

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}.$$

(To odgovara aktivitetu količine od 0,66 mm³ radona, pod standardnim uvjetima, u ravnoteži s 1 g radijuma.)

Integriranjem jednadžbe (1) dobiva se:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

zakon radioaktivnog raspada, koji kaže koliko se je jezgara od na početku prisutnih raspalo za vrijeme t . S pomoću te jednadžbe definira se veličina koja se namjesto λ' često upotrebljava za karakterizaciju radioaktivnih tvari, tzv. *vrijeme poluraspada* $t_{1/2}$, tj. vrijeme koje je potrebno da bi se raspala polovica ispočetka prisutnih jezgara. Iz jedn. (2) slijedi, sa $N = 0,5 N_0$: $t_{1/2} = 0,693/\lambda$.

U defektoskopiji se upotrebljavaju isključivo radioizotopi jer su neuporedivo jeftiniji od prirodnih radioaktivnih elemenata.

$$I_d = I_0 B \cdot \exp(-\mu_{ef} d),$$

gdje je I_d intenzitet primarnih i sekundarnih zraka nakon prolaza kroz materijal, I_0 intenzitet svih primarnih zraka, μ_{ef} efektivni apsorpcijski koeficijent, a B tzv. »build up«-faktor. Ovaj faktor je funkcija geometrije prozračavanog materijala i približno je:

$$\text{za čelik } B_{Fe} = (1 + \mu_{Fe} \cdot d), \text{ za olovo } B_{Pb} = \frac{(1 + \mu_{Pb} \cdot d)}{2}.$$

Zrake veće valne dužine (kvanti manjih energija) brže se apsorbiraju u materijalu od zraka manje dužine vala. Zbog toga je njihov udio u spektru zračenja s porastom debljine sve manji. Ova se pojava naziva *filtracijskim efektom* materijala. Filtracijski efekt je naročito izražen kod materijala velikih atomskih težina. U praksi se to iskorištava pri upotrebi olovnih folija za reduciranje sekundarnog zračenja.

Tablica 3
KARAKTERISTIKE GAMA-IZVORA

Radioizotop	Vrijeme poluraspada	Energija radijacije, MeV		Metoda dobivanja	Specif. vol. aktivnost, Ci cm ⁻³	Gama radijacija R h m Ci ⁻¹	Ekv. radija: 1 Ci odgovara g	Vrijednost poludebljine mm Pb
		β	γ					
Co-60	5,3 godina	0,31 (100%)	1,33 (100%) 1,17 (100%)	⁶⁰ Co (n, γ) ⁶⁰ Co	620	1,35	1,6	13
Ir-192	74,4 dana	0,24 (11%) 0,54 (41%) 0,67 (48%)	brojne od 0,137 do 0,651	¹⁹² Ir (n, γ) ¹⁹² Ir	370	0,55	0,65	2
Cs-137	30 ± 3 god.	1,17 (8%) 0,51 (92%)	0,66 (100%)	proizvod radioaktivnog raspada	100	0,39	0,42	8

Tablica 3 prikazuje usporedne karakteristične veličine za tri najčešće upotrebljavana radioizotopa: kobalt-60 (⁶⁰Co), iridijum-192 (¹⁹²Ir) i cezijum-137 (¹³⁷Cs).

U defektoskopiji prozračavanjem nije moguće praktično koristiti se pojavama prelamanja i totalne refleksije X- i gama-zraka jer ne postoje tehnička sredstva (leće, prizme, zrcala) kojima bi se ove zrake mogle skupljati ili usmjeravati. Kao i vidljivo svjetlo, X- i gama-zrake prolaze pravocrtno kroz materiju uz pojavu djelomične apsorpcije. Zavisno od valne dužine (energije kvanta zračenja) proces apsorpcije može biti posljedica triju različitih efekata: foto-efekta, Comptonovog efekta i procesa stvaranja para elektrona. Kod fotoefekta se X- ili gama-kvant u potpunosti apsorpira, a izbija se ubrzani elektron — *fotoelektron*. U Comptonovom efektu dolazi do kvanta promijenjenog smjera s energijom manjom od energije primarnog X- ili gama-kvanta. Javlja se i ubrzani elektron, tzv. Comptonov elektron. Procesom stvaranja para kvant se potpuno apsorpira a nastaju ubrzani pozitron i elektron (v. također *Biološki štiti*, TE 2, str. 84, i *Dozimetrija jonizujućeg zračenja*).

Rasipane zrake apsorbiraju se u materiji također uz pojavu navedenih efekata. Što je duži put rasipanih kvanta u materijalu veća je i vjerojatnost ponovnog i daljnjeg rasipanja. Intenzitet i kvalitet zraka rasipanih prilikom prolaza kroz neki materijal zavisi od geometrije prozračavanog komada (*volumski efekt*). Efekt ovih zraka u materijalu je isti kao efekt ubrzanih elektrona na antikatodi rendgenske cijevi. Rasipno zračenje i zračenje nastalo kao posljedica foto-elektrona, Comptonovog elektrona i elektrona iz procesa tvorbe para, zove se zajedničkim imenom *sekundarno zračenje*.

Intenzitet zraka opada po dubini prozračavanog materijala. Ako je debljina materijala koji prozračavamo d , intenzitet zraka na izlazu iz materijala bit će

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d} \quad [I = I_0 \exp(-\mu d)],$$

gdje je I_0 ulazni intenzitet zraka, I intenzitet na izlazu iz materijala a μ linearni koeficijent apsorpcije, direktno proporcionalan četvrtoj potenciji atomskog broja prozračavanog materijala i trećoj potenciji valne dužine primarnih zraka.

Kod prozračavanja materijala zračenje će, međutim, biti sastavljeno od više komponenata različitih valnih dužina primarnih zraka uz jako prisustvo sekundarnih zraka nastalih u procesu apsorpcije. Zakon apsorpcije ovakvog zračenja može se prikazati izrazom

Greška koja se eventualno nalazi u prozračavanom materijalu ima sigurno atomski broj različit od atomskog broja materijala. Po pravilu je (naročito kod prozračavanja čelika i težih metala) ova razlika znatna. Zbog toga će, a prema gornjim izrazima, intenzitet zraka koje prolazeći kroz materijal naidu na grešku biti različito umanjen, te će se moći na izlazu iz materijala registrirati ili mjeriti. Ovo svojstvo predstavlja osnovu defektoskopske kontrole metodama prozračavanja.

Područje upotrebe metoda prozračavanja. Od svih tehnika defektoskopskog pregleda metodama prozračavanja najrasprostranjenija i najviše upotrebljavana je *filmska radio- ili gamagrafija*. Intenzitet zraka na izlazu iz materijala stvara na filmu jaču ili slabiju latentnu sliku koja se nakon razvijanja očituje kao vidljiva razlika u zacrtnjenju filma.

Tehnika fluorografije zasnovana je na principu fluorescencije zaslona od odgovarajućeg materijala (npr. cink-sulfida ZnS), kada na njega padnu X- ili gama-zrake nakon prolaska kroz ispitivani materijal. Mjesta grešaka u materijalu očituju se kao svjetlije mrlje na zaslonu. Nedostatak ove tehnike je relativno velika neoštrina, pa se zbog toga dosta rijetko upotrebljava u industrijskoj defektoskopiji.

Kseroradiografska tehnika osniva se na promjeni vodljivosti poluvodiča pod djelovanjem zračenja. Ekspozirane ploče razvijaju se posipavanjem posebnim praškovima, a slika se pojavljuje u obliku reljefa. Ova tehnika, zbog svoje prilične kompliciranosti, uglavnom nije izašla iz okvira laboratorijske primjene.

Tehnike prozračavanja s upotrebom Geiger-Müllerovih, scintilacionih brojača itd. u novije se vrijeme sve više upotrebljavaju. Njihovo područje upotrebe, međutim, strogo je ograničeno na neke velikoserijske ili masovne proizvodnje sa specijalnim, skupim uređajima (većinom vezanim sa rekorderima, automatikom i signalizacijom) bez kojih ne mogu biti normalno u upotrebi.

Filmska radiografija ima nekoliko osnovnih prednosti koje su uvijekvale njenu vrlo široku primjenu u industrijskoj defektoskopiji. Najvažnije prednosti jesu: a) dobra vidljivost površinskih, potpovršinskih i unutrašnjih grešaka; savremenim razvojem naučnih saznanja i tehničkih mogućnosti za ovu tehniku omogućeno je pouzdano otkrivanje i određivanje grešaka kojih veličina ne prelazi 1,5 do 2% debljine prozračavanog materijala; b) ovom tehnikom dobiva se trajan dokument (film) kojim se može naknadno utvrđivati i uspoređivati nivo kvaliteta kontroliranog predmeta; to predstavlja naročitu pogodnost kad kvalitet proizvoda kontro-

lira osim kontrolnog organa proizvođača još i neko drugo kontrolno ili inspeksijsko tijelo, ili kad treba usporediti kvalitet proizvoda (npr. posuda pod pritiskom, mostova) odmah po proizvodnji i nakon određenog vremena eksploatacije; c) ovom su tehnikom snimanje i interpretacija rezultata vremenski odijeljeni, stoga za provođenje ovog tipa kontrole nije potreban velik broj visokostručnog ili visokospecijaliziranog kadra: snimanje i obradu filma može vršiti priučeni radnik, a specijalisti uglavnom određuju elemente kontrole i pregledavaju snimke; d) kod proizvodnje većeg broja istih dijelova ili proizvoda istih ili sličnih debljina stijenki ovom tehnikom omogućen je rutinski rad, a upotrebom panoramskog snimanja može se istovremeno kontrolirati veći broj proizvoda ili veća površina.

Pored navedenih prednosti, metode prozračavanja imaju i određena ograničenja u industrijskoj upotrebi i izvjesne nedostatke. To su, uglavnom, ovi:

a) Uredaji za provođenje kontrole metodama prozračavanja relativno su skupi, pribor za snimanje i pregled filmova zahtijeva stalno nova financijska ulaganja, uredaji za zaštitu od zračenja i tamna komora za obradu filmova također predstavljaju velike investicione troškove. Prema tome upotreba ovih metoda ograničena je uglavnom na veće tvornice, u kojima je omogućeno njihovo korištenje za kontrolu cijelog proizvodnog programa ili bar većine proizvoda, ili velike specijalizirane defektoskopske laboratorije koje vrše također usluge za manje tvornice ili tvornice koje trebaju kontrolu samo malog dijela proizvoda ovim metodama.

b) Cijena filma i ostalog potrebnog potrošnog pribora te amortizacija investicionih ulaganja ograničava upotrebu ovih metoda kontrole na proizvode s većom pojedinačnom vrijednošću. Prema novijim podacima udio ukupnih troškova kontrole kod vrlo visokih klasa proizvoda (avijacija, energetika, atomska energija) ne prelazi vrijednost od 25% cijene takvih proizvoda. Udio cijene kontrole u ukupnoj cijeni jednostavnijih proizvoda, koji se izrađuju masovno, mora biti znatno niži.

