

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 269

ISSN 1213-418X

Hobst Leonard

**PERSPEKTIVY
ROZVOJE RADIOGRAFIE
VE STAVEBNICTVÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav stavebního zkušebnictví

Doc. Ing. Leonard Hobst, CSc.

**PERSPEKTIVY ROZVOJE RADIOGRAFIE VE
STAVEBNICTVÍ**

OUTLOOK OF RADIOGRAPHY DEVELOPEMENT IN CIVIL
ENGINEERING

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
FYZIKÁLNÍ A STAVEBNĚ MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ



BRNO 2008

KLÍČOVÁ SLOVA

radiografie, radioskopie, betatronografie, radiografické filmy, paměťové folie

KEY WORDS

radiography, radioscopy, betatronography, radiographic films, capture plates

© Leonard Hobst, 2008

ISBN 978-80-214-3662-6

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	5
2 ZHODNOCENÍ ZDROJŮ ZÁŘENÍ V RADIOGRAFII A RADIOSKOPII	5
2.1 Rentgenografie.....	6
2.2 Gamagrafie.....	6
2.3 Betatronografie.....	7
3 MOŽNOSTI ZÁZNAMU OBRAZU V RADIOGRAFII.....	8
3.1 Radiografický film	8
3.2 Radioskopie.....	9
3.2 Paměťové folie.....	10
4 ZPŮSOBY VYHODNOCOVÁNÍ RADIOGRAFICKÉHO OBRAZU	11
5 ZÁVĚR.....	14
6 ÚVAHA NAD DALŠÍM VÝVOJEM NDT METOD VE STAVEBNICTVÍ	15
7 VYBRANÉ PRÁCE AUTORA (ZE 148 PRACÍ).....	16
7.1 Publikace výsledků z oblasti radiografie	16
7.2 Publikace výsledků z oblasti stavební ochrany před zářením	18
7.3 Deset nejvýznamnějších prací.....	19
8 ABSTRACT	20

PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Leonard Hobst se narodil 19. září 1949 v Brně. Střední všeobecně vzdělávací školu ukončil v roce 1968 maturitou s vyznamenáním. Studium oboru „Konstrukce a dopravní stavby“ absolvoval na Fakultě stavební VUT v Brně v roce 1973 (s červeným diplomem). Během vojenské základní služby působil jako stavbyvedoucí na stavbě komplexu Vysoké školy pozemního vojska ve Vyškově. V období 1974-8 studoval jako interní vědecký aspirant na Ústředním středisku radiační defektoskopie VUT. Studium ukončil úspěšnou obhajobou disertační práce. Odbornou praxi vykonával v nár. podniku Hutní montáže Ostrava v letech 1978 až 1980. Jako samostatný defektoskopický pracovník byl vyslán na odbornou stáž do NSR k firmě Gottfeld GmbH a později k firmě Omnitest GmbH. (Poznatky z tohoto pobytu později využil při

zavádění předmětu „Základní metody defektoskopie svarů“.) V roce 1980 byl přijat na Ústřední středisko radiační defektoskopie jako odborný asistent. Po absolvování čtyřsemestrálního postgraduálního studia na Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně byl v roce 1984 jmenován znalcem v oboru „Stavebnictví, stavby obytné – nedestruktivní zkušebnictví“. Aby se zdokonalil v pedagogické odbornosti, absolvoval v roce 1988 s výborným prospěchem čtyřsemestrální postgraduální kurz „Základy vysokoškolské pedagogiky“. V říjnu 1989 byl na základě tehdy platných kritérií jmenován docentem pro obor „stavební hmoty“. V roce 1991 se stal vedoucím Ústředního střediska radiační defektoskopie. Od roku 1992 je „Autorizovaným inženýrem“ v oboru „zkoušení a diagnostika staveb“. V období 1997 až 2000 zastával funkci prorektora VUT pro výstavbu a dislokaci (v této době bylo vybudováno Centrum VUT na ul. Antonínská 1). Po sloučení „Ústavu radiační defektoskopie“ s „Ústavem stavebnin a zkušebních metod“ do společného „Ústavu stavebního zkušebnictví“ byl jmenován zástupcem vedoucího a od roku 2004 vedoucím tohoto ústavu. V roce 2004 předložil habilitační práci s názvem „Využití ionizujícího záření ve stavebnictví a rozbor dalšího rozvoje radiačních metod“, kterou úspěšně obhájil a od roku 2005 byl jmenován docentem pro obor „Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství“

Podstatnou část svého pracovního úsilí vždy věnoval výzkumné činnosti. Byl odpovědným řešitelem 13 a spoluřešitelem 5 výzkumných úkolů. Své práce zaměřoval převážně na využití ionizujícího záření ve stavebnictví a na problematiku ochrany proti účinkům ionizujícího záření. Výsledky výzkumu přímo uplatňoval v praxi. Vypracoval 66 a podílel se na zpracování 140 odborných posudků, zpráv a expertíz. S výsledky svých prací průběžně seznamoval technickou veřejnost ve více než 120 člancích a příspěvcích. Usnadňovala mu to i skutečnost, že po dobu 8 let byl šéfredaktorem časopisu SANACE a od roku 2000 se stal zástupcem předsedy redakční rady časopisu BETON TKS. Byl členem přípravných výborů a odborných komisí velkého počtu konferencí a symposií jak doma tak v zahraničí (Brazílie, Německo, Rumunsko, Slovensko). Kromě odborných stáží v NSR v letech 1979-81 absolvoval přednáškový pobyt na jaderné elektrárně v Cienfuegos na Kubě (1984) a krátkodobé stáže na Řízkém polytechnickém institutu (1986) a Technické univerzitě v Lipsku (1987 a 1989). V roce 1991 pracoval v rámci tříměsíční stáže na Technické univerzitě v Lyngby (Dánsko) a v roce 2005 přednášel na Technické univerzitě v Saarbrückenu. Na pedagogické činnosti se začal podílet již během své interní vědecké aspirantury. Od 80. let přednášel v předmětu „Základy zkušebnictví“. Své přednášky rozšířil o aktuální problematiku „ochrany proti radonu“. Je konzultantem a oponentem diplomových prací a školitelem řady úspěšných doktorandů.

1 ÚVOD

Devatenácté století, označované jako „století páry“, bylo stoletím zásadních objevů a vynálezů v oblasti techniky, které byly dále rozvíjeny ve století dvacátém. V poslední dekádě 19. století objevil C.W. Roentgen neznámé „paprsky X“ a to byl velký impuls pro tehdejší vědu a techniku. Význam tohoto objevu oceňoval vědecký svět již za jeho života tím, že v roce 1901 mu byla udělena Nobelova cena za fyziku. O století později bylo navrženo, aby jeho jménem byl označen nově objevený chemický prvek s protonovým číslem 111 – **roentgenium (Rg 272)**.

Fyzici a technici se snažili objasnit podstatu tohoto objevu, což se jim podařilo a během několika málo let se využívání ionizujícího záření dostalo prakticky do všech oblastí lidské činnosti. Využití rentgenového záření se uplatnilo nejdříve v lékařství a to v diagnostice a později i terapii nemocí. Postupně jak se při zdokonalování rentgenových přístrojů zvyšovala energie rentgenového záření a rozšiřovaly se i oblasti jeho využití. Byla to především oblast defektoskopie ve strojírenství, kde se záření využívá pro rentgenografickou kontrolu svarů a odlitků. Později začala rentgenografie pronikat i do dalších oblastí výroby a hospodářských aktivit.

Rozvoj jaderného výzkumu a průmyslu v období po 2. sv. válce umožnil kromě výroby jaderných zbraní také vývoj a výstavbu jaderných reaktorů, které našly velké uplatnění především v energetice. V jaderných reaktorech však vznikají i umělé radioizotopy, které se v mnohých případech dají použít jako alternativní zdroje záření místo rentgenů. Využívá se jejich snadná manipulovatelnost a nezávislost na zdrojích energie. Jejich využití je však podmíněno vývojem nových stínících krytů, které by byly bezpečné z hlediska stínění, snadno manipulovatelné a funkčně spolehlivé.

