

LEPENÍ KŘEMÍKOVÝCH ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ VTS ZLÍN A ZAPOJOVÁNÍ JEJICH VÝVODŮ DO MĚŘÍCÍCH ŘETĚZCŮ

1. Obecné základní údaje

1.1. Pro nalepení odporového tenzometru na měřený objekt mají podstatně výhodnější vlastnosti lepidla vytvrzující chemicky, než lepidla, vytvrzující fyzikálně, odpařením rozpouštědla. Od tenzometrických lepidel vyžadujeme zejména vysokou odolnost proti tečení v pevném stavu (creep). Potřebný souhrn vlastností vykazují lepidla na bázi:

- epoxidu, vytvrzující při teplotách nad 100°C
- kyanoakrylátu, vytvrzující za pokojové teploty, působením vzdušné vlhkosti
- polyamidu, vytvrzují za vyšších teplot, s kterými lze měřit od kryogenních teplot do 400°C, jsou však dražší a obtížněji dostupná

Přehled nejvíce užívaných lepidel a jejich základních charakteristik je v kapitole 5.3., odstavci a).

1.2. Základním měřítkem kvality tenzometrického lepidla je prokluz, působený tečením lepidla za studena (creep). Vyjadřuje se procentickou změnou signálu tenzometru při konstantní poměrné deformaci, obvykle 1×10^{-3} a stálé teplotě, nejčastěji po 30 minutách, nebo grafem časové závislosti této změny.

$$d_t = \frac{R_{e.1} - R_{e.2}}{R_{e.1}} \times 100$$

- kde d_t prokluz deformovaného tenzometru za čas t [%]
 $R_{e.1}$ odpor tenzometru v okamžiku zdeformování [Ω]
 $R_{e.2}$ odpor tenzometru po uplynutí času t od zdeformování [Ω]

1.3. Volba lepidla se řídí požadovanou přesností a podmínkami měření. Snímače a statická tenzometrická měření vyžadují prokluz při pokojové teplotě řádu setin %. Dynamická měření jsou na hodnoty prokluzu náročná méně. Z velkého počtu průmyslově využívaných epoxidů a kyanoakrylátů má jen málo typů přijatelný prokluz. Na příklad široce používaná pryskyřice EPOXI 1200 má za podmínek, uvedených v předchozím odstavci prokluz kolem 7%.

1.4. Tenzometrické lepidlo lze získat buď od zahraničních dodavatelů tenzometrů, nebo přímo od výrobců lepidel. U lepidla dodaného výrobcem je vždy třeba ověřit zda má vyhovující prokluz, a to u každé dodávky.

1.5. Vysoká deformační citlivost křemíkových tenzometrů umožňuje určit u tenzometrických lepidel účinnost přenosu deformace z měřeného objektu na tenzometr. Ta je přímo úměrná hodnotám konstant deformační rovnice tenzometru C_1 a C_2 . U přesných měření se proto zavádějí korekční faktory konstant C_1 a C_2 pro zvolené lepidlo.

$$k_{c1} = \frac{C_{1M}}{C_{1Z}} \qquad k_{c2} = \frac{C_{2M}}{C_{2Z}}$$

- kde k_{c1}, k_{c2} korekční faktor, kterým při přesných měřeních násobíme hodnoty konstant deformační rovnice C_1, C_2 uvedené v atestu, zjištěné u tenzometru nalepeného kyanoakrylátovým lepidlem
 C_{1M}, C_{2M}hodnoty konstant C_1, C_2 zjištěné u tenzometru nalepeného zvoleným epoxidem
 C_{1Z}, C_{2Z}hodnoty konstant C_1, C_2 , zjištěné při "pevnostní" zkoušce tenzometru nalepeného kyanoakrylátem

Doplňující údaje:

- a) Každý křemíkový tenzometr je podroben zkoušce tahovou a tlakovou deformaci $\pm 2.5 \times 10^{-3}$, která vyřadí křemíkové aktivní části s poruchami monokrystalické struktury, jinak nezjistitelnými.
- b) Při deformační zkoušce jsou tenzometry nalepeny na zkušební nosník kyanoakrylátovým lepidlem. Během zatěžování a odlehčování se na hladinách po 5×10^{-4} měří odpor a z této závislosti odporu na deformaci se vyčíslí konstanty deformační rovnice C_1 a C_2 .
- c) Kyanoakrylátová lepidla jsou pro tuto zkoušku vhodná proto, že se z tenzometrů snadno odstraní N,N-dimethylformamidem, případně acetonem, na rozdíl od lepidel epoxidových.
- d) Pro měření s tenzometry nalepenými epoxidovými lepidly jsou průměrné hodnoty korekčních faktorů $k_{c1}=1.05$, $k_{c2}=1.50$

2. Úprava povrchu měřeného objektu před lepením

- 2.1. Povrch zbavíme hrubých nečistot a povlaků nátěrových hmot.
- 2.2. Kovový povrch odmastíme benzinem, toluenem, acetonem nebo octanem ethylnatým pomocí tamponů z vaty nebo buničiny. Okolo místa přilepení tenzometru vždy očistíme plochu větší, pak ji čistými tampony stíráme od středu k okraji a postupně ji zmenšujeme.

Doplňující údaje:

- a) K odmašťování nejsou vhodné chlorované uhlovodíky, na příklad trichlorethylen (CHCl.CCl_2), tetrachlormethan (CCl_4), která kromě nepříznivých účinků na životní prostředí, uvolňují při styku s kovy a za působení světla stopová množství kyselých reagujících látek s korozivními účinky, která jsou obtížně odstranitelná.
 - b) Nejsou-li k dispozici dostatečně čistá rozpouštědla dodávaná speciálně pro tento účel, je třeba zjistit, zda se odpařují beze zbytku. Rozpouštědlo nanese na dobře očištěnou plochu, na které bylo před tím možné vytvořit souvislý vodní film. Po jeho odpaření zkusíme na ploše opět vytvořit vodní film. Sbaluje-li se při tom voda do kapek, je třeba rozpouštědlo předestilovat.
 - c) Tampony nikdy nenamáčíme do rozpouštědla v zásobní nádobě, ale rozpouštědlo vždy odlijeme do misky a po ukončeném čištění ho do zásobní nádoby nevracíme.
 - d) Každý tampon v misce namočíme jen jednou.
- 2.3. Bezprostředně před nalepením tenzometru vybrousíme plochu smirkovým plátnem zrnitosti 180 až 240. Prach vzniklý broušením dokonale odstraníme některým rozpouštědlem. Čistou částí tamponu otřeme plochu jen jednou a otírání opakujeme, dokud jsou na tamponu stopy nečistot.

Doplňující údaje:

- a) Plochu lze očistit a zdrsnit i otryskáním.
 - b) Vlákna ulpělá na očištěné ploše setřeme suchou vatou, nikdy je neodstraňujeme prsty, ani neodfukujeme ústy.
- 2.4. Čistotu povrchu před lepením ověříme smočením destilovanou vodou. Na dobře očištěném povrchu se udrží vodní film, který osušíme vatou nebo buničinou.

Doplňující údaje:

- a) Dodavatelé tenzometrických lepidel dodávají i přípravky pro čištění povrchu

b) Povrchy některých kovových materiálů, na příklad titanu a jeho slitin se někdy velmi obtížně upravují tak, aby se na nich udržel souvislý vodní film. Lepené spoje na titanu mají obecně nízkou pevnost a jediným spolehlivým způsobem jejího zvýšení je leptání ploch před lepením, na příklad roztokem:

- 15 objemových % koncentrované kyseliny dusičné
- 3 objemová % koncentrované kyseliny fluorovodíkové
- 82 objemových % destilované vody

Roztok na určenou plochu nanášíme polyethylenovou trubičkou, vytaženou do kapiláry v množství, které se nerozlévá za vymezenou plochu. Asi po 10 sekundách působení odsajeme tamponem a postup opakujeme. Po dostatečném naleptání, které se projeví změnou kovového vzhledu plochy na matný, ji opláchneme destilovanou vodou, zneutralizujeme asi 3% vodným roztokem čpavku (amoniaku-NH₄OH) z kapátka a omyjeme destilovanou vodou.

