

Revize a údržba aparátů je dnes bez využívání nedestruktivních metod zkoušení materiálu a aparátů již nemyslitelná. Bezdemontážní diagnostika umožňuje zkracování doby nutných odstávek a prodlužování doby mezi jednotlivými revizemi. Vede též k vývoji nových přístrojů dovolujících provádění kontrol během provozu.

Mezi nedestruktivní metody patří kontroly poškození základního materiálu a svarů, zjišťování úbytků tloušťky stěny korozním nebo erozním účinkem prostředí, kontroly stavu nátěrů, izolace, tloušťky nánosů, zjišťování přehřátých míst, kontrola funkce regulačních prvků, měření tvrdosti či kontrola těsnosti tlakových systémů. Je třeba si uvědomit, že žádná z nedestruktivních metod bezdemontážní diagnostiky není univerzální. K získání informace o skutečném stavu kontrolované součásti se používá proto velmi často dvou i více metod.

7.1 Zjišťování provozního poškození základního materiálu a svarů

Kontrolují se vznik a šíření trhlin, které jsou důsledkem mechanického či tepelného namáhání nebo vad materiálu, které vznikly již při výrobě. V prvním případě vznikají obvykle na povrchu, v případě vad se může jednat jak o povrchové, tak i vnitřní trhliny. Má-li být revizní kontrola účinná, je třeba vycházet ze znalosti stavu před uvedením do provozu; u důležitých svarů je nutná evidence vad, které při uvádění do provozu byly ponechány jako přípustné, vždy po určitých dobách provozu. Pro detekci trhlin, pro stanovení jejich rozměrů a indikaci šíření trhlin se používá následujících metod:

1. Radiografická metoda, která je založena na interakci zkoušeného materiálu se silným rentgenovým nebo gama zářením. Při průchodu materiálem dochází k jeho zeslabení v důsledku absorpce a rozptylu. Pro daný materiál je za daných podmínek intenzita prošlého záření tím menší, čím větší je tloušťka prozařované stěny; to znamená, že zjistitelnost vady bude tím lepší, čím větší úbytek tloušťky ve směru záření způsobí. Při prozařování jsou proto nejlépe zjistitelné vady prostorového typu, zatímco plošné jsou dobře zjistitelné pouze v těch případech, kdy jsou orientovány přibližně ve směru záření. Uvedenou metodou lze zjišťovat provozní trhliny jen tehdy, když lze s dostatečnou jistotou předpokládat jejich orientaci a kdy jejich převážná plocha leží v jedné rovině. I tehdy je pravděpodobnost jejich zjištění poměrně malá a závisí nejen na odchylce roviny, ve které leží od směru záření, ale i na jejich šířce a na zkušebních podmínkách. Úzké trhliny jsou na radiogramu obtížně zjistitelné v důsledku degradace kontrastu, ke které dochází vlivem celkové neostrosti radiogramu. Z toho vyplývá, že prozařování, které je vlastně základní metodou při výrobní kontrole před uvedením do provozu, je v oblasti provozu určeno, kromě dalších případů uvedených dále, především pro kontrolu oprav, hlavně svarů, ale není vhodné pro detekci vzniku a šíření trhlin.

Pro běžný obor rentgenových tlouštěk (do 80 mm) se jako zdroj záření používá aparatur, které se pro montážní účely vyrábějí v lehkém přenosném provedení s půlvlnovým zapojením. Pouze tam, kde z provozních důvodů nelze použít rentgenového přístroje, používá se zdroj radioaktivního gama-záření. Zvláště v oblasti menších tlouštěk se zde dosáhne proti rentgenovému záření horší kvality radiogramů. Dnes se používá téměř výhradně isotopu Ir 192, který se vyrábí v aktivitách přes $4 \cdot 10^3$ GBq a je umístěn v lehkých krytech stíněných uranem, s dálkovým ovládáním. Jen pro největší tloušťky, pro které nelze použít jiného zdroje, je vhodný Co 60. Naopak pro prozařování malých tlouštěk (např. při zkoušení svarů tenkostěnných trubek vý-

měníků) se používá nízkoenergetického gama-záření (Yb 169, Tm 170), které při malých rozměrech zářiče umožňuje prozařování z malých ohniskových vzdáleností při dobré rozlišitelnosti vad.