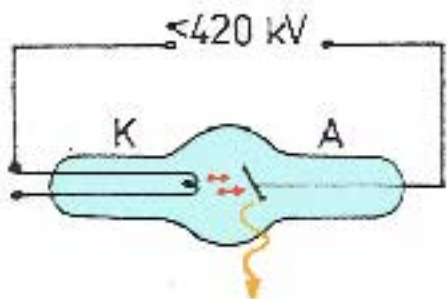
Vývoj techniky ve stavebnictví zákonitě směřuje k účinnějšímu využití materiálu všeho druhu, vede k tomu, že dřívější robustní stavby jsou nahrazovány subtilními stavbami z oceli, betonu a plastů, stejně tak jako byla např. málo výkonná vodní kola mlýnů nahrazována turbínami vodních elektráren. Tento vývoj byl a je podmiňován zvyšováním kvality použitého materiálu, ale zároveň také jistotou, že použitý materiál předpokládané vlastnosti, na kterých je založena spolehlivost funkce a především bezpečnost budovaných moderních objektů, skutečně má a že byl použit v takovém rozvržení, jak to stanovuje projekt. Nástroj pro účinnou a spolehlivou kontrolu dodržování těchto požadavků poskytují i zde právě **radiografie a radioskopie**, používané na zjišťování vnitřních nehomogenit v materiálu. Nejčastěji to bývá zjišťování profilu a polohy betonářské resp. předpínací výztuže ve stavebních konstrukcích.

2 ZHODNOCENÍ ZDROJŮ ZÁŘENÍ V RADIOGRAFII A RADIOSKOPII

Zásadní význam v radiografii má energie zdrojů ionizujícího záření. Čím vyšší energii ionizujícího záření použijeme, tím větší tloušťku materiálu můžeme prozářit. Podle zvyšující se energie zdrojů ionizujícího záření můžeme členit radiografii na **rentgenografii**, **gamagrafii** a **betatronografii**, která se právě koncem 20. století stala nejvýkonnějším mobilním zdrojem ionizujícího záření. Nejrozšířenější záznamový prostředek při prozařování konstrukcí je stále radiografický film. Při jeho použití mluvíme o **radiografii**. Řadu let jsou však vyvíjeny prostředky pro okamžité zobrazení vnitřní struktury materiálu (on line). Tyto zobrazovací prostředky jsou založeny na různých fyzikálních základech a při jejich použití mluvíme o **radioskopii**.

2.1 RENTGENOGRAFIE

Rentgeny jsou nejstarší zdroje ionizujícího záření (C. W. Roentgen – 1895). Záření vzniká v rentgence, což je vakuová trubice obsahující dvě elektrody – katodu a anodu. Žhavená katoda



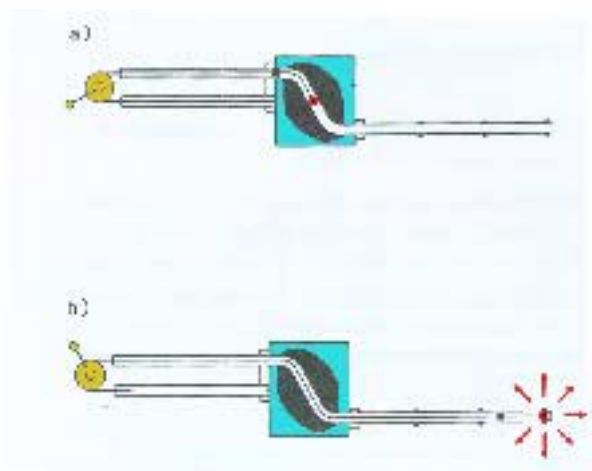
Obr. 1 Schéma rentgenky

emituje do svého okolí elektrony, které jsou vysokým elektrickým potenciálem mezi katodou a anodou urychlovány směrem k anodě. Anoda rentgenky je nejčastěji tvořena wolframovou destičkou. Na ní dopadají elektrony a předávají jí svoji kinetickou energii. (obr. 1). Ta se mění na teplo (99 %) a rentgenové záření (1 %). Většina dodané elektrické energie se tedy mění na neužitečné teplo, které způsobuje řadu konstrukčních problémů v souvislosti s nutností jeho odvodu z rentgenky. K velkým přednostem rentgenografie patří možnost plynulého nastavení vysokého napětí na rentgence a tím i energie vznikajícího rentgenového záření (v anglofonních zemích označováno „záření X“).

Významná jsou i bezpečnostní hlediska, neboť po odpojení rentgenu od sítě, ihned je přerušena emise rentgenového záření. K nevýhodám lze počítat problémy s odvodem tepla během činnosti rentgenu a dále relativně nízkou energii rentgenového záření, danou max. napětím mezi katodou a anodou, kterou nad 420 kV již nelze zvyšovat. Ta umožňuje při kontrole stavebních konstrukcí prozařovat max. 150 mm betonu.

2.2 GAMAGRAFIE

Objev radioaktivity je jen nepatrně mladší nežli objev rentgenového záření (H. Becquerel - 1896). Radioaktivní záření je výsledkem specifických přeměn hmoty a jeho zdrojem je jádro prvku. Charakter tohoto záření je zcela



Obr. 2 Schéma umístění zářiče v uranovém krytu a jeho vysunutí do pracovní polohy

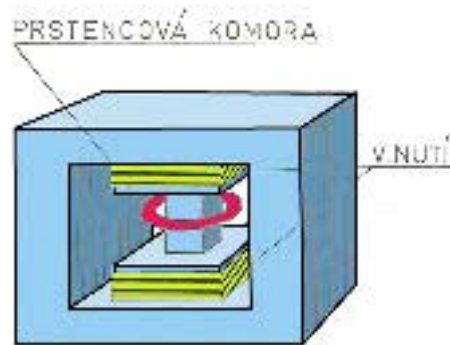
určen prvkem, který je vysílá a není funkcí vnějších podmínek – teploty, tlaku aj. I když z radioaktivního zářiče vychází obecně i záření α a β , jsou tato záření vzhledem ke svým vlastnostem (látkové záření o malé pronikavosti) odstíněna a v gamagrafii se využívá pouze záření γ . Dříve používaný přírodní gamazářič radium Ra 226, součást uranoradiové rozpadové řady, se v současné době již nepoužívá (při jeho rozpadu vzniká radioaktivní plyn radon Rn 222). V současné době se používají převážně umělé radioizotopy, vyráběné v jaderných reaktorech. Pro diagnostiku stavebních konstrukcí je vhodné používat radioaktivní kobalt Co 60, který má vysokou energii záření ($E = 1,25 \text{ MeV}$) a relativně velký

poločas rozpadu $T_{1/2} = 5,3$ roku, který umožňuje využívat zářič po řadu let bez jeho výměny (u Co 60 je to až 10 let). Tím, že radioaktivní zářiče neustále vyzařují ionizující záření, je nutno je přechovávat a transportovat ve stínících krytech, které jsou zhotovovány z materiálu o velké měrné hmotnosti. Dříve se jako stínícího materiálu používalo olova ($\rho = 11\,360 \text{ kg/m}^3$), v současné době se používají materiály s větší měrnou hmotností jako je wolfram ($\rho = 19\,300 \text{ kg/m}^3$), nebo

ochuzený uran ($\rho = 19\,050\text{ kg/m}^3$). Tloušťka stínění krytu závisí, kromě energie zářiče E, též na jeho aktivitě A. Vysoká aktivita zářiče A sice zkracuje dobu expozice (nepřímo úměrně), ale současně roste i jeho fyzická velikost a tím i velikost ohniska, což se nepříznivě projevuje na jakosti vzniklého radiogramu a dále na tloušťce stínění krytu a tím i jeho celkové hmotnosti. Pokud bereme v úvahu mobilnost krytu, neměla by jeho hmotnost přesahovat 100 až 150 kg. Pro uranový kryt těchto parametrů dostáváme maximální aktivitu Co 60 v hodnotě $A = 1\text{ TBq}$. Tato aktivita umožňuje prozařovat betonové konstrukce běžně do tloušťky 400 mm. Vysouvání zářiče z krytu do „pracovní polohy“ se uskutečňuje dálkovým ovládním (obr. 2). Obvykle se jedná o bowden, připojený k nosiči zářiče, kterým se zářič vysouvá do výsuvné hadice. Obsluha „dálkového ovládní zářiče“ je obvykle ruční, nevyžaduje zdroje elektrické energie a je proto výhodná při práci v terénu.

2.3 BETATRONOGRAFIE

Betatron je kruhový indukční urychlovač elektronů, ve kterém elektrony dosahují podstatně vyšších rychlostí a tím i kinetické energie nežli v rentgence. Po dopadu elektronů na terčík vzniká **brzdné záření** (které se i v anglofonní literatuře nazývá „bremsstrahlung“). Elektrony jsou urychlovány točivým elektrickým polem, vytvářeným střídavým magnetickým polem. Části tohoto magnetického pole se využívá k řízení pohybu elektronů po uzavřené kruhové dráze. Střídavé magnetické pole vzniká v elektromagnetu betatronu pomocí magnetických cívek a profilovaných pólových nástavců, kolem kterých je umístěna prstencová vakuová urychlovací komora. Je to analogická činnost jako činnost transformátoru. (obr. 3).