c) Povrch konstrukčních ocelí před lepením tenzometrů lze naleptat 3% roztokem kyseliny dusičné (HNO₃) v lihu (ethyalkoholu-C₂H₅OH) pomocí kapátka, pak omýt vodou, neutralizovat asi 3% vodným roztokem amoniaku (NH₄OH) z druhého kapátka a omýt lihem.

d) Na upravené kovové plochy naneseeme lepidlo co nejdříve.

e) Povrchy nekovových materiálů upravujeme způsoby, obvyklými při lepení těchto materiálu, uvedenými v literatuře

3. Práce s křemíkovými odporovými tenzometry

Práci s křemíkovými tenzometry výrazně usnadní binokulární mikroskop s 5 až 10 násobným zvětšením.

3.1. Křemíková aktivní část tenzometru je dostatečně tuhá a nevyžaduje nosnou podložku. K manipulaci s nimi je vhodná ocelová pinzeta s hladkými hroty. Pinzetou můžeme tenzometr uchopit jen za kovové vývody. **Pinzetou můžeme tenzometr uchopit jen za kovové vývody.**

Pinzetou, ani jinými tvrdými předměty se nikdy nedotýkáme křemíkové aktivní části, protože i málo intenzivní tlak tvrdého předmětu způsobí narušení její povrchové struktury, vizuálně nezjistitelné, provázené výrazným poklesem její mezní tahové deformace na hodnoty kolem jedné promile.

3.2. Povrch křemíkové aktivní části nečistíme a nijak neupravujeme, protože je z výroby upraven tak, aby tenzometrická lepidla k němu měla vysokou přilnavost.

4. Lepení křemíkových tenzometrů na měřené objekty

4.1. Tenzometr musí být od měřeného objektu elektricky izolován. Při lepení tenzometrů bez nosné podložky na objekty z elektricky vodivých materiálů je v místě přilepení tenzometru nutné nejdříve vytvořit elektricky izolující podložní vrstvu. Na materiály elektricky nevodivé lepíme tenzometry přímo.

4.2. Při vytvrzování lepidla je třeba tenzometr k měřenému objektu přitlačovat. Menší plocha aktivní části křemíkového tenzometru vyžaduje nižší přitlačné zatížení než u tenzometru foliového. Přípravky, přitlačující tenzometry závažími, umožňují přesněji nastavit přitlačnou sílu, než přípravky s přitlačnými pružinami. Velikost závaží volíme od 0.25 kg/cm² do 0.35 kg/cm². Nadměrně vysoké přitlačné zatížení zdeformuje příložku ze silikonového kaučuku, ležící na tenzometru tak výrazně, že může "odstříhnout" zlatý vývod průměru 0.07 mm v místě spoje s křemíkem.

4.3. Epoxidová lepidla.

Pro nízký prokluz řádu setiny až nízké desetiny % se užívají ve snímačích mechanických veličin. Umožňují tenzometrická měření v rozmezí od -269°C do 300°C, krátkodobě až do 400°C teplot. Většinou vytvrzují za vyšší teploty. Jestliže při teplotách skladování nereaguje pryskyřičná složka se složkou vytvrzující, dodávají se obě složky smíšené.

Podložní vrstvu z nich vytvoříme na povrchu objektu, upraveném podle odstavce 2. a vytvrdíme podle pokynů dodavatele lepidla. Optimální tloušťka vrstvy je 0.02 mm - 0.03 mm. Vytvrzenou podložní vrstvu nenaruší nevytvrzené lepidlo. Při lepení postupujeme takto:

- na spodní plochu křemíkové aktivní části nanese vrstvu lepidla v které nesmí zůstat vzduchové bubliny a necháme z ní odpařit rozpouštědlo

Spodní plocha tenzometru je ta, na které nejsou upevněny vývody.

