

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

302 194

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

G01B 21/08 (2006.01)

G01B 11/06 (2006.01)

G01N 25/72 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2001-3674**
 (22) Přihlášeno: **13.04.2000**
 (30) Právo přednosti: **16.04.1999 US 09/292,886**
 (40) Zveřejněno: **17.04.2002**
(Věstník č. 4/2002)
 (47) Uděleno: **01.11.2010**
 (24) Oznámení o udělení ve Věstníku: **08.12.2010**
(Věstník č. 49/2010)
 (86) PCT číslo: **PCT/US2000/010068**
 (87) PCT číslo zveřejnění: **WO 2000/063642**

(56) Relevantní dokumenty:

US 4792683; WO 9805921; US 5711603; EP 304708; US 5631465; JP 10274675.

(73) Majitel patentu:

GENERAL ELECTRIC COMPANY, Schenectady, NY,
US

(72) Původce:

Ringermacher Harry Israel, Delanson, NY, US
 Howard Donald Robert, Troy, NY, US
 Pandey Ravindra Kumar, Albany, NY, US

(74) Zástupce:

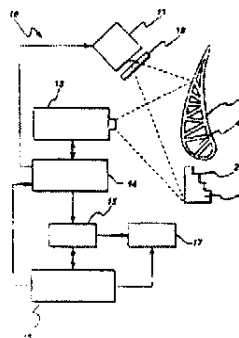
JUDr. Otakar Švorčík, Hálkova 2, Praha 2, 12000

(54) Název vynálezu:

**Způsob infračervené tranzientní termografie
pro určování tloušťky předmětu a zařízení k
jeho realizaci**

(57) Anotace:

Tranzientní termografický systém (10) infračervené tranzientní termografie zahrnuje vysoce výkonnou zábleskovou lampu tvořící zdroj (11) tepelného impulzu vybavenou spektrálně naladěnými optickými filtry (18) a kameru (13) s polem senzorů v ohniskové rovině, za účelem shromažďování infračervených obrazových dat. Řídící počítač (16) zpracování obrazových dat analyzuje shromážděné infračervené obrazové datové snímky a zajišťuje barevně laděné zobrazení na zobrazovacím monitoru (17) zobrazovaného předmětu (1), které odpovídá tloušťce objektu v zobrazované povrchové oblasti. Shromažďování infračervených dat se inicializuje spuštěním zábleskové lampy, která je použita pro zahřátí povrchu předmětu (1). V předem určené časové periodě po spuštění lampy se shromáždí a zaznamená do paměti (15) snímkových dat předem určený počet infračervených obrazových snímků, za účelem zjištění teplotně-časové (T-t) historie povrchu objektu. Pro každý obrazový prvek obrazového snímku se vypočte kontrastní křivka, přičemž každý obrazový prvek odpovídá elementární oblasti na povrchu objektu.



CZ 302194 B6

Způsob infračervené tranzientní termografie pro určování tloušťky předmětu a zařízení k jeho realizaci

5 Oblast techniky

Předkládaný vynález se vztahuje k termografickým nedestruktivním testovacím technikám pro určení tloušťky objektu. Zejména se vztahuje k metodě velmi rychlé infračervené tranzientní termografie a k zařízení pro přesné měření tloušťky stěny kovových lopatek turbíny rotoru nebo podobně.

Dosavadní stav techniky

15 Během let byly k určení průřezové tloušťky kovového odlitku a jiných pevných předmětů využívány různé nedestruktivní ultrazvukové techniky měření. Běžně je předmět prozkoumáván ultrazvukovými vlnami, které pronikají povrchem a jsou odraženy vnitřně na opačné straně nebo povrchu daného předmětu. Na základě doby potřebné k příjmu odražené vlny je možné určit vzdálenost opačné (zadní) stěny, čímž je dána tloušťka předmětu v daném bodě. Bohužel, provádění ultrazvukových měření tohoto typu ke zjištění průřezové tloušťky pro většinu předmětů by si obvykle vynutilo obtížné a časově náročné mechanické snímání celého povrchu pomocí snímače. Kromě toho se pro usnadnění těsného zvukového kontaktu mezi snímačem a povrchem předmětu musí na tento povrch aplikovat proud tekutého vazebného prostředí, nebo se alternativně musí zařadit celkové ponoření předmětu do vazebného prostředí. Nicméně takováto přizpůsobování nejsou často praktická nebo dokonce proveditelná, díky mnoha strukturálním a materiálním důvodům. Například ultrazvukové systémy, schopné snímat a analyzovat geometricky složité části, jsou obvykle velmi drahé a složité. Mechanické snímání povrchu velkého předmětu snímačem může trvat doslova celé hodiny.

30 Navíc, pokud provádíme ultrazvukové měření na některých kovových předmětech, mohou vnitřní krystalová orientace a struktura kovu způsobit nežádoucí šumové a směrové efekty, které přispívají k nepřesnostem ve shromážděných datech. Toto základní omezení ultrazvukových měření se ukazuje jako závažná nevýhoda při testování součástí konstruovaných z krystalických nebo „směrových“ kovů, které jsou často používány v moderních turbínových křídlových profilech.

35 Naproti tomu je infračervená (IR) tranzientní termografie poněkud všestrannější metoda testování, která se spoléhá na časová měření teplotního přenosu předmětem pro získání informací vztahujících se ke struktuře a integritě daného předmětu. Díky tomu, že tok tepla předmětem je v podstatě neovlivněný mikrostrukturou a orientací jednotlivých krystalů materiálu daného předmětu, nemá tranzientní infračervená termografická analýza v podstatě omezení, která toto vytváří pro ultrazvukové měření. Narozdíl od většiny ultrazvukových metod, není přístup tranzientní termografické analýzy podstatně omezen velikostí, obrysem nebo tvarem testovaného předmětu a navíc může být provedena desetkrát až stokrát rychleji než většina běžných ultrazvukových metod, pokud je testován předmět s velkou povrchovou plochou.

45 Jedna známá moderní aplikace tranzientní termografie, která poskytuje možnost určení velikosti a „relativního“ umístění (hloubky) vady v pevných nekovových směsích, se objevuje v patentu US 5 711 603 Ringermacher et al., nazvaném „Nedestruktivní testování: Tranzientní hloubková termografie“, která je začleněna na tomto místě jako odkaz. Tato technika v podstatě zahrnuje zahřívání povrchu zkoumaného předmětu a zaznamenávání změn teploty v čase ve velmi malých oblastech neboli v „rozlišovacích prvcích“ na povrchu daného předmětu. Tyto změny teploty povrchu se vztahují k charakteristické dynamice tepelného toku předmětem, která je ovlivněna přítomností vad. Podle toho může být určena velikost a hodnota udávající „relativní“ hloubku vady (to jest relativně k jiným vadám v daném předmětu) na základě pečlivé analýzy změn teploty, které se objevují v každém rozlišovacím prvku na povrchu daného předmětu. Ačkoliv to

není ve výše zmíněném Ringermacherově patentu výslovně řečeno, „skutečná“ hloubka vady (to jest hloubka vady od povrchu předmětu) nemůže být určena, pokud není na předmětu obsažen „standardizační blok“, který má dutiny ve známých hloubkách nebo „nekonečná“ (tepelně tlustá) referenční oblast, jako část termografického shromažďování dat a analýzy pro porovnání s relativními hodnotami hloubky.

K získání přesných tepelných měření za použití tranzientní termografie se musí povrch předmětu zahřát na určitou teplotu v dostatečně krátké době tak, aby se zamezilo jakémukoliv významnému zahřívání zbytku předmětu. V závislosti na tloušťce a charakteristice materiálu testovaného předmětu, se běžně používá křemenná lampa nebo záblesková lampa s vysokou intenzitou k tomu, aby byl vytvořen tepelný impuls správné velikosti a doby trvání. Nicméně, specifický mechanismus, který se použije k zahřívání povrchu předmětu, může být jakýkoli mechanismus schopný rychlého zahřívání povrchu na teplotu dostatečnou pro umožnění termografického monitorování, jako je například pulsující laserové světlo. Když je povrch předmětu zahřátý, získává se a analyzuje grafický záznam tepelných změn povrchu.

Infračervená (IR) videokamera bývala běžně používána k zaznamenání a uložení po sobě jdoucích tepelných obrazů (snímků) povrchu předmětu po jeho zahřátí. Každý videosnímek je složen z pevného množství obrazových prvků. V této souvislosti je obrazový prvek malý prvek obrázku v obrazovém poli neboli snímku, který odpovídá pravoúhlé oblasti, nazývané „rozlišovací prvek“, na povrchu zobrazovaného předmětu. Jelikož teplota v každém rozlišovacím prvku přímo souvisí s intenzitou odpovídajícího obrazového prvku, mohou být změny teploty v každém rozlišovacím prvku na ploše předmětu analyzovány jako změny kontrastu obrazového prvku. Uložené videosnímky jsou použity k určení kontrastu každého obrazového prvku v obrazovém snímku odečtením střední intenzity obrazového prvku pro konkrétní obrazový snímek, představující známý bod v čase, od intenzity individuálního obrazového prvku ve stejném časovém bodě.

Data o kontrastu pro každý obrazový prvek jsou pak analyzována v časové oblasti (to jest, přes více obrazových snímků) za účelem identifikace času objevení se „inflexního bodu“ na datech křivky kontrastu, který matematicky souvisí s relativní hloubkou vady v předmětu. V podstatě, při aplikaci na „deskový“ předmět z pevného materiálu o tloušťce L , potřebuje impuls tepelného toku dopadající na předmět určitý „charakteristický čas“ T_c na to, aby pronikl předmětem na druhou stranu (zadní stěnu) a vrátil se na zobrazovaný přední povrch. Tento charakteristický čas T_c se vztahuje k tloušťce předmětu, při dané tepelné rozptylnosti materiálu, podle následující rovnice:

$$T_c = 4L^2/\pi^2\alpha \quad \text{rovnice (1),}$$

kde L je tloušťka (v cm) předmětu a α je tepelná rozptylnost (v cm^2/sec) materiálu.

