

UŽITNÝ VZOR

(11) Číslo dokumentu:

33 590

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

G01N 23/04 (2018.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2019-36939**
(22) Přihlášeno: **28.11.2019**
(47) Zapsáno: **30.12.2019**

(73) Majitel:
Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR,
v.v.i., Praha 9, Prosek, CZ

(72) Původce:
Ing. Daniel Vavřík, Ph.D., Praha 8, Libeň, CZ

(74) Zástupce:
PatentCentrum Sedlák & Partners s.r.o., Okružní
2824, 370 01 České Budějovice, České Budějovice
3

(54) Název užitého vzoru:
**Zařízení pro nedestruktivní zkoumání
vrstevnaté struktury**

CZ 33590 U1

Zařízení pro nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury

Oblast techniky

5

Technické řešení se týká zařízení pro nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury ležící na substrátu, který je vůči vrstevnaté struktuře masivní z hlediska poměru celkové tloušťky vrstevnaté struktury a tloušťky substrátu. Technické řešení je zejména určeno pro nedestruktivní zkoumání polychromie na cenných uměleckých dílech a památkách, jako jsou středověké malby a sochy, ale lze jej použít i v jiných úlohách zaměřených na nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury.

10

Dosavadní stav techniky

15

Nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury (tj. stratigrafie), která pokrývá masivní a strukturovaný substrát, jako je například dřevo, je poměrně složitou úlohou. Jako příklad takové vrstevnaté struktury můžeme uvést polychromii středověkých deskových maleb a soch. Celková tloušťka polychromie je v řádu desetin milimetru, tloušťka jednotlivých vrstev je pak v řádu od jednotek mikrometrů po desítky mikrometrů. Vzhledem ke značnému nepoměru mezi tloušťkou polychromie a dřevěného substrátu není reálné běžnou metodou počítačové tomografie popsat vrstevnaté složení polychromie s dostatečným rozlišením.

20

Celková tloušťka vrstevnatého povlaku může být měřena na vybraném místě pomocí ultrazvuku, jak uvádí dokument DOI: 10.4067/S0718-221X2018005041301, avšak stratigrafická data nejsou tímto způsobem získána.

25

Stratigrafie se běžně provádí pomocí techniky konfokální rentgenové fluorescence za pomoci kapilární rentgenové optiky, jak je uvedeno v dokumentu DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.05.005. Tato metoda je poměrně časově náročná a je určena především pro měření pouze na vybraných místech zkoumaného objektu, zatímco průzkum větších ploch zkoumaného objektu je z hlediska celkové doby měření problematický.

30

Další možnou technikou pro zkoumání stratigrafie je takzvaná Comptonova zobrazovací tomografie, o které je psáno např. v přihlášce vynálezu CZ 2015-623 A3, a dále v článku autora K. Osterloh et. al., X-RAY backscatter imaging with a novel twisted slit collimator (In. ECNDT 2012, NDT.net, 2010). Comptonova zobrazovací tomografie využívá zpětně rozptýlené fotony, pocházející z oblasti ozařované tenkým a rovinným rentgenovým svazkem. Tato metoda byla vyvinuta pro kontrolu dílů, které jsou přístupné pouze z jedné strany, s rozlišením typicky na úrovni stovek mikrometrů. Princip je následující: objekt je ozařován rovinným svazkem rentgenového záření, který prochází povrchem objektu pod zvoleným úhlem dopadu (obvykle 45°); rentgenová kamera sleduje zkoumaný řez ze strany – kolmo k rovině rovinného svazku, čímž se získají informace o struktuře objektu v jednom řezu. Trojrozměrná data se zaznamenávají skenováním zkoumaného objektu řez po řezu s ekvidistantním krokem.

35

40

Nevýhody výše uvedené metody spočívají v tom, že pro mikrometrické rozlišení musí být rovinný svazek velmi tenký, zatímco prostorový krok mezi řezy musí být minimalizován. Přesněji musí být tloušťka svazku a velikost obrazových pixelů použité rentgenové kamery srovnatelné s požadovaným rozlišením. To vede k neúnosnému prodloužení celkové doby měření, aby bylo možné analyzovat přiměřeně velkou plochu zkoumaného objektu. Navíc intenzita původního divergentního rentgenového svazku z rentgenky tím dramaticky klesá, když je původní rentgenový svazek přetvořen na tenký rovinný svazek.