2. Ultrazvuková metoda je založena na interakci zkoušeného materiálu s ultrazvukovými vlnami o frekvenci 0,5 až 12 MHz zaváděnými do materiálu vhodnou ultrazvukovou sondou buď ve směru kolmém k povrchu nebo pod určitým úhlem. Při dopadu těchto vln na necelistvost materiálu dochází k jejich úplnému nebo částečnému odrazu na jejich povrchu a odražený signál je u většiny ultrazvukových defektoskopů indikován na obrazovce tzv. poruchovým echem. Z polohy echa na stopě obrazovky lze pak určit vzdálenost vady od místa přiložení sondy a tedy i hloubku pod povrchem. Touto metodou lze teoreticky zjistit vady, jejichž příčné rozměry (kolmé na osu svazku) jsou větší než je 1/2 vlnové délky ultrazvukových vln; ve směru šíření vln lze např. indikovat trhliny o šířce až 10^{-5} mm. Při vhodné volbě úhlu ultrazvukového svazku lze touto metodou spolehlivě zjistit především vady rovinového typu, u nichž se dosáhne nejlepšího odrazu ultrazvukových vln, zatímco prostorové vady, které dávají na povrchu odraz ve všech směrech, se zjišťují hůře.

Z fyzikálního principu ultrazvukové metody je tedy zřejmé, že tato metoda je mimořádně vhodná pro indikaci trhlín a je nejvýhodnější nedestruktivní metodou pro indikaci provozního poškození z necelistvostí, které se nacházejí uvnitř zkoušeného průřezu a nebo, je-li poškození indikováno na protilehlém nepřístupném povrchu. Proti radiografii má však nevýhodu v tom, že ultrazvuková indikace neposkytuje bezprostřední údaje o velikosti zjištěné vady, protože výška echa není závislá pouze na velikosti odrazné plochy, ale ovlivňuje ji např. geometrie, jakost povrchu a struktura zkoušeného výrobku, druh a orientace indikované vady. Mezi oběma metodami neexistuje přímá kvantitativní korelace. Tzn. že při kontrole ultrazvukem některého důležitého svaru během provozu je třeba doplnit výrobní nebo montážní kontrolu, která se provádí před uvedením do provozu prozařováním nebo ultrazvukovou kontrolou. Porovnáním evidovaných ultrazvukových indikací po určitých dobách provozu lze získat údaje o chování ponechaných vad ve svarech, příp. o vzniku nového poškození. Pro zjišťování vad v provozních podmínkách se používají lehké přenosné přístroje, které jsou napájeny ze sítě nebo z vestavěných NiCd-baterií.

3. Metoda magnetických rozptylových polí je založena na principu změny magnetického odporu ve zmagnetovaném předmětu v okolí necelistvostí. Je to jedna z nejstarších, ale dosud nejcitlivějších metod pro zjišťování povrchových necelistvostí ve feromagnetických materiálech. Povrchová trhlina orientovaná pokud možno kolmo na působení magnetického toku způsobí mnohonásobné, až 10^3 násobné, zvýšení magnetického odporu. Nad necelistvostí vzniká rozptylové magnetické pole, které závisí na velikosti, tvaru, poloze a orientaci vady a na velikosti magnetické indukce. K indikaci vady se při ručním způsobu nejčastěji používá magnetického prášku, který je zachycován rozptylovým magnetickým polem. Podstatně méně často se používá snímání rozptylového pole snímacím vinutím permaloyovou, feritovou nebo Hallovou sondou nebo pomocí magnetografického papíru.

Jako detekčního prostředku pro magnetickou metodu práškovou se používá prášek na bázi pentakarbonylu železa nebo oxidů železa ve formě prášku nebo pasty, z nichž se připravuje suspenze v řídkém oleji (petroleji nebo ve směsi oleje a petroleje) nebo ve vodě. Protože lidské oko je mnohem citlivější na světelný kontrast než na kontrast barvy, používá se v zahraničí ve stále větší míře magnetických prášků, jejichž povrch je pokryt fluorescenční vrstvou a to rovněž v olejové

nebo vodní suspenzi. Pozorování se děje pod ultrafialovým světlem. Indikace jsou pak velmi dobře viditelné i při částečném zaclonění proti přímému světlu, zejména při použití fokusovaných lamp a není proto třeba provádět pozorování v úplné tmě. Tato metoda je nejen mnohem citlivější, ale i pohodlnější, rychlejší a spolehlivější. Pro zkoušení tmavých neopracovaných povrchů (např. svary) je vhodné použít magnetických fluorescenčních prášků ve vodní suspenzi, s nimiž je ve srovnání s petrolejovou a olejovou suspenzí práce příjemnější, protože nenapadají pokožku a po zkoušce není třeba povrch odmašťovat. Dodávané koncentráty obsahují současně i aditiva obsahující smáčedla a prostředky proti pění a korozi, které eliminují velké povrchové napětí a korozní účinek vody.