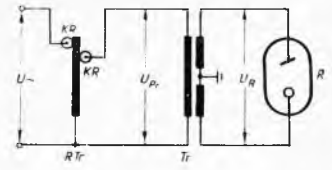
c) Debljina prozračenog proizvoda također predstavlja izvjesno ograničenje. S porastom debljine rastu i potrebe za sve jačim

u debljini. Zacrtnjenja filma najpovoljnija za dobru ocjenu snimke kreću se između $S = 1,5$ i $S = 2,5$. U slučaju veće razlike u debljini stijenke razlika u zacrnjenju na filmu bit će tolika da će otežati ili onemogućiti interpretaciju rezultata kontrole. Praktički maksimalno dopustiva razlika u debljinama stijenki kod upotrebe rendgena iznosi $\sim 20\%$. Pri upotrebi radioizotopa dopustiva razlika je nešto veća.

e) Određeni tipovi grešaka male debljine (npr. pukotine, dvoslojnost), postavljenih poprečno na smjer zračenja, vrlo se teško otkrivaju metodama prozračavanja.

Uredaji, pribor i postupci ispitivanja prozračavanjem. Moderni uredaji za emitiranje X-zraka (rendgenski aparati, »rendgeni») proizvode se danas u velikom broju tipova. U tablici 4 navedeni su samo neki najuobičajeniji od njih. Klasični rendgenski aparati proizvode se za srednje energije (80–400 kV maksimalne energije) i to uglavnom u dvije osnovne izvedbe: kao lako prenosivi, tzv. polualvalni, i kao stacionarni — istosmjerni. Osim klasičnih rendgenskih aparata, u defektoskopiji se upotrebljavaju kao izvori X-zraka također visokonaponski rendgenski aparati i betatron.

Polualvalni rendgen-aparati. Pojednostavnjenu shemu polualvalnog rendgenskog aparata prikazuje slika 1. Mrežni napon U prilagođuje se kliznim regulatorom KR na regulacionom transformatoru RTr, koji istovremeno služi za regulaciju napona U_{PR} na primarnom namotaju visokonaponskog transformatora Tr. Krajevi sekundarnog namotaja visokog napona U_R spojeni su s rendgenskom cijevi R. Visokovakuumska rendgenska cijev djeluje kao ventil i emitira struju elektrona samo u poluperiodi kad antikataka (anoda) ima prema katodi pozitivni potencijal. Zbog iskorištenja samo jedne poluperiode (polovice jednog vala) ovakav spoj, a prema njemu i aparat, zove se polualvalni.



Sl. 1. Shema polualvalnog rendgenskog aparata

Tablica 4

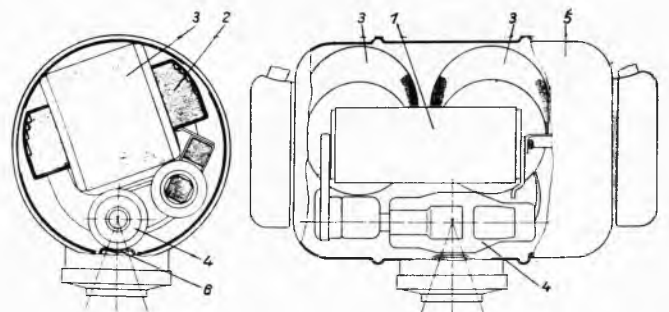
PODRUČJA OPTIMALNE UPOTREBE IZVORA ZRAČENJA

Vrsta zračenja	Izvor zračenja	Debljina prozračavanja mm Fe		Faktor množenja za					
		rutinski rad	max.	Al	Cu	Zn	Mjed	Pb	
X	Polualvalni rendgen	100 kV	0...8	15	12	0,67	—	—	—
	„ „	150 kV	0...20	40	7,7	0,62	0,71	0,71	0,07
	„ „	200 kV	6...30	60	7,1	0,71	0,75	0,77	0,08
	Istosmjerni rendgen	300 kV	6...50	100	—	0,71	0,77	0,77	—
	„ „	400 kV	10...75	125	—	0,71	0,77	0,77	—
	Rezonantni transformator	1 i 2 MV	50...125	200	—	—	—	0,83	0,2
	Van de Graaff generator	1 i 2 MV	50...125	200	—	—	—	0,83	0,2
Linearni akcelerator	3...8 MeV	70...200	250	—	—	—	—	0,4	
Betatron	8...35 MeV	70...250	400	—	—	—	—	—	
γ	Co-60	30...100	200	2,9	0,91	1,0	0,91	0,43	
	Cs-137	15...75	120	2,9	0,91	1,0	0,91	0,36	
	Ir-192	8...50	100	2,9	0,91	0,91	0,91	0,25	

(i skupljim) uredajima, koji bi bili sposobni kontrolirati određenu količinu proizvoda kroz prihvatljivo dugo vrijeme. U tablici 4 dat je pregled izvora sposobnih za defektoskopiju određenih debljina u čeliku. Maksimalne vrijednosti debljina prozračavanja iz tablice mogu se postići jedino ekstremnim snagama izvora i vrlo dugim vremenima ekspozicije uz upotrebu (za rendgene) visokopojčavajućih solnih folija. Za ostale materijale, zbog različitog koeficijenta apsorpcije, može se tablica 4 upotrijebiti (osim za maksimalne vrijednosti) ako se vrijednosti debljine pomnože s koeficijentima, ekvivalentima čelika, navedenim za nekoliko neželjenih metala. Ostali elementi snimanja (razmak izvor-film, vrijeme ekspozicije itd.) ostaju pri tom nepromijenjeni. S povećanjem debljine prozračenog materijala naglo raste i vrijeme ekspozicije. To je naročito izraženo pri upotrebi gama-izvora. Prilikom kalkuliranja broja potrebnih uredaja za predviđenu količinu kontrole treba ovaj moment imati posebno u vidu.

d) Defektoskopija prozračavanjem u izvjesnoj je mjeri nepodesna za kontrolu proizvoda čije stijenke pokazuju velike razlike

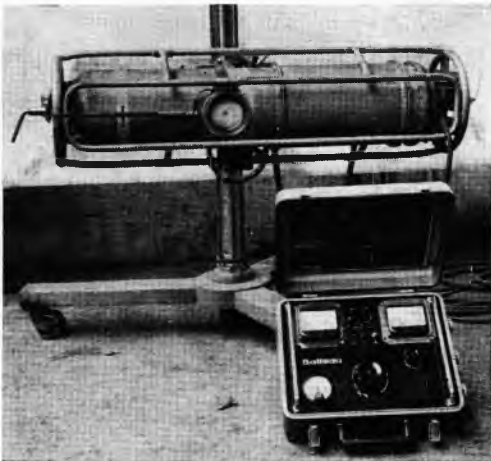
Glavne odlike polualvalnih rendgenskih aparata jesu male dimenzije i reducirana težina, tako da su vrlo podesni za transport. Mogućnost transportiranja uvjetovala je posebna tehnička rješenja i robustnost izrade radi odolijevanja udarcima tokom prevoza.



Sl. 2. Polushematski presjek zračnika polualvalnog rendgenskog aparata

Dio rendgenskog aparata u kojem se nalazi rendgenska cijev naziva se *zračnikom*. Zračnik se poluvalnih aparata (sl. 2) obično sastoji od visokonaponskog transformatora (1) sa posebno izvedenom zatvorenom jezgrom (2) i namotajima (3), rendgenske cijevi (4), transformatora za grijanje katode rendgenske cijevi i dobro zabrtvljenog kućišta (5) na kojem se nalazi prozor za prolaz izlazećeg zračenja (6). Gabaritne dimenzije kućišta zračnika svih suvremenih poluvalnih aparata u poprečnom presjeku su reducirane na veličinu standardiziranih otvora za prolaz čovjeka na tlačnim posudama, koji ima oblik elipse 300 × 400 mm. Ulje visoke otpornosti na proboj kojim je zračnik obično punjen (pod vakuumom, kako bi se izbjeglo da u zračniku zaostane zrak) ima svrhu da električki izolira i da prenosi toplinu radi efikasnijeg hlađenja. Za bolje hlađenje antikatode neki tipovi poluvalnih rendgena imaju ugrađenu u zračnik i malu cirkulacionu pumpu koja injektira ulje u posebne kanale u rendgenskoj cijevi. U najnovije vrijeme zračnici nekih tipova poluvalnih aparata manjih energija hlade se plinom.

Zračnik je višezilnim kabelom niskog napona, dužine obično 10-30 metara, spojen s kontrolno-komandnom tablom. Zbog lakšeg prenošenja ova se izvodi u obliku kovčega. Na kontrolno-komandnoj tabli nalaze se ručice za podešavanje i instrumenti za kontrolu mrežnog napona, primarnog napona visokonaponskog transformatora i struje u rendgenskoj cijevi, mrežni prekidač,

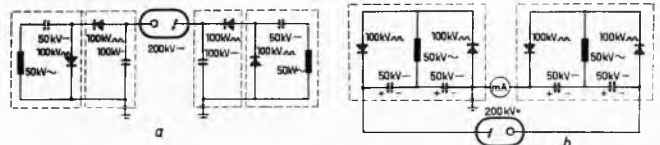


Sl. 3. Poluvalni rendgenski aparat Baltospot 3005/5D. Zračnik aparata hlađen Freonom

prekidač (indirektni) visokog napona i sat za ekspoziciju. Izgled rasporeda komandi i instrumenata za kontrolu na tabli poluvalnog aparata 300 kV prikazan je na sl. 3.

Zračnici poluvalnih aparata osim za usmjereno zračenje proizvode se i za tzv. panoramsko snimanje. Antikatoda rendgenske cijevi ovih aparata izvedena je u obliku plašta stošca. Zračenje je po cijelom opsegu s kutom snopa X-zraka najčešće od 15 do 45°. Cijev je izduženog oblika i ima koničnu antikatodu na kraju. Antikatoda je hlađena odvojenim zatvorenim cirkulacionim sistemom s izmjenjivačem topline, a medij za hlađenje je voda. Osim sistema s isturenom anodom postoje i izvedbe s panoramskom antikatodom u centru zračnika. Ovakve izvedbe obično nemaju posebnog hlađenja. Zračnici za panoramsko snimanje imaju prednost u upotrebi kod cilindričnih oblika (kolonâ, posuda pod pritiskom i sl.) i za istovremeno snimanje većeg broja jednakih proizvoda malih dimenzija, jer se tim simultanim snimanjem postiže ušteda vremena.