Obr. 3 Schéma elektromagnetů betatronu s urychlovací komorou

3). Betatrony jsou obdobně jako rentgeny zdroje s dočasnou emisí záření. Energie brzdného záření betatronů je o několik řádů vyšší, nežli energie záření rentgenů. Princip betatronů je sice znám již od 40. let 20. století, ale v té době to byly zdroje poměrně složité a hmotné, nehodily se pro práci v terénu.

První mobilní betatrony moderní konstrukce vyvinuli vědci Výzkumného ústavu introskopie, který je součástí Tomské polytechnické university, v 70. letech 20. století. Jeden z prvních sériových výrobků s označením PMB-6 (max. energie $E = 6\text{ MeV}$) byl získán pro Ústřední středisko radiační defektoskopie VUT v Brně v roce 1973, kde byl podroben zkouškám, které měly prokázat možnost jeho použití ve stavebnictví. Cílem práce bylo vyvinout novou účinnější metodu radiografie - **betatronografie**, vymežit podmínky její aplikace, vypracovat zásady pro její použití a tím přispět k jejich uplatnění ve stavebnictví pro snímkování konstrukcí ze železového a zejména předpjatého betonu. Výsledky výzkumných prací byly shrnuty ve výzkumné zprávě státního úkolu P-12-333-224-E04-02-15-3 s názvem „Betatronografie konstrukcí z předpjatého betonu“. Ve zprávě bylo prokázáno, že betatrony jsou vhodným zdrojem záření pro prozařování železobetonových konstrukcí do tloušťky 500 mm, popř. i více. Kromě příznivých vlastností byly však zjištěny i nepříznivé skutečnosti, jako malá homogenita svazku brzdného záření a změna nastavených parametrů betatronu po zahřání elektroniky, která byla součástí monobloku s elektromagnety.

Zvýšených výkonů a lepších parametrů bylo dosaženo u novější verze betatronu, u betatronu MIB-4, který byl zkoušen na ústavu v 80. letech. Betatron měl sice nižší maximální energii (max. $E = 4 \text{ MeV}$), avšak měl vyšší dávkový příkon záření, takže při menších rozměrech a hmotnosti monobloku měl srovnatelné parametry při prozařování železobetonových konstrukcí.

Zavedení nových stínících materiálů (U 238) do konstrukcí defektoskopických krytů umožnilo koncem 80. let používat radionuklidy o velkých aktivitách. Jednalo se především o kobalt $\text{Co}60$,



Obr. 4 Snímkování vrstvy betonu o tloušťce 1 m ve Výzkumném ústavu introskopie betatronem MIB-7,5

jehož energie ($E = 1,25 \text{ MeV}$) a dosažená aktivita (až $A = 1\text{TBq}$) umožňovaly prozařovat tloušťky betonu srovnatelné s tloušťkami betonu prozařovanými betatrony. Přitom manipulace s defektoskopickými kryty na staveništích byla jednodušší nežli manipulace s betatrony. Tím význam betatronů v tomto období poklesl.

Výzkumnému ústavu introskopie v Tomsku se však za posledních 15 let podařilo zvýšit dávkové příkony betatronů 15 až 20 krát v porovnání s betatrony ze 70. let, při zachování stejných rozměrů a hmotnosti monobloku zářiče. To umožňuje prozařovat betonové konstrukce až do tloušťky 1,0 m. Tato tloušťka byla ověřena na konkrétní betonové vrstvě s vloženou železobetonovou výztuží, která se uskutečnila přímo na Výzkumném ústavu introskopie v Tomsku dle podkladů Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně v rámci projektu GAČR (obr. 4).

Pozn.: V 80. letech 20. stol. došlo ve světě k rychlému rozvoji lineárních urychlovačů, které v mnoha případech nahradily betatrony, neboť hustota toku energie užitečného svazku, vycházejícího z lineárních urychlovačů, je o jeden až dva řády vyšší nežli u betatronu. Současné lineární urychlovače jsou však hmotná stacionární zařízení a doposud se nepodařilo je konstruovat jako mobilní zařízení, vhodná pro defektoskopii v terénu.

3 MOŽNOSTI ZÁZNAMU OBRAZU V RADIOGRAFII

Ionizující záření, které prošlo zkoušeným materiálem je modulováno nehomogenitami, které se v materiálu nachází a tyto změny pole ionizujícího záření je nutno zachytit a vyhodnotit. V podstatě od objevu rentgenového záření se tento záznam ionizujícího záření dělí na radiografii, ve které byl pro záznam využit radiografický film, který však je nutno před vyhodnocováním vyvolat a radioskopii, která umožňuje okamžité zobrazení vnitřních struktur materiálu přímo na fluorescenčním štítu nebo obrazovce monitoru.

3.1 RADIOGRAFICKÝ FILM

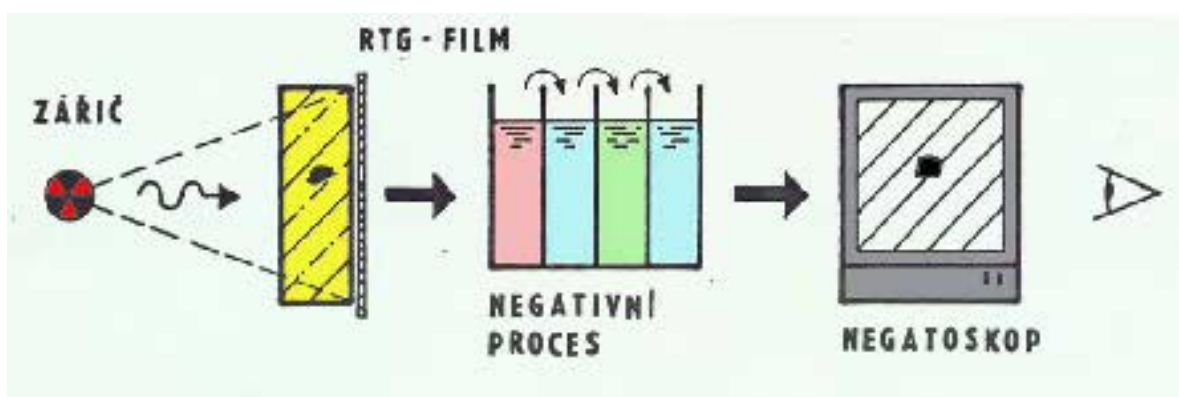
K registraci obrazu zkoušeného materiálu se v radiografii nejčastěji používají speciální radiografické filmy umístěné ve světlotěsné kazetě. Filmy musí vynikat ostrou kresbou obrazu, vysokou citlivostí, širokým rozmezím použití a možností dokumentace.

Citlivá vrstva radiografického filmu je připojena vrstvou pojidla na podložku z polyesteru (dříve z triacetátové celulózy). Na citlivou vrstvu (emulzi halogenidu stříbra, např. AgBr

v želatině) je ještě nanášena ochranná želatinová vrstva. Pouze 1% záření procházejícího filmem reaguje s citlivou vrstvou a podílí se na vytváření latentního obrazu. Proto se pro radiografii s výhodou používají oboustranně polévané filmy, neboť se dosáhne dvakrát vyššího zčernání. Požadované vlastnosti obecně kladené na citlivé vrstvy jsou: jemnozrnnost, vysoká citlivost, strmá gradace, nezávadnost materiálu, trvanlivost.

Zrnitost radiografických filmů lze vyjádřit numerickým číslem zrnitosti. Údaj zrnitosti je důležitý pro vyhodnocení vnitřní neostrosti rentgenového obrazu. Citlivost se udává pouze relativně a označuje se slovně. Nezávadnost materiálu předpokládá, že filmy neobsahují vady dané technologií výroby a trvanlivost závisí na kvalitě materiálu a způsobu uložení

Formáty filmů pro radiografii jsou normalizovány - nejběžnější formát filmu při radiografické kontrole stavebních konstrukcí je však 300 mm x 400 mm. Velkou nevýhodou radiografických filmů je nutnost je před vlastním vyhodnocováním vyvolat „mokrým procesem“ (ve vývojce, přerušovací lázni a ustalovači) a to buď ručně, nebo ve vyvolávacích automatech (obr. 5).