Z empirických pozorování je známo, že poté co tepelný impuls dopadne na deskový předmět, teplota povrchu pozorovaná ze stejné strany předmětu (to jest přední) stoupá způsobem, který je také závislý na tloušťce a tepelné rozptylnosti materiálu. Kromě toho se z grafu čas vs. tepelná ($T-t$) historie povrchu dá určit charakteristický čas T_c na základě specifického bodu na křivce $T-t$, který se nazývá „inflexní bod“. Tento inflexní bod t_{infl} , je indikován bodem maximální strmosti na $T-t$ křivce (tj. časem špičkové strmosti) a souvisí s charakteristickým časem T_c podle následující rovnice:

$$t_{\text{infl}} = 0.9055 T_c \quad \text{rovnice (2).}$$

Tento vztah mezi inflexním bodem a charakteristickým časem, jak je vyjádřen rovnicí (2), je přesný na 1% pro jednorozměrnou (1-D) a stejně tak pro dvourozměrnou (2-D) analýzu tepelného toku. Když je z odezvy $T-t$ určen inflexní bod t_{infl} , je možné určit relativní tloušťku L předmětu z rovnice (1), za použití známé tepelné rozptylnosti α materiálu a skutečné hodnoty T_c z rovnice (2).

Podrobnější diskusi o vztahu, invariantním k tepelnému toku, mezi časem špičkové strmosti (inflexní bod) a „charakteristickým časem“ materiálu, jak je definováno výše je možné nalézt v Review Of Progress In Quantitative Nondestructive Evaluation, v článku od Ringermachera et al., nazvaném „Towards a Flat-Bottom Hole Standard for Thermal Imaging“, který publikovalo Plenum Press, New York, květen 1998, který je začleněn na tomto místě jako odkaz.

Bohužel, přestože výše odkazovaná patentovaná metoda Ringermacher et al., pro detekci vad může být efektivní u keramiky, plastů, směsí a jiných nekovových předmětů, není zvláště použitelná pro určování tloušťky kovových předmětů. Jedním z problémů je, že kovy mají významně vyšší charakteristickou tepelnou vodivost a tepelnou rozptýlnost, než mají nekovy. To snižuje časový úsek, během kterého mohou být shromažďována užitečná tepelná data a požaduje zvyšování citlivosti infračerveného záznamového zařízení. Zvýšená citlivost zařízení způsobuje nepřesnosti ve shromažďovaných datech vznikající z infračerveného šumu z jiných okolních infračervených zdrojů, jako jsou zábleskové lampy. Navíc, jelikož zařízení a metoda dle výše uvedeného patentu Ringermacher et al. produkuje pouze „relativní“ měření, nemůže být použita pro získávání hodnot pro skutečnou tloušťku kovového předmětu v požadovaném bodě. Následkem toho je třeba vylepšená metoda provádění a zpracování infračervené tranzientní termografie, za účelem určování skutečné tloušťky kovových předmětů.

Podstata vynálezu

Předkládaný vynález se vztahuje k nedestruktivní testovací metodě a zařízení pro určování a zobrazování skutečné tloušťky předmětu, za použití rychlé infračervené (IR) tranzientní termografie. Specifický aspekt předkládaného vynálezu je to, že předmětem zájmu může být kovový materiál i přesto, že kovy mají vysoké hodnoty tepelné vodivosti.

Podstata způsobu infračervené tranzientní termografie pro určování tloušťky předmětu spočívá v provádění následujících kroků. Nejprve dochází k ukládání dat o intenzitě obrazového prvku z předem určeného sledu obrazových snímků získaných z kamery s polem senzorů v ohniskové rovině citlivé na infračervené záření. Každému následně shromážděnému obrazovému snímku je přiřazeno číslo snímku se vzrůstající hodnotou lineárně odpovídající uplynulému času. Poté se určí kontrastní křivky obrazového prvku z dat intenzity obrazového prvku pro obrazový prvek ze zmíněného sledu obrazových snímků. Provede se gaussovské časové vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku získané v předešlém kroku. Určí se časová derivace dat kontrastní křivky obrazového prvku z oddělených datových bodů v čase na kontrastní křivce po gaussovském časovém vyhlazení. Dále se identifikuje lokalizovaný vrchol derivovaných hodnot v časové derivaci dat kontrastní křivky obrazového prvku, načež se použije předem určená váhová funkce na zmíněné lokalizované vrcholové hodnoty identifikované v předešlém kroku k určení hodnoty významu pro každou identifikovanou vrcholovou hodnotu derivace. Vybere se jedna vrcholová hodnota derivace kontrastní křivky na základě určené nejvýznamnější hodnoty a určí se tloušťka předmětu L na základě čísla snímku toho obrazového snímku, ve kterém se objeví vrcholová hodnota derivace kontrastní křivky, vybraná v předešlém kroku.

Kontrastní křivku obrazových prvků lze určit odečtením dat referenční křivky obrazového prvku od dat intenzity obrazového prvku pro daný obrazový prvek. Data referenční křivky obrazového prvku lze v jednom případě určit z dat intenzity obrazového prvku tepelně tlusté referenční části předmětu, kde tato referenční část aproximuje charakteristiky hypotetického nekonečně tlustého předmětu. Jinou možností je, že data referenční křivky obrazového prvku jsou určeny z dat intenzity obrazového prvku získaných z tepelně tlusté oblasti odděleného kovového referenčního kusu, která má značně podobné charakteristiky vodivosti tepla a je zobrazen spolu s předmětem.

V jednom možném provedení je proměnná emisní schopnost způsobená zakřivením povrchu a/nebo různými stavy povrchu zobrazovaného předmětu kompenzována modifikací dat intenzity obrazového prvku předem určeným ziskovým faktorem pro vybrané obrazové prvky.

Data intenzity obrazového prvku pro vybrané obrazové prvky je možné modifikovat za účelem kompenzace vlivů proměnné infračervené emisní schopnosti díky zakřivením povrchu daného předmětu.

- 5 V dalším provedení je kontrastní křivka obrazového prvku zahrnující data intenzity obrazového prvku získaná v předem určeném časovém úseku přesazena srovnáním vybraných bodů na křivce intenzity obrazového prvku s vybranými body na normalizované referenční křivce obrazového prvku.
- 10 Jinou možností je, že velikost časového vyhlazovacího okna použitého pro gaussovské vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku je buď úměrná číslu snímku, která odpovídá počátečnímu času vyhlazovacího okna tak, že velikost vyhlazovacího okna vzrůstá s časem, nebo je úměrná druhé odmocnině čísla snímku, které odpovídá počátečnímu času vyhlazovacího okna.
- 15 Časová derivace dat kontrastní křivky obrazového bodu se může získat použitím běžného tří-bodového derivačního algoritmu modifikovaného výběrem tří datových bodů na kontrastní křivce rovnoměrně rozložených v čase takových, že první a třetí datový bod jsou odděleny časovým úsekem úměrným druhé odmocnině hodnoty čísla snímku pro druhý (střední) datový bod.
- 20 V jednom možném provedení je tloušťka L určena následujícími rovnicemi:

$$T_c = 4L^2/B^2V \quad a$$

$$t_{inf} = 0,9055T_c,$$

- 25 kde V je tepelná rozptylnost předmětu a kde t_{inf} přímo souvisí s hodnotou čísla snímku toho obrazového snímku, ve kterém se objeví vrchol derivace kontrastní křivky s největším významem.

- 30 Jinou možností je, že předmět je před shromažďováním infračervených obrazových snímků pokryt tenkou vrstvou látky s vysokou ultrafialovou viditelností a infračervenou emisní schopností.

- 35 Další varianta spočívá v těchto dodatečných krocích. Dochází ke shromažďování dat intenzity obrazového prvku z předem určené posloupnosti infračervených obrazových snímků předmětu za použití kamery s polem senzorů v ohniskové rovině citlivé na infračervené záření, kde každý obrazový snímek zahrnuje množinu obrazových prvků. Poté se získají hodnoty reprezentující průměrnou intenzitu obrazového prvku z dat intenzity obrazových prvků odpovídajících tepelné tlusté referenční části předmětu. Následně se určí data kontrastu obrazových prvků odečítáním zmíněné hodnoty reprezentující průměrnou intenzitu obrazového prvku od dat intenzity obrazového prvku pro daný obrazový prvek. Tyto dva poslední kroky se opakují pro každý snímek zmíněné posloupnosti infračervených obrazových snímků za účelem získání teplotně-časové ($T-t$) kontrastní křivky pro zmíněný obrazový prvek. Nakonec dochází k určení skutečné tloušťky v rozlišovacím prvku předmětu odpovídajícího obrazovému prvku za použití kontrastní křivky. Toto určení je založené na vztahu invariantním k toku tepla mezi inflexním bodem na kontrastní křivce a charakteristickým časem toku tepla, který je závislý na tepelné rozptylnosti předmětu.

- 45 Krok určení skutečné tloušťky v rozlišovacím prvku předmětu odpovídajícím obrazovému prvku za použití zmíněné kontrastní křivky dále může zahrnovat následující kroky. Provede se časové vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku a určí se časová derivace dat kontrastní křivky obrazového prvku a určí se časová derivace dat kontrastní křivky obrazového bodu z datových bodů oddělených v čase na kontrastní křivky. Dále dochází k identifikaci lokalizovaných vrcholových hodnot derivace v časové derivaci dat kontrastní křivky obrazového bodu a k aplikaci předem určené váhové funkce na tyto lokalizované vrcholové hodnoty k určení hodnoty významu
- 50

pro každou identifikovanou vrcholovou hodnotu derivace. Následně se vybere jedna vrcholová hodnota derivace kontrastní křivky na základě této hodnoty významu a určí se skutečná tloušťka předmětu v rozlišovacím prvku na základě čísla snímku toho obrazového snímku, ve kterém se objeví vybraná vrcholová hodnota derivace kontrastní křivky.