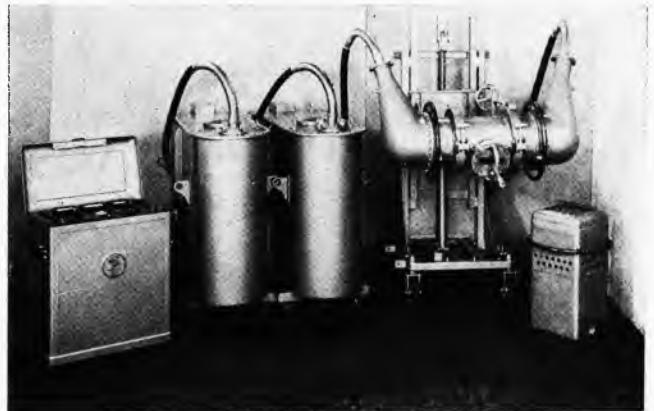
Istosmjerni rendgen-aparati. Osnovni nedostatak poluvalnih aparata, intermitentni rad zbog toga što se koristi samo pozitivna poluperioda, uspješno je uklonjen kod istosmjernih aparata. Danas se istosmjerni aparati srednje snage (do 400 kV) izvode u dva principijelno različita spoja, ali s približno istim efektom. *Villardov spoj* (sl. 4a) u stvari je osnovni spoj za postizanje udvojenog istosmjernog pulzirajućeg napona s dodatkom za smanjenje amplitude pulziranja, a *Greinacherov spoj* (sl. 4b) ispravlja obje poluperiode izmjeničnog napona uz istovremeno udvajanje napona.



Sl. 4. Sheme spoja istosmjernih rendgenskih aparata. a Villardov spoj s dodatkom za izgladivanje, b Greinacherov spoj

U oba spoja ispravljanje se vrši visokovakuumskim ispravljačicama (ventilskim cijevima) ili, u najnovije vrijeme, pomoću silicijumskih dioda.

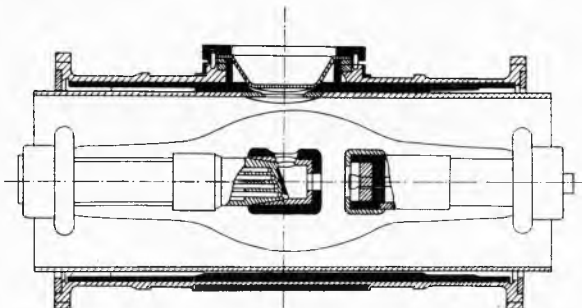
Visokonaponski transformatori, ventilske cijevi i kondenzatori za udvajanje visokog napona istosmjernih aparata ugrađeni su u zasebne dobro zabrtvljene posude ispunjene uljem visoke otpornosti na proboj. Svaki aparat ima dva ovakva generatora visokog napona (sl. 5), jedan s pozitivnim a drugi s negativnim potencijalom na vanjskom izvodu (v. i sl. 4). Rendgenska cijev je spojena



Sl. 7. Sastavni dijelovi istosmjernog rendgenskog aparata (Seifert-Isovolt 400). Slijeva nadesno: kontrolno-komandni stol, generatori visokog napona, zračnik sa stativom i pumpa za hlađenje antikatode

s generatorima pomoću savitljivih specijalnih kablova. Na krajevima cijevi nalazi se, dakle, napon jednak sumi potencijala obaju generatora.

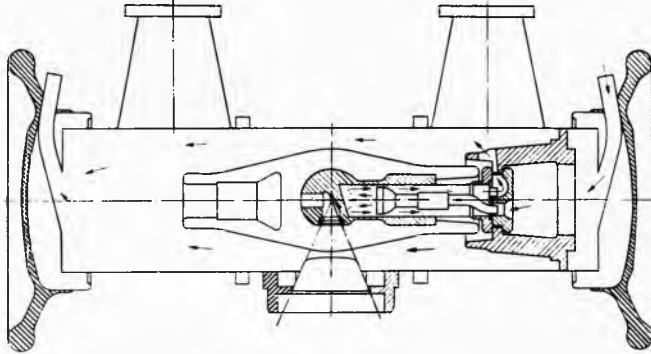
Rendgenska cijev istosmjernih aparata, za razliku od cijevi poluvalnog aparata, ima neprekinut tok elektronskog mlaza na antikatodi. Time je antikatoda toplinski daleko više opterećena, pa je bilo potrebno pobrinuti se za uspješno odvođenje topline. To se izvodi na više načina, od kojih je jedan prikazan na sl. 6. Medij za hlađenje antikatode, najčešće ulje, crpe se iz posebnog rezervoara pumpom i brizga kroz sapnice na stražnju stijenku antikatode. Ulje preuzima na sebe dio topline i vraća se kroz povratne



Sl. 6. Presjek zračnika istosmjernog rendgenskog aparata. (Vide se kanali za prolaz ulja kojim se hladi antikatoda.)

kanale u rezervoar. Zračnik aparata, u kojem se nalazi samo rendgenska cijev sa priključcima, ispunjen je uljem za izolaciju i hlađenje, i dobro je zabrtvljen. Sličnu konstrukciju, ali u kojoj sva količina ulja iz zračnika i rezervoara sudjeluje u odvođenju topline, prikazuje sl. 7. Ulje iz rezervoara najprije se posebno konstruiranim kanalima brizga na antikatodu, a nakon toga prolazi kroz zračnik i vraća se u rezervoar.

Istosmjerni aparati redovito se izvode za usmjereno zračenje. No postoje i izvedbe u kojima se upotrebljava samo jedan generator visokog napona (minus-pol) s posebno konstruiranim zračnikom za panoramsko zračenje, a antikatoda rendgenske cijevi je uzemljena.

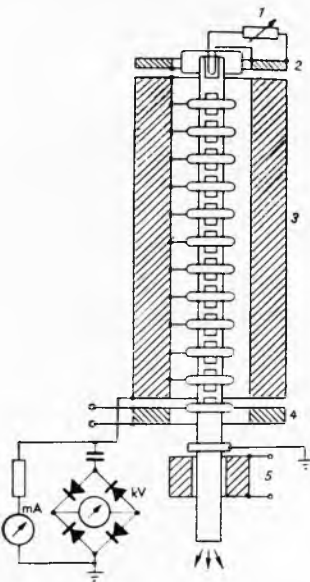


Sl. 7. Sistem hlađenja zračnika s potpunom cirkulacijom (TUR M200 — VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden)

Kontrolno-komandni stolovi istosmjernog aparata i poluvalnog aparata ne razlikuju se u načelu, ali stol istosmjernog aparata ima više kontrola, redovito svjetlosnih (uključena pumpa za ulje, kontrola cirkulacije ulja, kontrola uključenog grijanja katode itd.), i dosta velik broj sigurnosnih ili razvodnih releja za osiguranje od eventualnih nepravilnosti u radu aparata.

U posljednjih nekoliko godina za hlađenje i izolaciju zračnika ulje se uspješno zamjenjuje inertnim plinom. Tako firma Balteau iz Belgije proizvodi aparate od 320 i 400 kV u tzv. »monatank«-izvedbi, bez visokonaponskih generatora, gdje su svi visokonaponski dijelovi ugrađeni u zračnik zajedno s rendgenskom cijevi i hlađeni sistemom cirkulacije inertnog plina (Freona) u zračniku. Ovo svakako predstavlja poboljšanje u izvedbi, jer su visokonaponski kabeli najosjetljiviji dio istosmjernih rendgenskih aparata.

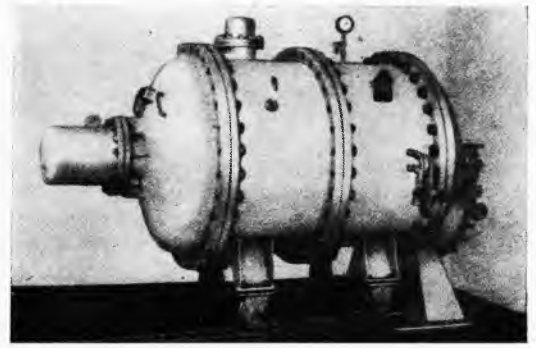
Visokonaponski rendgen-aparati. Za veće energije zračenja grade se u svijetu dva tipa visokonaponskih rendgenskih aparata. U industrijskoj primjeni u Evropi nalazi ih se vrlo malo, ali su u USA dosta rašireni. To su rezonantni transformator i van de Graaffov generator. Oba se temelje na principu linearnog ubravanja elektrona, a razlikuju se po tome što rezonantni transformator emitira intermitirajuće zračenje kao poluvalni rendgenski aparat, a emitiranje van de Graaffova generatora je neprekidno.



Sl. 8. Shematski prikaz rezonantnog transformatora

Principijelna shema rezonantnog transformatora prikazana je na sl. 8. Primarni namotaj (4), radi veće indukcije, radi s frekvencijom višom (obično trostrukom) od mrežne. Sekundarni namotaj visokog napona (1...2 MV) podijeljen je na velik broj sekcija induktivno vezanih s primarnom konstrukcijom bez jezgre i spojen sa sistemom ispravljača. U sredini transformatora smještena je rendgenska cijev grijana posebnim namotajem 2. Emitirani elektroni ubrzavaju se sistemom prstenova pod visokim potencijalom, usmjeravaju (fokusiraju) posebnim namotajem 5 i na izlazu iz cijevi udaraju u antikatodu. Cijeli sistem ugrađen je u nepropusnu posudu punjenu freonom, koji pomoću pumpe cirkulira i hladi, a istovremeno djeluje kao električki izolator.

Princip rada van de Graaffova generatora objašnjen je na drugom mjestu u ovoj enciklopediji (v. *Akceleratori nuklearnih*



Sl. 9. Van de Graaffov generator 2 MeV za defektoskopiju (VEB Transformatoren- und Röntgenwerke, Dresden)

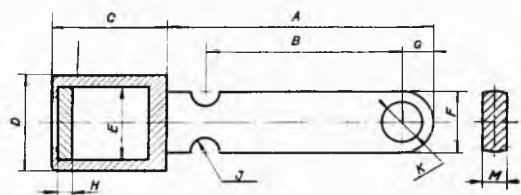
čestica, TE 1, str. 40). Izgled izvedbe jednog van de Graaffova generatora za defektoskopiju 2 MW prikazan je na sl. 9.

Betatron. Dok kod klasičnih rendgenskih aparata i visokonaponskih aparata ubravanje elektrona nastaje kao posljedica naponskog stanja, betatron se zasniva na ubravanju elektrona pod utjecajem promjenljivog magnetskog polja. Princip djelovanja betatrona također je već na drugom mjestu objašnjen (v. *Akceleratori nuklearnih čestica*, TE 1, str. 42). Stepenn iskoristivosti energije za betatron daleko je veći nego za rendgen. Dok se od ukupno emitirane energije rendgenskog aparata jedva 2% pretvara u zračenje, za betatron od 15 MeV ovaj udio iznosi 40%. Za potrebe defektoskopije u svijetu se proizvode betatroni energije 5...35 MeV. Sl. 12 prikazuje tipični defektoskopski betatron. Betatron za svrhe defektoskopije upotrebljava vrlo mali broj proizvođača, ne samo zbog visoke cijene uređaja, nego i zbog potrebnih golemih investicija u sredstva za zaštitu od njegova zračenja.