Pro provozní a montážní účely se používá buď podélná magnetizace, většinou pomocí elektromagnetu nebo příčná magnetizace (cirkulární) přímým průchodem elektrického proudu mezi dvěma přiloženými elektrodami. Tato příčná magnetizace pro svou jednoduchost a přístrojovou nenáročnost dosáhla největšího rozšíření. Vývoj ručních přístrojů se silným elektromagnetem vede v posledních letech ke značnému rozšíření magnetizace podélné, při níž nedochází k nežádoucím opalům od elektrod. Z důvodů bezpečnosti bývá napájecí proud o napětí 42 V.

Při podélné i příčné magnetizaci se přikládají elektrody, příp. póly magnetu vždy nejméně ve dvou na sebe kolmých směrech, aby se zachytily povrchové vady různě orientované. Při zkoušení koutových svarů se používá magnetizace pomocným vodičem, který se magnetuje cirkulárním magnetickým polem vznikajícím při průchodu elektrického proudu vodičem umístěným nad zkoušeným povrchem. Při zkouškách při teplotách pod 0°C se přidává do vodní nosné kapaliny 10 až 40% metanolu nebo etanolu, čímž lze zkoušky provádět při teplotách od -4 do -30°C . Naopak při vysokých teplotách lze s výhodou užít suchých magnetických prášků, které se naprašují na zkoušený povrch. Magnetizace se provádí stejným způsobem jako u mokrého postupu, jen citlivost zkoušky je nižší. Magnetická metoda prášková polévací je velmi rychlá, levná a spolehlivá. Při vhodných podmínkách je schopna rozlišit trhliny o šířce 10^{-3} až 10^{-4} mm. V současné době objevili vědci z vídeňské techniky asi deset druhů mikroorganismů schopných vypátrat magnetické pole a procesy stárnutí ušlechtilých ocelí. Bakterie nanášejí na zkoumaný kov a pod mikroskopem pak sledují jejich rozmístění, ze kterého se dá vyčíst, jak probíhá magnetické pole a zda je v materiálu vada.

4. Kapilární metoda vychází z principu elevace detekční kapaliny, která se nanáší na očištěný a odmaštěný povrch. Po odstranění přebytečné kapaliny se povrchové trhliny zviditelní vztlínáním zateklé kapaliny na vrstvě nanesené vývojky. Tato metoda je na rozdíl od magnetické metody používána pouze v případech, kdy povrchová vada je otevřená. Pro zjišťování je rovněž méně citlivá, a proto se používá pouze pro neferomagnetické materiály nebo jako metoda kontrolní. Podobně jako u polévací metody lze použít barevné indikační kapaliny nebo výhodnější jsou kapaliny fluorescenční. Pro snadný oplach přebytečné kapaliny se používá emulgátor, který se přidává buď přímo do detekční kapaliny nebo častěji samostatně. U nás jsou detekční kapaliny a vývojky pod názvem "Indikal", ze zahraničních výrobků jsou známé MET-L-CHECK (USA, NSR), SPOTCHECK (USA, Anglie) nebo DIFUTHERM (NSR, Rakousko). Všechny tyto výrobky jsou dodávány ve sprejovém provedení v sadách, kde kromě detekční kapaliny a vývojky jsou odmašťovač či emulgátor, takže jejich nanášení je snadné. Důležitá je doba působení vývojky (asi 10 min.). Závisí na šířce, hloubce a orientaci vady, na teplotě, tloušťce vrstvy vývojky.

Některé prvky přítomné v detekčních prostředích mohou způsobit vznik koroze

pod napětím, zejména u austenických a nerezavějících ocelí, které jsou na tuto korozi náchylné. Při provozních měřeních za zvýšených teplot nelze používat normální penetrační prostředky, které se rychle vypařují; používají se penetranty v tuhé nebo pastovité formě. Vyznění indikace vad se děje tekutou vývojkou, která se nanáší stříkáním, u níž nosnou kapalinu tvoří nehořlavá rozpustidla. Horní hranici teploty je 260°C , protože nad touto mezí je nebezpečí rozkladu nosných medií a vzniku jedovatých plynů.

5. Metoda vířivých proudů slouží pro ruční detekci trhlin s příloženou cívkou napájenou střídavým proudem, která se přikládá k povrchu zkoušeného tělesa. Střídavé magnetické pole cívky indukuje ve zkoušeném předmětu vířivé proudy, které svými magnetickými účinky působí zpětně na původní magnetické pole, kterým se mění impedance cívky. Velikost sekundárního magnetického pole závisí též na elektrické vodivosti zkoušeného materiálu. Přítomností trhliny se mění elektrická vodivost a tedy i sekundární magnetické pole. Vyráběné indikátory trhlin mají např. tužkovou sondu, kterou se přejíždí po povrchu zkoušeného materiálu a trhliny jsou indikovány měřidlem a světelným nebo akustickým signálem.

