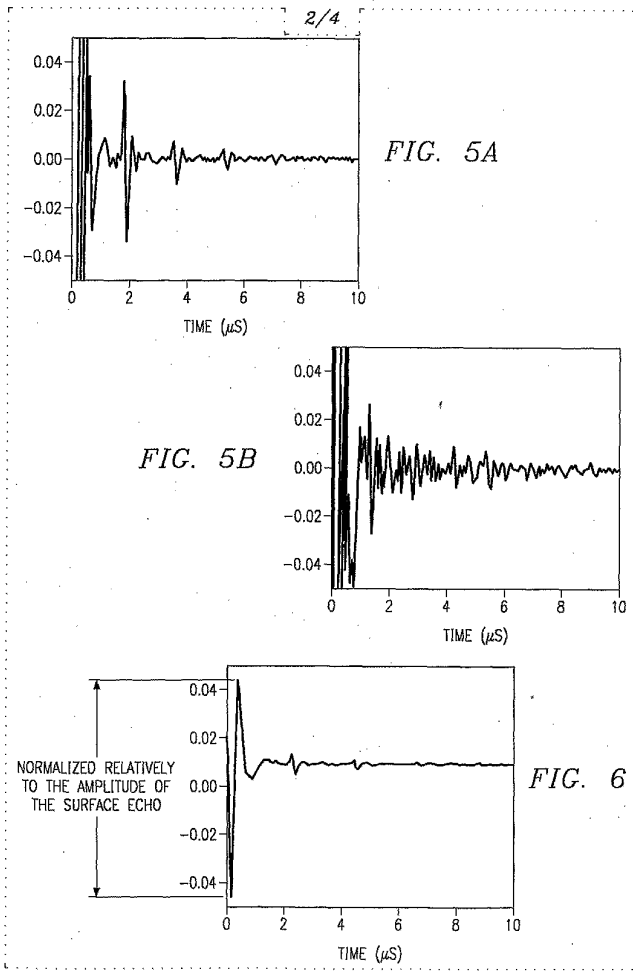
WO 02/06814

PCT/US01/22156



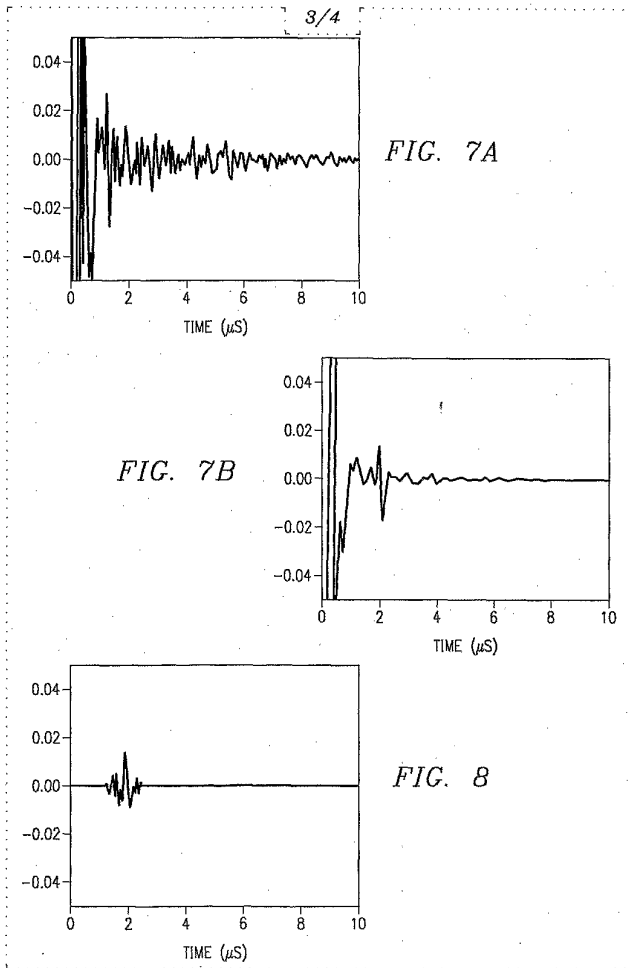
WO 02/06814

PCT/US01/22156



WO 02/06814

PCT/US01/22156



4/4

FIG. 9

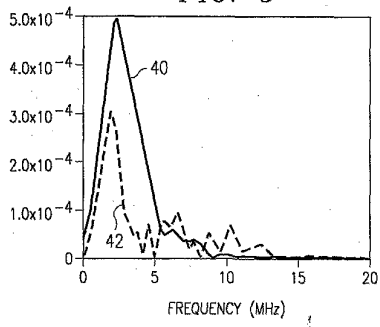
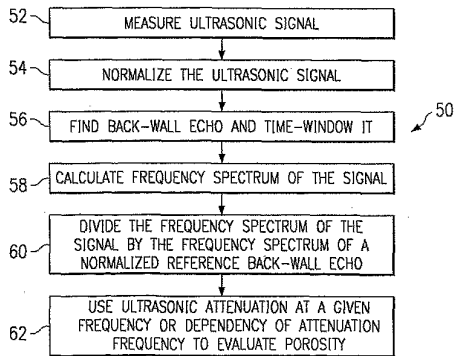


FIG. 10



【国際公開パンフレット(コレクトバージョン)】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau



(43) International Publication Date  
24 January 2002 (24.01.2002)