Obr. 5 Schéma radiografické kontroly vad v materiálu

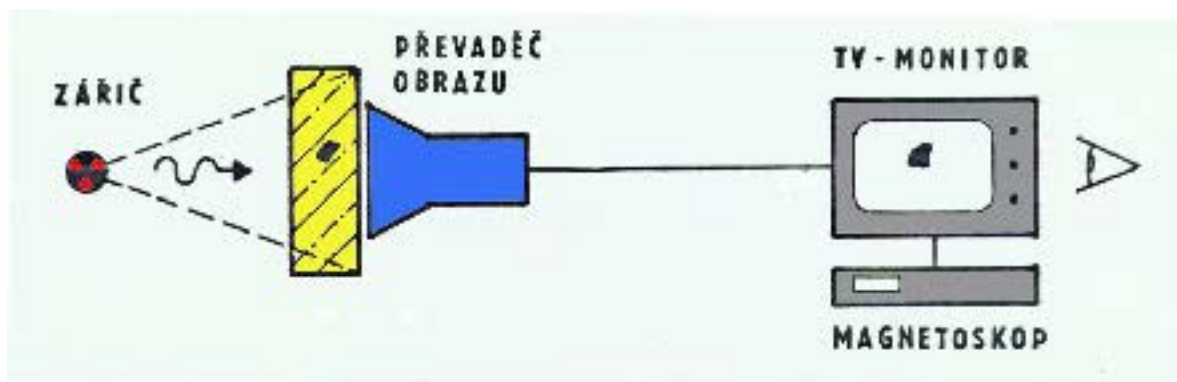
Zesilovací folie

Zesilovací folie svými vlastnostmi vhodně doplňují radiografické filmy. Jejich primárním úkolem je zvýšit účinky záření na zčernání filmu a tím i zkrátit dobu expozice. U **kovových zesilovacích folií** se to děje na základě fotoefektu, kdy vyražené elektrony z folie mají vyšší fotochemický účinek na film nežli vlastní ionizující záření. U **fluorescenčních zesilovacích folií** je neviditelné ionizující záření převedeno ve vrstvě luminoforu folie na viditelné světlo, které má opět vyšší fotochemické účinky na film nežli neviditelné ionizující záření. Sekundárně pak kovové folie působí jako filtry rozptýleného záření, takže zvyšují jakost vzniklých radiogramů. Ani vývoj zesilovacích folií se nezastavil a jsou vyvíjeny stále nové typy, které spojují výhody kovových a fluorescenčních folií – **folie fluorometalické**.

3.2 RADIOSKOPIE

Radioskopie je stejně stará jako radiografie, neboť jsou již od dob C.W. Roentgena známy pokusy zobrazit předměty na **fluorescenční štít**. Vývojem se došlo k velmi citlivým fluorescenčním štítům, které jsou snímány televizní kamerou, anebo je obraz přímo zaznamenán polovodičovými detektory a je přiváděn na zpracování do počítače (obr.6).

Problematikou rentgen-televizního řetězce se zabývalo Ústřední středisko radiační defektoskopie VUT v Brně v letech 1989 až 1990. V rámci výzkumného úkolu „*Radiografie místních poruch stavebních konstrukcí v reálném čase*“ byla vybudována typová aplikační laboratoř v prostorách ústavu, která umožňovala okamžitou kontrolu a hodnocení stavebních dílců. Řešení úkolu bylo zaměřeno na kontrolu plošných stavebních konstrukcí, které však bylo nutno dopravit do laboratoře na zkušební dráhu. Výzkumné práce byly zaměřeny na využití moderní



Obr. 6 Schéma rentgen – televizního řetězce na zjišťování vad v materiálu (radioskopie)

počítačové techniky, jak pro řízení posuvů zkoušených stavebních dílců, tak pro úpravu a vyhodnocování radioskopických obrazů.

Rentgen-televizní řetězec byl na ústavu sestaven z dostupných zařízení. Hlavní součást rtg-TV řetězce - převaděč obrazu – byl tuzemské výroby ZOX-193 KM, což byl převaděč obrazu používaný v lékařství, upravený pro použití v defektoskopii.

Jako zdroj záření byl použit rentgen od firmy Andrex CP-160, který je ve vybavení ústavu. Radioskopický obraz při použití tohoto rentgenu měl i s tuzemským převaděčem ZOX-193 KM velkou rozlišitelnost (0,6 až 0,8%), avšak maximální napětí na rentgence 160 kV umožňuje prozářit beton pouze do tloušťky 150 mm.

Vstupní měření však prokázala, že převaděč obrazu není příliš vhodný pro použití ve stavebnictví, neboť neumožňuje registraci záření o vyšší energii, které je nezbytné pro prozařování betonových konstrukcí větších tloušťek.

V současné době jsou vyvíjeny **polovodičové detektory**, které se jeví jako nejperspektivnější zobrazovací systémy. Jejich nevýhodou je vysoká cena a vysoké nároky na zacházení. Navíc jsou také ovlivňovány teplotou pracovního prostředí. Podle způsobu zobrazování se rozlišují systémy s **přímou konverzí záření** (na bázi amorfního selenu) nebo **nepřímou konverzí záření** (na bázi amorfního silicia).

Obecně platí, že polovodičové detektory na bázi amorfního silicia mají větší rozlišení, avšak proti detektorům na bázi amorfního selenu mají menší dynamiku (dynamikou se rozumí citlivost v široké oblasti energií).

3.2 PAMĚŤOVÉ FOLIE

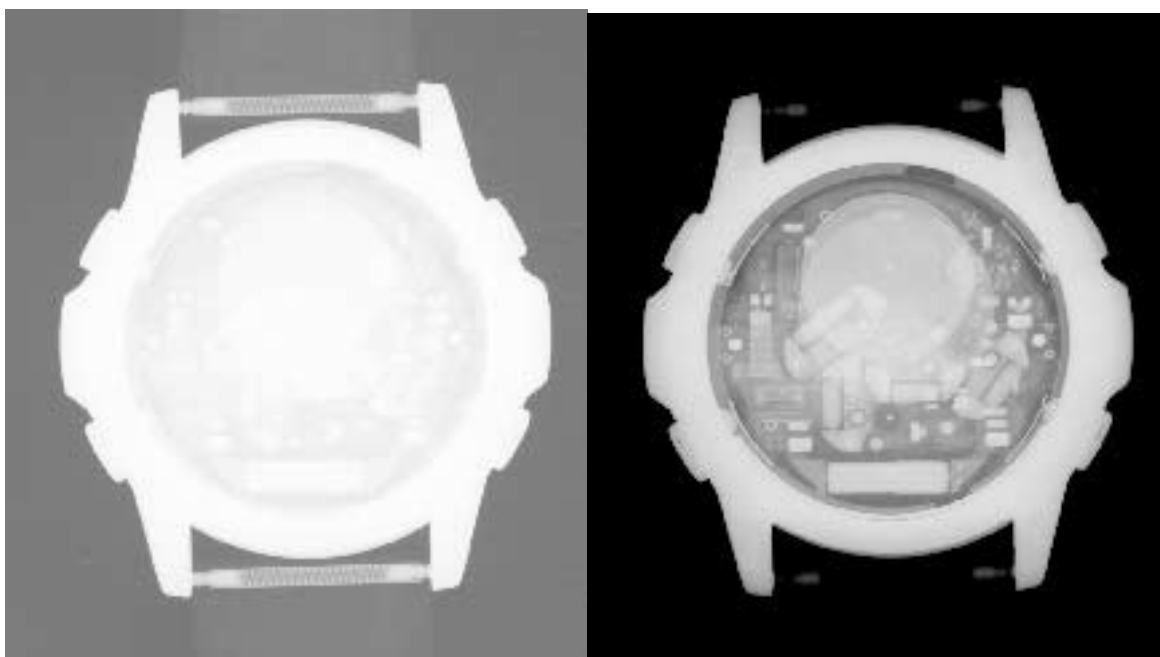


Obr. 7 Scanner od firmy Dürr pro vyhodnocování paměťových folií

K nejnovějším prostředkům záznamu rentgenového obrazu patří **paměťové folie**. Jsou to folie na bázi fosforu, které se vkládají do kazet, obdobně jako rentgenové filmy. Při dopadu rentgenového nebo gama záření jsou na nich vybuzeny elektrony v krystalické struktuře folie a ty se posouvají do vyšších energetických vrstev, kde zůstávají v kvazistabilním stavu. Ve speciálním scanneru (obr. 7), do kterého se exponovaná folie vkládá, se tyto elektrony působením laserového paprsku uvolňují, takže ve fluorescenční vrstvě vznikne viditelný obraz, který je sejmut a digitalizován. Paměťové folie mají velkou dynamiku, což je výhodné při prozařování materiálů o různých tloušťkách. Právě tato

jejich vlastnost dává předpoklad, že paměťové folie budou při zkouškách stavebních konstrukcí vhodnou náhradou radiografických filmů.