45

50

V jiném vynálezu, známém z přihlášky vynálezu CZ 2015-27 A3, je pro zkoumání vrstevnaté struktury na uměleckých dílech použit rovinný svazek rentgenového záření, který proniká zkoumanou oblastí zkoumaného objektu pod ostrým úhlem dopadu. Současně s průnikem

rentgenového svazku je zaznamenáván vystupující rentgenový svazek (transmisní měření), a dále je snímáno fluorescenční záření vystupující z ozařovaného materiálu zkoumané oblasti dvěma způsoby, a to nezakrytým detektorem pro analýzu prvkového složení, a současně zakrytým detektorem, jehož kryt je opatřen dírkou pro geometricky popsatelný prostup a dopad fluorescenčního záření na citlivou plochu detektoru.

Nevýhody výše uvedeného řešení spočívají v tom, že je vynalezený způsob komplikovaný, neboť tloušťka použitého rovinného svazku musí být pro rozlišení mikrometrech rovněž v mikrometrech, čímž je rovinný svazek velmi utlumen, a dále že je potřeba analyzovat data ze třech detektorů, načež je nezbytné dílčí výsledky složit do výsledného výstupu. Komplikovaný způsob měření vyžaduje komplikované zařízení k jeho provádění, což zvyšuje cenu vynálezu, zvyšuje pravděpodobnost poškození, či výpadku funkčnosti.

Úkolem technického řešení je vytvoření zařízení pro nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury, které by dosahovalo vysokého rozlišení v mikrometrech za použití rovinného svazku s tloušťkou v milimetrech, které by bylo konstrukčně jednoduché, a které by optimalizovalo rychlost realizace měření do přijatelných hodnot, oproti známým řešením.

Podstata technického řešení

Vytčený úkol je vyřešen pomocí zařízení pro nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury vytvořeného podle níže uvedeného technického řešení.

Podstata zařízení pro nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury zkoumaného objektu spočívá v tom, že je sestaveno ze zdroje svazku nízkoenergetického rentgenového záření orientovaného výstupem svazku nízkoenergetického rentgenového záření vůči zkoumanému objektu. Zdroj ozařuje místo zájmu svazkem nízkoenergetického rentgenového záření na zkoumaném objektu, načež materiál v místě zájmu začne emitovat sekundární nízkoenergetické rentgenové záření. Součástí zařízení je alespoň jeden kolimátor svazku nízkoenergetického rentgenového záření, který je uspořádaný před výstup svazku nízkoenergetického rentgenového záření ze zdroje. Kolimátor s výhodou upraví kónický svazek nízkoenergetického rentgenového záření do podoby rovinného svazku nízkoenergetického rentgenového záření s ostrou hranou. Dále se zařízení sestává z alespoň jedné zobrazovací kamery nízkoenergetického rentgenového záření orientované vůči zkoumanému objektu, aby zobrazovací kamera snímala sekundární záření vystupující z místa zájmu zkoumaného objektu. Poslední v řadě, ale neméně důležitou součástí zařízení, je alespoň jedna výpočetní jednotka, která je drátově nebo bezdrátově připojená k zobrazovací kameře pro archivaci a vyhodnocení signálu s charakteristikou sekundárního záření.

Zařízení umožňuje nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury zkoumaného objektu, jenž je složeno z postupových kroků:

- a) místo zájmu zkoumaného objektu se ozařuje rovinným svazkem nízkoenergetického rentgenového záření s alespoň jednou ostrou hranou, jenž se vymodeluje v kolimátoru zařízení, a který dopadá na místo zájmu pod ostrým úhlem dopadu o velikosti v rozmezí od 0° do 10° ,
- b) fluorescenční záření a rozptýlené částice vystupující z ozařovaného místa zájmu zkoumaného objektu se snímají alespoň jednou zobrazovací kamerou nízkoenergetického rentgenového záření a převádějí na signál,
- c) signál ze zobrazovací kamery se vyhodnocuje ve výpočetní jednotce pro stanovení výsledků nedestruktivního měření vrstevnaté struktury.

