

SOUČASNÉ BEZKONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ TLOUŠŤKY FUNKČNÍCH POVLAKŮ A ZAJIŠTĚNÍ JEJICH SPOLEHLIVOSTI

PRESENT CONTACTLESS METHODS OF FUNCTIONAL COATINGS THICKNESS MEASUREMENT AND THEIR RELIABILITY PROVISION

Vladimir SYASKO¹, Sergei GOLUBEV², Adam POLÁČEK³
1, 2, 3 NDT1 KRAFT s.r.o., Praha, Česká republika,
e-mail: 9334343@gmail.com

Abstrakt

Byla provedena analýza úkolů měření tloušťky současných a vyvíjených kovových a dielektrických funkčních povlaků používaných v leteckém, kosmickém a strojírenském průmyslu.

V příspěvku jsou zkoumány fyzikální principy bezkontaktních aktivních termografických, vířivoproudých a rentgenových metod, zajišťujících měření tloušťky, vodivosti, magnetických vlastností a také kontrolu souvislosti povlaků ve výrobních podmínkách s normovanými metrologickými charakteristikami a potlačení vlivu interferenčních parametrů výrobků a vnějších faktorů.

Příspěvek obsahuje příklady přístrojů a technologií, realizujících zkoumané metody a výsledky jejich použití ve výrobních se špičkovými technologiemi.

Klíčová slova: *funkční povlaky, tloušťka povlaku, elektrofyzikální vlastnosti povlaků, souvislost povlaků*

Abstract

An analysis of the tasks of thickness measurement of current and developed metallic and dielectric functional coatings used in aviation, aerospace and engineering industries was carried out.

The proceeding examines the physical principles of contactless active thermographic, eddy current and radiographic methods to measure coating thickness measurement, conductivity, magnetic properties and also continuity inspection of coatings in manufacturing conditions with normative metrological characteristics and the suppression of interfering parameters of products and external factors.

The proceeding contains examples of devices and technologies that implement the examined methods and results of their application in high technology manufacturing plants.

Key words: *functional coatings, coating thickness, electrophysical properties of coatings, coatings continuity*

V posledních letech se v předních průmyslových odvětvích výrazně rozšířil sortiment používaných povlaků a materiálů výrobků, na které se tyto nanášejí. Také se zvýšily požadavky na kvalitu.

Jak je známo, povlaky jsou vrstvy, uměle získané na povrchu kovových a nekovových výrobků, chránící před korozí, opotřebením nebo jim přidávají zadané funkční vlastnosti: pevnost, oděruvzdornost, tepelnou ochranu, radioabsorpci, snížení tření a další. V závislosti na materiálu povlaku je možné je rozdělit na několik základních skupin: kovové, nekovové, neorganické, barvy a laky, plastové, kompozitní, povlaky ze speciálních materiálů.

Jeden z hlavních parametrů kvality povlaku je tloušťka T , která se předepisuje pro konkrétní typy výrobků a je jedním z hlavních měřených parametrů při nedestruktivním testování (NDT) jejich kvality.

Pro úlohy měření T je možné zformulovat následující kombinace povlak/podklad:

- 1) feromagnetické vodivé povlaky na vodivých feromagnetických podkladech;
- 2) neferomagnetické vodivé povlaky na vodivých feromagnetických podkladech;
- 3) dielektrické povlaky na vodivých feromagnetických podkladech;
- 4) feromagnetické vodivé povlaky na vodivých neferomagnetických podkladech;
- 5) neferomagnetické vodivé povlaky na vodivých neferomagnetických podkladech;
- 6) dielektrické povlaky na vodivých neferomagnetických podkladech;
- 7) feromagnetické vodivé povlaky na dielektrických podkladech;
- 8) neferomagnetické vodivé povlaky na dielektrických podkladech;
- 9) dielektrické povlaky na dielektrických podkladech.

Je známa velká skupina úloh měření tloušťky povlaků, nedovolujících nebo výrazně limitujících možnost mechanického kontaktu primárních měřících sond s povrchem výrobku v procesu kontroly. V souvislosti s tím se v současné době stále více rozvíjejí metody bezkontaktního režimu měření T , jako vířivoproudá fázová metoda, aktivní termografická metoda, rentgenová (radiometrická) fluorescenční a metody β zpětného rozptylu.