Tyto paměťové folie jsou dosud používány především ve strojírenství při použití rentgenů nebo gamazářičů s nízkou energií záření (Ir 192). Proto navázal Ústav stavebního zkušebnictví kontakt s firmou Dürr, která tyto folie a příslušné scannery vyvíjí a vyrábí, aby paměťové folie byly odzkoušeny s vysokoenergetickým zářičem Co 60, používaným ve stavebnictví. Firma Dürr dopravila na FAST paměťové folie a vyvinutý scanner a v laboratořích ústavu byly odzkoušeny vrstvy betonu s vloženou výztuží do tloušťky 0,5 m, při použití gamazářiče Co 60. Experimenty v laboratoři prokázaly, že čas expozice poklesl, ale projevil se velký vliv rozptýleného záření, které je nutno odstínit kovovými filtry. Velkou výhodou těchto folií je, že se dají přemazávat, takže se předpokládá, že mohou být použity až 2000 x a dále to, že obraz je digitalizován a dá se speciálním softwarem dále zpracovávat. Na rozdíl od radiogramů mohou být paměťové folie počítačově vyhodnoceny i v případě jejich podexpozice nebo přexpozice (obr. 8a a obr. 8b).



Obr. 8a Podexponovaný snímek náramkových hodinek na paměťové folii

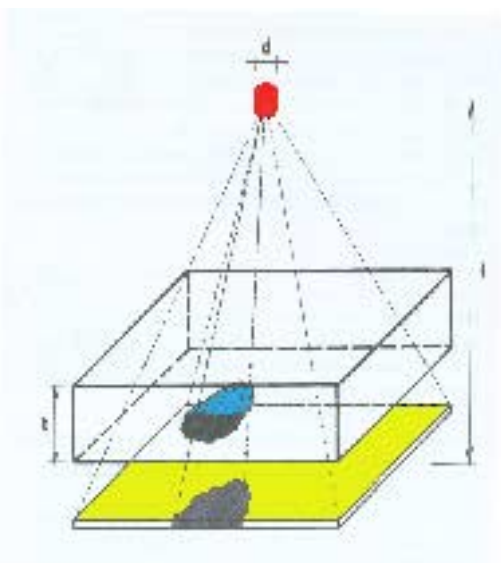
Obr. 8b Počítačově upravený snímek náramkových hodinek na paměťové folii

Paměťové folie se proto v nejbližším období jeví jako velmi perspektivní nástupce rentgenových filmů. Pro jejich optimální využití ve stavebnictví však bude zapotřebí vyřešit ještě řadu problémů, které se mohou stát náplní dalšího výzkumu.

4 ZPŮSOBY VYHODNOCOVÁNÍ RADIOGRAFICKÉHO OBRAZU

Konečnou fází radiografické kontroly a výchozím podkladem pro určení stavu kontrolovaných staveb je vyhodnocení záznamu obrazu (např. radiogramu). Je nutno si přitom uvědomit, že zobrazovací technika v radiografii a radioskopii je založena na principu **centrální projekce** (známé z deskriptivní geometrie), při níž zdroj záření je totožný se středem prozařování (obr. 9). Je zřejmé, že zobrazovaná nehomogenita, která je obvykle trojrozměrná, se zobrazuje na záznamový prostředek dvojrozměrně. Přitom i tento dvojrozměrný záznam není autentický s rozměry nehomogenity, ale je velikostně zkreslen vlivem zmiňované centrální projekce. Při volbě

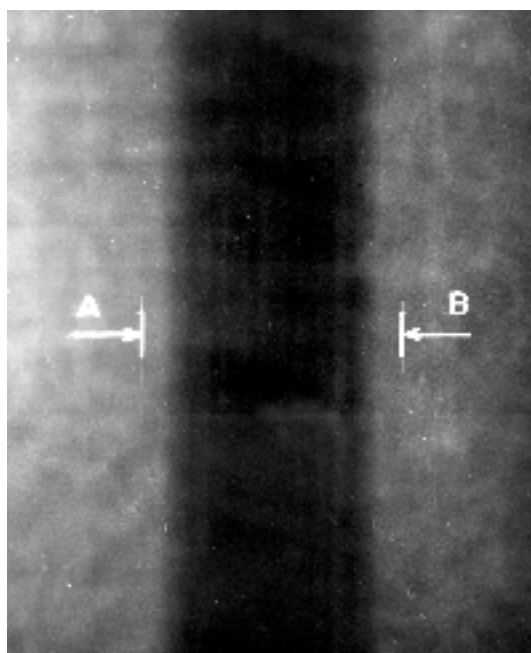
geometrie prozařování je proto snahou volit co největší vzdálenost zářiče od záznamového prostředku (ohniskovou vzdálenost f) a co nejmenší vzdálenost kontrolovaného objektu od záznamového prostředku. Volba geometrických podmínek snímání velmi závisí na zkušenosti zkušebních pracovníků, neboť např. při prodlužování ohniskové vzdálenosti, klesá hustota toku energie se čtvercem vzdálenosti a tím se významně prodlužuje doba expozice.



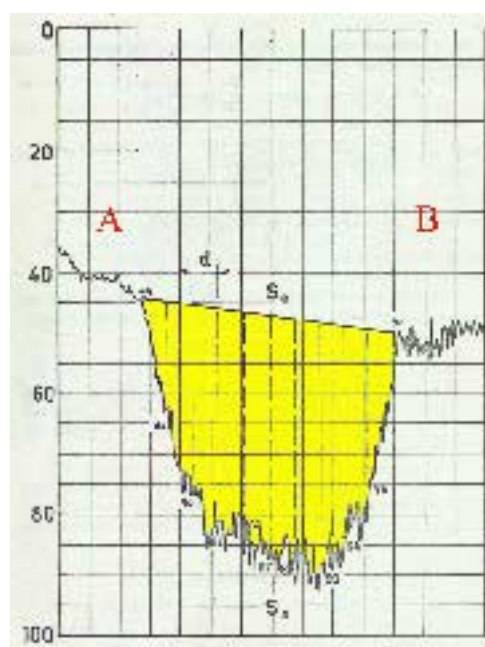
Obr. 9 Centrální průmět nehomogenity na záznamový prostředek

Při dosud nejrozšířenějším způsobu záznamu obrazu na radiografický film, je vzniklý radiogram po svém vyvolání a usušení vyhodnocován na negatoskopu – zdroji světla s regulovaným jasem. Rozeznatelnost zachycených nehomogenit je při tomto způsobu vyhodnocování ovlivněna nejen jakostí radiogramu, ale také podmínkami vyhodnocování, zejména osvětlením snímku, absolutní velikostí pozorovaného pole a adaptací oka. V neposlední řadě však i zkušenostmi pracovníka. Je proto snahou i tento způsob vyhodnocování zobjektivnit. U radiogramů se toho

dosahuje tím, že se jednotlivé snímky skenují speciálními scannery a výsledný digitální obraz je ukládán do paměti počítače a následně se může dále zpracovávat. Rozeznatelnost nehomogenit se může uměle zvýšit, pokud se jednotlivým stupňům šedi přiřadí barevná škála. Počítačově lze zvýraznit i kontury nehomogenity. Obdobně jako oskenované radiogramy lze přímo zpracovávat a vyhodnocovat záznamy z polovodičových detektorů a záznamy z paměťových folií.