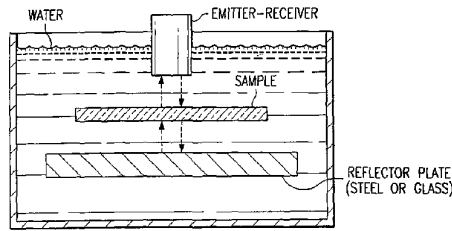
PCT

(10) International Publication Number  
WO 02/006814 A3

- (51) International Patent Classification: **G01N 29/10**, NY 12068 (US), **DEATON, John, B., Jr.**, 1112 Merlin Drive, Niskayuna, NY 12309 (US), 29/24
  - (21) International Application Number: PCT/US01/22156
  - (22) International Filing Date: 13 July 2001 (13.07.2001)
  - (25) Filing Language: English
  - (26) Publication Language: English
  - (30) Priority Data: 60/218,341 14 July 2000 (14.07.2000) US
  - (71) Applicant: **LOCKHEED MARTIN CORPORATION** (US/US); 6801 Rockledge Drive, Bethesda, Maryland 20817 (US)
  - (72) Inventors: **DUBOIS, Marc**; 40 Stoney Creek Drive, Clifton Park, NY 12065 (US). **LORRAINE, Peter, W.**; 876 Heather Lane, Niskayuna, NY 12309 (US). **DRAKE, Thomas, E., Jr.**; 2418 5th Avenue, Fort Worth, TX 76110 (US). **FILKINS, Robert, J.**; 122 Pilling Drive, Fonda,
  - (74) Agent: **HULSEY, William, N.**; Hughes & Luce, L.L.P., Suite 2800, 1717 Main Street, Dallas, TX 75210 (US).
  - (81) Designated States (national): AF, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CI, CN, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LX, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZW.
  - (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GI, GM, KL, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Published:**  
— with international search report

[Continued on next page]

(54) Title: A SYSTEM AND METHOD OF DETERMINING POROSITY IN COMPOSITE MATERIALS USING ULTRASOUND



(57) Abstract: The invention provides for ultrasonically measuring the porosity in a sample composite material by accessing only one side of the sample composite material and includes the steps of measuring a sample ultrasonic signal from the sample composite material, normalizing the sample ultrasonic signal relative to the surface echo of the sample composite material, and isolating a sample back-wall echo signal from the sample ultrasonic signal. A sample frequency spectrum of the sample back-wall ultrasonic signal is then determined. Next, the method and system include the steps of measuring a reference ultrasonic signal from a reference composite material, normalizing the reference ultrasonic signal relative to the surface echo of the reference composite material, and isolating a reference back-wall echo signal from the sample ultrasonic signal. A reference frequency spectrum of the reference back-wall ultrasonic signal is then determined. The invention further includes deriving the ultrasonic attenuation of the sample ultrasonic signal as the ratio of the sample frequency spectrum to the reference frequency spectrum over a predetermined frequency range. Comparing the derived ultrasonic attenuation to predetermined attenuation standards permits evaluating the porosity of the sampled composite material.



WO 02/006814 A3

WO 02/006814 A3 

*before the expiration of the time limit for amending the claims and to be republished in the event of receipt of amendments*

*For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.*

**(88) Date of publication of the international search report:**  
26 September 2002



## 【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/US 01/22156
<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> IPC 7 G01N29/10 G01N29/24		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 G01N		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 98 22814 A (LAPLANT FREDERICK P ET AL) 28 May 1998 (1998-05-28)  page 9, line 7 -page 9, line 21	1-3, 5-10, 12-17, 19,20
A	WO 98 22801 A (LAPLANT FREDERICK P AUTOSPECT INC (US); DIXON JOHN W (US); WHITE) 28 May 1998 (1998-05-28) the whole document	1,8,15
A	US 5 608 166 A (MONCHALIN JEAN-PIERRE ET AL) 4 March 1997 (1997-03-04) the whole document	1,7,8, 14,15
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents: *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance *C* earlier document but published on or after the international filing date *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art *Z* document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 22 July 2002		Date of mailing of the international search report 29/07/2002
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 apo.nl, Fax. (+31-70) 340-3010		Authorized officer Kouze11s, D

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.  
PCT/US 01/22156

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 9822814 A	28-05-1998	EP 1007942 A1	14-06-2000
		EP 1023595 A1	02-08-2000
		WO 9822801 A1	28-05-1998
		WO 9822814 A1	28-05-1998
		US 6092419 A	25-07-2000
		US 6128081 A	03-10-2000
WO 9822801 A	28-05-1998	EP 1007942 A1	14-06-2000
		EP 1023595 A1	02-08-2000
		WO 9822801 A1	28-05-1998
		WO 9822814 A1	28-05-1998
		US 6092419 A	25-07-2000
		US 6128081 A	03-10-2000
US 5608166 A	04-03-1997	DE 19641653 A1	17-04-1997
		FR 2739934 A1	18-04-1997

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT,BE,CH,CY,DE,DK,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GW,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EE,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,NO,NZ,PL,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TR,TT,TZ,UA,UG,UZ,VN,YU,ZA,ZW

(74)代理人 100080263

弁理士 岩本 行夫

(72)発明者 デュボワ、マルク

アメリカ合衆国 ニューヨーク、クリフトン パーク、ミシェル ドライブ 53

(72)発明者 ロレイン、ピーター、ダブリュ

アメリカ合衆国 ニューヨーク、ニスカユナ、ヘザー レイン 876

(72)発明者 ドレイク、トーマス、イー、ジュニア

アメリカ合衆国 テキサス、フォート ワース、ライアン プレイス ドライブ 2530

(72)発明者 フィルキンズ、ロバート、ジェイ

アメリカ合衆国 ニューヨーク、ニスカユナ、ランキン ロード 2114

(72)発明者 ディートン、ジョン、ビー、ジュニア

アメリカ合衆国 ニューヨーク、ニスカユナ、マーリン ドライブ 1112

Fターム(参考) 2G047 AA05 AB00 BC00 BC04 BC07 CA04 GG29 GG32 GG37 GG38