- zkontrolujeme, zda je vrstva tak silná, aby zatížení tenzometru vytlačilo lepidlo vedle křemíkové aktivní části, více zředěná lepidla vyžadují po odpaření rozpouštědla nanesení více vrstev
- tenzometr uchopíme pinzetou za jeden z vývodů, obrátíme a spodní plochu s naneseným lepidlem položíme na podložní vrstvu
- tenzometr pomocí pinzety, prostřednictvím vývodů přesně usadíme
- vývody zafixujeme přelepením proužkem pásky, snášející vytvrzení
- na tenzometr položíme separační příložku ze silikonového kaučuku, tloušťky kolem 0.7 mm a na ni příložku z kovu, nebo tepelně odolné tvarovací hmoty, tvarově shodnou s povrchem objektu
- zatěžovací přípravek zatížíme závažím hmotnosti 0.25 kg-0.5 kg na každý cm² plochy příložky
- zatěžovací přípravek s měřeným objektem přeneseme do prostoru s předepsanou teplotou a vytvrdíme po předepsanou dobu.

4.4. Kyanoakrylátová lepidla.

Vytvrzují při pokojové teplotě, působením vzdušné vlhkosti v důsledku své vysoké reaktivity s hydroxylovými ionty. Optimální vytvrzovací podmínky jsou 60% až 80% relativní vlhkosti a teplota od +15°C do +30°C. Alkalita povrchu objektů vytvrzování zrychluje, kyselost povrchu vytvrzení zpomaluje až znemožňuje. Používají se pro běžná měření. Nejsou vhodné pro snímače, protože mají prokluz řádu desetiny %. Vytvrzené kyanoakrylátové vrstvy se v kapalných kyanoakrylátových lepidlech rozpouštějí. Proto na měřeném objektu vytváříme podložní vrstvu z tenké skelné tkaniny tloušťky 0.02 mm, nebo z cigaretového papíru, které prosytíme kyanoakrylátovým lepidlem. Dále postupujeme takto:

- lepidlo nanese buď v dostatečné vrstvě na spodní plochu tenzometru, jak je popsáno u lepidel epoxidových a tenzometr ihned nalepíme, protože kyanoakrylátová lepidla neobsahují žádná rozpouštědla, nebo lepidlo nanese na podložní vrstvu vytvořenou na měřeném objektu

- po nanesení lepidla na spodní plochu uchopíme tenzometr pinzetou za jeden z vývodů, obrátíme a spodní plochu s naneseným lepidlem položíme na podložní vrstvu
 - tenzometr, pomocí pinzety, prostřednictvím vývodů přesně usadíme
 - vývody fixujeme přelepením úzkým proužkem samolepící pásky
 - na tenzometr položíme separační příložku ze silikonového kaučuku, tloušťky kolem 0.7 mm a na ni příložku, z kovu, nebo tvarovací hmoty, tvarově shodnou s povrchem objektu
 - zatěžovací přípravek zatížíme závažím hmotnosti 0.25 kg-0.5 kg na každý cm² plochy příložky
 - zatěžovací přípravek s měřeným objektem ponecháme v prostoru s 60%-80% relativní vlhkostí při teplotě +15°C-+30°C umožňujícími vytvrzení lepidla
- Konečnou tvrdost dosáhne lepidlová vrstva při pokojové teplotě po 20 hodinách, nebo po 2 hodinách při ohřevu na 70°C
- Měřit lze až po vytvrzení lepidlové vrstvy.

- 4.5. V případech, kdy je pro manipulaci s tenzometry výhodná nosná podložka, lze tenzometry nalepit na podložky z tenké skelné tkaniny tloušťky 0.02 mm, nebo z cigaretového papíru, výše uvedeným postupem a po vytvrzení lepidla ji nalepit na měřený objekt.