6. Tepelné metody využívají změny tepelné vodivosti, absorpce nebo rozdílu zpětného vyzářování v okolí povrchové nebo podpovrchové nečistosti. Ohřívá-li se např. místně povrch zkoušeného předmětu a jeho teplota se snímá podél povrchu, projeví se v okolí trhliny díky zhoršenému přestupu tepla lokální zvýšení teploty.

Při použití této metody lze využít buď vlastní teploty zkoušeného předmětu, nebo libovolného zdroje ohřevu. Jako detektoru lze použít při kontaktním způsobu termografický fosfor, tekuté krystaly, zvláštní laky a jiné detektory; při bezkontaktním způsobu radiometrie s různými detektory např. germaniový detektor dopovaný rtutí v tekutém heliu, antimonid indium v tekutém dusíku, termistorový bolometr, radiální pyrometr aj. Výhodou tepelných metod je především možnost bezdotykové kontroly na velké vzdálenosti, přípustnost drsného povrchu, možnost zkoušení kovových i nekovových materiálů, materiálů s nízkou elektrickou vodivostí nebo materiálů s vysokým útlumem ultrazvukových vln, pro něž nelze použít ultrazvuku.

7. Měření kontaktní elektrické vodivosti. Metody, kterými se zjišťují povrchové vady, neumožňují obvykle s výjimkou ultrazvuku určit jejich hloubku. Hloubku povrchové trhliny, indikované většinou magnetickou nebo kapilární metodou lze poměrně jednoduše změřit pomocí změny kontaktní elektrické vodivosti povrchové vrstvy elektricky vodivého materiálu. Při této metodě se používá soustavy zpravidla čtyř elektrod, které se přikládají ke zkoušenému předmětu. Krajsními elektrodami se přivádí elektrický proud, prostřední dvě slouží k měření napětí mezi dvěma body na jeho povrchu. Je-li mezi středními elektrodami trhlina, projeví se zmenšení elektrické vodivosti trhlinou úbytkem napětí. Je-li citlivost přístroje ocejchována na etalonu s umělými zářezy, je možno odečítat na měřidle přímo hloubku měřené trhliny. Měřicí rozsah je od 0,5 do 100 mm, přesnost měření ± 10 až 15% nastaveného rozsahu.

8. Akustická emise je jev, při němž se energie uvolněná v zatěžovaném materiálu v důsledku plastických deformací nebo při vzniku a šíření trhliny mění v tlakové akustické vlny, které se šíří materiálem všemi směry.

Vhodnými čidly např. sondami s piezoelektrickými měniči, je možné vzniklou akustickou emisí detekovat s povrchu vyšetřovaného materiálu. Akustická emise tak umožňuje získat informace o vadách, které se právě v materiálu vytvářejí, nebo které se vlivem namáhání zvětšují.

Použijí-li se ke snímání akustické emise minimálně tři snímače, je možné tzv. triangulací určit polohu zdroje signálů tj. polohu vady. Tato metoda tedy umožnu-

je získat údaje o průběhu poškození v materiálu v závislosti na čase. Např. při periodických zkouškách tlakových nádob se využívá nevratnosti děje, tzv. Kaisero-va efektu. V případě, že od předchozí kontroly nedošlo v nádobě vlivem provozních podmínek ke vzniku trhlin nebo k jejich růstu, příp. vad dříve zjištěných, akustická emise při zvyšování přetlaku až do předchozí dosažené hranice nevzniká. Ale na druhé straně při růstu trhliny v provozu se tato skutečnost projeví při opakované zkoušce vznikem akustických emisí již pod horní hranicí přetlaku.

9. Vizuální kontrola patří mezi poměrně staré prostředky nedestruktivní kontroly.

Provádí se optickým zařízením trubkovými boroskopy na vnitřním povrchu trubek, vývrtů a jiných nepřístupných povrchů. Nyní se používají ohebné boroskopy s vláknovou optikou (fy. OLYMPUS - NSR, kde k osvětlení vyšetřovaného místa a k jeho zobrazení je použito jemných skleněných vláken, umožňujících zakřivení optické dráhy osvětlovacího a zobrazovacího systému). Zařízení je dodáváno v různém provedení zahrnujícím délky v rozmezí 1 až 2 m s odstupňováním po 250 mm s vnějšími průměry 6,8 a 11 mm. Boroskop se dodává se dvěma koncovkami, které jsou opatřeny optikou buď pro čelní nebo boční pozorování. Jejich zorné pole je asi 51° a obě koncovky lze od přímého směru dálkově vychýlit o úhel až 120° na obě strany. K zařízení patří speciální světelný zdroj s halogenovou lampou 150 W, který spolu s optickým systémem zajišťují vysokou rozlišovací schopnost zařízení. K pozorování se používá okulár se zvětšením 12 nebo 22 pro průměr 6 mm a ke zhotovení trvalého záznamu je dodávána speciální fotografická kamera, která dává ostré snímky vyšetřovaných míst.