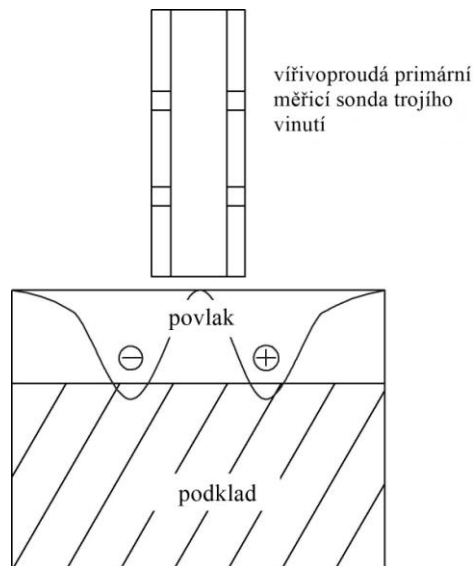
Uvedeme krátkou charakteristiku těchto NDT metod, které se aplikují na výše uvedené úlohy měření tloušťky.

Vířivoproudá metoda NDT je založena na analýze interakce vlastního elektromagnetického pole vířivoproudé sondy s elektromagnetickým polem vířivých proudů indukovaných v objektu kontroly (v objektu a povlaku) a závisejících na elektrofyzikálních a geometrických parametrech hlavního kovu a povlaku. V závislosti na úloze měření a vlastnostech materiálu podkladu a povlaku se mohou aplikovat různé funkce změny elektromagnetického pole v čase (zkušební energie) a různé primární informativní parametry, definované způsobem získání primární informace. Do praxe bezkontaktního měření T pevně vstoupily vířivoproudé tloušťkoměry realizující fázovou metodu měření, jež má řadu výhod.

S použitím fázové metody vířivoproudého NDT je možné provádět bezkontaktní měření T :

- vodivých neferomagnetických povlaků na vodivých feromagnetických podkladech;
- vodivých feromagnetických povlaků na vodivých feromagnetických podkladech;
- vodivých neferomagnetických povlaků na vodivých neferomagnetických podkladech.

Na obr. 1 je zobrazen model citlivého elementu vířivoproudé transformátorové primární měřící sondy trojího vinutí s feritovým jádrem nad dvouvrstvou strukturou kovový povlak - kovový podklad, jež realizuje fázovou metodu měření tloušťky kovových povlaků, včetně feromagnetických na kovových podkladech.



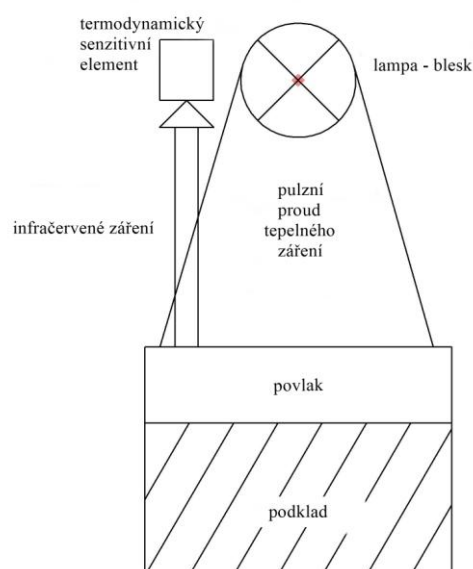
Obr. 1. Model senzitivního elementu vířivoproudé transformátorové primární měřicí sondy trojího vinutí nad dvouvrstvou strukturou

Hlavní výhodou vířivoproudé fázové metody je možnost vývoje sondy s frekvencí excitačního proudu od desítek Hz do desítek MHz pro měření tloušťky povlaků v rozsahu od jednotek mikrometrů do desítek milimetrů s možností potlačení vlivu mezery, drsnosti povrchu povlaku a podkladu a také poloměru podkladu. Nedostatky zahrnují závislost údajů na řadě interferenčních parametrů: vodivost σ a permeabilita μ podkladů a povlaků. Také je řada omezení v možných kombinacích povlak - podklad.