5. Lepení tenzometrů na zakázku a tenzometrická lepidla

- 5.1. Sdružení výrobců Výroba tenzometrů a snímačů Zlín lepí tenzometry na objekty dodané zákazníky. Používá k tenzometrická lepidla firem Hottinger Baldwin Messtechnik, Vishay nebo Kyowa umožňující měření od - 270°C do +300°C
- 5.2. Pokud partneři VTSZ pokládají za účelné lepit křemíkové tenzometry vlastními silami, mohou volit dvě možnostmi získání lepidel:
- a) Od zahraničních dodavatelů tenzometrů - základní údaje obsahují následující tabulky:
Hottinger Baldwin Messtechnik - Ing.Ivan WAGGESTIAN, Podskalská 7, 120 00 Praha 2

označení lepidla	typ lepidla	rozmezí pracovních teplot			maximální skladovací doba
		dolní	horní		
			staticky	dynamicky	
°C	°C	°C	°C		
Z 70	kyanoakrylát	-70	+100	+120	6 měsíců
EP 250	epoxid	-269	+250	+315	6 měsíců
EP 310	epoxid	-240	+260	+310	1 rok

Vishay Measurements Group, Ing.Pavel JANAČÍK, Letovická 12, 621 00 BRNO

označení lepidla	typ lepidla	rozmezí pracovních teplot		maximální skladovací doba
		krátkodobě	dlouhodobě	
		°C	°C	
M-BOND 200	kyanoakrylát	- 185 – + 95	- 32 – + 65	6 měsíců
M-BOND 43-B	epoxid	- 269 – + 175	- 269 – + 150	9 měsíců
M-BOND 610	epoxid	- 269 – + 370	- 269 – + 260	9 měsíců
M-BOND 450	epoxid	- 269 – + 400	- 269 – + 260	6 měsíců

- b) Od výrobců lepidel. Nejdříve je třeba mezi nabízenými lepidly najít typ s vyhovujícími vlastnostmi prokluzu a dalších požadovaných vlastností. U každé dodávky pak je třeba kontrolovat alespoň prokluz, protože tato charakteristika lepidel má překvapivě širokou toleranci.

6. Zapojení vývodů tenzometrů do měřících řetězců

- 6.1. Vývody křemíkových tenzometrů s kladnou deformační citlivostí jsou ze slitiny AuGa₃ (zlato s 3% galia), vývody tenzometrů se zápornou deformační citlivostí ze slitiny AuSb₁ (zlato s 1% antimonu).
- 6.2. Vývody se do měřících řetězců nejčastěji zapojují dvěma způsoby:
- připájením vývodů měkkou pájkou na svorkovnici nebo přímo k měděnému vodiči, tento způsob připojení obvykle vyhoví pro měření do teplot 110°C až 220°C, podle typu použité pájky
 - tavným přivařením vývodu tenzometru k měděnému vodiči, které umožňuje měření až do meze teplotní odolnosti tenzometrů 370°C
- 6.3. Pájení zlatých vývodů vyžaduje dodržení obecných zásad pro pájení měkkými pájkami (s teplotou tavení nižší, než 450°C) a současné respektování specifických vlastností materiálové dvojice:
- zlatý vývod křemíkového tenzometru
 - pájka na bázi cínu či olova.

Nejzávažnější je rychlé rozpouštění zlata a jeho slitin ve většině měkkých pájek. To lze řešit nejméně dvěma způsoby:

- a) Pájet běžnými mikropájkami a použít speciální pájky, které rozpouštějí zlato pomaleji než běžné cínové pájky.
- b) Pájet běžnými mikropájkami, použít běžné měkké pájky a nepříznivé důsledky rychlého rozpouštění zlata v těchto pájkách eliminovat pracovním postupem.

Ekonomicky výhodnější je postup b), umožňující spolehlivě zapojovat zlaté vývody tenzometrů s běžnými pájkami Sn63Pb37, Sn96Ag4.

Při pájení postupujeme takto:

- a) Na očištěné místo povrchu vodiče, nebo svorkovnice nanese tenký povlak roztavené pájky.
- b) Do místa připojení zlatého vývodu nanese pájecím hrotem kapku roztavené pájky.
- c) Od roztavené kapky oddálíme pájecí hrot a současně do ní druhou rukou zvolna zasouváme vývod tenzometru, který držíme v pinzetě. Zlatý vývod zasouváme do kapky přiměřenou rychlostí, úměrnou teplotě kapky, proto pájecí hrot nepřehříváme.
- d) Po zchladnutí pájky zkontrolujeme kvalitu připájení vývodu. Správně připájený vývod vychází ze ztuhlé pájky s nezeslabeným průměrem. Pokud je v místě výstupu z pájky vývod zeslaben, odřízneme ho těsně u pájky skalpelem, kapku pájky znovu roztavíme a pájení opakujeme od bodu c).