7.2 Měření korozních a erozních úbytků tloušťky stěny a měření tloušťky nánosů

Pro uvedené účely je nejvhodnější užití impulzní odrazové ultrazvukové metody. Nejznámější tloušťkoměr je tzv. D-metr (fy. KRAUTKRÄMER - NSR). Je snadno přenosný a vhodný i pro měření v obtížně dostupných místech. Naměřená tloušťka stěny je udávána přímo v mm a u oceli a hliníku má rozsah od 1,2 do 300 mm. Pracuje s přesností $\pm 0,1$ mm při teplotách od -10° do $+500^\circ\text{C}$ při použití vhodné sondy, např. KMR 4 pro -10° do $+200^\circ\text{C}$ s měřicím rozsahem od 1,2 do 60 mm apod. Větší přesnost $\pm 0,01$ mm nebo až $\pm 0,003$ mm provádí fy. BRANSON u přístrojů CALIPER 101A resp. CALIPER 104M. Nové varianty přístrojů označovaných DA 201, 203 a 205 jsou též vhodné pro měření rovinných nebo zakřivených povrchů. Při použití speciálního kabelu lze se sondami DA 201 a 203 měřit tloušťku součástí z hliníku.

K měření tloušťky stěn lze užít rovněž měření intenzity prošlého rentgenového nebo gamazáření, častěji měření zpětného rozptylu záření gama. Přesnost tloušťkoměrů vyráběných v TESLE Přemýšlení je pro rozsah 2,5 až 13 mm $\pm 0,1$ mm a v rozsazích 1 až 2,5 a 10 až 20 mm $\pm 5\%$. Vyhodnocovací část tvoří scintilační detektor s fotonásobičem, zdroj je obvykle Co 60. Uvedené zařízení lze použít i ke kontrole zanesení potrubí usazeninou a ke kontrole výšky hladiny.

Do tloušťek cca 3 mm lze použít kontaktní metody elektrické vodivosti nebo metody vířivých proudů s příložnou cívkou.

7.3 Měření tloušťky ochranných a izolačních vrstev a nátěrů

Pro kontrolu tloušťek elektricky nevodivých vrstev na vodivém podkladu lze použít metody vířivých proudů s příložnou cívkou. Pro rozsah tloušťek povlaků do 0,1 nebo 0,3 mm je vhodný ISOMETR fy. FÖRSTER. Pro měření tloušťky neferomagnet-

tických vrstev na feromagnetickém podkladu byl stejnou firmou vyvinut MONIMETR, který pracuje na principu feromagnetické sondy, kterou tvoří budící a snímací cívka s feromagnetickým jádrem. Napětí, které se indukuje ve snímací cívce, závisí na vzdálenosti jádra od feromagnetického podkladu a tím na tloušťce neferomagnetické vrstvy. Max. rozsah přístroje je do 3 mm.

Metody zpětného odrazu záření lze použít pro bezkontaktní měření povlaků pomocí ionizujícího záření. Pro malé tloušťky se používá betazáření, pro větší tloušťky rentgenové nebo gamazáření. Jako detektorů se používá buď ionizačních komor nebo scintilačních počítačů.

Jako alternativní metoda je vhodná i rentgenová fluorescence; lze docílit vyšší citlivosti než u běžných radiometrických metod. Využívá se charakteristického záření vybuzeného vhodným zdrojem primárního záření buď přímo v povlaku nebo v základním materiálu. V prvním případě roste intenzita charakteristického záření s tloušťkou povlaku až do určité mezní hodnoty, v druhém případě je charakteristické záření základního materiálu zeslabováno vrstvou povlaku a s jeho rostoucí tloušťkou klesá. Pro detekci zařízení se používá proporcionálních nebo scintilačních počítačů nebo polovodičových detektorů. Tato metoda je využívána např. i pro měření tloušťky zinku, cínu nebo hliníku na oceli.