5

Velikost okna vyhlazovací funkce použitého pro časové vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku je v tomto případě s výhodou úměrná číslu snímku odpovídajícího počátečnímu času vyhlazovacího okna tak, že velikost vyrovnávacího okna se zvětšuje s časem.

10

V jiném provedení je velikost časového vyhlazovacího okna použitého pro gaussovské vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového bodu úměrná druhé odmocnině čísla snímku, který odpovídá počátečnímu času vyhlazovacího okna.

15

Další modifikace spočívá v zařazení následujících kroků. Shromáždí se data intenzity obrazového prvku z předem určené posloupnosti infračervených obrazových snímků předmětu a sousedícího odděleného referenčního kusu zobrazeného společně s objektem za použití kamery s polem senzorů v ohniskové rovině citlivé na infračervené záření. Každý obrazový snímek zahrnuje množinu obrazových prvků a referenční kus má jednu nebo více samostatných částí se známou tloušťkou a se značně podobnými charakteristikami vodivosti tepla jako předmět. Poté se získá hodnota reprezentující průměrnou intenzitu obrazového prvku z dat intenzity obrazových prvků odpovídajících tepelně tlusté referenční části referenčního kusu. Určí se data kontrastu obrazových prvků odečítáním zmíněné hodnoty reprezentující průměrnou intenzitu obrazového prvku od dat intenzity obrazového prvku pro daný obrazový prvek. Poslední dva kroky se opakují pro každý snímek zmíněné posloupnosti infračervených obrazových snímků za účelem získání teplotně-časové ($T-t$) kontrastní křivky pro zmíněný obrazový prvek. Nakonec se určí skutečná tloušťka v rozlišovacím prvku předmětu odpovídajícího obrazovému prvku za použití kontrastní křivky, kde určení je založené na vztahu invariantním k toku tepla mezi inflexním bodem na kontrastní křivce a charakteristickým časem toku tepla, který je závislý na tepelné rozptýlnosti předmětu.

20

25

30

Krok určení skutečné tloušťky v rozlišovacím prvku předmětu odpovídajícímu obrazovému prvku za použití zmíněné kontrastní křivky může dále zahrnovat tyto kroky. Provedení časového vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku, určení časové derivace dat kontrastní křivky obrazového bodu z datových bodů oddělených v čase na kontrastní křivky, identifikace lokalizovaných vrcholových hodnot derivace v časové derivaci dat kontrastní křivky obrazového bodu, aplikace předem určené váhové funkce na tyto lokalizované vrcholové hodnoty k určení hodnoty významu pro každou identifikovanou vrcholovou hodnotu derivace, výběr jedné vrcholové hodnoty derivace kontrastní křivky na základě této hodnoty významu a určení skutečné tloušťky předmětu v rozlišovacím prvku na základě čísla snímku toho obrazového snímku, ve kterém se objeví vybraná vrcholová hodnota derivace kontrastní křivky.

35

40

Velikost okna vyhlazovací funkce použitého pro časové vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku může být v jednom provedení úměrná číslu snímku odpovídajícího počátečnímu času vyhlazovacího okna tak, že velikost vyrovnávacího okna se zvětšuje s časem.

45

V jiném provedení je velikost časového vyhlazovacího okna použitého pro gaussovské vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového bodu úměrná druhé odmocnině čísla snímku, který odpovídá počátečnímu času vyhlazovacího okna.

50

Je též možné realizovat způsob infračervené tranzientní termografie pro určování skutečné tloušťky předmětu tak, že se nejprve shromáždí data intenzity obrazového prvku z předem určené posloupnosti infračervených obrazových snímků předmětu a sousedícího odděleného referenčního kusu zobrazeného společně s objektem za použití kamery s polem senzorů v ohniskové rovině citlivé na infračervené záření. Každý obrazový snímek zde zahrnuje množinu obrazových prvků a referenční kus má jednu nebo více samostatných částí se známou tloušťkou a se značně podobnými charakteristikami vodivosti tepla jako předmět. Poté se určí inflexní body v $T-t$ křivkách

55

intenzity obrazového prvku odpovídajícího rozlišovacímu prvku předmětu a jednomu nebo více rozlišovacím prvkům odpovídajících různým částem známé tloušťky referenčního kusu. Nakonec se určí skutečná tloušťka předmětu v rozlišovacím prvku předmětu porovnáváním relativních časů výskytu inflexních bodů určených v předešlém kroku a extrapolací nebo interpolací hodnoty tloušťky pro předmět z části známé tloušťky na referenčním kusu.

Podstatou zařízení pro určování tloušťky předmětu majícího povrch, který může být zviditelněn jako pole obrazových prvků je, že sestává ze zdroje tepla pro rychlé zahřívání povrchu předmětu, prostředku pro zaznamenávání intenzity obrazových prvků v posloupnosti infračervených obrazů, prostředku pro určování dat kontrastu obrazových prvků ze zaznamenané intenzity obrazových prvků, prostředku pro určování derivace dat kontrastu na základě hodnoty čísla snímku přiřazené infračervenému obrazu a z prostředku pro určování tloušťky vzhledem k jiným částem předmětu na základě kontrastu obrazového prvku a čísla obrazového snímku.

Ve shodě s předkládaným vynálezem se využívá vylepšené rychlé infračervené tranzientní termografické provedení založené na znalosti dynamiky toku tepla v kovových předmětech k přesnému měření tloušťky kovového předmětu a poskytování vizuálního barevně kódovaného zobrazení, které indikuje jeho průřezovou tloušťku v dané oblasti předmětu. Navíc, vylepšené tranzientní termografické techniky předkládaného vynálezu mohou být použity k měření tloušťky kovových předmětů s větší přesností než běžné ultrazvukové metody.

V tomto ohledu předkládaný vynález zejména využívá inflexní bod v analýze kovových předmětů, protože inflexní bod se v $T-t$ odezvě objevuje relativně brzy a je v podstatě nezávislý na mechanismu laterální ztráty tepla. Takové úvahy jsou důležité pokud pracujeme s kovovými předměty, protože díky vysoké tepelné vodivosti kovů je tepelná odezva rychlá a dostupný pozorovací čas je tudíž krátký. Navíc, jestliže se v souladu s předkládaným vynálezem získá $T-t$ křivka z pozorování infračervenou kamerou z „přední strany“, získá se přesnější určení inflexního bodu, pokud je „kontrastní“ křivka snímku vytvořena odečítáním pozorované $T-t$ křivky od hypotetické nebo změřené $T-t$ křivky, která odráží hlubokou vnitřní „referenční oblast“ v zahříváném předmětu (tato referenční oblast aproximuje „nekonečně tlustý“ předmět) nebo v sousedním tepelně tlustém „referenčním“ bloku.

Podle předkládaného vynálezu je bod zvratu t_{inf} určen z tepelných dat shromážděných za předem určený časový úsek ze za sebou následujících obrazových snímků infračervené kamery. Tento časový úsek je s výhodou alespoň trochu delší než předpokládaný charakteristický čas, získaný z rovnice (1) na základě odhadu tloušťky hodnoceného předmětu.

Bohužel, jak zjistili předkladatelé předkládaného vynálezu, má zařízení infračervené tranzientní termografie podle známého současného stavu techniky nejméně jednu nevýhodu: zábleskové lampy potřebné pro generaci tepelného impulsu produkují dlouhověnné infračervené „doznívající“ emise, které nakonec dojdou k předmětu a kameře jako záření pozadí. To má za následek snížený kontrast v zaznamenaných infračervených snímcích a nakonec to ovlivňuje přesnost tepelného měření. Předkládaný vynález poskytuje vylepšené zařízení rychlé infračervené tranzientní termografie, které značně eliminuje problémy spojené s „doznívajícími“ infračervenými emisemi způsobenými tradičními uspořádáními zahřívací zábleskové lampy. Navíc poskytuje předkládaný vynález vylepšenou metodu infračervené tranzientní termografie a zařízení pro efektivní kvantitativní vyhodnocování tloušťky přední stěny kovových předmětů, jako jsou lopatky rotoru turbíny a podobně. Dále předkládaný vynález poskytuje vylepšenou metodu a zařízení pro určování tloušťky kovového předmětu, kde prostředky pro shromažďování dat pro určování tloušťky nejsou v podstatě ovlivněny specifickou vnitřní krystalickou strukturou předmětu, jak je to běžné u kovových odlitků a jiných „směrových“ kovových předmětů.

V souladu s výhodným provedením předkládaného vynálezu obsahuje zařízení obrazový systém zahrnující jednu nebo více vysoce výkonných zábleskových lamp vybavených speciálními optickými filtry, infračervené citlivou kameru s polem senzorů v ohniskové rovině pro shromažďování

dat a zobrazovací monitor. Počítačový systém řídí obrazový systém, zaznamenává a analyzuje data o teplotě povrchu získaná pomocí infračervené kamery a poskytuje barevně klíčovaný obraz na zobrazovacím monitoru, který přesně odpovídá tloušťce předmětu.

- 5 Shromažďování dat o teplotě povrchu je zahájeno spuštěním zábleskových lamp, za účelem ozáření povrchu daného předmětu. Speciální optické filtry jsou spektrálně naladěny tak, aby absorbovaly a/nebo odrážely veškeré infračervené záření o vlnové délce 3 až 5 mikronů zpět do zábleskové lampy (lamp). Toto zabraňuje nežádoucím dlouhovlnným infračerveným „doznívajícím“ emisím, které jsou typicky vytvářeny přehřátými kovovými prvky v zábleskových lampách, aby se dostaly k objektu nebo kameře poté, co jsou lampy zhasnuty. Použití takovýchto filtrů umožňuje přesnější tepelné ohodnocení, které může produkovat rozměrová měření v rozsahu přesnosti 1 až 3 % skutečné tloušťky.