Tepelná metoda NDT je založena na analýze parametrů tepelných polí kontrolovaných objektů.

Aktivní synchronní termografická metoda, jejíž obecné schéma je uvedeno na obr. 2, umožňuje provádět měření T :

- dielektrických povlaků na kovových podkladech;
- dielektrických povlaků na dielektrických podkladech.

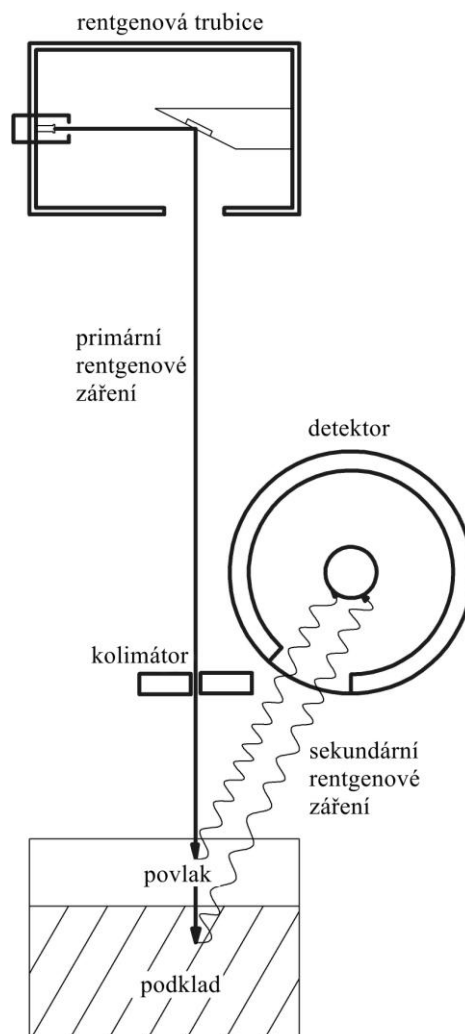


Obr. 2. Obecné schéma měřicího konvertoru, realizující aktivní synchronní termodynamickou metodu měření tloušťky dielektrických povlaků na kovových a nekovových podkladech

Výhodou metody je možnost bezkontaktního měření v rozsahu tlouštěk od několika mikrometrů do 1 mm. Nedostatkem je závislost výsledků měření na termofyzikálních (součinitel tepelné vodivosti λ , tepelná vodivost C , hustota ρ , koeficient teplotní vodivosti $a = \lambda/\rho C$, tepelná setrvačnost $e = \lambda(C\rho)^{1/2}$, odrazná schopnost povlaku) a geometrických (především drsnost povrchu Rz) parametrů povlaku a podkladu a také adheze povlaku k podkladu.

Radiační metoda NDT zejména využívá fotonové (včetně rentgenového), neutronové a elektronové záření.

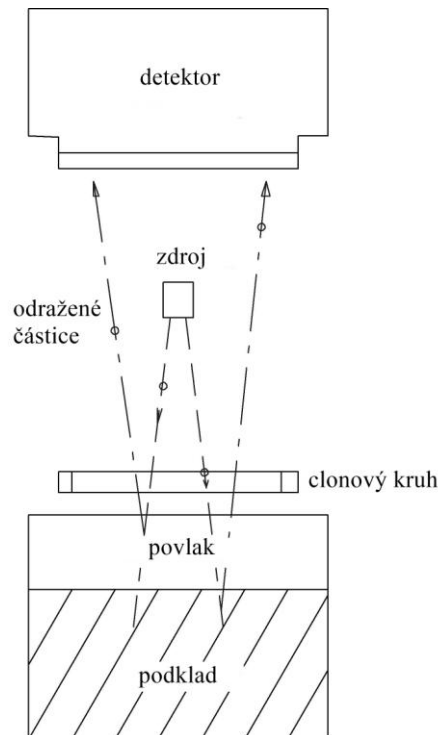
Rentgenová fluorescenční metoda je radiometrická metoda nedestruktivního testování, určená k měření T kovových tenkých a ultratenkých povlaků na kovových a dielektrických podkladech, zejména malé velikosti. Také se používá pro měření vícevrstvých povlaků. Na obr. 3 je uvedeno obecné schéma měřicího konvertoru realizujícího rentgenovou fluorescenční metodu měření tloušťky povlaku.