7.4 Zjišťování porušení izolace a kontrola přehřátých míst

Pro zjišťování uvedených poruch jsou vhodné tepelné bezkontaktní metody. Nejužívanějším zařízením je snímací infrazkamera a monitor, na němž jsou zobrazitelná rozložení teplot sledovaného místa nebo isotermy v různé nastavitelném rozsahu teplot od -30° do $+700^{\circ}$ nebo s filtry až do $2\,000^{\circ}\text{C}$ od švédské firmy AGA. Rozlišovací schopnost zařízení je $0,2^{\circ}\text{C}$ a lze je použít i pro absolutní měření teploty. V plošném zobrazení se projeví rozdíly teplot buď různými odstíny šedi (studenější místa budou tmavší) a nebo použitím přídavného zařízení lze získat barevný obraz, kde se rozdíly teplot projeví různou barvou.

Při zjišťování přehřátí, ke kterému dochází např. u pecí poškozením vyzdívkou nebo izolace, lze též použít trvalého nátěru z tepelně citlivých laků, jejichž barva se mění při dosažení určité teploty. Tato změna barvy je nevratná a lze ji volit v širokém rozmezí teplot od 40° do $1\,350^{\circ}\text{C}$ podle chemického složení laků. Aby se zabránilo nežádoucím indikacím v důsledku provozního kolísání teploty, volí se obvykle teplota pro barevnou změnu asi o 100 až 120° nad provozní teplotu povrchu stěny. Komerčně vyráběné speciální laky označené MERCKENS-THERMOCOLOR W (NSR) umožňují kromě střežení teplot i dlouhodobou ochranu povrchu před korozním napadením. Při uvádění nových zařízení do provozu lze pomocí těchto laků zjišťovat správnou provozní funkci zařízení.

7.5 Měření opotřebení strojních součástí

Pro uvedené účely byla vypracována řada metodik využívajících radioaktivního záření. Součást, u níž se zjišťuje stupeň opotřebení, se buď opatří vložkou s aktivním materiálem nebo se celá, nebo její určitá část povrchu aktivuje nabitými částicemi na cyklotronu nebo v atomovém reaktoru. Podle charakteru součástí se pak zjišťuje opotřebení buď poklesem aktivity součástí nebo v uzavřených např. mazaných systémech přírůstkem aktivity oleje nebo dopravovaného média po určitých dobách provozu. Tato metoda je výhodně užívána pro stanovení opotřebení ozubených kol, převodovek, součástí pístových motorů a pro stanovení korozních úbytků, k

rozlišení druhu koroze a stupně korozního napadení strukturních složek, k posouzení protikorozních inhibitorů apod.

7.6 Nedestruktivní měření tvrdosti

Pro kontrolu strukturního stavu materiálu během dlouhodobého provozu a teplem ovlivněných míst lze s výhodou použít ručního přenosného tvrdoměru, který pracuje na mechanicko-elektrickém principu. U nás nejužívanějším přístrojem tohoto typu je SONODUR fy. Krautkrämer - NSR. Ruční sonda ve tvaru tenké tyčky z magnetostriktčního materiálu je ukončena Vickersovým diamantovým jehlanem. Tyčka kmitá v rezonančním kmitočtu 38 kHz; při vniku diamantové špičky do materiálu konstantní silou 5,85 N se mění rezonanční kmitočet tyčky v závislosti na velikosti stykové plochy vytvořené špičkou. Tato změna kmitočtu tyčky je pak elektricky převedena v úměrnou hodnotu stejnosměrného proudu a zaznamenána jako výchylka ručky proudového měřidla, která je u přístroje kalibrována v hodnotách tvrdosti dle Rockwellovy stupnice. Měřidlo má dvě stupnice, kde jedna je upravena pro tvrdosti v rozsahu 20 až 70 HRC a druhá má 0 až 100 dílků pro relativní měření. Přesnost měření je ± 1 HRC. Hloubka vrypu, který sonda zanechá, je pouze $(6 \text{ až } 10) \cdot 10^{-3}$ mm. V některých případech lze zjišťovat strukturní změny - stárnutí - materiálu po dlouhodobé expozici za vyšších teplot i měřením jednotlivých složek útlumu ultrazvukových vln.

7.7 Kontrola smontovaných konstrukčních dílů

Pro kontrolu některých konstrukčních prvků bez demontáže slouží především metody prozařovací. Podle tlouštěk prozařovaných předmětů se používá buď rentgenových aparatur nebo radioaktivních zdrojů Ir 192 nebo Co 60.

Pro ověření správné funkce některých ovládacích či regulačních prvků lze nahradit normální registraci na radiografický film buď pohybovou radiografií (kdy se pořizuje několik expozic, přičemž se rychle vyměňují kazety s filmem) nebo použitím zesilovače obrazu příp. v kombinaci s televizním přenosem na monitor. Pro rychle vzájemně se pohybující objekty lze použít speciálních impulzních rentgenových aparatur umožňujících velmi krátkou expozici.