- 15 Předem určený počet obrazových snímků je potom zaznamenán v určitém časovém úseku poté, co jsou zábleskové lampy spuštěny a zaznamenané obrazy jsou použity ke stanovení teplotně-časové ($T-t$) historie pro každou elementární oblast neboli „rozlišovací prvek“ z oblasti zájmu na povrchu předmětu. Každý zaznamenaný obrazový snímek sestává z předem určeného ($n \times m$) pole obrazových prvků, jejichž intenzita koreluje s povrchovou teplotou předmětu v čase, kdy byla snímková data shromážděna a kde má každý obrazový prvek (x, y) určení polohy v obrazovém snímku, které odpovídá konkrétnímu rozlišovacímu prvku.

- Pro každý obrazový prvek v získaných obrazových snímcích se potom provádí analýza toku tepla z historie $T-t$ za účelem určení tloušťky předmětu v místě každého rozlišovacího prvku (může být použit jak jednorozměrný, tak vícerozměrný přístup k analýze toku tepla). Analýza přechodného toku tepla pevnými částmi předmětu běžně vyžaduje určení charakteristického času T_c , potřebného pro „impulz“ tepelné energie k proniknutí do objektu na prvním povrchu, odrazení od protilehlého povrchu a vrácení se k povrchu prvnímu. Jelikož charakteristický čas souvisí se vzdáleností mezi těmito dvěma povrchy, může být použit k určení tloušťky předmětu mezi dvěma povrchy v požadovaném bodě. Naštěstí může být hodnota pro charakteristický čas T_c určena z termografické $T-t$ historie obrazového bodu, jelikož v čase souvisí s výskytem „inflexního bodu“ v zaznamenané historii kontrastu obrazového prvku v souladu s rovnicí (2) uvedenou výše.

- V souladu s předkládaným vynálezem je také předložena vylepšená metoda analýzy toku tepla, která mimo jiné usnadňuje přesnější určování „inflexního bodu“ historie kontrastu. Jak je detailněji popsáno níže, je křivka kontrastu nejprve určena pro každou (x, y) polohu obrazového prvku, odpovídajícího každému rozlišovacímu prvku na povrchu předmětu. Tato křivka kontrastu je sestavena na základě průměrné intenzity obrazového prvku, získané za použití „tepelně tlusté“ části (ve výhodném provedení je tepelně tlustá část nejméně pětikrát tlustší než celková tloušťka měřeného předmětu) předmětu nebo jiného „referenčního“ bloku, který má tepelnou vodivost podobnou měřenému předmětu. Ve výhodném provedení je samostatný tepelně tlustý blok umístěn v těsné blízkosti k měřenému předmětu a je spolu s ním zobrazován. V jiném provedení je termograficky zobrazen společně s předmětem zájmu „standardní“ blok, který má tepelně tlustou část a který zahrnuje odlišné stupně známé tloušťky.

- 45 Dále je ke zlepšení poměru signál/šum měření použito Gaussovo časové vyhlazování dat kontrastní křivky obrazového prvku. Poté je vypočítána matematická derivace kontrastní křivky za použití tříbodového vzorkování dat, kde oddělení prvního a třetího vzorkovacího bodu je proporcionálně vztaženo k hodnotě čísla obrazového snímku ve druhém vzorkovacím bodě. Dále jsou určeny místní vrcholy v derivaci dat kontrastní křivky a je použita váhová funkce k nastavení významu každého vrcholu, za účelem identifikace nejlepšího „inflexního bodu“ v datech kontrastní křivky $T-t$, pro použití v určování tloušťky předmětu. Korekce dat obrazového prvku je také použita k vyrovnání efektů měnící se infračervené emisní schopnosti s ohledem na zakřivení povrchu zobrazovaného předmětu.

Přehled obrázků na výkresech

Účelu a výhodám získaným díky předkládanému vynálezu je možné porozumět důkladným pro-
studováním následujícího detailního popisu výhodného provedení se specifickým odkazem na
5 doprovodné nákresy.

Obr. 1 je schematický diagram ilustrující příklad uspořádání systému infračervené tranzientní ter-
mografie pro určování a zobrazování skutečné tloušťky předmětu v souladu s předkládaným vynálezem.
10

Obr. 2 je vývojový diagram ilustrující proces shromažďování a analýzy infračervených obrazo-
vých dat, jak ho provádí systém z obr. 1 v souladu s předkládaným vynálezem.

Obr. 3 je příkladný tisk zobrazení infračerveného tranzientního termografického obrazu kovové-
ho stupňového standardu slitiny niklu v souladu s předkládaným vynálezem.
15

Příklady provedení vynálezu

Obr. 1 ilustruje příklad infračerveného tranzientního termografického systému 10 pro určování a
zobrazování tloušťky předmětu 1, například kovového turbínového křídlového profilu, který má
záměrné prázdné prostory 4. Pro účely následující diskuse se tloušťkou předmětu 1 míní tloušťka
přední stěny nebo povrchu u dutého nebo částečně dutého předmětu (tj. předmětu, který má
záměrné prázdné prostory 4) a „tepelně tlustý“ předmět 1 znamená předmět nebo část předmětu,
25 která je dostatečně tlustá na to, aby se přiblížila hypoteticky „nekonečně“ tlustému předmětu,
který je ve výhodném provedení alespoň pětkrát tlustší, než je celková tloušťka měřeného předmětu 1.

Měřený předmět 1 je s výhodou nejprve natřen, například, sprejem, štětcem nebo válečkem, ten-
kou vrstvou rychleschnoucího nátěru látky s vysokou ultrafialovou viditelností a vysoké infra-
červené absorpčnosti, například materiálem s uhlíkovým základem jako je grafit, uhlík nebo
barva se sazemi s vodním základem.
30

V předkládaném vynálezu je zdroj 11 tepelného impulzu se zábleskovou lampou sepnut, aby
rychle zahřál povrch měřeného předmětu. Jedno vhodné uspořádání zdroje 11 tepelného impulzu
se zábleskovou lampou by mohla být, například, sada čtyř nebo osmi vysokorychlostních fotogra-
fických zábleskových lamp s vysokým výkonem, kde je každá schopna výstupního výkonu při-
bližně 4,8 kilojoulů a má samostatný napájecí zdroj (jako jsou například vyráběné firmou
Speedtron, Corp. v Chicagu, IL).
35

Jelikož kovy mají podstatně větší rychlost vedení tepla než nekovy, jsou charakteristické časy pro
tok tepla v kovech mnohem rychlejší než například u plastů nebo kompozitních materiálů.
V důsledku toho je při pokusu o adaptaci tradičních infračervených termografických technik
(běžně omezených pro nekovy) na kovy třeba ostré ukončení aplikovaného tepla. Aby se toho
dosáhlo, je použit 3 až 5 mikronový odrazný filtr 18 mezi zábleskovými lampami, tvořícími
45 zdroj 11 tepelného impulzu (pokrývá je) a předmětem 1 tak, aby zabránil vystavení předmětu
zbytkového tepla, když se zábleskové lampy ochlazují po expozici.

V praxi může být použit jeden nebo více filtrů 18 (například jeden pro každou zábleskovou
lampu). Tyto filtry 18 mají za úkol bránit přímému dlouhovlnnému vyzařování, které se typicky
50 generuje z „doznívání“ přehřátých kovových částic v zábleskových lampách v opuštění těchto
zábleskových lamp a dopadu na cíl nebo jinému odrazení zpět do kamery 13 s polem senzorů
v ohniskové rovině. Takové primární doznívající vyzařování ze zábleskových lamp konkuruje a
může interferovat s dlouhovlnnými infračervenými emisemi z cílového předmětu během počá-
tečního shromažďování tepelných dat, čímž zastírá pravé cílově generované infračervené vyzařo-
55

vání a redukuje konečný kontrast obrazu a kvalitu. Použití těchto speciálních filtrů 18 tedy produkuje dostatečně ostrý tepelný impuls, který umožňuje detekci kratšího času šíření tepla v kovu.

V souladu s předkládaným vynálezem může být filtr 18 zábleskové lampy vytvořen z PyrexuTM, roztaveného křemene, BK7 nebo jiného optického materiálu, který je transparentní pro viditelné a ultrafialové světlo a na straně obrácené k zábleskové lampě je pokryt infračerveným reflektivním povrchem, aby odrazil veškeré vyzařování v rozsahu 3 až 5 mikronů zpět do zábleskových lamp. (Optické sklo a pokryté filtry je možné získat nebo speciálně vyrobit výrobcem optického skla a obecné vědecké optiky, jako je firma Oriel ve Stratfordu, CT.).

Měření teploty povrchu předmětu 1 osvětleného tepelným impulzem spolu s referenčním blokem 2 se získají za použití infračerveně citlivého obrazového systému zahrnujícího infračerveně citlivou kameru 13 s polem senzorů v ohniskové rovině (například Radiance HS camera dostupná u Amber Engineering v Goletě, CA, Raytheon Company), řídicí elektroniky 14, paměti 15 snímkových dat, řídicího počítače 16/obrazového procesoru a zobrazovacího monitoru 17.

Shromažďování tepelných dat je s výhodou iniciováno v okamžiku spuštění zábleskových lamp buď optickým spínáním, nebo jinými vhodnými prostředky. Spuštění zábleskových lamp je řízeno pomocí běžné elektroniky 14 zábleskových lamp ovládané konvenčním softwarem pro získávání obrazových snímků, který funguje v systémovém řídicím počítači 16 (jako je systém shromažďování snímků ImageDeskTM od Amber Corp. nebo jiný běžný software pro shromažďování snímků a řízení zábleskových lamp například takový, jaký je komerčně dostupný od Thermal Wave Imaging Inc. v Lathrup Village, MI).