Díky ostré hraně je dobře rozpoznatelné rozhraní mezi nezasaženým a zasaženým materiálem rovinným svazkem nízkoenergetického rentgenového záření. Současně je výhodné, pokud se použije velikost úhlu dopadu v rozmezí od 0° do 10° , neboť je rozlišení v měření tloušťek vrstev nepřímo úměrné tangentu úhlu dopadu rovinného svazku na povrch místa zájmu zkoumaného

objektu. Pokud má úhel dopadu hodnotu jednotek stupňů, můžeme při rozlišení zobrazovací kamery na úrovni desítek mikrometrů měřit tloušťky vrstev s přesností jednotek mikrometrů.

5 Rovněž se s výhodou v rámci práce se zařízením podle technického řešení při realizaci postupového kroku c) v charakteristice celkového signálu vyhledají pasáže signálu s rostoucí a/nebo s klesající změnou hodnot, které se zaregistrovaly pro oblast průniku svazku nízkoenergetického rentgenového záření u jeho ostré hrany místem zájmu zkoumaného objektu, načež se z jejich počtu a průběhu stanoví počet a tloušťka jednotlivých vrstev vrstevnaté struktury v ozařovaném místě zájmu zkoumaného objektu. Je výhodné, že registrovaný signál 10 obsahující fluorescenční a rozptýlené fotony narůstá postupně, jak hlouběji zasahuje do první vrstvy vrstevnaté struktury, zatímco signál s nárůstem pro následující vrstvu vrstevnaté struktury se neprojevuje do chvíle, než hrana pronikavého svazku prostoupí kompletně první vrstvou. Od konce první vrstvy je možné detekovat další nárůst signálu způsobený průnikem hrany svazku druhou vrstvou. V případě, že se sleduje oblast výstupu svazku nízkoenergetického rentgenového 15 záření, lze analogicky sledovat pokles signálu.

Kromě tlouštěk vrstev vrstevnaté struktury je získána celková informace o stavu a složení povrchových vrstev pomocí analýzy fluorescenčních a rozptýlených fotonů z oblastí materiálu ležící mezi vstupem a výstupem rovinného svazku, kdy jsou povrchové vrstvy kompletně uvnitř 20 tohoto svazku. Šířka svazku nízkoenergetického rentgenového záření může být libovolně zvolena a může být relativně velká, typicky o řád větší než u jiných výše popsaných metod.

Ve výhodném provedení zařízení podle technického řešení je zdroj zdrojem nízkoenergetického rentgenového záření a zobrazovací kamera je citlivá na nízkoenergetické rentgenové záření s rozlišením na úrovni desítek μm . Díky tomu lze použít nízkoenergetické rentgenové záření, 25 které zejména u organických substrátů, jako je např. dřevo, nezpůsobuje přílišné generování sekundárního nízkoenergetického rentgenového záření v materiálu dřeva.

V dalším výhodném provedení zařízení podle technického řešení jsou zdroj a kamera upevněny 30 k polohovatelnému unašeči tvořeném robotickým ramenem a zařízení je opatřeno polohovatelným stolcem pro nesení zkoumaného objektu. Prostorové nastavení kamery a zdroje záření vůči zkoumanému objektu je s výhodou možné naprogramovat, aby nedošlo např. k rozostření při manuálním prostorovém nastavení, nebo k chybě při kvazikontinuálním zkoumání větších ploch

35 V jiném dalším výhodném provedení zařízení podle technického řešení je kolimátor štěrbinový s rovinným a hladkým povrchem štěrbin. To je výhodné, neboť bylo zjištěno v rámci pokusných měření, že rovinný a hladký povrch štěrbin kolimátoru má díky odrazu nízkoenergetického rentgenového záření oproti předpokládanému zeslabení intenzity právě naopak zesilující účinek 40 na nízkoenergetické rentgenové záření při ostrých hranách rovinného svazku nízkoenergetického rentgenového záření.

Zařízení podle technického řešení pomáhá urychlit nedestruktivní měření vrstevnaté struktury, netrpí dramatickým poklesem intenzity u rentgenového svazku při jeho formování do rovinného 45 tvaru, neboť velikost tloušťky svazku může být znatelně větší než velikost požadovaného rozlišení, dále významně zjednodušuje známé postupy nedestruktivní stratigrafie a zachovává si vysoké rozlišení měření.