Obr. 3. Obecné strukturální schéma měřicího konvertoru realizujícího rentgenovou fluorescenční metodu měření tloušťky povlaků

Pomocí *radiometrické metody β zpětného rozptylu*, jejíž konvertor má obecné schéma zobrazeno na obr. 4, je možné měřit T :

- dielektrických povlaků na kovových a dielektrických podkladech;
- kovových (včetně vícevrstvých) povlaků na kovových a dielektrických podkladech.



Obr. 4. Obecné strukturální schéma primární měřicí sondy, realizující metodu beta zpětného rozptylu při měření tloušťky povlaků

Metoda umožňuje provádět měření v rozsahu od setin do stovek mikrometrů.

Interferenčními parametry pro radiometrické metody jsou hustota ρ a atomové číslo N_{at} materiálů povlaků a podkladů, drsnost R_z .

Všechny výše uvedené bezkontaktní metody měření T ochranných a funkčních povlaků uvažovaných druhů NDT jsou nepřímými metodami. To znamená, že nastavení, ověření a kalibrace měřicích prostředků se musí provádět za použití etalonových měrek tloušťky, imitujících měřený fyzikální parametr v rozsahu jeho změny při známých stabilních interferenčních parametrech. Také je třeba brát v úvahu, že každá zvlášť popsaná metoda uvažovaných druhů NDT řeší omezený okruh úloh měření a je charakterizována různými interferenčními parametry.

V souladu s většinou vytvořených schémat návaznosti (schémat ověření) se jako pracovní prostředky měření používají měřky tloušťky a tloušťkoměry povlaků, uskupené podle použití v závislosti na druhu materiálů povlaků a podkladů měřených objektů.

Na obr. 5 je uvedeno devět typů tloušťkoměrů a schémat návaznosti (schémat ověření).

<p>Tloušťkoměry polovodičových povlaků na dielektrických podkladech</p> <p>5 ÷ 30 μm Δ = 0,4 ÷ 1,0 μm</p>	<p>Tloušťkoměry dielektrických povlaků na polovodičových podkladech</p> <p>1 ÷ 5 μm Δ = 0,4 ÷ 1,0 μm</p>	<p>Tloušťkoměry nemagnetických vodivých povlaků na magnetických podkladech</p> <p>4 ÷ 1000 μm Δ = 1,5 ÷ 100,0 μm</p>
<p>Tloušťkoměry nemagnetických vodivých povlaků na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>2 ÷ 500 μm Δ = 0,4 ÷ 20,0 μm</p>	<p>Tloušťkoměry magnetických povlaků na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>5 ÷ 100 μm Δ = 0,4 ÷ 10,0 μm</p>	<p>Tloušťkoměry magnetických povlaků na magnetických podkladech</p> <p>5 ÷ 100 μm Δ = 0,5 ÷ 10,0 μm</p>
<p>Tloušťkoměry vířivoproudě pro dielektrické povlaky na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>2 ÷ 20000 μm Δ = 1 ÷ 200 μm</p>	<p>Tloušťkoměry magnetické pro dielektrické povlaky na magnetických podkladech</p> <p>2 ÷ 20000 μm Δ = 1 ÷ 200 μm</p>	<p>Tloušťkoměry nemagnetických vodivých povlaků na dielektrických podkladech trubkových (průměr 0,6 ÷ 1,5 mm)</p> <p>5 ÷ 100 μm Δ = 5,0 μm</p>

Obr. 5. Pracovní měřicí prostředky podle platného schématu ověření

Výše byly zformulovány kombinace povlak/podklad, jejichž analýza ukazuje, že v platném schématu ověření nejsou následující tloušťkoměry:

- dielektrických povlaků na dielektrických podkladech;
- feromagnetických povlaků na dielektrických podkladech.

V souladu s platnými schématy ověření jsou základním prostředkem ověření tloušťkoměrů povlaků etalonové měřky tloušťky povlaků a zařízení pro ověření magnetických a vířivoproudých tloušťkoměrů dielektrických povlaků, jejichž příklady jsou uvedeny na obr. 6.