Systémový řídicí počítač 16/obrazový procesor je speciálně naprogramovaný univerzální digitální počítač, který je, kromě digitálního zpracování obrazu a zobrazování v souladu s metodou dle předkládaného vynálezu, schopný realizovat řízení periferií a komunikační funkce. Systémový řídicí počítač 16 řídí elektroniku 14 kamery a lampy a paměť 15 snímkových dat za účelem shromažďování předem určeného počtu po sobě jdoucích tepelných obrazových snímků povrchu předmětu, které jsou uloženy v paměti 15 snímkových dat pro budoucí analýzu.

Před začátkem procesu tepelného zobrazování je nejprve infračervená kamera 13 kalibrována za použití „celoplošné“ kalibrační techniky s dvojím obrazem, jak je dále popsáno. Tato výhodná technika využívá dvě obrazové kalibrační reference „černého tělesa“ (BB): „studený“ BB zdroj používající plochou černou desku o pokojové teplotě a „teplý“ BB zdroj používající zahřátou plochou černou desku. Například pro získání kalibračního obrazu „studeného“ BB zdroje je umístěna přímo před čočku kamery plochá černě natřená schránka, obklopující plochou černou desku o pokojové teplotě, uspořádanou v úhlu 45° k čočce kamery. Pro získání kalibračního obrazu „teplého“ BB zdroje je po zahřátí ploché černé desky nominálně o asi 10 °C nad teplotu okolí čočka kamery umístěna do stejné ploché černě natřené schránky tak, že kamera zobrazuje zahřátou desku přes celou zobrazovací plochu. Ačkoliv je výše popsaná kalibrační technika s dvojím obrazem upřednostňována, může být použita jakákoliv kalibrační technika, jejímž výsledkem je maximální uniformita obrazového pole, což je důležité pro zobrazení s vysokým kontrastem a získání vylepšené tepelné přesnosti.

Každý obrazový snímek získaný v průběhu zobrazovacího procesu se skládá z N x N obrazových prvků, kde každý obrazový prvek odpovídá rozlišovacímu prvku na povrchu předmětu, kde N je typicky buď 128, nebo 256, v závislosti na požadované přesnosti a rozlišení. Každý obrazový prvek zabírá okolo dvou bytů paměti a může být například reprezentován 12-bitovým nebo větším binárním číslem. Uložené obrazové snímky jsou následně identifikovány podle zvyšujících se hodnot čísla snímku, což dohromady slouží k zajištění historického záznamu charakteristiky teplot versus čas (T-t) předního povrchu předmětu 1 po předem určenou dobu poté, co byl zasažen tepelným impulzem předaným zábleskovou lampou.

Ve výhodném provedení je pro určení skutečné tloušťky kovového předmětu tento kovový zájmový předmět umístěn vedle odděleného kovového referenčního bloku 2, který má podobné složení a má tepelně tlustou část 3 a s tímto referenčním blokem 2 je společně zobrazen ve stejném obrazovém snímku, za použití stejného tepelného impulzu zábleskové lampy. Tepelně tlustá část 3 kovového referenčního bloku 2 je použita k odvození průměrné intenzity obrazového prvku pro tento blok, která není dotčena žádným možným vlivem tepelného impulzu odraženého vnitřně v měřeném předmětu. Tato průměrná intenzita obrazového prvku je poté užita pro určení kontrastu individuálního obrazového prvku (jak je popsáno níže) a umožňuje přesné určení skutečné tloušťky kovové vrstvy „pod“ tímto obrazovým prvkem.

Během vyhodnocování kovového předmětu, poté co řídící počítač 16 spustí zábleskové lampy nebo lampu, se z kamery 13 shromažďují snímky obrazových dat a infračervená intenzita v každém rozlišovacím prvku na obraze se digitálně zaznamenává a ukládá v záznamovém zařízení, tedy v paměti 15 snímkových dat. Shromažďování dat pokračuje po předem určený počet následných obrazových snímků, které jsou dostačující k získání významné T-t historie po dobu trvání alespoň jednoho odhadovaného „charakteristického času“ pro materiál předmětu. Počet Z shromážděných obrazových snímků se liší v závislosti na požadované přesnosti a rozlišení obrazu a může být až 550 snímků za vteřinu shromažďování dat.

Záznamové zařízení snímkových dat může být běžná vnitřní digitální paměť procesoru **řídícího počítače 16** nebo jakékoli vhodné zařízení pro ukládání dat obrazových snímků, které je přístupné procesoru. Každému postupně shromážděnému tepelnému obrazovému snímku je přiděleno zvyšující se snímkové číslo Z, které odpovídá průběhu reálného času. Vzniklý „svazek“ datových snímků je poté analyzován s použitím jednorozměrné analýzy toku tepla, jak je uvedeno výše. V souladu s tímto přístupem využívá metoda podle předkládaného vynálezu výhodu známé vlastnosti tepelné invariance, dokázané v historii teplota versus čas (T-t) každého obrazového prvku přes po sobě jdoucí infračervené obrazové snímky, která závisí na identifikaci umístění „inflexního bodu“ nebo času špičkové strmosti, to jest časového bodu s maximální strmostí na T-t datové křivce.

Na obr. 2 je vývojový diagram, který zobrazuje kroky pro provádění tranzientní infračervené termografie a analýzy obrazových dat pro kovové předměty v souladu s předkládaným vynálezem. Tyto kroky jsou realizovány systémovým řídícím počítačem 16 naprogramovaným za použití vhodného komerčně dostupného software a/nebo aplikací známých běžných programovacích technik.

Počítačový operátor nejprve vybere a/nebo vloží informace o relevantních parametrech pro požadovaný materiál, jako je koeficient tepelné rozptylnosti, teplotní data interní referenční oblasti atp. a identifikuje se oblast zájmu na daném předmětu (tj. infračervená kamera se zaostří tak, aby zachycovala oblast zájmu a požadovanou „tepelně tlustou“ oblast).

Dále v kroku 20 dá systémový řídící počítač instrukci elektronice zábleskových lamp aby spustila zábleskové lampy a zahájila shromažďování dat obrazových snímků z kamery 13 s polem senzorů v ohniskové rovině. Shromažďování dat pokračuje po předem určený počet následných obrazových snímků. V kroku 21 je každý shromážděný obrazový snímek identifikován pomocí čísla snímku Z s rostoucí hodnotou a poté je zaznamenán v paměti snímkových dat.

Dále se v kroku 22 vytvoří sada T-t křivek pro každý obrazový prvek, odpovídající v tepelném obrazu (x,y) pozici každého rozlišovacího prvku v oblasti zájmu na povrchu předmětu, identifikuje se čas a číslo snímku počátečního infračerveného zahřívacího „záblesku“, identifikuje se první nenasyčený datový snímek a generuje se „referenční“ T-t křivka. K určení skutečné tloušťky v místě rozlišovacího prvku na předmětu (narozdíl od „relativní tloušťky“, která je pouze relativní hodnotou tloušťky vzhledem k jiným místům na předmětu) se musí použít referenční T-t křivka, která aproximuje charakteristiku hypotetického „nekonečně tlustého“ předmětu s podobnými charakteristikami tepelné vodivosti. K vytvoření této referenční křivky je zob-

5 razena spolu s předmětem tepelně tlustá oblast odděleného předmětu podobné stavby a je použita pro získání dat referenční T–t křivky. Alternativně mohou být použita T–t data ze známé tepelně tlusté části předmětu našeho zájmu (nebo pokud je požadována pouze relativní tloušťka, mohou být data referenční křivky získána z T–t historie střední intenzity obrazových prvků z každého obrazového snímku).

10 V krocích 23 a 24 je pro analýzu vybrán první obrazový prvek (nebo následující obrazový prvek) a jsou nalezena data jeho T–t křivky (tj., je určena nebo znovu vyvolána z počítačové paměti). V tomto bodě je možné udělat volitelné úpravy offsetu a měřítka (amplitudy) tak, aby pomohly překonat efekty měnící se emisní schopnosti nebo ztráty amplitudy díky zakřivení povrchu předmětu. K dosažení toho je T–t datová křivka pro každý obrazový prvek nastavena tak, aby odpovídala specifickým bodům na „normalizované“ referenční křivce. Referenční křivka může být například normalizována tak, že „studená“ (předzáblesková) amplituda odpovídá nule. Když je pak T–t datová křivka pro každý obrazový prvek analyzována, je posunuta na nulovou studenou 15 amplitudu prvním přizpůsobením vhodnému bodu na referenční křivce. Navíc může být v tomto kroku aplikována na každý bod T–t datové křivky korekce „zisku“ dat intenzity obrazového bodu tak, aby se vyrovnala infračervená emisní schopnost, měnící se díky zakřivení povrchu a/nebo proměnným povrchovým podmínkám předmětu. Korekce zisku obrazového prvku může být například také aplikována tak, že amplituda obrazového prvku v prvním nenasyceném obrazovém 20 snímku bude odpovídat amplitudě referenční křivky ve stejném časovém bodě.

Dále je za účelem přesnějšího určení inflexního bodu na T–t křivce určena v kroku 25 „kontrastní“ křivka vybraného obrazového prvku tak, že se odečtou data „referenční“ T–t křivky od dat T–t křivky pro daný obrazový prvek.