50 Objasnění výkresů

Uvedené technické řešení bude blíže objasněno na následujících vyobrazeních, kde:

obr. 1 znázorňuje schematické vyobrazení provádění nedestruktivního měření,

obr. 2 zjednodušeně znázorňuje princip stratigrafického měření využívajícího ostrou hranu rovinného svazku,

obr. 3 graf s charakteristikou signálu z měření testovacího vzorku s dvouvrstvou polychromií.

5

Příklad uskutečnění technického řešení

Na obr. 1 je schematické vyobrazení způsobu nedestruktivního měření vrstevnaté struktury na povrchu zkoumaného objektu 5, kterým je například malba na dřevěné desce, plátno obrazu atp.
10 Mocnost vrstev vrstevnaté struktury je násobně menší, než mocnost nosného substrátu zkoumaného objektu 5.

Ze zdroje 1 nízkoenergetického rentgenového záření je vyzařován svazek nízkoenergetického rentgenového záření, který je v kolimátoru 2 vymodelován do rovinného svazku 4
15 nízkoenergetického rentgenového záření s ostrou hranou. Tento rovinný svazek 4 dopadá na místo zájmu zkoumaného objektu 5, kterým začne pronikat. Současně je v materiálu ležícím v průniku rovinného svazku 4 generováno sekundární nízkoenergetické rentgenové záření složené z fluorescenčního záření a z rozptýlených částic. Toto sekundární záření je registrováno zobrazovací kamerou 3. Signál ze zobrazovací kamery 3 je posléze vyhodnocen.

20

Princip způsobu je názorně vyobrazen na obr. 2, kde je vidět řez místem zájmu zkoumaného objektu 5, a dále je vidět řez rovinným svazkem 4 nízkoenergetického rentgenového záření s ostrou hranou. Současně je naznačen směr jeho šíření prostorem. Tloušťka St rovinného svazku 4 je konstantní. Úhel α dopadu je ostrý o velikosti v jednotkách stupňů. Na zkoumaném objektu 5
25 leží dvě povrchové vrstvy s tloušťkami t1 a t2.

Jak je z obr. 2 patrné, čím hlouběji zasahuje rovinný svazek 4 do první vrstvy vrstevnaté struktury, tím více se zesiluje měřený signál, jak je vidět na první rostoucí pasáži δ_{11} signálu. Na přechodu mezi první a druhou vrstvou se stává signál z první vrstvy v podstatě konstantním,
30 přičemž je postřehnutelná druhá rostoucí pasáž δ_{12} signálu pro druhou vrstvu. Obdobné chování platí i v oblasti výstupu rovinného svazku 4 z místa zájmu zkoumaného objektu 5, kde pro první vrstvu je viditelná pasáž δ_{21} signálu s klesajícími hodnotami, a následně je patrná druhá pasáž δ_{22} signálu s klesajícími hodnotami pro druhou vrstvu.

35 Pro názornost a rychlé pochopení funkce zařízení byl růst a/nebo pokles v pasážích δ signálu obou vrstev vyobrazen lineárně, avšak ve skutečných podmínkách lze očekávat nelineární chování signálu. Současně byl pro zjednodušení ukázky zanedbán příspěvek k celkovému signálu ze substrátu.

40 Co se týče určení tloušťky libovolné první vrstvy je rovnice následující:

$$t_1 = \delta_{11} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Co se týče určení tloušťky libovolné n-vrstvy je rovnice následující:

$$t_n = \delta_{1n} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

45

Co se týče určení celkové tloušťky povrchové struktury je rovnice následující:

$$T = \sum t_n = \delta_{1n} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

50 Prakticky stejné rovnice jsou platné pro vrstvy v oblasti výstupu rovinného svazku 4 z místa zájmu zkoumaného objektu 5.

Přesnost měření je tedy ovlivněna kvalitou celkového signálu, ve kterém se vyhledávají pasáže δ signálu týkající se prostupu skrz vrstevnatou strukturu.

Zdrojem 1 nízkoenergetického rentgenového záření je rentgenka pracující na napětí 40 kV a proudu 0,5 mA. Svazek nízkoenergetického rentgenového záření byl pomocí štěrbinového kolimátoru 2 z olověného skla vymodelován na rovinný svazek 4 nízkoenergetického rentgenového záření o tloušťce 0,5 mm. Plochý zkoumaný objekt 5 byl uspořádán na manipulační stolek a rovinný svazek 4 nízkoenergetického rentgenového záření dopadal na místo zájmu zkoumaného objektu pod úhlem α dopadu o velikosti 5° .