Obr. 10 Radiogram předpínací výztuže



Obr. 11 Densitogram předpínací výztuže

Kromě počítačového zdůraznění kontur nehomogenity, lze z radiografického obrazu za jistých podmínek odečíst i onen „třetí“ rozměr nehomogenity, který se „ztrácí“ při dvojrozměrném zobrazení. Dá se k tomu využít velikost změny zčernání na záznamu obrazu. Pokud známe průběh (funkci) charakteristiky záznamového prostředku (závislost zčernání na obdržené dávce záření), dá se tento „třetí rozměr“ vypočítat. K ověření tohoto předpokladu byly vybrány a odzkoušeny radiogramy předpínací výztuže, na kterých byly na zvoleném úseku nehomogenity (výztuže) vytvořeny denzitogramy. K tomu byl využit registrační fotometr, jehož údaje tzv. **denzitogramy** (obr. 11), jsou v podstatě grafickým znázorněním změn zčernání filmové emulze na radiogramu (obr. 10). Základní podmínkou pro uplatnění zvoleného principu vyhodnocování bylo odvození vztahů mezi plochou skutečné výztuže (pokud se zjišťovalo rozložení výztuže v železobetonové konstrukci nebo konstrukci z předpjatého betonu) a plochou zmenšeného zčernání (resp. zvětšeného zčernání při negativním „překlopení“ radiogramu), zjištěnou z denzitogramu. Vyvinutý přesný postup odvození plochy výztuže z údajů denzitogramu, zhotoveného na zvoleném místě radiogramu je patrný z obr. 11.

Dosažené výsledky byly i po odvození zmíněných vztahů zkreslovány účinkem **rozptýleného záření**, a proto musel být ještě stanoven součinitel pro zohlednění tohoto účinku β . Součinitel závisející na tloušťce prozařovaného materiálu d , ohniskové vzdálenosti f , a vzdálenosti výztuže od filmu c , byl odvozen experimentálně a z výsledků byl sestaven matematický vztah pro jeho vyjádření.

Ze zjištěných závislostí byl formulován matematický vztah pro odvození plochy výztuže:

$$F = \beta \times K \times \frac{s}{n} \times \cos \omega \times \sum_0^{n-1} \left(\ln \frac{S_x}{S_0} \right)_n \quad (1)$$

- kde
- F - odvozená plocha výztuže [cm²]
 - β - součinitel zahrnující vliv rozptýleného záření [1]
 - K - vyhodnocovací konstanta [cm]
 - s - šířka stopy výztuže, odměřená na radiogramu [cm]
 - n - počet intervalů na denzitogramu [1]
 - ω - odchylka kazety od roviny kolmé na osu svazku
 - S_x, S_0 - údaje registračního fotometru G II [1]

S použitím vztahu (1) lze pro různé podmínky snímkování určovat plochu výztuže s přesností závislou na počtu vyhodnocení výztuže z denzitogramu.

Správnost metody byla ověřena statistickým vyhodnocením více než sta snímků. Přitom bylo zjištěno, že chyba měření dosahuje při třech měřeních výztuže 14 %. Její vhodnost byla prokázána také praktickým stanovením množství a rozmístění předpínací výztuže na stavbách.

I když se prokázala správnost postupu této metody, velké množství ovlivňujících činitelů (např. i charakteristika filmu, která se mění podle podmínek jeho zpracování), způsobuje poměrně velký rozptyl ve výsledcích této metody. Lze však předpokládat, že při použití jiných záznamových prostředků nežli radiografického filmu (např. paměťových folií) jako záznamového prostředku, bude možno vycházet z pevně stanovené charakteristické křivky těchto záznamových prostředků a digitalizované výstupy přímo zpracovávat a získávat z nich s velkou pravděpodobností onen „třetí“ rozměr nehomogenity.

5 ZÁVĚR

Radiografie má za sebou více než 100 let úspěšného vývoje. Pronikla a proniká do všech oblastí lidské činnosti. Stěžejní oblast jejího využití je však diagnostika v lékařství a defektoskopie ve strojírenství a ostatních technických oborech.

Využívání radiografie ve stavebnictví má svoji nezastupitelnou úlohu. Radiograficky se zjišťují nehomogenity v železobetonových konstrukcích, jedná se především o profil a uložení prutů železové výztuže a rozmístění kabelů a kvalita jejich zainjektování v předpjatých konstrukcích. Radiograficky se dají sledovat procesy vnitřních deformací vybraných stavebních prvků při zatěžovacích zkouškách.

Důležitý je vývoj zdrojů záření. Je snahou docílit co nejvyšší energie, která by umožňovala prozařovat stále větší tloušťky zkoušeného materiálu. V současné době jsou nejvýkonnější mobilní zdroje záření – betatrony - vyráběny na jediném místě na světě na Výzkumném ústavu introskopie Tomské polytechnické university, se kterým má Ústav stavebního zkušebnictví uzavřenou smlouvu o spolupráci v rámci které je sledována prozářitelnost železobetonových konstrukcí.

Vývoj prodělaly i záznamové prostředky. Po dlouhou dobu byl nejrozšířenější záznamový prostředek radiografický film a tato dominace mu ještě po nějakou dobu vydrží. Nově vyvíjené prostředky by měly být úspornější a měly by urychlit proces vyhodnocování. Patří k nim především paměťové folie a polovodičové detektory. U obou těchto prostředků má docházet k přímé digitalizaci obrazu, která umožňuje další zpracování na počítači. Oba tyto systémy mají dosud nedostatky, na jejichž odstranění zainteresované firmy intenzivně pracují. Jejich největší rozšíření je dosud ve zdravotnictví, kde se pro diagnostiku používá nižší energie záření a kde o finanční prostředky není nouze. Vysokoenergetické záření, používané v defektoskopii, nepřináší podle posledních zjištění výrazné snížení dob expozice, jak se dříve předpokládalo. Tyto zobrazovací prostředky se však mohou stát námětem pro výzkum v této oblasti v dalším období.

Ve vyhodnocování výsledků radiografické kontroly má velký význam digitalizace obrazu a následné počítačové zpracování, které dokáže ze stávajících výsledků záznamu vyčíst daleko více informací a údajů. I zde se otvírá široké pole pro výzkum, který by mohl být zaměřen na počítačové vyhodnocení polohy a stavu zainjektování přepínací výztuže v konstrukcích a počítačové vyhodnocení polohy výztuže v konstrukcích ze železobetonu.

Kromě zmíněných výhod má radiografie i nevýhody. Jsou to především požadavky na bezpečnostní opatření, které je nutno při radiografické kontrole dodržovat. Týká se to především radiografické kontroly v terénu, kdy je nutno vždy vytyčovat kontrolované pásmo a je třeba bezpodmínečně zabezpečovat, aby se v době prozařování do ohroženého prostoru nedostala žádná nepovolaná osoba. Např. v obytných budovách, u kterých nelze zajistit jejich vyklizení, je radiografická kontrola zcela vyloučena.

I přes uvedené nedostatky lze konstatovat, že vývoj a možnosti radiografie nebyly dosud ukončeny. Oblast jejího využití se v posledním období rozšiřuje i do dalších odvětví lidské činnosti – např. i do státní správy. Zejména v celnictví (při hledání drog) a v oblasti bezpečnostních složek (při hledání výbušnin) dosahuje radiografie velkého uplatnění.

6 ÚVAHA NAD DALŠÍM VÝVOJEM NDT METOD VE STAVEBNICTVÍ

Radiografie, jejímiž perspektivami jsem se zabýval, tvoří sice významnou, ale jen malou část nedestruktivních metod využívaných ve stavebnictví. Nedestruktivní metody kontroly jsou obecně metody, které využívají různých fyzikálních principů na zjišťování požadovaných parametrů, které z různých důvodů (především z důvodu neporušení celistvosti zkoušeného předmětu), nelze určit přímým měřením (např. pevnost, vlhkost, přítomnost výztuže). Každá defektoskopická metoda má své hranice použitelnosti a neexistuje jediná metoda, která by umožnila stanovit všechny požadované parametry a druhy vad na stavební konstrukci. Mnohé zjišťované parametry (vady) stavebních konstrukcí lze zjišťovat různými metodami, založenými na zcela rozdílných fyzikálních základech (např. vlhkost lze zjišťovat gravimetricky, pomocí mikrovln, radiometricky, vodivostní metodou aj.) Na odbornících pak leží tíha volby a interpretace výsledků, protože jednotlivé výsledky se nemusí shodovat. Je proto snahou jednotlivé zkušební metody vhodně kombinovat, aby byly minimalizovány nepřesnosti, které mohou vzniknout při chybné interpretaci výsledků pouze jedné nedestruktivní metody. Tento vývoj má v naší zemi dlouholetou tradici, neboť již dříve v naší normě ČSN 73 1374 *Dvojparametrová nedeštruktivna metoda skúšania betónu* byla kombinována metoda Schmidtova tvrdoměru s ultrazvukovou průchodovou metodou na zjišťování pevnosti betonu. Tato norma však byla zrušena. Dalším příkladem může být kontrola rozložení výztuže v železobetonové konstrukci, kdy se běžně radiografická metoda kontroly kombinuje s kontrolou magnetickým indikátorem výztuže. Obě metody mají své výhody a nedostatky. V zahraniční literatuře se často uvádí kombinace georadaru a ultrazvukové odrazové metody na kontrolu přepínací výztuže v konstrukcích z předpjatého betonu a kvalitu zainjektování kanálků. Těchto kombinací se vyskytuje celá řada a závisí na zkušenostech a odborných znalostech pracovníka defektoskopie, jak získané výsledky bude interpretovat.