Sl. 10. Betatron 15 MeV (Chirana, Prag)

Uređaji za gama-radiografiju. Osnovne prednosti uređaja za prozračavanje pomoću gama-zraka pred rendgenima jesu njihove relativno male dimenzije, njihova transportabilnost i (u većini slučajeva) nezavisnost od izvora električne energije. Eksploatacija gama-izvora zato je došla do punog značaja u kontroli montažnih radova, na cjevovodima, većim konstrukcijama itd., no u novije vrijeme se i njihova upotreba kao stacionarnih uređaja znatno razvila, naročito za izvore velikih energija, zahvaljujući konstrukcijama daljinskih komandi i servo-uređajima za održavanje vremena ekspozicije.

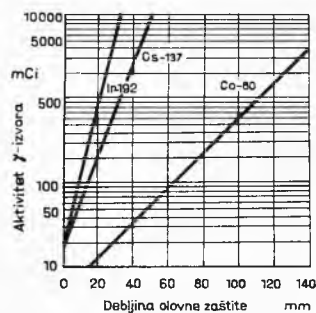


Dimenzije izvora, mm	A	B	C	D	E	F	G	H	Ƴ	K	M
6 × 6	21	15,5	9	7,2	6	5,1	2,5	1	1,5	3	2
4 × 4	22	15,5	8	5,1	4	5,1	2,5	1	1,5	3	2
2 × 2	23	15,5	7	5,1	2	5,1	2,5	1	1,5	3	2
1 × 1	23	15,5	7	5,1	1	5,1	2,5	1	1,5	3	2

Sl. 11. Aluminijski držači za izvor Ir-192 (Institut »Boris Kidrič« Vinča)

Osnovu uređaja za defektoskopiju gama-zračenjem predstavlja sam izvor zračenja. Izvor se isporučuje najčešće u obliku valjkaste tablete smještene u poseban držač (kapsulu). Izgled i dimenzije držača za izvore iridijum-192, koje proizvodi nuklearni institut »Boris Kidrič« u Vinči, prikazuje sl. 11. Držači se izvode od lakih metala te zadržavaju vrlo mali dio zračenja, uglavnom njihovih α - i β -komponenti.

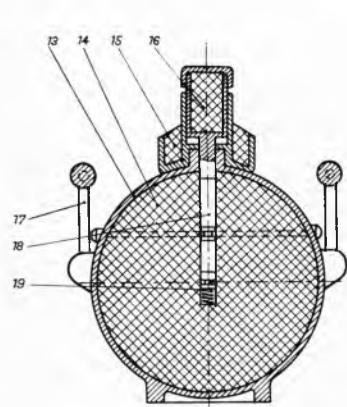
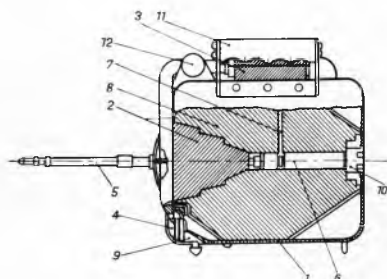
Za razliku od izvora X-zraka, uređaji za rad s izvorima gama-zraka moraju biti posebno konstruirani, s obzirom na to što gama-izvori stalno emitiraju zračenje. Zbog toga se uređaji za gama-defektoskopiju obično izvode u dva zasebna sklopa: *defektoskope i kontejnere*. Za vrijeme stajanja ili transporta, tj. kad se izvor ne upotrebljava, on se nalazi smješten u kontejneru i prebacuje se u defektoskop neposredno prije primjene. Defektoskop i kontejner moraju osiguravati biološku zaštitu rukovaoaca uređajem. To se postiže izvedbom zaštitnog omotača od materijala s velikom atomskom težinom. Debljina zaštitnog omotača zavisi od vrste i aktivnosti radioizotopa za koji je uređaj predviđen i od upotrijebljenog materijala za zaštitu. U dijagramu sl. 12 nanesene su debljine olovnog zaštitnog omotača u zavisnosti od tipa i



Sl. 12. Debljina olovne zaštite za dozu od $2 \mu\text{R/s}$ na 1 m udaljenosti

aktivnosti izvora, uz pretpostavku da na 1 metar udaljenosti od zatvorenog izvora zračenje nije jače od $2 \mu\text{R/s}$.

Zbog manipulativnosti poželjno je da defektoskopi budu malih dimenzija i umjerene težine. Ovaj zahtjev je u suprotnosti s efektivnošću zaštite od zračenja. Uzimajući u obzir činjenicu da namještanje defektoskopa i njegovo otvaranje ne traje dugo i da se osoba koja rukuje izvorom u ostalom vremenu (čekanje tokom eksponiranja, stajanje itd.) nalazi na relativno velikoj udaljenosti od izvora, defektoskopi se konstruiraju tako da propuštaju relativno visoke ekspozicije (doze zračenja). Za jače izvore defektoskopi

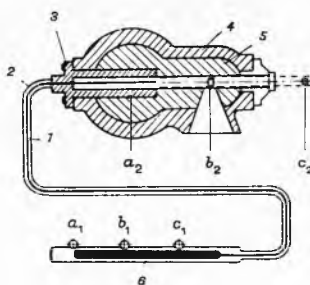


Sl. 13. Presjek defektoskopa JU-DE H 2 (gore) i kontejnera TK-2 (dolje) s dijagramima doza zračenja u zavisnosti od udaljenosti (»Energoinvest«, Sarajevo). 1 Limeni okvir, 2 konusni poklopac, 3 rupica za otvaranje, 4 brava, 5 lineal za centriranje, 6 držač izotopa, 7 vijak za učvršćenje držača izotopa, 8 olovni zid, 9 nosač brave, 10 čep defektoskopa, 11 ručica za prenos, 12 osovinski poklopac, 13 brončani omotač, 14 olovna masa, 15 poklopac, 16 klip poklopca, 17 ručica, 18 držač izotopa, 19 opruga

se izrađuju s oblogama od legura teških metala (volframa, urana), čime im se težina a i dimenzije mogu značajno smanjiti. Međutim, velik nedostatak takvih uređaja je njihova vrlo visoka cijena.

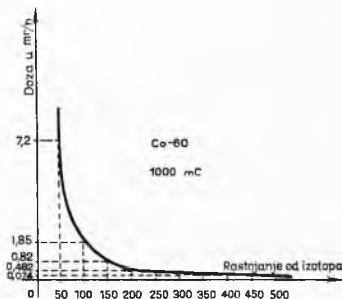
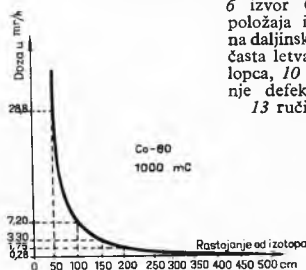
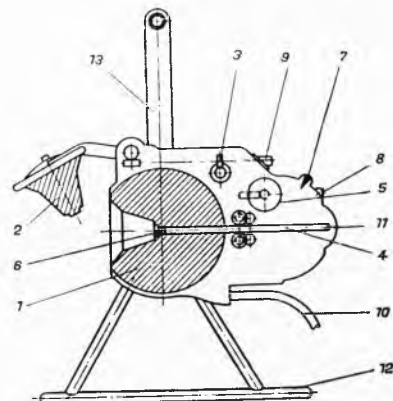
Dok se kod izvođenja defektoskopa kao glavni faktor (uz određenu sigurnost) uzima manipulativnost, izvedba kontejnera rezultat je prvenstveno zahtjeva za dobru zaštitu od zračenja. Njihove su dimenzije i težine zato uvijek veće od dimenzija i težina defektoskopa. Modernije izvedbe kontejnera za izvore većih aktivnosti imaju posebno konstruirana transportna kolica. Na sl. 13 prikazani su defektoskop i kontejner proizvodnje »Energoinvest«, Sarajevo, za izvor kobalt-60, aktivnosti 1,0 Ci, s opisima sastavnih dijelova i dijagramima ekspozicije (doze zračenja) u zavisnosti od udaljenosti.

Da bi se spriječile velike ekspozicije prilikom otvaranja i zatvaranja defektoskopa s jakim izvorima, postoji danas čitav niz rješenja za daljinsko upravljanje, počevši od najjednostavnijih mehaničkih pa do kompliciranih potpuno automatskih sistema. Sl. 14 pokazuje jednostavan način manipulacije izvorom iz daljine pomoću savitljivog ka-



Sl. 14. Sistem ručnog daljinskog rukovanja defektoskopom (defektoskop CUP-Co-0,5-J, proizvod SSSR). 1 Čelična žica, 2 savitljivi kabel, 3 čahura od teškog metala, 4 kućište od ljevnog željeza, 5 olovna ispunna, 6 manipulator; a_1, b_1, c_1 položaji ručice na manipulatoru koji odgovaraju odnosnim položajima izvora

Sl. 15. Električno upravljani defektoskop »TuR M Co 1,3 (VEB Transformatoren- und Röntgenwerke, Dresden). 1 Olovno tijelo defektoskopa, 2 olovni poklopac, 3 poluga za otvaranje poklopca, 4 zupčasta letva za izvlačenje izvora, 5 pogonski elektromotor, 6 izvor Co-60, 7 pokazivač položaja izvora, 8 priključak na daljinsko upravljanje, 9 zupčasta letva za otvaranje poklopca, 10 ručka za orijentiranje defektoskopa, 12 stalak, 13 ručica za prenošenje

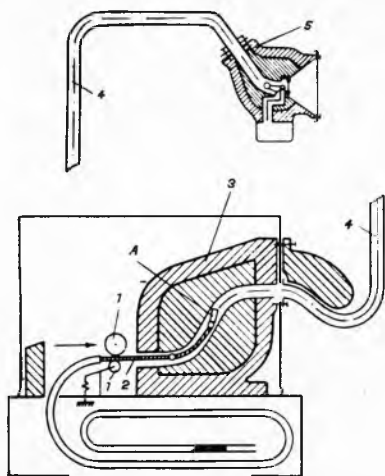


belu 2 sa čeličnom žicom 1. Položajima ručice a_1, b_1, c_1 na manipulatoru 6 odgovaraju određeni položaji izvora smještenog u posebno izvedenoj šipki od teškog metala. U položaju a_2 izvor je neaktivan, položaj b_2 je predviđen za usmjereno zračenje, a u položaju c_2 izvor je izvučen iz defektoskopa i zrači panoramski.