<p>Měřky tloušťky nemagnetických vodivých povlaků na magnetických podkladech</p> <p>4 ÷ 1000 μm δ = (0,1+0,025h) μm</p>	<p>Měřky tloušťky nemagnetických vodivých povlaků na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>2 ÷ 500 μm δ = (0,3+0,025h) μm</p>	<p>Měřky tloušťky magnetických povlaků na nemagnetických vodivých podkladech</p> <p>5 ÷ 100 μm δ = (0,1+0,025h) μm</p>
---	---	--

Obr. 6. Etalony druhé kategorie podle platného schématu ověření

Výše uvedené bezkontaktní metody tří druhů NDT, použité při vyvíjení měřicích sond tloušťkoměrů ochranných a funkčních povlaků mají základ v závislosti některého

informativního parametru na T . Ovšem výše bylo uvedeno, že informativní parametry závisí nejen na měřené veličině, ale i na celé řadě interferenčních parametrů, které jsou uvedeny pro každou z výše uvažovaných metod NDT. Zároveň v souladu s platnou normativní dokumentací při výrobě, kalibraci a ověření existujících měrek tloušťky se kontrolují pouze jejich geometrické parametry: tloušťka povlaku, rozdílná tloušťka, drsnost povrchu, neberou se v úvahu interferenční parametry, které mají přímý vliv na výsledek měření bezkontaktními tloušťkoměry a určují přitom skutečnou hodnotu T a nejistotu výsledku měření. V tomto ohledu se zdá být nezbytné vytvořit nové normy na měrky tloušťky a také zdokonalení schématu ověření nebo vytvoření několika lokálních schémat ověření.

Analýza současné standardizace NDT kvality povlaků bezkontaktními metodami ukázala, že dnes existují normativní dokumenty na druhy a metody NDT, které definují požadavky k termínům a definicím, ale nejsou uvedeny požadavky k měřicím prostředkům a ověření. Proto je nutné vyvinout normativní dokumenty na bezkontaktní metody, které budou určovat požadavky k tloušťkoměrům, měrkám tloušťky a také požadavky jejich ověření a kalibrace. Analogicky s mezinárodními normami, např. ISO 16859 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Leeba, vytvořené v třech částech: 1 - Zkušební metoda; 2 - Ověřování a kalibrace zkušebních přístrojů; 3 - Kalibrace referenčních zkušebních destiček, se nabízí následující struktura norem:

1. Bezkontaktní metoda NDT tloušťky povlaků. Základní ustanovení.

- 1 Oblast použití
- 2 Normativní odkazy
- 3 Termíny a definice
- 4 Metoda měření
- 5 Tloušťkoměry
- 6 Požadavky k objektům měření
- 7 Měření tloušťky povlaků
- 8 Hodnocení nejistoty měření
- 9 Protokol měření