V současné době jsme svědky rychlé digitalizace výsledků měření, ze kterých, po počítačovém zpracování, se dá získat daleko více údajů, nežli to umožňovalo analogové vyhodnocování. Nové přístroje pro NDT již nelze zhotovovat „na koleně“ (až na výjimky) a malosériová výroba přístrojů a zkušebních zařízení u renomovaných firem je velmi drahá. Je proto nutno vědět kdo jednotlivé přístroje NDT vlastní (např. georadar), jaké jsou jejich parametry a v případě potřeby si tyto přístroje vypůjčit (i s obsluhou). A dále usilovat o opatření si pouze těch zařízení a přístrojů, o kterých víme, že budou využívány a budeme mít pro ně kvalifikovanou obsluhu.

Logická je proto úzká spolupráce mezi jednotlivými ústavy fakulty a to jak teoretickými (pro ověření funkčnosti nových zkušebních metod) tak praktickými, aby bylo zřejmé kam metody nedestruktivního zkušebnictví zaměřit a jaké parametry na konstrukci ověřovat. Nezbytná je i spolupráce s praxí, která též dává podněty jaké nedestruktivní metody kontroly vyvíjet. Právě pracovníci v nedestruktivním zkušebnictví mohou být oním spojovacím článkem při zavádění teoretických poznatků do praxe (např. využití metod akustické emise) a zpětně problémy praxe pomáhají přenášet a řešit teoreticky (zavedení metodiky kontroly délky zabudovaných kotevních šroubů ultrazvukem aj.). Velmi důležitá je však i spolupráce v úrovni mezinárodní, aby získané poznatky z rychle se rozvíjející techniky ve světě byly co nejdříve zaváděny do stavební praxe.

Tyto všechny problémy by měly být vzaty v úvahu při koncipování výuky studentů a při dalším vzdělávání pracovníků v NDT. Tito pracovníci by měli být totiž špičkovými odborníky ve svém oboru, ale současně by měli mít široký encyklopedický přehled o ostatních metodách kontroly a to nejen ve stavebnictví. Cílem přípravy a vzdělávání je tedy vytvořit v pravém slova smyslu „renesanční“ odborníky, kteří by měli být schopni posoudit v každém konkrétním případě, která zkušební metoda je optimální a aby vhodně interpretovali výsledky měření jednou nebo několika metodami.

7 VYBRANÉ PRÁCE AUTORA (ZE 148 PRACÍ)

7.1 PUBLIKACE VÝSLEDKŮ Z OBLASTI RADIOGRAFIE

1. HOBST, Leonard, HÖNIG, Arnošt. *Betatronografie konstrukcí z normálního železového betonu*. Závěrečná zpráva státního výzkumného úkolu P-12-121-001-03-03/03, 1976.
2. HOBST, Leonard. *Betatronografie konstrukcí z předpjatého betonu*. Závěrečná zpráva státního výzkumného úkolu P-12-333-224-E04-02-15-3, 1977.
3. HOBST, Leonard. *Zkušební, výpočtové a hodnotící postupy - Vyhodnocování radiogramů registračním fotometrem*. Závěrečná zpráva státního výzkumného úkolu P-12-333-224-04E02-16-5, 1977.
4. HOBST, Leonard. *Betatronografie předpjatého betonu*. In *Nedestruktivní zkoušení ve stavebnictví*. Brno : [s.n.], 1977. s. 79-82.
5. HOBST, Leonard. *Betatronografie konstrukcí z předpjatého betonu*. In *Skúšobníctvo v inžinierskom staviteľ'stve*, Bratislava : [s.n.], 1978. s. 41-45.
6. HOBST, Leonard. *Využití betatronografie pro průzkum stavebních konstrukcí*. *Inženýrské stavby*. 1981, č. 5, s. 205-210.
7. HOBST, Leonard. *The Radiographic Monitoring of Reinforcing Materials in Concrete Structures*. In *RILEM Long Term Observation of Concrete Structures*. Budapest: [s.n.], 1984. s. 226-235.
8. HOBST, Leonard. *Determination of the Course of Reinforcements in Selected Cross-Sections of Reinforced Concrete Structures by Non-Destructive Methods*. In *Special Session on Nuclear Related Methods for Nondestructive Testing in Civil Engineering*. Leipzig: Wissenschaftliche Berichte der TH Leipzig, 1994. s. 99-104.
9. HOBST, Leonard, MENCL, Vojtěch. *Radiography of Prestressed Concrete Structures. In Situ Behaviour of Structures*. Constanta : INCERC, 1986. s. 19-26.
10. HOBST, Leonard. *Radiografická kontrola konstrukcí z předpjatého betonu*. *Inženýrské stavby*. 1986, č. 10, s. 525-529.
11. HOBST, Leonard. *Ověření kvality zainjektování předpínací výztuže radiografií*. *Radioizotopy*. 1986, č. 2-3, s. 93-96.
12. HOBST, Leonard, HÖNIG, Arnošt, JANEČEK, Bohumír. *Complex Investigation of the Reinforced Concrete Structure of the Therapeutic Building IRMA in Piešťany Spa*. In *In Situ Behaviour of Buildings*. Arad : INCERC. 1988.
13. HOBST, Leonard. *Die Zerstörungsfreie Kontrolle der Bewehrungen in Stahlbetonkonstruktionen*. *Budapešť* : [s.n.], 1988. Seminář na Vysoké škole technické.

14. HOBST, Leonard. Bestimmung des Verlaufes von Bewehrungen in ausgewählten Querschnitten von Stahlbetonkonstruktionen durch zerstörungsfreie Prüfmethode. Leipzig : [s.n.], 1989.
15. HOBST, Leonard. Vývojové směry v radiografii stavebních konstrukcí. In Jakost a zkušebnictví ve stavebnictví. Brno : ČSVTS, 1989. s. 89-96.
16. HOBST, Leonard, HÖNIG, Arnošt, JANEČEK, Bohumír. *Radiometrie fyzikálních a mechanických vlastností stavebních materiálů a konstrukcí*. Výzkumná zpráva úkolu III-3-1/12-E04 03.1, 1990.
17. HOBST, Leonard, HÖNIG, Arnošt, VÍTEK, Lubomír, BECKER, Denise. *Další vývoj typové laboratoře pro radiografii v reálném čase*. Závěrečná výzkumná zpráva fakultního grantu č. 55.
18. HOBST, Leonard, HÖNIG, Arnošt, VALOŠEK, Petr. Radioscopy of Reinforced Concrete Panels. In Diagnosis of Concrete Structures. Bratislava : RILEM, 1991. s. 122–125.
19. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír. Využití radiografie při diagnostice železobetonových konstrukcí. In SANACE 93. Brno : SSBK, 1993. s. 262-268.
20. HOBST, Leonard. Non Destructive Testing Used in Searching Explosive Charges. In *DAMSTRUC 98*. Rio de Janeiro : UFF, 1998. CD-ROM.
21. HOBST, Leonard, GIRETH, Jan. Közúti híd robbantó kamráinak keresése a szerkezet megbontás nélküli ellenőrzésének módszerével Tábör városban. [Určení polohy míst pro destrukční nálože na silničním mostě v Táboře nedestruktivními metodami]. *Műszaki Katonai Köztöny*. 2001, č. 3-4, s. 3-12. ISSN 1219-4166.
22. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, ANTON, Ondřej. The Application of Non-destructive Testing to Reinforced Concrete Structures for a Ferrocement Sailing Boat. In *DAMSTRUC 2002*. Rio de Janeiro : UFF, 2002. CD-ROM.
23. HOBST, Leonard, ANTON, Ondřej, ŠTĚPÁNEK, Petr, et. al. Radiographic Control of Reinforcement in Damaged Roof Trusses of Industrial Hall. In *IIIrd Workshop NDT in Progress* (International Meeting of NDT Experts). Praha : CNDT, 2005. ISSN 1213-3825. DVD.
24. HOBST, Leonard. Important Role of Radiography for Determination of Conditions in reinforced Concrete Constructions (Významná úloha radiografie při určování stavu železobetonových konstrukcí). *Engenharia Estudo e Pesquisa*. Fluminense (BR): vol.9, N° 1, 2007. ISSN 1415-3025. s. 37-43
25. HOBST, Leonard. Možnosti využití radiografie při posuzování stavu železobetonových konstrukcí. In „Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2007“. Praha: Kloknerův ústav ČVUT, 2007. s. 171-178. ISBN 978-80-01-03794-2.