Složeniju konstrukciju daljinskog upravljanja shematski pokazuje sl. 15. Izvor kobalt-60 jakosti 1,3 Ci (6) učvršćen je na zupčastoj letvi 4 pogonjenoj elektromotorom 5 upravljanim iz daljine. Usmjereno zračenje postiže se otvaranjem poklopca 2 pomoću elektromotornog pogona i poluge 3. Potiskivanjem zupčaste letve ulijevo izvor izlazi iz defektoskopa i zrači panoramski. Defektoskop je električkim vodovima spojen s komandnim uređajem na kojem se, osim svjetlosnih oznaka za signaliziranje određenih položaja izvora, nalazi električki sat za ekspoziciju s automatikom za zatvaranje nakon protoka odabranog vremena.

Izvori vrlo visokih aktivnosti postavljaju posebne zahtjeve u pogledu zaštite od zračenja ne samo prilikom njihova čuvanja nego također, i prvenstveno, za vrijeme namještanja ekspozicije. Opasnost od velikih doza pri premještanju takvog izvora iz kontejnera u defektoskop izbjegnuta je povoljnom konstrukcijom prikazanom na sl. 16. Izvor, izotop

kobalt-60 aktivnosti 50 Ci, u stanju mirovanja nalazi se smješten u kontejneru 3 u položaju A. Defektoskop 5, spojen s kontejnerom preko savitljive cijevi 4 duge ~ 15 m, namješta se na mjesto eksponiranja. Tada se aktivira elektromotor, koji preko potpisnog sistema 1 gura savitljivu osovinu 2, na čijem je kraju



Sl. 16. Defektoskop-kontejner za jake izvore (CUP - Co-50-J, proizvod SSSR)

montiran izvor, do defektoskopa. Nakon završene ekspozicije izvor se obratnim putem vraća u kontejner. Masa cijelog uređaja je 700 kg, od čega na defektoskop otpada samo 65 kg.

Pomoćna sredstva za filmsku radiografiju. Najvažniji pribor filmske radiografije je *film*. Za različite tehnike rada, jačine i vrste izvora, debljine i kvalitete prozračavanog materijala i za zadovoljenje zahtjeva za vidljivost detalja, razvijen je u svijetu velik broj tipova filmova. Grubom podjelom mogu se svrstati u 3 osnovne grupe: a) finoizrznati, visokokontrastni filmovi za upotrebu s olovnim folijama ili bez njih (često nazivani i »spori« filmovi); b) srednje- ili gruboizrznati filmovi za upotrebu s olovnim folijama ili bez njih (nazvani i »brzi« filmovi); c) filmovi za upotrebu s oštrocijavajućim ili visokopojčavajućim solnim folijama. Senzitometrijske krivulje ovih vrsta filmova dosta se razlikuju (vidi još pod *Film*) pa je za svaku vrstu potrebno odrediti tzv. faktore filma za rad sa X- i gama-izvorima. Pri izračunavanju potrebnih elemenata ekspozicije važan je i koeficijent zacrnljenja S . Normalno upotreblijiva zacrnljenja u defektoskopiji kreću se od $S = 1,5$ do $S = 2,5$, gdje jača zacrnljenja (naročito kod finoizrznatih filmova) daju oštrij definiciju greške.

Folije (zasloni) služe za bolje iskorištavanje energije zračenja pri stvaranju latentne slike. Kod ekspozicije primjenjuju se usko priljubljene uz film. *Olovne folije*, debljine najčešće između 0,02 i 0,15 mm, imaju osnovni zadatak da reduciraju utjecaj sekundarnog zračenja na film, čime pojačavaju kontrast i definiciju. Zbog djelomičnog reflektiranja primarnog zračenja ubrzavaju stvaranje latentne slike i djeluju na povećanje zacrnljenja. Ova se pojava naziva *pojačanje*, a izražava se omjerom između vremena ekspozicije filma bez folije i filma uz upotrebu folija. Faktor pojačanja za olovne folije uz izvore malih i srednjih kvantnih energija kreće se oko 3, a uz izvore većih energija (gama-izvori) oko 2. *Solne folije* najčešće su izrađene od kalcijum-volframata ili barijum-olovo-sulfata, nanesenih u tankom sloju na kartonsku podlogu ili suspendiranih u foliju od plastične mase. Djelovanje im se temelji na svojstvu navedenih soli da fluoresciraju, tj. apsorbiraju zračenje istovremeno emitirajući svjetlo. Faktor pojačanja solnih folija za manje energije kvanta vrlo je velik (kod 200 keV iznosi 50-100), a za veće energije naglije pada (kod 2 MeV iznosi 2-4). Folije se ne upotrebljavaju pri radu s vrlo jakim izvorima zbog pojave jakog ogrubljenja i slabe definicije snimka.

Da bi se pojednostavnilo i olakšalo izračunavanje elemenata ekspozicije, u normalnoj praksi se upotrebljavaju ekspozicijski dijagrami i računala.

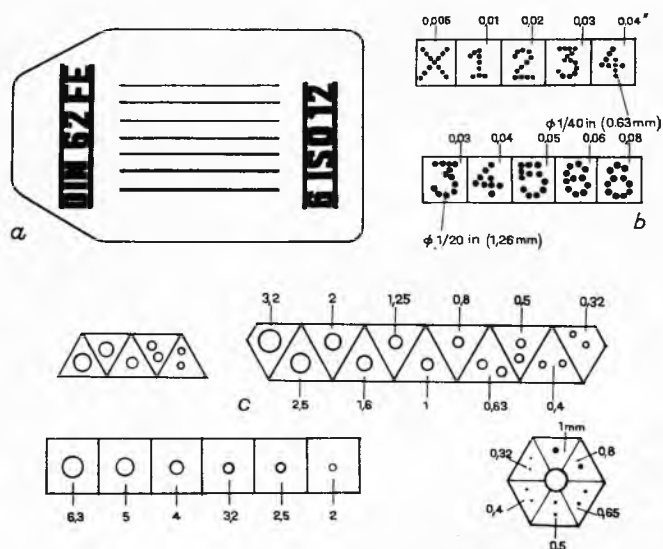
Ostala pomoćna sredstva za filmsku radiografiju jesu: kasete za filmove (metalne i od plastmasa), olovna slova i oznake za signiranje pripadnosti snimke, uređaji za razvijanje filmova u

tamnoj komori, ormari za sušenje snimaka, uređaji za čitanje snimaka i pribor za detekciju zračenja.

Pribor za detekciju zračenja, osim sredstava za osiguranje od zračenja (»bunker« za radioizotope, zidani ili obloženi prostori za ekspoziciju; v. i članak *Biološki štiti*) predstavlja neophodan pribor osoblja koje rukuje izvorima zračenja (v. *Detekcija nuklearnog zračenja*). Osim toga osoblje koje radi s izvorima zračenja obavezno nosi na sebi indikatore primljenih doza (v. članak *Dozimetrija jonizujućeg zračenja*, također za maksimalno dopuštene doze koje u određenom periodu smije da primi profesionalno osoblje).

Interpretacija rezultata ispitivanja prozračivanjem zavisu prvenstveno od kvaliteta dobivenog snimka, koji se mjeri postignutim *stepenom razaznavanja*. Pomoćno sredstvo za određivanje stepena razaznavanja jesu indikatori kvaliteta, zvani *penetrametri*.

Na slici 17 a prikazan je indikator kvaliteta prema DIN 54 109. Između folija od plastične mase nalazi se pravilno raspoređeno sedam kalibriranih žica različite debljine (ovi se indikatori izrađuju sa tri područja debljine) od materijala koji približno odgovara materijalu koji se prozračava. Iznad i ispod žica nalaze se olovne oznake s informacijama o materijalu (Fe, Al, Cu) i o području debljine. Razaznavanje se mjeri brojem žica koje se vide na snimku. Osim žičnih indikatora postoji niz izvedbi tzv. stepenastih indikatora kvaliteta snimke. Penetrametar prema BWRA (British Welding Research Association) prikazan je na sl. 17 b, a nekoliko izvedbi prema francuskom standardu AFNOR-NF-04-304 (koji je usvojio i ISO) na sl. 17 c. Brojevi iznad polja označavaju debljinu materijala stepenica. Razaznavanje se mjeri tako da se očitava na



Sl. 17. Penetrametri (indikatori kvaliteta snimka)

snimku posljednja vidljiva razlika između rupe u stepenici i same stepenice.

Definicija razaznavanja Z može se prikazati izrazom

$$Z = \frac{\Delta d_{\min}}{d} \cdot 100\%$$

gdje je Δd_{\min} debljina najtanje žice ili detalja penetrametra koji se još može na filmu opaziti, a d debljina prozračavanog materijala u smjeru zraka. Što je manja veličina Z to je bolje razaznavanje. Ono zavisi još i od geometrijskih neoštrina, koje su posljedica odnosa dimenzija izvora i udaljenosti između izvora i filma, i od tzv. unutrašnjih neoštrina, zavisnih od vrste primijenjenog zračenja i tipa upotrijebljenih folija.

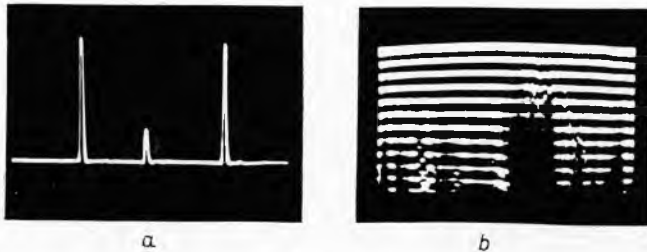
Dobiveni rezultati snimanja grešaka uspoređuju se s određenim priznatim *etalonima* ili *standardiziranim veličinama*. Velik broj zemalja razvio je različite tipove standarda za kriterij ocjene grešaka u materijalu; posebno velik broj standarda postoji za odljeve i zavarene spojeve. Na međunarodnom planu treba istaći aktivnost Međunarodnog instituta za zavarivanje (International Institute of Welding, Institut International de la Soudure — IIW/IIS), čije se kolekcije referentnih radiograma primjenjuju za uspoređivanje rezultata u velikom broju zemalja.

Kad zvuk upada pod izvjesnim kutovima, dolazi do totalne refleksije kako longitudinalne tako i transverzalne komponente, a mogu nastati i površinski valovi. Ove pojave koriste se kod kutnih glava i tzv. površinskih glava.

Ako ultrazvučni val, prolazeći kroz materijal, naiđe na grešku, on se (zavisno od veličine, položaja i tipa greške) reflektira od površine greške ili biva, zbog različitih kutova odraza, vrlo umanjeno na povratku k površini s koje je emitiran. Mjerenje ovih pojava predstavlja osnovu ultrazvučne defektoskopije.