Jako zobrazovací kamera 3 byla použita dírková XRF kamera orientována kolmo k povrchu zkoumaného objektu, tzn., že detektor XRF kamery byl paralelně orientován s rovinným svazkem 4 nízkoenergetického rentgenového záření. XRF kamera byla nainstalována na unašeč, který ji naváděl pro nerušený příjem sekundárního záření. XRF kamera byla vybavena Timepix detektorem s tloušťkou křemíkového senzoru $300 \mu\text{m}$, jenž měl rozlišení 256×256 čtvercových pixelů s délkou strany $55 \mu\text{m}$. Sekundární záření bylo promítáno skrz díрку XRF kamery o průměru $100 \mu\text{m}$. Detekční práh XRF kamery byl nastaven na 3 keV pro odfiltrování šumu detektoru.

Výpočetní jednotkou byl komerčně dostupný přenosný počítač, jenž byl opatřen softwarovým modulem pro vyhodnocení signálu z kamery 3.

Data byla zaznamenávána v čase pro všechny události překonávající práh 3 keV a posléze byla analyzována v rámci metody analýzy po jednotlivých událostech, což poskytlo informaci o energii každé zaznamenané částice.

Pozorovaný povrch místa zájmu zkoumaného objektu 5 byl zvětšen násobkem 1,4 vzhledem k vzdálenosti dírky XRF kamery a zkoumaného objektu 5 pro dosažení poměru, ve kterém jeden pixel detektoru XRF kamery odpovídá $40 \mu\text{m}$ povrchu místa zájmu zkoumaného povrchu 5.

V grafu na obr. 3 se záznamem signálu pro zkušební vzorek s dvouvrstvou polychromií lze spatřit pasáž signálu mezi hodnotami 0,533 mm a 0,943 mm, kde hodnota 0,533 reprezentuje začátek první vrstvy polychromie, jenž začne s prostupujícím rovinným svazkem 4 emitovat sekundární záření reprezentované signálem, a hodnota 0,943 reprezentuje začátek příspěvku k sekundárnímu záření od druhé vrstvy polychromie, z čehož lze úvahou odvodit, že první vrstva skončila.

Další pasáž signálu sekundárního záření je mezi hodnotami 0,943 mm a 1,476 mm, kdy je patrný nárůst intenzity sekundárního záření způsobeného od stále hlouběji pronikajícího rovinného svazku 4 do hloubky druhé vrstvy, načež v hodnotě 1,476 mm dojde k náhlému poklesu, který lze úvahou přisoudit k tomu, že rovinný svazek 4 opustil druhou vrstvu polychromie.

Úhel dopadu při testovacím měření byl 5° . Tangens úhlu o velikosti 5° má hodnotu 0,09.

Pro výpočet celkové tloušťky polychromie v místě zájmu na testovacím vzorku lze použít níže uvedený výpočet s dosazením do vzorce:

$$t_c = (1476 \mu\text{m} - 533 \mu\text{m}) \cdot 0,09$$

$$t_c = 84 \mu\text{m}$$

Výpočet tloušťky první vrstvy polychromie je následující:

$$t_1 = (943 \mu\text{m} - 533 \mu\text{m}) \cdot 0,09$$

$$t_1 = 37 \mu\text{m}$$

Výpočet tloušťky druhé vrstvy je jednoduchý rozdíl:

$$t_2 = t_c - t_1$$

$$t_2 = 84 - 37$$

$$t_2 = 47 \mu\text{m}$$

Uvedené výsledky souhlasily s experimentálním měřením kontrolní metodou.

Průmyslová využitelnost

Zařízení pro nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury podle technického řešení nalezne uplatnění ve výzkumu a restaurování uměleckých děl, dále v oblasti analýzy kvality povrchové úpravy aplikované na masivním substrátu, např. u měření mocnosti ochranných nátěrů.