Rozdílu zesilovacího účinku různých materiálů při prozařování rentgenovým nebo gamazářením a neutrony je možno používat i pro kontrolu smontovaných dílů. Porovnáním neutronogramu s radiogramem lze získat informace, které nelze na radiogramu dobře zjistit, jako např. stav pryžových těsnění, zamontovaných částí z plastů, koroze hliníkových slitin v nepřístupných místech atd.

7.8 Zjišťování netěsností a jejich množství

Samostatnou a stále ne zcela doceněovanou skupinou nedestruktivních zkoušek je zjišťování netěsností, ke kterým dochází vlivem vad a necelistvostí materiálu celou stěnou zařízení nebo častěji při poruše mechanické těsnosti v místech těsnících spojů.

Postupy používané ke zjišťování netěsností jsou založeny buď na principu přetlakové nebo vakuové zkoušky. Volba metody je závislá na provozních podmínkách kontrolované součásti, na velikosti těsněného prostoru, na relativním pohybu těsnících ploch, na tlaku a teplotě těsněného média aj. Pro přetlakové zkoušky lze použít jak kapalně tak i plynné zkušební látky. Zkušební postupy zahrnují např. natlakování vodou s měřením úbytku tlaku, natlakování vzduchem a měření bublinko-

vou metodou nebo aktivním plynem, který reaguje chemicky s reagenční látkou nanesenou např. na vnějším povrchu nádoby. Při zjišťování množství netěsností je třeba použít vhodných detektorů, z nichž nejcitlivější je hmotový spektrometr (halogenové zkoušky). Přírubové spoje je možno zapouzdřit a zjišťovat množství netěsností kapilárou. Pro nalezení místa netěsností se používá ultrazvukového indikátoru, který snímá směrovým mikrofonom zvuk, který vzniká při unikání plynu netěsností. Mikrofon je připojen k elektronickému zařízení, které mění akustické signály v oboru ultrazvukových frekvencí buď na zvuky slyšitelné nebo na světelné signály.

Vakuové zkoušky jsou vhodné pro zařízení, které lze vhodným vakuovým čerpadlem za ekonomickou dobu vyčerpat. Přítomnost netěsností způsobí pronikání zkoušebního média jako vzduchu, freonu, helia aj. z okolní atmosféry do vyčerpaného prostoru na cca 1 kPa, kde se jeho přítomnost indikuje buď poklesem vakua nebo vhodným detektorem.

Vakuové zkoušky jsou při použití stejného média až o tři řády citlivější než zkoušky přetlakové.

U velkoprostorových nádrží a nádob se používá podobný postup jako při kapilární zkoušce. Jsou-li přístupné oba povrchy, nanese se na jeden upravený povrch detekční tekutina a na protilehlý vývojka. U jednoduchých rovinných a válcových ploch přístupných pouze z jedné strany se užívají detekční kapaliny s vysokou pěnicí schopností a přísavné vakuové komůrky s průhledným okénkem. Když se v této komůrce sníží vývěvou tlak na cca 1 až 0,5 kPa, pak v místě netěsnosti se ve vrstvě indikační kapaliny vytvářejí bublinky.

Při vzniku větších netěsností u přírubových spojů se u nás používá způsob výplně hmoty "Furmanite" (Anglie), která na určitou dobu dojetí tlakového zařízení do opravy umožní jeho provozování při minimálních netěsnostech (zastoupení má n.p. DUSLO Šala).

Literatura

- [7-1] Ailor, W.H.: Handbook on Corrosion Testing and Evaluation, The Electrochemical Society 1971, New York
- [7-2] Čížek, L., Duben, L., Bízek, V., Pitler, S.: Nedestruktivní metody pro bezdemontážní diagnostiku, CHZJD Bratislava, 1986
- [7-3] Himmelblau, D.M.: Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Processes, Elsevier, Amsterdam, 1978
- [7-4] Johnson, P.: Radioisotope Tracer in Industry and Geophysics I.A.E.A. Wien, 1967, s. 615-24