Područje primjene defektoskopije ultrazvukom. Bez sumnje se može konstatirati da je defektoskopija ultrazvukom zbog svojih prednosti postala vrlo popularna metoda traženja skrivenih grešaka u materijalu. Osnovne prednosti koje ova metoda ima, naročito u usporedbi s metodama prozračavanja, jesu ove: a) područje debljina ispitivanog materijala za ispitivanja ultrazvukom vrlo je veliko; modernim sredstvima mogu se ispitivati materijali debljine i do nekoliko metara; b) uređaji i pribor za rad relativno su jednostavni, lako prenosivi i ne zauzimaju mnogo prostora; c) opasnost od kvarova uređaja smanjena je upotrebom tranzistorske tehnike; time se smanjila i težina uređaja; d) rukovanje uređajima i priborom ne predstavlja nikakvu opasnost za rukovaoca; e) metode defektoskopije ultrazvukom vrlo su osjetljive i otkrivanje grešaka (uz određena ograničenja) dosta je jednostavno; f) moguće je ispitivanje prilazom samo s jedne strane ispitivanog predmeta; g) dodavanjem odgovarajućih uređaja mogu se stvoriti brojne kombinacije za automatizaciju kontrole. Ova se može izvesti u različitoj mjeri: kao automatska registracija, automatsko označavanje defektnih produkata ili mjesta i automatsko sortiranje proizvoda.

Među ozbiljnije nedostatke ove metode mogu se ubrojiti ovi: a) osim u nekim sasvim specijalnim tipovima ispitivanja (C-slika) metode ultrazvučnog pregleda ne mogu ostaviti trajan dokument



Sl. 20. Tipovi registracije ultrazvučnih valova. a A-slika, b B-slika, c C-slika

iz kojeg bi se i poslije nekog vremena nedvosmisleno ustanovili karakter i veličina greške; b) procjena greške otkrivene ultrazvukom podložna je subjektivnosti operatora i njegovom nivou poznavanja kako načina ispitivanja tako i svojstava ispitivanog materijala; c) zbog na-

čina ispitivanja i procjene rezultata na mjestu kontrole, osoblje koje rukuje aparatima za ultrazvučnu defektoskopiju mora, osim većeg predznanja, imati dugu praksu uz mogućnost komparativnog utvrđivanja karaktera otkrivene greške; uvođenje ovih metoda je zato mnogo dugotrajnije nego ostalih; d) postoje relativno slabe mogućnosti za otkrivanje potpovršinskih grešaka i grešaka u predmetima kompliciranijih oblika. Poželjno je da su površine upada i odraza zvuka paralelne i glatke.

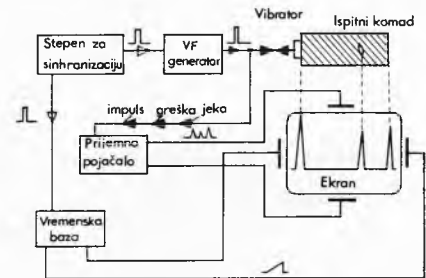
Zbog navedenih nedostataka, ispitivanje ultrazvukom se često vrši u kombinaciji s metodama prozračavanja na taj način da se mjesta na kojima se ultrazvukom pronašla greška naknadno snime jednom od metoda prozračavanja.

Uređaji i pribor, postupci ispitivanja ultrazvukom.

Ultrazvučni defektoskopi proizvode se u tri osnovna oblika. Zavisno od konstrukcije i tipa ispitivanja na zaslonu katodne cijevi pojavljuje se odjek od greške u obliku tzv. A-, B- ili C-slike (engl. A-, B-, C-scan). Uređaji koji prikazuju tzv. A-sliku (slika 20a) najjednostavniji su i najčešće se upotrebljavaju. Odjek od zadnje

stijenke ili od greške pojavljuje se u obliku jednostavnih vertikalnih impulsa. Upotrebljavaju se podjednako za tehniku impulsa-jeka ili za transmisionu tehniku ispitivanja. Na B-slici se (sl. 20b), posredstvom elektronskih dodatka, u horizontalnoj osi pokazuje dužina ispitivanog komada a visina slike u stvari je debljina komada koji se ispituje. Na slici se vidi kolika je greška i koliko je duboko ispod površine. C-slika (sl. 20 c), također posredstvom dosta složenih elektronskih dodatka, predstavlja površinu na kojoj se predmet ispituje. Putovanje elektronskog snopa ocrtava svaku grešku ispod ispitivane površine u njenoj punoj veličini. Uređaji za slike B i C razvijeni su i uglavnom su u upotrebi u USA, i to pretežno za imerzionu tehniku; u Evropi, uz vrlo malo izuzetaka, proizvode i eksploatiraju se samo uređaji sa A-slikom.

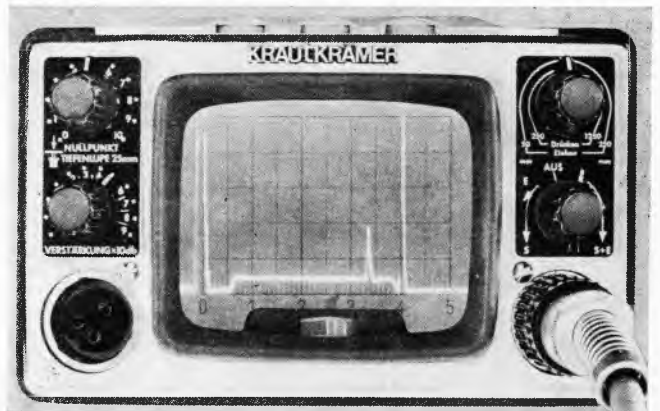
Principijelna shema uređaja za ultrazvučno ispitivanje *metodom impulsa-jeka* vidi se na slici 21. Ultrazvučni vibrator (glava) emitira u ispitivani predmet intermitentne impulse određene frekvencije.



Sl. 21. Blok-shema ultrazvučnog aparata za A-sliku i metodu impulsa-jeka

Ako se u dubini ispitivanog predmeta ne nalazi greška, ultrazvučni val se, zbog velike razlike u specifičnoj vodljivosti zraka i materijala od kojeg je predmet načinjen, gotovo potpuno reflektira od zadnje površine predmeta i vraća prema prednjoj površini na kojoj se nalazi vibrator. U pauzama između signala vibrator djeluje kao prijemna sonda i primljene impulse šalje u pojačalo, a ovo ih baca na ekran katodne cijevi, te se na njemu pojavljuje »odjek« od zadnje površine u određenoj udaljenosti od predajnog impulsa. Ova udaljenost zavisna je od debljine stijenke ispitivanog predmeta i od brzine širenja zvuka u tom predmetu (tablica 5). Ako se u dubini ispitivanog predmeta nalazi greška, jedan dio impulsa se odbija od njene površine i vraća prije odjeka sa zadnje površine. Greška se očitava na ekranu kao odjek u udaljenosti koja odgovara dubini greške.

Transmisiona tehnika je u principu slična prethodnoj, s tom razlikom da se koristi dvjema odijeljenim sondama, od kojih jedna samo emitira impulse a druga, smještena na suprotnoj strani ispitivanog predmeta, služi kao prijemnik impulsa nakon prolaza kroz materijal. Ukoliko ultrazvučni impulsi na svom putu naiđu na grešku, oni će, u zavisnosti od veličine i karaktera te greške, biti djelomično reflektirani, te će umanjena količina energije proslijediti put do prijemnog vibratora. Greška će se na ekranu katodne cijevi očitovati manjom visinom signala ili, u slučaju veće greške, odsustvom signala.



Sl. 22. Prednja ploča tranzistorskog ultrazvučnog aparata USK-5M (Krautkramer, Köln)



Sl. 25. Nekoliko tipova ultrazvučnih vibratora (Krautkrämer, Köln)

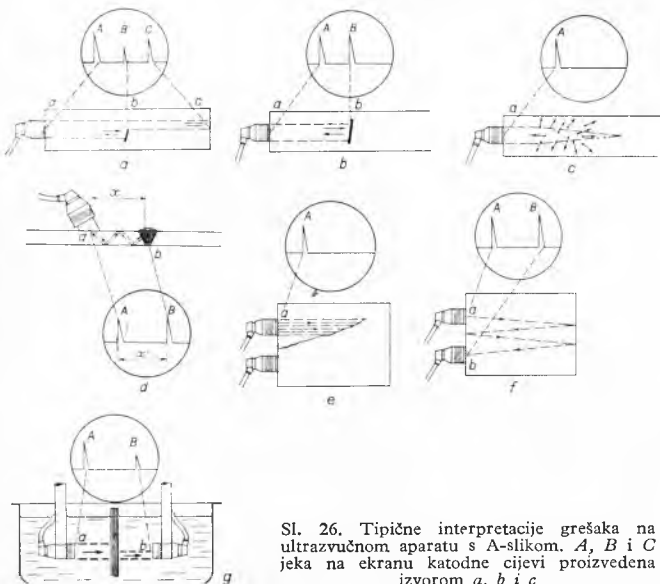
Suvremeni aparati proizvode se za mogućnosti ispitivanja sa obje navedene tehnike. Sl. 24 prikazuje noviji tip tranzistoriziranog ultrazvučnog aparata za ispitivanje transmissionom tehnikom impulsa-jeka.

Imerzionna tehnika koristi se prvenstveno za kontrolu serijske proizvodnje ili za otkrivanje grešaka neposredno ispod površine ispitivanog predmeta. Ona je u širokoj primjeni u USA. Ispitivani predmet nalazi se u vodenoj kupki kroz koju se upravljaju ultrazvučni impulsi na površinu predmeta. Ova se tehnika koristi principima tehnike impulsa-jeka i transmisionne tehnike.

Rezonantna tehnika se upotrebljava za defektoskopiju uglavnom samo sekundarno, prilikom njene vrlo omiljele primjene za mjerenje debljine stijenke. Oscilator pobudivan od vibratora naslonjenog na stijenku modulira (ugađa) se na pogodan način dok njegova frekvencija ne postigne vrijednost pri kojoj se u stijenki obrazuje stoji val; u tom trenutku mijenja se impedancija vibratora i to se na ekranu osciloskopa očituje kao karakterističan impuls. Elementi ugađanja zavise od debljine stijenke i ova se u modernim aparatima na dodatnom uređaju neposredno očitava. Ako u stijenki ima greška, to se očituje kao smetnja ugađanju.

Kao **emiter** ultrazvuka najčešće se upotrebljava piezoelektrična pločica pogodno smještena u držač koji u sebi sadrži kontakte za spoj s aparaturom, a često i foliju koja štiti piezo-pločicu od habanja. Piezo-pločice upotrebljive za defektoskopiju izrađene su od kvarca, Seignetteove soli, barijum-titanata, turmalina i dr. Frekvencija kojom će vibrator rezonirati zavisa je od debljine i osi presjeka kristala, a širina snopa zvuka od ostalih dimenzija pločice. Izgled nekoliko izvedenih vibratora za longitudinalne, transverzalne i površinske valove prikazan je na slici 25.