NÁROKY NA OCHRANU

1. Zařízení pro nedestruktivní zkoumání vrstevnaté struktury zkoumaného objektu (5), **vyznačující se tím**, že sestává ze zdroje (1) svazku (4) nízkoenergetického rentgenového záření orientovaného výstupem svazku (4) nízkoenergetického rentgenového záření vůči zkoumanému objektu (5), z alespoň jednoho kolimátoru (2) svazku nízkoenergetického rentgenového záření uspořádaného před výstup svazku (4) nízkoenergetického rentgenového záření ze zdroje, z alespoň jedné zobrazovací kamery (3) nízkoenergetického rentgenového záření orientované vůči zkoumanému objektu (5), a z alespoň jedné výpočetní jednotky drátově nebo bezdrátově připojené k zobrazovací kameře (3) pro archivaci a vyhodnocení signálu ze zobrazovací kamery (3).

2. Zařízení podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že zdroj (1) je zdrojem nízkoenergetického rentgenového záření, a že zobrazovací kamera (3) je citlivá na nízkoenergetické rentgenové záření s rozlišením na úrovni desítek μm .

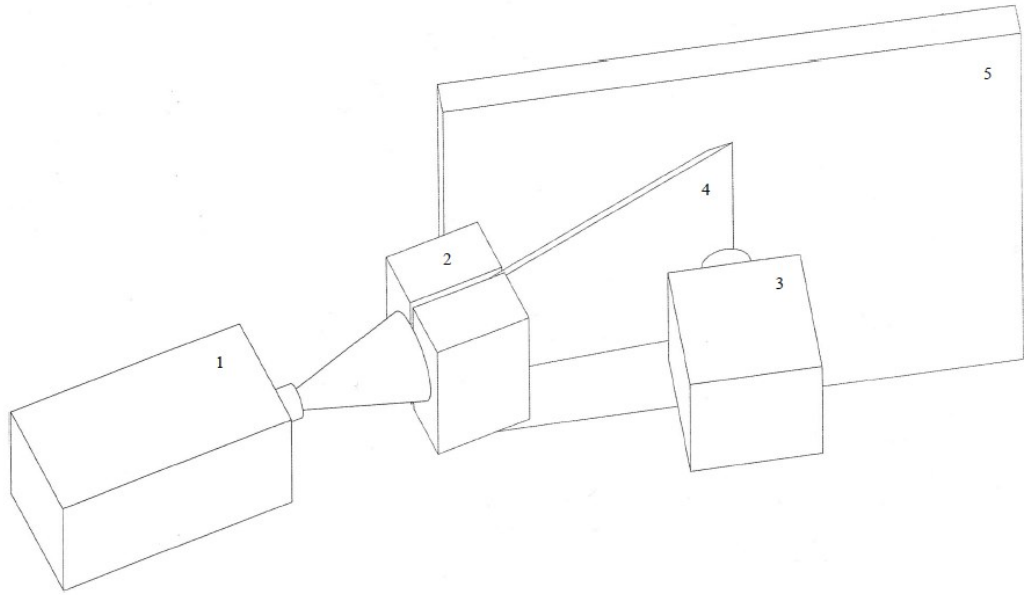
3. Zařízení podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím**, že zdroj (1) a kamera (3) jsou upevněny k polohovatelnému unašeči tvořeném robotickým ramenem, a že je zařízení opatřeno polohovatelným stolcem pro nesení zkoumaného objektu (5).

4. Zařízení podle některého z nároků 1 až 3, **vyznačující se tím**, že kolimátor (2) je štěrbínový kolimátor s rovinným a hladkým povrchem štěrbiny.