25 Dále se v kroku 26 provádí časové vyhlazení dat kontrastní křivky za pomoci gaussovske funkce. Zde je vytvořeno „časové okno“ používané v gaussovském vyhlazovacím algoritmu tak, že se mění jako časová funkce tím, že je proporcionálně úměrné číslu Z obrazového snímku. V podstatě toto vyhlazovací „okno“ řídí plnou šířku gaussovske funkce v polovině maxima (tj. šířku „ $2-\sigma$ “). Použití tohoto přístupu „vyhlazování podle čísla snímku“ s proměnlivou šířkou je výhodnější než používání tradičního gaussovského vyhlazování, protože to má tendenci ke kompenzaci 30 efektů šíření tepla v rostoucích hloubkách v materiálu.

Pro tento krok je šířka vyhlazovacího okna ve vybraném datovém bodě s výhodou vytvořena tak, 35 že je úměrná druhé odmocnině čísla obrazového snímku v tomto bodě. Kromě gaussovského časového vyhlazování může být v této fázi na data kontrastní křivky aplikováno množství softwarově implementovaných „obrazových filtrů“ včetně prostorového vyhlazování, potlačení počátečního a závěrečného šumu, potlačení negativního kontrastu a prahování kontrastu.

40 V kroku 27 se dále určí matematická derivace kontrastní křivky, udávající inflexní bod. Je dobře známo, že bod maximální strmosti na křivce může být určen za použití tradičního derivačního algoritmu se třemi následnými body, ve kterém jsou vzorkovány tři rovnoměrně vzdálené následné datové body na křivce a jsou použity k vypočítání strmosti křivky ve druhém (prostředním) datovém bodu. V souladu s předkládaným vynálezem se stále používají tři body k určení derivace 45 kontrastní křivky, ale vzdálenost prvního a třetího vzorkového derivačního bodu (tj., šířka základního derivačního intervalu) je spojeno s reálným časem ve vývoji obrazu pomocí čísla obrazového snímku. Konkrétně je šířka základního derivačního intervalu v jakémkoliv vybraném bodě na kontrastní křivce úměrná druhé odmocnině čísla Z infračerveného obrazového snímku.

50 Tímto způsobem jsou maximalizovány charakteristiky poměru signál/šum (S/N) dokonce i při vysokých úrovních šumu. Toto vylepšení v poměru S/N vyplývá ze „vzorkování“ ve velkém intervalu a tedy detekuje největší změnu signálu spíše než diferenciální změnu, která se tradičně získá při třibodové diferenciaci s pevnou šířkou. Jelikož se maximální poměr S/N získá, když je odstup vzorkovacích bodů rovný plné gaussovske šířce, je při použití přístupu s šířkou úměrnou 55 číslu snímku dle stávajícího vynálezu vždy dosažen maximální možný poměr S/N.

V dalším kroku 28 jsou identifikovány všechny vrcholy v derivované křivce a je použit faktor „vážící“ význam, za účelem vyhodnocení správného vrcholu, který pak bude použit jako inflexní bod t_{inf} . Během tohoto kroku je v paměti počítače udržován seznam všech umístění (časů) a amplitud vrcholů. Použitím předem určené vhodné vážící funkce na seznam vrcholů je možné
 5 přizpůsobit důležitost každého vrcholu tak, že například šumové efekty produkující vrcholy objevující se brzy v čase shromažďování dat jsou účinně vynechávány. Protože empirické důkazy indikují, že vrcholy, které se objevují později v čase, inklinují k větší důležitosti, je v předkládaném příkladném provedení implementována časová vážící funkce tak, že se jednoduše násobí amplituda vrcholu časem, ve kterém se objeví. Poté jsou vrcholy rozděleny v závislosti na klesajícím významu (váze) a vrchol, který má největší váženou hodnotu (tj., nejvýznamnější) je
 10 vybrán jako ten, který indikuje správný inflexní bod.

V kroku 29 je určena tloušťka předmětu v místě rozlišovacího prvku odpovídajícího vybranému obrazovému prvku. Toto se provede identifikací čísla snímku, ve kterém se objevuje nejdůležitější vrchol a převedením této hodnoty do reálného času. Protože shromažďování infračervených
 15 obrazových snímků se děje se známou předem určenou rychlostí, může být číslo snímku přiřazeno k reálnému uplynulému času. Tudíž číslo snímku toho infračerveného obrazového snímku, který v sobě uchovává nejdůležitější vrchol, poskytuje časovou hodnotu pro t_{inf} . Za použití rovnic (1) a (2), uvedených výše, je tato hodnota pro t_{inf} převedena na hodnotu tloušťky L , vztahující se ke skutečné tloušťce předmětu v místě rozlišovacího prvku odpovídajícího obrazovému prvku.
 20

Dále je v kroku 30 hodnota tloušťky L uložena v paměti a použita k vytvoření barevně mapovaného obrazu (nebo obrazu ve stupnici šedi) oblasti zájmu na povrchu předmětu za účelem zobrazení nebo tisku, kde každá barva odpovídá určité tloušťce. Poté je vybrán následující obrazový
 25 prvek (v kroku 23) a výše uvedené kroky se opět provádějí pro každý obrazový prvek tvořící infračervený obraz.

Navíc ke krokům naznačeným výše jsou pomocí příslušného běžného programování systémového řídicího počítače automatizovány vstup a výběr různých hodnot parametrů, jako je konstanta rozptylnosti, počáteční bod a rozsah analýzy dat, rozsah velikostí časového vyhlazovacího okna a rozsah barevného mapování, za účelem přesnosti a shodnosti.
 30

Prováděním tranzientní termografické analýzy za použití výše popsaných kroků pro shromažďování tepelných dat a jejich analýzu spolu s výše popsaným zařízením v souladu s předkládaným vynálezem, je možné přesně stanovit hodnoty tloušťky stěny dokonce i mezi blízko situovanou
 35 zadní stěnou nebo vnitřními strukturami, které mohou tvořit část testovaného předmětu nebo mohou být k němu připojeny, například žebrovitými strukturami, které často nacházíme v turbínových křídlových profilech (jak je zobrazeno na obr. 1), zatímco používání tradičních tepelných nebo ultrazvukových metod pro takové struktury s blízko umístěnou zadní stěnou by normálně vedlo k rozmazaným obrazům a zkomoleným datům.
 40

Obr. 3 ukazuje příklad tisku infračerveného tranzientního termografického obrazu kovového stupňovitého standardu ze slitiny niklu, vytvořeného v souladu s metodou a zařízením předkládaného vynálezu. Stupňovitý standard použitý k vytvoření obrazu z obr. 3 má šest čtvercových
 45 sekcí různé tloušťky a mnohem tlustší dolní oblast (není zobrazena), která je použita jako tepelně tlustá referenční část pro získání dat referenční $T-t$ křivky, potřebných k určení skutečné tloušťky. Tloušťka každé ze šesti sekcí je signalizována barevným odstínem (nebo tónem šedi), který odpovídá barvě na tloušťkovém klíči se sloupcovou stupnicí, který je zobrazen napravo od obrazu. V tomto případě, zahrnuje sloupcová stupnice znaky tloušťky v rozsahu od 0,016 do
 50 0,064 palce (0,04 až 0,16 cm).

Jiné provedení předkládaného vynálezu odstraňuje potřebu získávání hodnot kontrastu pro každý obrazový prvek. V tomto provedení jsou určeny a porovnány výskytu inflexního bodu v čase v $T-t$ křivkách intenzity obrazového prvku odpovídajících rozlišovacímu prvku jak měřeného
 55 předmětu, tak referenčního bloku, který má jednu nebo více částí, u kterých je známá tloušťka.

Výskyt inflexního bodu (bodů) referenčního bloku v čase, vztažený k inflexnímu bodu předmětu indikuje tloušťku tohoto předmětu. Pokud inflexní bod předmětu padne mezi inflexní body odpovídající dvěma částem různé tloušťky v bloku, zjistí se tloušťka předmětu interpolací. Zatímco je ve výhodném provedení kontrast obrazového prvku určen tak, jak je uvedeno výše za použití tepelně tlusté reference, je možné provádět užitečná měření bez určení kontrastu obrazového prvku za použití pouhých inflexních bodů intenzity obrazového prvku.

Zatímco byl vynález popsán v souvislosti s tím, co je v současnosti považováno za nejpraktičtější a výhodné provedení, rozumí se, že vynález nemá být omezen pouze na zde zveřejněné provedení, ale naopak, je zamýšleno pokrytí různých modifikací a ekvivalentních uspořádání, zahrnutých v duchu a rozsahu připojených nároků.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Způsob infračervené tranzientní termografie pro určování tloušťky předmětu (1), **v y z n a -**
č u j í c í s e t í m, že obsahuje kroky:

a) ukládání dat o intenzitě obrazového prvku z předem určeného sledu obrazových snímků získaných z kamery (13) s polem senzorů v ohniskové rovině citlivé na infračervené záření, kde je každému následně shromážděnému obrazovému snímku přiřazeno číslo snímku se vzrůstající hodnotou lineárně odpovídající uplynulému času;

b) určení kontrastní křivky obrazového prvku z dat intenzity obrazového prvku pro obrazový prvek ze zmíněného sledu obrazových snímků;

c) provedení gaussovského časového vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku získané v kroku (b);

d) určení časové derivace dat kontrastní křivky obrazového prvku z oddělených datových bodů v čase na kontrastní křivce po gaussovském časovém vyhlazení;

e) identifikace lokalizovaného vrcholu derivovaných hodnot v časové derivaci dat kontrastní křivky obrazového prvku;

f) použití předem určené váhové funkce na zmíněné lokalizované vrcholové hodnoty identifikované v kroku (e) k určení hodnoty významu pro každou identifikovanou vrcholovou hodnotu derivace;

g) výběr jedné vrcholové hodnoty derivace kontrastní křivky na základě nejvýznamnější hodnoty určené v kroku (f); a

h) určení tloušťky předmětu L na základě čísla snímku toho obrazového snímku, ve kterém se objeví vrcholová hodnota derivace kontrastní křivky, vybraná v kroku (g).

2. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že kontrastní křivka obrazových prvků je určena odečtením dat referenční křivky obrazového prvku od dat intenzity obrazového prvku pro daný obrazový prvek.

3. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 2, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že data referenční křivky obrazového prvku jsou určena z dat intenzity obrazového prvku tepelně tlusté referenční části předmětu, kde tato referenční část aproximuje charakteristiky hypotetického nekonečně tlustého předmětu.

4. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 2, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že data referenční křivky obrazového prvku jsou určena z dat intenzity obrazového prvku získaných z tepelně tlusté oblasti odděleného kovového referenčního kusu, který má značně podobné charakteristiky vodivosti tepla a je zobrazen spolu s předmětem.

5. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že proměnná emisní schopnost způsobená zakřivením povrchu a/nebo různými stavy povrchu zobrazovaného předmětu je kompenzována modifikací dat intenzity obrazového prvku předem určeným ziskovým faktorem pro vybrané obrazové prvky.

6. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že data intenzity obrazového prvku pro vybrané obrazové prvky jsou modifikována za účelem kompenzace vlivů proměnné infračervené emisní schopnosti díky zakřivením povrchu daného předmětu.

7. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že kontrastní křivka obrazového prvku zahrnující data intenzity obrazového prvku získaná v předem určeném časovém úseku je přesazena srovnáním vybraných bodů na křivce intenzity obrazového prvku s vybranými body na normalizované referenční křivce obrazového prvku.

8. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že velikost časového vyhlazovacího okna použitého pro gaussové vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku je úměrná číslu snímku, která odpovídá počátečnímu času vyhlazovacího okna tak, že velikost vyhlazovacího okna vzrůstá s časem.

9. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že velikost časového vyhlazovacího okna použitého pro gaussové vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku je úměrná druhé odmocnině čísla snímku, které odpovídá počátečnímu času vyhlazovacího okna.

10. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že časová derivace dat kontrastní křivky obrazového bodu se získá použitím běžného třibodového derivačního algoritmu modifikovaného výběrem tří datových bodů na kontrastní křivce rovnoměrně rozložených v čase takových, že první a třetí datový bod jsou odděleny časovým úsekem úměrným druhé odmocnině hodnoty čísla snímku pro druhý (střední) datový bod.

11. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že tloušťka L je určena následujícími rovnicemi:

$$T_c = 4L^2/B^2V \text{ a}$$

$$t_{inf} = 0,9055T_c,$$

kde V je tepelná rozptylnost předmětu a kde t_{inf} přímo souvisí s hodnotou čísla snímku toho obrazového snímku, ve kterém se objeví vrchol derivace kontrastní křivky s největším významem.

12. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 4, **vyznačující se tím**, že předmět je před shromažďováním infračervených obrazových snímků pokryt tenkou vrstvou látky s vysokou ultrafialovou viditelností a infračervenou emisní schopností.

13. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje kroky:

a) shromažďování dat intenzity obrazového prvku z předem určené posloupnosti infračervených obrazových snímků předmětu za použití kamery s polem senzorů v ohniskové rovině citlivé na infračervené záření, kde každý obrazový snímek zahrnuje množinu obrazových prvků;

b) získání hodnoty reprezentující průměrnou intenzitu obrazového prvku z dat intenzity obrazových prvků odpovídajících tepelně tlusté referenční části předmětu;

c) určení dat kontrastu obrazových prvků odečítáním zmíněné hodnoty reprezentující průměrnou intenzitu obrazového prvku od dat intenzity obrazového prvku pro daný obrazový prvek;

d) opakování kroků (b) a (c) pro každý snímek zmíněné posloupnosti infračervených obrazových snímků za účelem získání teplotněčasové ($T-t$) kontrastní křivky pro zmíněný obrazový prvek; a e) určení skutečné tloušťky v rozlišovacím prvku předmětu odpovídajícího obrazovému prvku za použití kontrastní křivky, kde určení je založené na vztahu invariantním k toku tepla mezi inflexním bodem na kontrastní křivce a charakteristickým časem toku tepla, který je závislý na tepelné rozptýlnosti předmětu.

14. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 13, **vyznačující se tím**, že krok určení skutečné tloušťky v rozlišovacím prvku předmětu odpovídajícího obrazovému prvku za použití zmíněné kontrastní křivky dále zahrnuje kroky:

provedení časového vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku;

určení časové derivace dat kontrastní křivky obrazového bodu z datových bodů oddělených v čase na kontrastní křivky;

identifikace lokalizovaných vrcholových hodnot derivace v časové derivaci dat kontrastní křivky obrazového bodu;

aplikace předem určené váhové funkce na tyto lokalizované vrcholové hodnoty k určení hodnoty významu pro každou identifikovanou vrcholovou hodnotu derivace;

výběr jedné vrcholové hodnoty derivace kontrastní křivky na základě této hodnoty významu; a

určení skutečné tloušťky předmětu v rozlišovacím prvku na základě čísla snímku toho obrazového snímku, ve kterém se objeví vybraná vrcholová hodnota derivace kontrastní křivky.

15. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 14, **vyznačující se tím**, že velikost okna vyhlazovací funkce použitého pro časové vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku je úměrná číslu snímku odpovídajícího počátečnímu času vyhlazovacího okna tak, že velikost vyrovnávacího okna se zvětšuje s časem.

16. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 14, **vyznačující se tím**, že velikost časového vyhlazovacího okna použitého pro gaussovské vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového bodu je úměrná druhé odmocnině čísla snímku, který odpovídá počátečnímu času vyhlazovacího okna.

17. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje kroky:

a) shromažďování dat intenzity obrazového prvku z předem určené posloupnosti infračervených obrazových snímků předmětu a sousedícího odděleného referenčního kusu zobrazeného společně s objektem za použití kamery s polem senzorů v ohniskové rovině citlivé na infračervené záření, kde každý obrazový snímek zahrnuje množinu obrazových prvků a referenční kus má jednu nebo více samostatných částí se známou tloušťkou a se značně podobnými charakteristikami vodivosti tepla jako předmět;

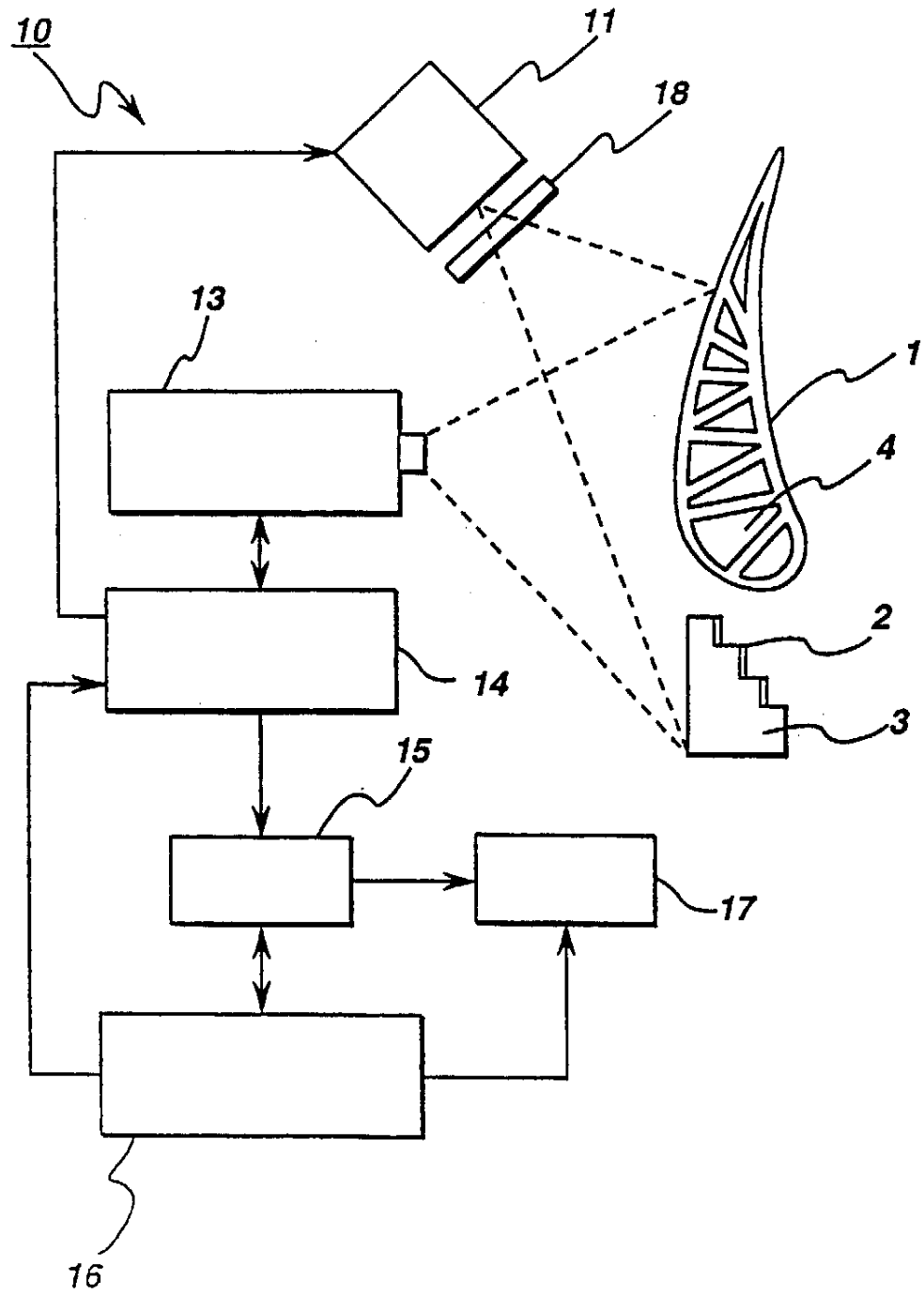
b) získání hodnoty reprezentující průměrnou intenzitu obrazového prvku z dat intenzity obrazových prvků odpovídajících tepelně tlusté referenční části referenčního kusu;

c) určení dat kontrastu obrazových prvků odečítáním zmíněné hodnoty reprezentující průměrnou intenzitu obrazového prvku od dat intenzity obrazového prvku pro daný obrazový prvek;