Interpretacija rezultata ultrazvučnih mjerenja. Zbog načina na koji je (osim na C-slici) greška prikazana na ekranu



Sl. 26. Tipične interpretacije grešaka na ultrazvučnom aparatu s A-slikom. A, B i C jeka na ekranu katodne cijevi proizvedena izvorom a, b i c

katodne cijevi, a i zbog mnogo drugih subjektivnih elemenata, interpretacija rezultata ispitivanja vrlo je zavisna od spretnosti, znanja i uvježbanosti ispitivača. Sl. 26 pokazuje nekoliko tipičnih interpretacija grešaka. Ultrazvučni val djelomično odbijen sa površine greške pokazuje se kao udaljenost između početnog impulsa i jeka sa stražnje površine (sl. 26 a). Ako je greška veća od emitiranog snopa zvuka, ne pojavljuje se odjek sa stražnje površine (sl. 26 b). Ako ima poroziteta u materijalu, zvučni snop se odbija u svim smjerovima i nema odjeka (sl. 26 c). Sučeono zavareni spojevi najčešće se ispituju kutnim vibratorom sa transverzalnim valovima (sl. 26 d). Slike 26 e i f pokazuju moguće načine ispitivanja upotrebom vibratora s odijeljenim emiterom i prijemnikom i novijih vibratora u kojima su emiter i prijemnik konstruktivno spojeni u jednoj sondi (tzv. SE-vibrator, prema njem. Sende-Echo). Sl. 26 g prikazuje princip ispitivanja u imerzionoj tehnici.

MAGNETSKE I ELEKTROMAGNETSKE (INDUKTIVNE) METODE

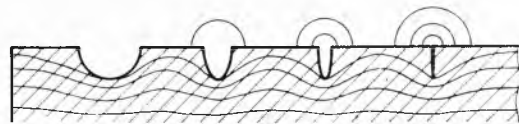
Fizičke osnove i principi magnetskih i induktivnih ispitivanja. Defektoskopija magnetskim i induktivnim metodama bazira se na nekoliko osnovnih svojstava materijala ili magnetskog polja, a to su električna provodljivost, permeabilitet i koercitivna sila. Te metode ustanovljavanja grešaka u materijalu dijele se u dvije osnovne grupe: metode koje se koriste posljedicama djelovanja magnetskih silnica proizvedenih u namagnetiziranom ispitanom predmetu i metode koje se koriste induktivnim djelovanjem izmjeničnog magnetskog polja. Prvom se grupom metoda mogu ispitivati samo feromagnetski materijali, drugom se osim feromagnetskih mogu ispitivati i neferomagnetski materijali.

Prolazom električne struje kroz neki vodič stvara se oko njega koncentrično magnetsko polje jakosti zavisne od jačine struje u vodiču. Magnetske silnice (magnetski fluks) prolazeći kroz određeni presjek magnetskog vodiča tvore gustinu polja

$$B = \mu H,$$

gdje je μ permeabilitet a H jačina magnetskog polja. Sposobnost vođenja magnetskih linija — permeabilitet — različitih materijala vrlo je različit. Ako se permeabilitet vakuuma postavi $\mu_{rel} = 1$, onda se nazivaju materijali sa $\mu_{rel} < 1$ dijamagnetskim, sa $\mu_{rel} \approx 1$ paramagnetskim, a $\mu_{rel} > 1$ feromagnetskim. Relativni permeabilitet željeza je ~ 100 puta veći od permeabiliteta paramagnetskih medija. U zavisnosti od sastava i termičke obrade čelika mijenja se μ_{rel} čelika u dosta širokim granicama.

Ako u materijalu postoji diskontinuitet (u obliku greške ili nekom drugom obliku) dolazi do ugiba magnetskih silnica, do



Sl. 27. Utjecaj površinski vezanog zarez (pukotine) na stvaranje rasipnog magnetskog polja

njihove koncentracije i do povećanja jakosti polja u različnom rasponu (sl. 27). Ova pojava predstavlja osnovu magnetskih ispitivanja feromagnetskih materijala.

Ako se neki vodič nalazi u izmjeničnom magnetskom polju koje stvara zavojnica, u njemu se inducira izmjenična struja, koja opet stvara svoje polje. Mjerenje novonastalog izmjeničnog polja, zavisnog od diskontinuiteta u materijalu vodiča, predstavlja osnovu induktivnih metoda defektoskopije.

Područje upotrebe induktivnih i magnetskih metoda.

Mala investicija i vrlo jeftino ispitivanje uz jednostavniju tehniku popularizirale su magnetske metode ispitivanja materijala. U najnovije vrijeme konstruirani su i vrlo složeni elektronički potpuno automatizirani uređaji (proizvodi ih Institut Dr. Förster, Magnaflux Corporation) za kontrolu i sortiranje produkata masovne proizvodnje (crne metalurgije, automobilske i vojne industrije itd.).

Osnovne prednosti ovih metoda su ove: a) jednostavnost principa i niska cijena uređaja (osim automatiziranih); b) lako i jednostavno rukovanje uređajima; c) dobra osjetljivost na otkri-

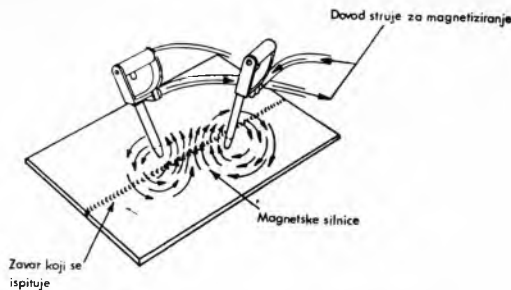
vanje površinskih i potpovršinskih grešaka, posebno pukotina (to je prednost naročito u odnosu na metode ultrazvuka); d) interpretacija rezultata ne zahtijeva naročitu stručnost; e) mogućnost primjene na proizvode složenih oblika i s velikim razlikama u debljinama stijenke (to su očite prednosti pred metodama prozračavanja i prozvučavanja).

Ograničenja upotrebe i nedostaci induktivnih i magnetskih metoda jesu ovi: a) ustanovljava se postojanje grešaka, a ne i njihova geometrija (ako se ne upotrijebe posebni dodatni uređaji); b) dubinske greške se, osim magnetografskom metodom, teško otkrivaju i identificiraju; dubina pouzdanog otkrivanja iznosi tek nekoliko milimetara, a najpouzdanije se otkrivaju greške koje imaju vezu sa površinom; c) osim s uređajima za kontrolu masovne proizvodnje, ove su metode prilično spore; d) interpretacija rezultata dosta zavisi od stanja površine ispitivanog predmeta.

Zbog navedenih nedostataka metode sa magnetnim prahom upotrebljavaju se za komplicirane oblike feromagnetskih proizvoda, a ostale se metode (induktivne, metode vrtložnih struja, strujne provodljivosti) primjenjuju za kontrolu jednostavnijih oblika veće duljine (cijevi, šipaka, profila, žica i sl.).

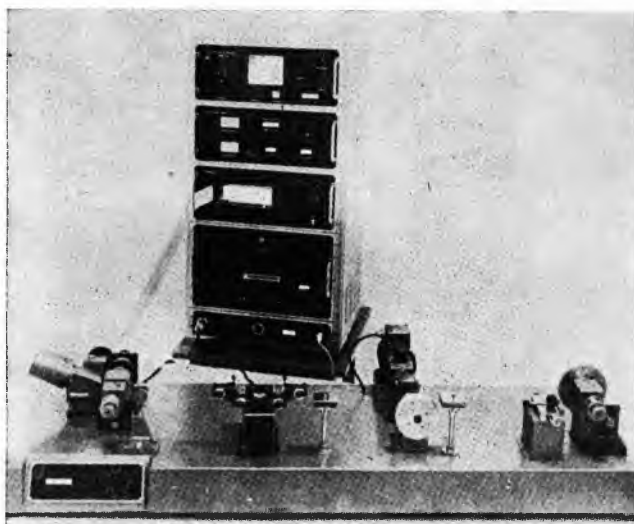
Magnetske metode se danas često upotrebljavaju i uporedo s drugim defektoskopskim metodama. Danas su još uvijek u stadiju brzog razvoja.

Uređaji, pribor i postupci magnetskih i induktivnih ispitivanja. Najjednostavnije uređaje za magnetska ispitivanja

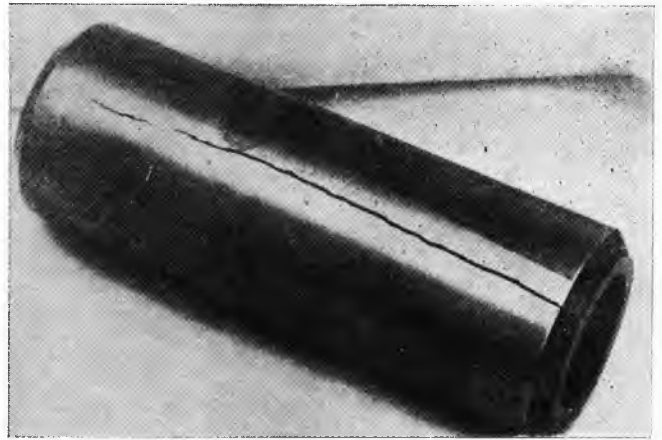


Sl. 28. Princip djelovanja feroflux-aparata

predstavljaju *feroflux-aparati*. To su generatori istosmjernih ili izmjeničnih struja velike jakosti a niskog napona. Izrađuju se u prenosnoj i stabilnoj izvedbi. Princip rada jednog prenosnog uređaja vidi se na sl. 28. Krajevi sekundarnog namotaja transformatora u obliku tzv. *pipala* kratko se spoje preko površine feromagnetskog predmeta koji se ispituje. Na nastalo magnetsko polje sipa se magnetit (željezo-oksidi Fe_3O_4) u obliku finog praška, veličine zrna $\sim 1\mu m$ ili prašak suspendiran u lakom mineralnom ulju i sl. Zbog



Sl. 29. Uređaj za automatsko ispitivanje tanke žice pomoću vrtložnih struja (Institut dr. Förster, Reutlingen). U prednjem planu uređaj za kontinuirani prolaz žice kroz specijalne sonde. U pozadini elektronički registrator koji bilježi svaku otkrivenu grešku, registrira defektne dužine i daje statističke podatke o upotrebljivosti ispitane žice



Sl. 30. Pukotina otkrivena metodom magnetskog praška

opisane pojave dolazi do koncentracije praška na mjestima površinskih ili potpovršinskih grešaka. Promatranje se vrši na dnevnom ili (kod posebnih praškova) ultraljubičastom svjetlu. Treba napomenuti da je otkrivanje grešaka najbolje ako su one okrenute poprijeko na smjer silnica. Zato treba redovito predmet magnetizirati u dva smjera.

Uređaji za masovnu kontrolu na principu magnetskog praha obično su snabdjeveni kupkama sa suhim prahom suspendiranim u zračnom jastuku, u koje se uranjaju namagnetizirani ispitni predmeti.