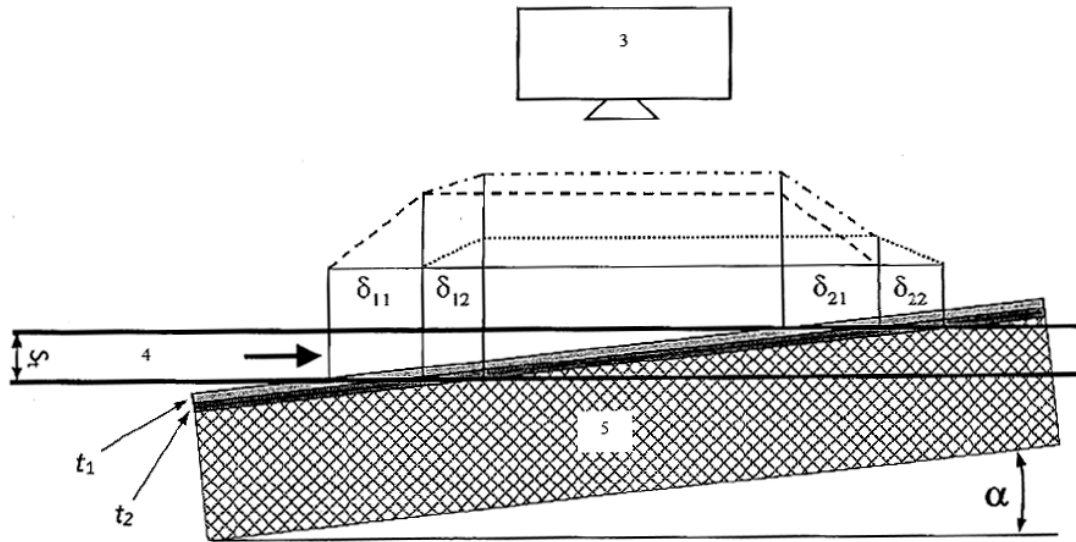
3 výkresy

Seznam vztahových značek:

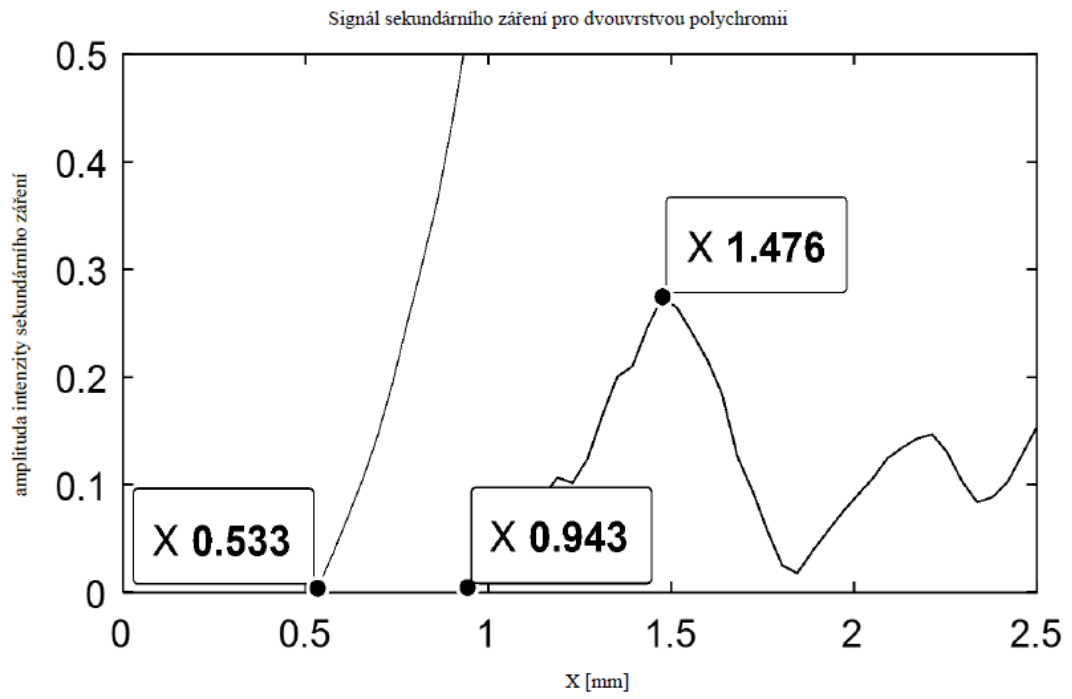
- 1 zdroj pronikavého záření
- 2 kolimátor pronikavého záření
- 3 zobrazovací kamera
- 4 rovinný svazek nízkoenergetického rentgenového záření s ostrou hranou
- 5 zkoumaný objekt
- α úhel dopadu
- δ_{11} pasáž signálu s rostoucí změnou hodnot pro první vrstvu
- δ_{12} pasáž signálu s rostoucí změnou hodnot pro druhou vrstvu
- δ_{21} pasáž signálu s klesající změnou hodnot pro první vrstvu
- δ_{22} pasáž signálu s klesající změnou hodnot pro druhou vrstvu
- t_1 tloušťka první vrstvy
- t_2 tloušťka druhé vrstvy
- St tloušťka rovinného svazku nízkoenergetického rentgenového záření.



Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3