2. Tloušťkoměry, ověření, kalibrace

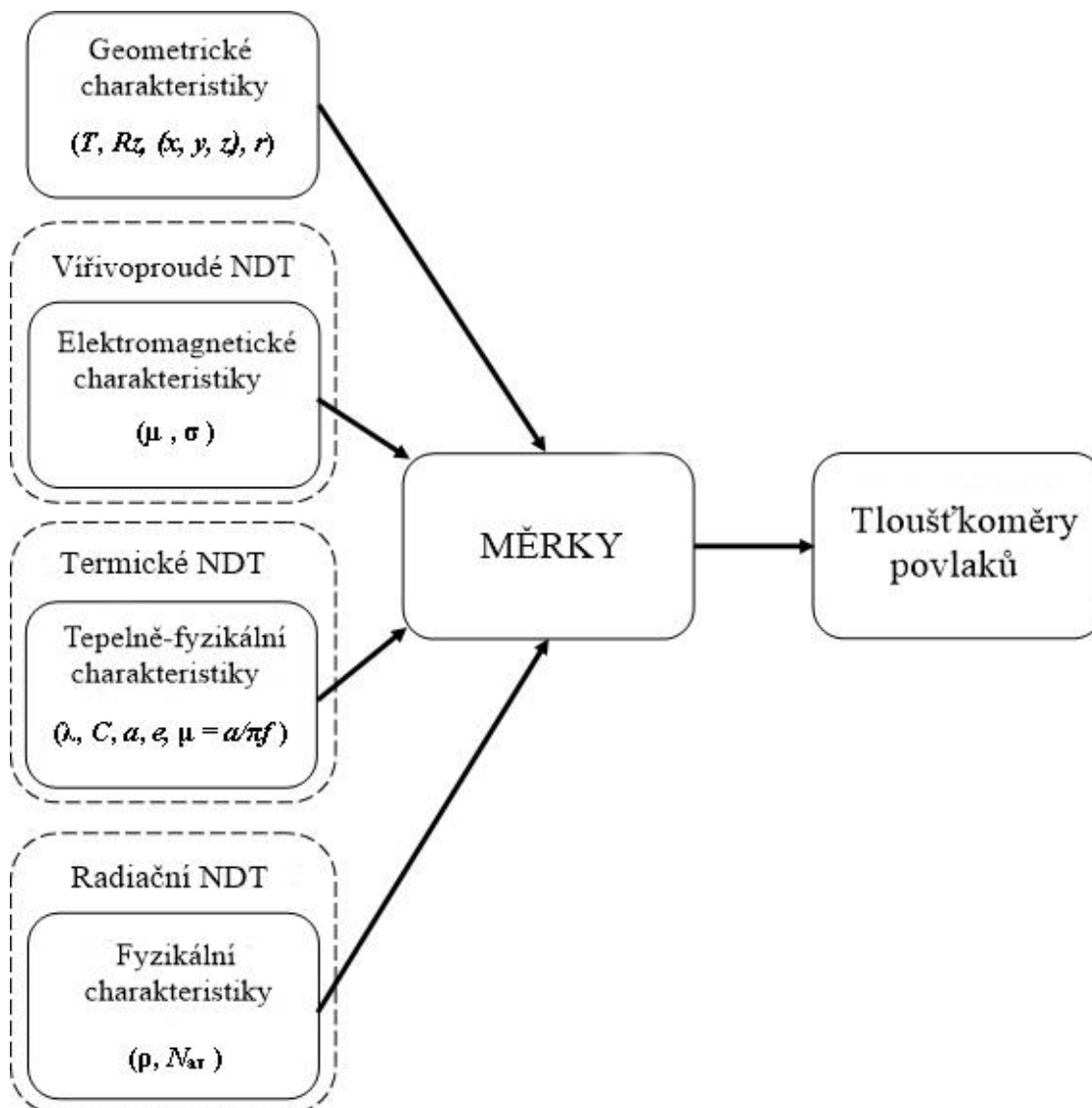
- 1 Oblast použití
- 2 Normativní odkazy
- 3 Základní podmínky
- 4 Ověření tloušťkoměrů
 - Obecná ustanovení
 - Variační koeficient
 - Odchylka tloušťkoměrů
 - Nejistota měření
- 5 Interval mezi ověřeními
- 6 Kalibrační list

3. Měrky tloušťky, ověření a kalibrace

- 1 Oblast použití
- 2 Základní podmínky
- 3 Výroba etalonových měrek tloušťky
- 4 Ověření etalonových měrek tloušťky
 - Obecné požadavky
 - Metrologická návaznost
- 5 Postup ověření

- 6 Počet měření
- 7 Nejistota měření
- 8 Značení
- 9 Doba použitelnosti

Interferenční parametry pro každou bezkontaktní metodu jako i tloušťka povlaku se musí kontrolovat ve fázích výroby a ověření měřicích prostředků, jak je uvedeno na obr. 7, v takovém případě bude zajištěna metrologická návaznost a jednotota měření.



Obr. 7. Schéma přenosu velikosti jednotky od měrek k tloušťkoměrům povlaků s ohledem na kontrolu interferenčních parametrů pro každou bezkontaktní metodu NDT

Použití přístrojů, jež realizují uvažované metody měření a také navrhované principy metrologického zajištění, umožní provádět bezkontaktní techniky měření při zajištění jednoty měření a také zvýšit spolehlivost výsledků.