Postup je využíván od roku 1970 a byly jím úspěšně připájeny stovky tisíc zlatých vývodů polovodičových tenzometrů.

- 6.4. Pájku volíme podle teploty pájených spojů v průběhu měření. Vhodné typy pájek jsou v následující tabulce.
- Důležitou charakteristikou pájek je teplotní rozmezí solidus/liquidus. V roztavených slitinách v tomto teplotním rozmezí existuje vždy společně ztuhlá slitina (solidus) s kapalnou slitinou (liquidus). S klesající teplotou přibývá tuhé slitiny, se stoupající teplotou přibývá slitiny kapalné.

Slitiny, tající a tuhnoucí při jediné teplotě se nazývají eutektické a rozmezí solidus/liquidus mají nulové.

Několik desítek stupňů pod teplotou solidu se elektrický odpor pájených spojů zvyšuje a stává se časově závislým. Při přesných měřeních je třeba experimentálně zjistit teplotní hranici po kterou je nepřesnost působená zvýšeným odporem pájeného spoje přijatelná.

Složení [%]	Teplotní rozmezí		Roztékavost pájky	Pevnost spoje	Vodivost spoje	Korozní odolnost
	solidus	liquidus				
63% Sn 37% Pb	183°C	183°C	vynikající	velmi dobrá	vysoká	dobrá
63.00% Sn 36.65% Pb 0.35% Sb	183°C	183°C	vynikající	velmi dobrá	vysoká	dobrá
96% Sn 4% Ag	221°C	221°C	velmi dobrá	velmi dobrá	vysoká	vynikající
95% Sn 5% Sb	232°C	238°C	vynikající	velmi dobrá	vysoká	dobrá
93.5% Pb 5.0% Sn 1.5% Ag	296°C	301°C	velmi dobrá	velmi dobrá	dostatečná	dostatečná

Sn – cín

Pb – olovo

Sb - antimon

Ag - stříbro

- 6.5. Tavidlo pro pájení vývodů volíme vždy neeleptavé, vylučující riziko koroze spojů. Plně vyhoví všechna tavidla dodávána pro pájení vývodů odporových tenzometrů. Nejvhodnějším tavidlem pro pájení zlatých vývodů pájkami uvedenými v tabulce je kalafuna (směs hydroaromatických "pryskyřičných" kyselin abietové a s ní izomerní pimarové – C₁₉H₂₉COOH), s účinnou reakční teplotou od 170°C do 270°C. Nejčastěji používáme 60% roztok kalafuny v ethylakoholu (C₂H₅OH). Účinnost tohoto tavidla lze výrazně zvýšit přísadou 4% až 6% hydrazinu (NH₂NH₂).
- 6.6. Pro extrémní podmínky měření lze vývody tenzometrů zapojit do měřících řetězců i tavným svařením zlatého vývodu s měděným vodičem. Zlato a měď tvoří v celém rozmezí koncentrací tuhý roztok s počátkem teploty tavení spoje nad 850°C a pro daný účel není kritický ani případný vznik intermetalických sloučenin (AuCu a AuCu₃). Jedním ze způsobů je svaření výbojem z baterie kondenzátorů, u nichž lze nastavit kapacitu, napětí a vybíjecí odpor. Tento způsob připojování vývodů polovodičových tenzometrů se osvědčil při analýze napjatosti radiálních kol kompresorů a disků turbin turbovrtulových motorů M-601 a M-602, rotujících do 40.000 ot/min do mezní teploty 370°C při které se vývody od křemíku odtaví.

O doplňující údaje lze požádat výrobce tenzometrů na adrese info@vtsz.cz.