Úvod	3
1.0 Základní podmínky práce konstruktéra a projektanta aparátu	5
2.0 Řešení konstrukčních prvků rotačně symetrických těles	
2.1 Způsoby zachování membránového stavu	7
2.2 Membránové síly při nesymetrickém vnějším zatížení	8
2.2.1 Obooná zatížení rotačně symetrických membrán-řešení řadami	11
2.2.2 Zajištění membránového stavu při místním účinku osamělých sil a momentů	14
2.2.2.1 Řešení komplexní proměnnou-homogenní část	14
2.2.2.2 Řešení partikulárního integrálu	20
2.3 Výztuhy v proniku válců a kuželů-potrubi odbočky	24
2.3.1 Rozbor namáhání válcové odbočky	26
2.3.2 Výztuhy kuželových potrubních odboček	30
2.3.2.1 Příklad řešení kuželové odbočky	35
2.4 Poruchy membránového stavu v blízkosti koncentrátoru napětí	38
2.4.1 Příklad vetknutého válce	42
2.4.2 Řešení spoje s přechodem tloušťky	43
2.4.3 Válec s prstencovou výztuhou	46
2.4.4 Válec s rovným dnem	49
3.0 Spolehlivost a životnost tlakových nádob	
3.1 Dimenzování rozdílně zatěžovaných systémů tlakových nádob	52
3.2 Narůstání plastických deformací při střídavém zatěžování	54
3.2.1 Přizpůsobení se konstrukce přetížení	55
3.2.1.1 Výpočet k_p graficky	59
3.2.1.2 Výpočet k_p graficko-početní Leckieho metodou	61
3.3 Cyklické zatěžování	64
3.4 Životnost při nízkocyklové únavě nebo při nízkocyklové únavě a tečení	70
4.0 Trubkové výměníky tepla	
4.1 Základní rozdělení trubkových výměníků tepla	73
4.2 Základní konstrukční skupiny a části trubkových výměníků	81
4.2.1 Komory výměníků	81
4.2.2 Pláště výměníků	82
4.2.3 Trubkové svazky výměníků	86
4.2.4 Části ke zvýšení intenzity výměny tepla	101
4.2.5 Průřezy hrdel, ochrana trubkových svazků proti účinkům pracovních látek	102
4.2.6 Uložení výměníků tepla	103
4.2.7 Návarky	103
4.3 Dimenzování konstrukčních částí výměníků tepla	103
5.0 Zatížení válcových konstrukcí kolonového typu a kontrola uzlových bodů	
5.1 Statický a dynamický účinek větru	118
5.1.1 Statický účinek větru	119
5.1.2 Výpočet doby vlastních kmitů	121

5.1.3	Dynamické účinky	124
5.1.4	Seismická	127
5.1.5	Kontrola tělesa kolony	127
5.2	Metoda postupného dimenzování válcové kolony	129
5.3	Podstavec	129
5.4	Příslušenství kolon	138
5.5	Kolonová patra	138
5.5.1	Zvonková patra	141
5.5.2	Tunelová patra	142
5.5.3	Sítová patra	142
5.5.4	Roštová patra	143
5.5.5	Ventilová patra	143
5.5.6	Náplňové kolony	144
6.0	Pevnostní výpočty potrubních soustav	
6.1	Dimenzování potrubních systémů	148
6.1.1	Výpočty podajnosti kolen a potrubních systémů	152
6.1.2	Zvětšení ohybového napětí u kolena	154
6.2	Výpočet reakcí v zakotvení od teplotní roztažnosti	156
6.3	Výpočet ohybového namáhání od teplotní roztažnosti	159
6.4	Stanovení vlastních momentů setrvačnosti a deviačních momentů	160
6.4.1	Rovný úsek	160
6.4.2	Koleno	160
6.4.3	Stanovení momentů setrvačnosti všech úseků k počátku souřadnic	162
6.4.4	Stanovení momentů setrvačnosti k těžišti systému	162
6.4.5	Příklad rovinného potrubního systému	162
6.4.6	Příklad prostorového potrubního systému	166
6.5	Montážní předpětí kompenzátorů a kompenzačních útvarů	171
6.6	Řešení okrajových úloh	171
6.7	Vyrovnávání teplotní roztažnosti kompenzátory	173
6.7.1	Ucpávkové kompenzátory	173
6.7.2	Vlnovcové kompenzátory	174
6.7.3	Kloubové vlnovcové kompenzátory	174
6.8	Potrubní uzly	175
6.8.1	Postup výpočtu rovinného systému	175
6.8.2	Výpočet prostorového systému	177
7.0	Využití nedestruktivních způsobů kontroly při bezdemontážní diagnostice	
7.1	Zjišťování provozního poškození základního materiálu a svarů	178
7.2	Měření korozních a erozních úbytků tloušťky stěny a měření nánosů	182
7.3	Měření tloušťky ochranných a izolačních vrstev a nátěrů	182
7.4	Zjišťování porušení izolace a kontrola přehřátých míst	183
7.5	Měření opotřebení strojních součástí	183
7.6	Nedestruktivní měření tvrdosti	184
7.7	Kontrola smontovaných konstrukčních dílů	184
7.8	Zjišťování netěsností a jejich množství	184