7.2 PUBLIKACE VÝSLEDKŮ Z OBLASTI STAVEBNÍ OCHRANY PŘED ZÁŘENÍM

1. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, DAŇKOVÁ, Marcela. Vývoj stínících vrstev pro ochranu rentgenových pracovišť. In SANACE 94. Brno : SSBK, 1994.s. 219-223.
2. HOBST, Leonard, a kol. ÚRD. Soubor dílčích zpráv o řešení grantového projektu č. 103/93/0929 „Podzemní úložiště vyhořelého paliva z jaderných elektráren“ (koordinátor prof. J. Bradáč), etapa *Inženýrské bariéry podzemních jaderných zařízení*. Dílčí zprávy za období 1993–1995.
3. HOBST, Leonard. Výskyt radonu ve vnitřním i vnějším prostředí obytných budov. In URBIS 95. Brno : BVV, 1995. s.75-77
4. HOBST, Leonard. Výskyt radonu v obytných budovách a technická ochrana proti radonu. In Stavebnictví městům a obcím. Brno : [s.n.], 1996. s. 29-31.
5. HOBST, Leonard. Betonáž stínících konstrukcí pro lineární urychlovače a jejich kontrola. In SANACE 96. Brno : SSBK, 1996. s. 76-81. ISSN 1211-3700.
6. HOBST, Leonard. Design and Inspection of Shielding Enclosures for Linear Accelerators. In *In situ Behaviour of Constructions*. Brasov : INCERC, 1996. s. 145–151.
7. HOBST, Leonard. Beton jako stínicí materiál kontejnerů pro vyhořelé jaderné palivo. In Podzemní skladování vyhořelého jaderného paliva. Ostrava : FAST VŠB TU, 1999. s. 88-94. ISBN 80-7078-707-4.
8. HOBST, L. *Optimalizace stavebních ochran v souvislosti se zdroji ionizujícího záření*. Závěrečná zpráva pro SÚJB Praha, 1999.
9. HOBST, Leonard. Úvod do problematiky návrhu a výroby těžkých betonů. In „Speciální betony“ (Vlastnosti – Technologie Aplikace). Otrokovice : SEKURKON Praha, 2002. s. 184-191. ISBN 80-86604-00-4.
10. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, ŠTĚPÁNEK, Petr. Zvyšování účinnosti stínících konstrukcí lineárních urychlovačů. SANACE 02. Brno : SSBK, 2002. s. 45–50. ISSN 1211-3700.
11. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, ŠTĚPÁNEK, Petr. An Increase of Shielding Construction Efficiency for Linear Accelerators. In *DAMSTRUC 2002*. Rio de Janeiro : UFF, 2002. CD-ROM.
12. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, ANTON, Ondřej. Poruchy ferobarytových stínících konstrukcí. In *CONSTRUMAT 2006*. Račková dolina : SPU v Nitre, 2006. ISBN 80-8069-747-7. CD-ROM.
13. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, ANTON Ondřej. The application of radiometric Method for quality assessment of linear accelerator shielding structures. In *IV. Pan-American Conference for NDT*. Buenos Aires: AAENDE, 2007. ISBN 978-987-23957-0-4. CD-ROM

14. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, ANTON, Ondřej. The application of radiometric method for quality assessment of linear accelerator shielding structures. *NDT Database & e-Journal of Nondestructive Testing* [on line]. 2007, November, ID: 4620. ISSN 1435-4934. Dostupný z WWW: <http://www.ndt.net/>

7.3 DESET NEJVÝZNAMNĚJŠÍCH PRACÍ

1. HOBST, Leonard. The Radiographic Monitoring of Reinforcing Materials in Concrete Structures. In *RILEM Long Term Observation of Concrete Structures*. Budapest: RILEM, 1984. s. 226-235.
2. HOBST, Leonard, HÖNIG, Arnošt, JANEČEK, Bohumír. Complex Investigation of the Reinforced Concrete Structure of the Therapeutic Building IRMA in Piešťany Spa. In *In Situ Behaviour of Buildings*. Arad : INCERC. 1988.
3. HOBST, Leonard, HÖNIG, Arnošt, VALOŠEK, Petr. Radioscopy of Reinforced Concrete Panels. In *Diagnosis of Concrete Structures*. Bratislava : RILEM, 1991. s. 122–125.
4. HOBST, Leonard, at al. *Provizoria dopravních staveb (pro území postižená přírodními katastrofami)*. Praha: ŠEL, 1999. 116 s. Technická knihnice autorizovaného inženýra a technika, řada C. ISBN 80-902697-1-0.
5. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, ŠTĚPÁNEK, Petr. An Increase of Shielding Construction Efficiency for Linear Accelerators. In *DAMSTRUC 2002*. Rio de Janeiro : UFF, 2002. CD-ROM.
6. HOBST, Leonard. Radiometrická kontrola stínících vlastností stěn „horké komory“. *Soudní inženýrství*. 2003, roč. 14, č.1, s. 15-19. ISSN 1211 - 443X.
7. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír. Betony pro konstrukce stínění zdrojů ionizujícího záření. *BETON TKS*. 2003, roč. 3, č. 6, s. 18-20. ISSN 1213-3116.
8. HOBST, Leonard. Ochrana proti radonu. In VLČEK, M., Puchýř, B., et al. *Praktická příručka technických požadavků na výstavbu*. Praha: Verlag Dashöfer, 2004, s. 1-40. ISBN 8086229-20-3.
9. HOBST, Leonard, VÍTEK, Lubomír, ANTON, Ondřej, et. al. Critical Defects, Diagnostics and Repair of Roof Trusses in Industrial Hall. In *DAMSTRUC 2005*. Joao Pessoa: UFF, 2005. CD-ROM.
10. HOBST, Leonard. Problematika radonu a ozdravná opatření. In Bradáč, A., Fiala, J., et al. *Rádce majitele nemovitostí*. 2. vyd. Praha: LINDE, 2006. s. 628 – 643. ISBN 80-7201-582-6.

8 ABSTRACT

Radioactivity and X-rays were discovered more than one century ago, nevertheless, the discovery has affected the development of the mankind in all areas of national economy. It has strongly contributed to an improvement and development of new diagnostic and therapeutic methods in medicine as well as to the development of new methods of non-destructive testing in engineering.

The author started with his scientific work at Brno University of Technology by improving already introduced methods of radiography and radiometric testing. Radiation sources, which were available for defectoscopy at that time, did not make possible to investigate concrete constructions with a thickness greater than 20 cm, and hence, the author has included into his research programme the verification of capabilities and development of the methods of more intensive radiation source applications. For research, the PMB-6 betatron was used. After investigation of the apparatus characteristics and physical properties of its radiation, especially the laws of radiation attenuation during radiation penetration through the matter with different densities, the author derived the equation for radiation attenuation by means of the effective mass attenuation coefficient for the bremsstrahlung of the betatron. He also found that the radiation betatron beam has a low homogeneity, and but on the other sight, the quality of betatronograms is favourably affected by the intensifying foils of different composition. He paid greater attention to the application of this effect. He also derived the exponential equation for turning black of betatronograms, and the results have been applied in the methods of objective betatronogram evaluation.

Development and application of new shielding materials for the radiographic shields (e.g. depleted uranium) allowed using gamma sources in radiography with high energies and high activities (e.g. Co-60) in 1980s for which radiation penetrated through concrete thicknesses comparable with the thicknesses of betatron applications (i.e. 40 to 50 cm). However, the development of betatrons has not been ceased, and today's models of betatrons produced in the Research Institute of Introscopy in Tomsk have achieved up to twenty-times of the dose rate compared to the betatrons produced 20 years ago with the same weight. Their radiation can penetrate through concrete structures up to a thickness of 1 m. Hence betatrons again become the perspective sources of high energy radiation.

New imaging devices have significantly affected the radiography development, especially the capture plates which have greater dynamics compared to radiographic films. Their images are directly digitized and can be directly processed and modified on PCs. The computer processing can give better resolution of irregularities and inhomogeneities in the materials tested.

It can be stated that the development of radiography has not been finished, and the application of radiography will be promoted even to other branches of human activities.