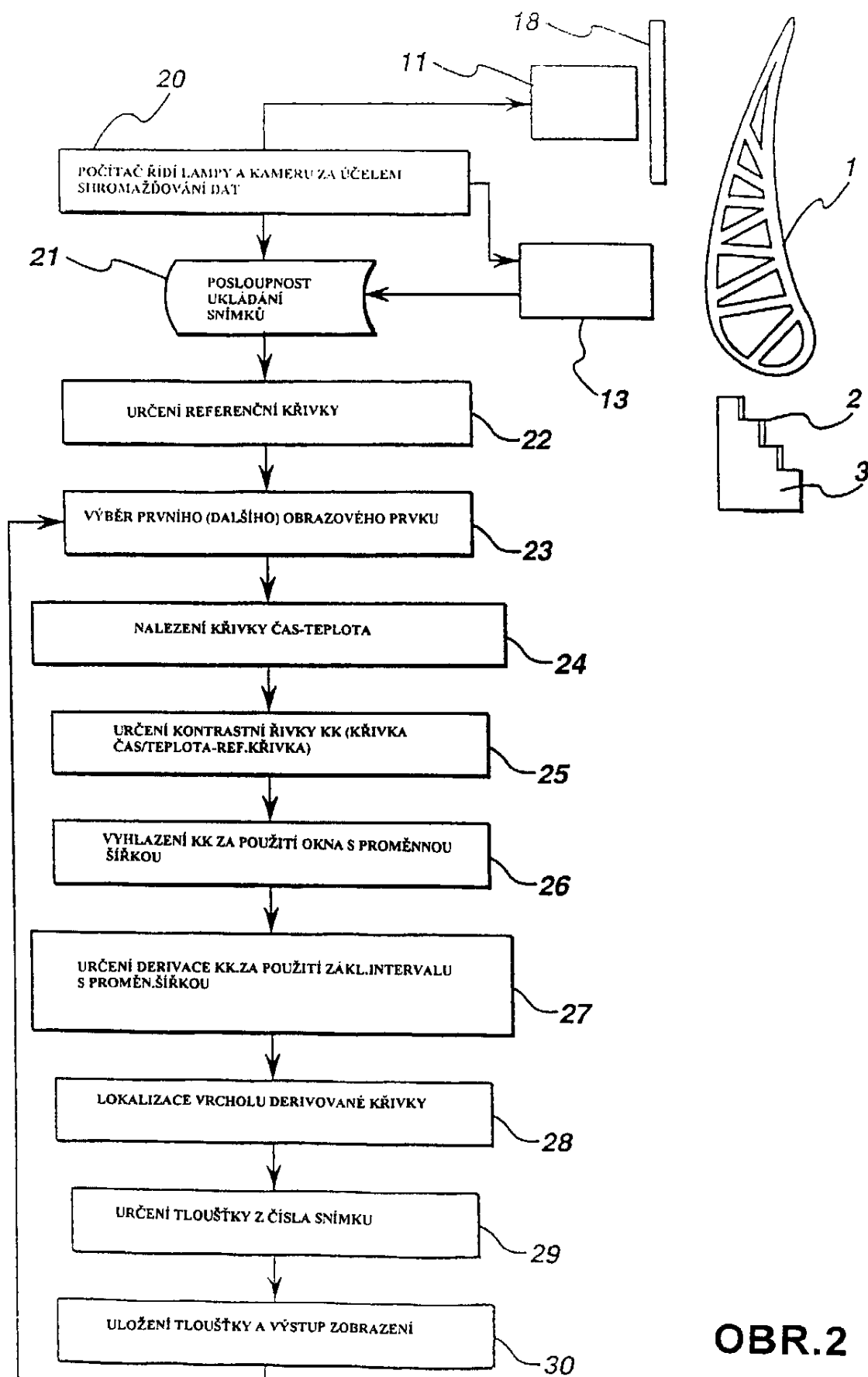
d) opakování kroků (b) a (c) pro každý snímek zmíněné posloupnosti infračervených obrazových snímků za účelem získání teplotněčasové ($T-t$) kontrastní křivky pro zmíněný obrazový prvek; a

e) určení skutečné tloušťky v rozlišovacím prvku předmětu odpovídajícího obrazovému prvku za použití kontrastní křivky, kde určení je založené na vztahu invariantním k toku tepla mezi inflexním bodem na kontrastní křivce a charakteristickým časem toku tepla, který je závislý na tepelné rozptýlnosti předmětu.

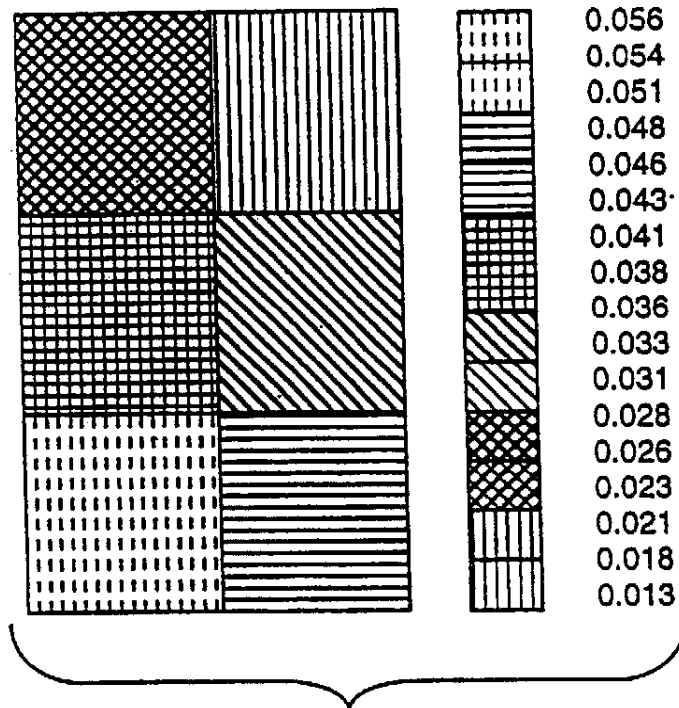
18. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 17, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že krok určení skutečné tloušťky v rozlišovacím prvku předmětu odpovídajícím obrazovému prvku za použití zmíněné kontrastní křivky dále zahrnuje kroky:
provedení časového vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku;
- 5 určení časové derivace dat kontrastní křivky obrazového bodu z datových bodů oddělených v čase na kontrastní křivky;
identifikace lokalizovaných vrcholových hodnot derivace v časové derivaci dat kontrastní křivky obrazového bodu;
- 10 aplikace předem určené váhové funkce na tyto lokalizované vrcholové hodnoty k určení hodnoty významu pro každou identifikovanou vrcholovou hodnotu derivace;
výběr jedné vrcholové hodnoty derivace kontrastní křivky na základě této hodnoty významu; a
určení skutečné tloušťky předmětu v rozlišovacím prvku na základě čísla snímku toho obrazového snímku, ve kterém se objeví vybraná vrcholová hodnota derivace kontrastní křivky.
- 15 19. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 18, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že velikost okna vyhlazovací funkce použitého pro časové vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového prvku je úměrná číslu snímku odpovídajícího počátečnímu času vyhlazovacího okna tak, že velikost vyrovnávacího okna se zvětšuje s časem.
- 20 20. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 18, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že velikost časového vyhlazovacího okna použitého pro gaussovské vyhlazení dat kontrastní křivky obrazového bodu je úměrná druhé odmocnině čísla snímku, který odpovídá počátečnímu času vyhlazovacího okna.
- 25 21. Způsob infračervené tranzientní termografie podle nároku 1, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že dále obsahuje kroky:
a) shromažďování dat intenzity obrazového prvku z předem určené posloupnosti infračervených obrazových snímků předmětu a sousedícího odděleného referenčního kusu zobrazeného společně s objektem za použití kamery s polem senzorů v ohniskové rovině citlivé na infračervené záření,
- 30 kde každý obrazový snímek zahrnuje množinu obrazových prvků a referenční kus má jednu nebo více samostatných částí se známou tloušťkou a se značně podobnými charakteristikami vodivosti tepla jako předmět;
- b) určení inflexních bodů v T-t křivkách intenzity obrazového prvku odpovídajícího rozlišovacímu prvku předmětu a jednomu nebo více rozlišovacím prvkům odpovídajících různým částem
- 35 známé tloušťky referenčního kusu; a
c) určení skutečné tloušťky předmětu v rozlišovacím prvku předmětu porovnáváním relativních časů výskytu inflexních bodů určených v kroku (b) a extrapolací nebo interpolací hodnoty tloušťky pro předmět z částí známé tloušťky na referenčním kusu.
- 40 22. Zařízení pro určování tloušťky předmětu majícího povrch, který může být zviditelněn jako pole obrazových prvků, **v y z n a č u j í c í s e t í m**, že zahrnuje:
zdroj (11) tepelného impulsu pro rychlé zahřívání povrchu předmětu (1);
prostředek pro zaznamenávání intenzity obrazových prvků v posloupnosti infračervených obrazů;
prostředek pro určování dat kontrastu obrazových prvků ze zaznamenané intenzity obrazových
- 45 prvků;
prostředek pro určování derivace dat kontrastu na základě hodnoty čísla snímku přiřazené infračervenému obrazu; a
prostředek pro určování tloušťky vzhledem k jiným částem předmětu na základě kontrastu obrazového prvku a čísla obrazového snímku.
- 50



OBR.1



OBR.2



OBR.3

Konec dokumentu