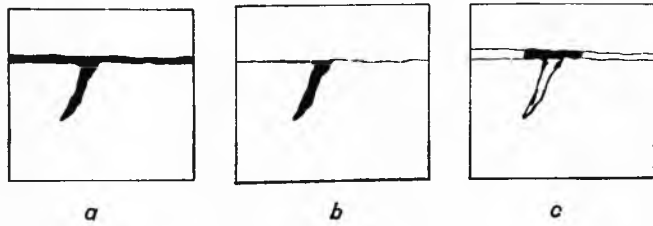
Razvijenije metode, uglavnom za serijsku kontrolu pravilnih i jednostavnih oblika, jesu *magnetografske metode*. U magnetografskim uređajima beskonačna gumena ili plastična traka, na kojoj je jednoliko nanesen magnetski pigment te ona ima tačno određena magnetska svojstva, priljubljuje se čvrsto na površinu magnetiziranog ispitnog predmeta. Kao posljedica remanentnog magnetizma ostaju na traci zabilježene sve nepravilnosti magnetskog polja na ispitnom predmetu, koje su posljedica grešaka. Posebnim sistemom rotirajućih sondi ovako snimljena traka »čita« se i registrira preko elektroničkih uređaja. U današnjem stupnju razvoja magnetografskih metoda njima se mogu otkrivati greške u materijalu do dubine 28 mm.

Uređaji za defektoskopiju *metodama mjerenja magnetskog polja, vrtložnih struja i strujne vodljivosti* vrlo su složeni mehanički i elektronički aparati. Primjena im, zbog složenosti i skupoće, nije prešla okvire istraživačkih laboratorija ili velikih industrija masovne proizvodnje. Sl. 29 prikazuje jedan kompletan uređaj za defektoskopiju tanke žice s elektronikom i pisačem za statističku kontrolu.

Interpretacija rezultata dobivenih metodama sa magnetskim praškom jednostavna je. Na sl. 30 prikazan je izgled pukotine na cilindričnom zatiku, dobiven upotrebom »moke metode«. Interpretacija rezultata dobivenih automatiziranim metodama gotovo redovito je vezana s označavanjem grešaka na površini, sortiranjem po kvalitetu i izlučivanjem škarta.

PENETRANTSKE METODE DEFEKTOSKOPIJE

Penetrantske metode defektoskopije (metode *kapilarne defektoskopije*) osnivaju se na činjenici da se tekućine velike površinske aktivnosti (kapilarne aktivnosti), zvane u ovom slučaju *penetrantima*, uvlače u vrlo uske, oku nevidljive pukotine na površini materijala i šupljine koje su u vezi s površinom, te se — pošto se ukloni višak tekućine s površine — mogu učiniti vidljivima na dnevnom ili ultraljubičastom svjetlu. Tome služi tzv. *razvijatelj*, prah ili suspenzija vrlo finog razdjeljenja koji nanijet na površinu materijala, kapilarnim djelovanjem izvlači površinski aktivnu tekućinu na vidjelo iz pukotina i šupljina. Za svoj nagli razvoj u posljednjih petnaestak godina te metode zahvaljuju naporima da se pronađu jednostavni i efikasni načini otkrivanja površinskih grešaka ili potpovršinskih grešaka koje imaju vezu s površinom u nemagnetičnim materijalima i u nemetalima, posebno plastičnim masama. Zbog svoje jednostavnosti one su se, međutim, jako raširile kako za magnetične tako i za nemagnetične materijale u mnogim granama industrije i eksploatacije.



Sl. 31. Princip ispitivanja pomoću penetranta

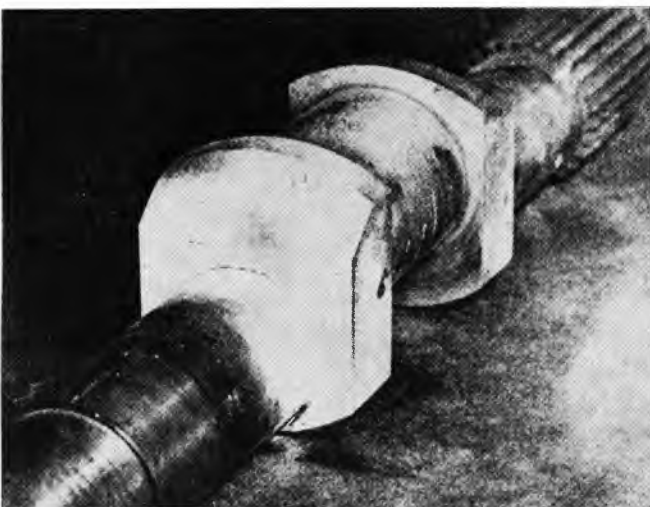
Princip ispitivanja penetrantima prikazan je na sl. 31. Ispitivana površina prekrije se penetrantskom tekućinom uroñjavanjem, štrcanjem ili nanošenjem kistom (a). Nakon perioda penetracije (koji, zavisno od tipa penetranta, od temperature i od površine i materijala koji se ispituje, iznosi 2...30 minuta), dobro se obriše ili opere i osuši površina ispitivanog predmeta (b), pa se onda na nju nanese (suhi ili mokri) razvijlač. Penetrant koji je zaostao u pukotinama i šupljinama ulazi uslijed kapilarnosti u razvijlač (c) i — budući da sadrži boju ili fluorescentnu tvar — pokazuje na vidljivom ili ultraljubičastom svjetlu gdje se nalaze dotad nevidljive nehomogenosti površine.

Materijali i pribor za penetrantsku defektoskopiju. Materijali za penetrantsku defektoskopiju, prema naprijed rečenom, obuhvaćaju tri grupe tvari: penetrante, tekućine za spiranje penetranta s površine i razvijlače.

Penetranti se sastoje od osnovne površinski aktivne tekućine ili smjese tekućina (petroleja, toluola, tributilfosfata, sulfoniranog ricinusovog ulja, mineralnog ulja i dr.), kojoj su dodate — već prema tipu penetranta — boje ili fluorescentne tvari i dodaci koji omogućavaju uklanjanje viška penetranta s površine ispitivanog materijala. Brojni tipovi penetrantskih tekućina koje se danas u svijetu upotrebljavaju mogu se podijeliti sa nekoliko gledišta. Prema tome da li greške postaju vidljive na danjem ili ultraljubičastom svjetlu, postoje dvije vrste penetranta sa mnogo gradacija u svakoj od njih. Uzme li se k tome u obzir i način kako se tekućina spire s ispitane površine, dobiva se podjela navedena u nastavku.

Vodoisperivi penetranti za dnevno svjetlo sadrže uz boje (po pravilu fluorescentne) neki detergent i/ili u vodi topljivo otapalo penetrantske tvari, koji omogućuju da se višak penetranta emulgira u vodi i ukloni s površine naprosto vodenim mlazom. Zbog toga i jer nije potrebno ultraljubičasto svjetlo, rad s takvim penetrantima je vrlo jednostavan, pa se stoga oni mnogo upotrebljavaju. Osjetljivost im je srednje dobra ako su ispitivane površine brižljivo pripremljene.

Vodoisperivi penetranti za ultraljubičasto svjetlo, zbog jače fluorescencije u tom svjetlu, osjetljiviji su od prethodnih. Upotrebljavaju se prvenstveno za kontrolu grubljih površina, zupčanika, navoja i sl. Ispitivanje s njima je brzo i ekonomično; nepodesni su za kromirane površine. Promatranje se mora vršiti u tamnoj prostoriji pod kvarc-lampom.



Sl. 32. Pukotina otkrivena ispitivanjem pomoću penetranta

Penetranti za rad s naknadnim emulgiranjem nemaju dodatka koji omogućavaju njihovo emulgiranje i neposredno ispiranje vodom. Oni se uklanjaju s površine na taj način da se na sloj penetranta, prije ispiranja vodom, nanese sloj tekućine koja sadrži emulgator. Budući da voda pri ispiranju ne može uklanjati i jedan dio penetranta iz pukotina i šupljina — a što se ne može spriječiti pri direktnom ispiranju vodoisperivih penetranta — metoda s naknadnim emulgiranjem, uz promatranje u ultraljubičastom svjetlu, predstavlja najosjetljiviju metodu za otkrivanje najfinijih grešaka. Može se upotrijebiti i za kontrolu galvaniziranih i kromiranih površina. Ta brza i ekonomična metoda u širokoj je primjeni u USA i gotovo je jedina koja se upotrebljava u velikim stacionarnim uređajima za masovnu kontrolu. U Evropi se zasad dosta rijetko nalazi.

Kao razvijlač upotrebljava se najčešće kreda, ali također talk, bentonit, koloidna kremena kiselina, diatomejska zemlja, bilo kao suhe smjese ili kao suspenzije u lako isparljivoj tekućini (većinom etilalkoholu ili izopropilalkoholu), kojoj je gotovo uvijek dodata neka tvar koja sprečava koroziju.

Primjena penetrantskih metoda defektoskopije. Već je naglašeno da je upotrebljivost penetrantskih metoda ograničena na otkrivanje grešaka koje imaju vezu s ispitivanom površinom. Osim toga ograničenja postoji još i to da površine koje se tim metodama ispituju moraju biti razmjerno glatke i čiste (ne smiju biti ličene). Treba izbjegavati i ispitivanje površina vrlo osjetljivih



Sl. 33. Prenosni komplet za ispitivanje penetrantima (Magnaflex Corporation)

prema koroziji. Brzina ispitivanja tim metodama i njihova efikasnost zavisi također od temperature površine i okoline. Interpretacija rezultata dobivenih penetrantskom defektoskopijom vrlo je jednostavna. Uopće je jednostavnost i niska cijena kontrole uz upotrebu penetranta osnovna prednost tih metoda. Sl. 32 pokazuje, primjera radi, pukotinu na koljenčastom vratilu otkrivenu penetrantskom metodom defektoskopije.

Uređaji za defektoskopiju penetrantima proizvode se u obliku prenosnih kompleta (sl. 33) ili kao stacionarna postrojenja kojima je rad uglavnom automatiziran, osim pregleda i interpretacije.

LIT.: E. A. W. Müller, Materialprüfung nach dem Magnetpulver-Verfahren, Leipzig 1951. — E. Hanke, Prüfung metallischer Werkstoffe II, Leipzig 1960. — D. Frost, Praktischer Strahlenschutz, Berlin 1960. — E. A. W. Müller, Handbuch der zerstörungsfreien Materialprüfung, München 1963. — R. C. McMaster, Nondestructive testing handbook, New York 1963. — Незарушающие испытания (справочник), Москва 1965. — J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Berlin-Heidelberg-New York 1966. — Za magnetografske metode i metode vrtložnih struja: F. Förster, Förster Report № 7, 8, 9, 1967. — Časopisi: Materials Evaluation, USA, Дефектоскопия, СССР, The British Journal of Nondestructive Testing, V. Britanija, Zerstörungsfreie Materialprüfung, SR Njemačka.