2.5 Öntvények és hegesztett kötések korszerű, röntgensugaras hibavizsgálata

Tárgyszavak: röntgensugaras vizsgálat; öntvények; hegesztett kötések.

Öntvények hibavizsgálatát jelenleg általában röntgensugaras átvilágítással készült filmfelvételeken végzik. A vizsgálat gyorsabbá és megbízhatóbbá tétele és a számszerű értékelés lehetőségeinek biztosítása érdekében vezették be a digitális módszert. Olyan új megoldásokon dolgoznak, amelyek lehetővé tennék legalább a filmfelvételnek megfelelő geometriai felbontóképesség és érzékenység elérését.

A vizsgálat célja a munkadarab belső hibáinak kimutatása, helyzetének meghatározása és jellemzése. Ezt automatikusan is meg lehet oldani. Teljes, háromdimenziós tomográfiai rekonstrukcióról a költségek és időszükséglet miatt nem lehet szó. Általában azt a megoldást választják, hogy egymás után több felvételt készítenek. Mindegyiken meghatározzák a hiba lehetséges helyét, majd ezeket az információkat kombinálva, értékelik a belső hibát.

Automatikus ellenőrzés

Alumíniumöntvények hibavizsgálatára alkalmas új módszer esetében a neuronhálózatok módszerét használták fel két feladat elvégzésére:

a) az érdeklődés tárgyát képező tartomány kiválasztása, és

b) a detektáló szűrők struktúrájának kidolgozása.

Az operátor tevékenységét nem igénylő automatikus begyakorló fázist követőleg a szűrők képesek arra, hogy értékeljék a referencia kép és a vizsgálati kép közötti eltéréseket. Ahol az eltérés jelentős, ott hibahely van.

Digitális röntgenvizsgálat

A digitális röntgenfelvétel lehetővé teszi az elektronikus adatfeldolgozás alkalmazását, többek között a referenciakép és a vizsgálati kép összehasonlítását. A referenciakép lehet szintetikus kép, vagy pedig hibátlan munkadarabról készült felvétel. Szintetikus képet CAD modell alapján, numerikus szimulá-

cióval lehet előállítani, azonban ez az eljárás nagy számítástechnikai kapacitást igényel és általában elég bonyolult. Ajánlatos előzetes sorozatvizsgálat eredményeként kiválasztott darabról elkészíteni a felvételt. Ezzel az eljárással különböző típusú hibák, repedések, porozitások, zárványok, vagy mérethibák kimutatására van lehetőség.

Referenciamódszer

A referenciamódszer alkalmazásakor meghatározott ellenőrzési helyzetben állóképet kell felvenni. Amikor az ellenőrzendő kép és a referenciakép között jelentős különbséget észlelnek, az ellenőrzött munkadarab hibás. Ahhoz, hogy egy „aranyképet", vagyis egy tárolt referenciaképet lehessen használni, a kép szürke tartománya eloszlásának korrelációban kell lennie az ellenőrzött képével. Az „aranykép" használatának tehát előfeltétele, hogy a munkadarab helyezése nagyon pontos legyen, nagyon szigorú gyártási tűréseket kell betartani, és elengedhetetlen, hogy a felvételhez használt röntgensugár paraméterei reprodukálhatók legyenek. Ezeknek a paramétereknek akár kis változása esetében is igen nagy lesz a különbség a két kép között.

Tehát igen fontos, hogy a két kép mind geometriai helyezés, mind energetikai jellemzők szempontjából minél jobban megegyezzen. Ezt a célt szolgálhatják a rendszer elemei:

– pontos többtengelyű mechanizmus,
– nagy felbontóképességű detektor és
– adatfeldolgozó (szoftver) modul.

A mechanikus rendszer nem teremti meg a hibaméret szempontjából szükséges helyezési pontosság feltételeit. Ezt elsősorban a manipulátor pontatlansága okozza.

A képek összehasonlítása nem korlátozódhat normálásra és a képelemek kivonására. A két képnek mindenekelőtt kellő mértékben összehasonlítható-nak kell lennie.

A probléma megoldása érdekében alkalmazható a blokk-korrelációs eljárás és a konfidencia elvű szűrés. A blokk-korreláció lényegében optikai módszer: az ellenőrzendő képet blokkokra osztják fel. A vizsgálati kép minden egyes X blokkjához hozzárendelik az „aranyképnek" azt az Y blokkját, amely kielégíti az X és Y közötti korreláció maximumát. Az eltérés jellemzésére a konfidencia-index szolgál. A blokk helyzetpontossága a szomszédos blokkok bevonásával javítható. A helyesbítés úgy történik, hogy a referenciaképet összehangolják az ellenőrzött képpel. Ez oly módon valósítható meg, hogy mindegyik blokkot a becsült elmozdulási vektornak megfelelő mértékben eltolják a meghatározott irányba. Ennek megtörténte után a detektálás egyszerűen elvégezhető a korrigált „aranykép" és az ellenőrzendő kép különbségének meghatározásával.

Gyakorlatilag ez annyit jelent, hogy az ellenőrzési folyamat két lépésből áll: képregisztrálásból és hibadetektálásból.

Képregisztrálás és a hiba kiemelése

A módszer részletei

A képfeldolgozás területén több módszer is foglalkozik képregisztrálással és hibakiemeléssel. Főként két szempontra kell figyelemmel lenni: elsőnek a hibák méreteit és ennek megfelelően a képregisztrálástól megkívánt pontosságot kell gondosan megválasztani, majd pedig az összehasonlításra kerülő két kép közötti látszólagos elmozdulás jellegét, amely vagy egyszerű eltolással korrigálható, vagy bonyolultabb modell felhasználását teszi szükségessé.

A vizsgálat lefolytatásakor tekintettel kell lenni arra, hogy egy háromdimenziós elmozdulás kétdimenziós vetülete a kép nem lineáris transzformálásával egyenértékű. Egyes esetekben (látszólagos) irányváltozás (inverzió) következhet be. Például egy 60 cm mély üreges munkadarab felszínének látszólagos elmozdulása akár háromszorosa lehet a hátoldali részek elmozdulásának, és esetleg optikai inverzióra kerülhet sor.

Általában a kétdimenziós illesztés módszere merev elmozdulási modellnek felel meg. Most azonban az elmozduláson kívül elfordulást és léptékváltozást is tekintetbe kell venni. Azonban deformálható modellek nem alkalmazhatók, mert a hibákat is megváltoztathatják. Még a sorrendi elemzésben a mozgás becslésére alkalmazott parametrikus modell sem veszi kellőképpen tekintetbe az ellenőrzött munkadarab merevségét.

Tehát elkerülhetetlen a blokkillesztés módszerének alkalmazása. Segítségével kellőképpen lehet megfelelő kompromisszumot találni a helyi transzformáció és a hiba jelenléte miatt szükséges merevség között.

Az összehasonlításra kerülő kép blokkokra való felosztása után azok mindegyikéhez – korreláció figyelembevételével – hozzárendelik a helyi elmozdulási vektort. A kapott teret az egyes blokkok konfidencia-indexe alapján végzett szűrésével teszik egyenletessé, „simítják el”. A blokkstruktúra előzetes helyzetéhez viszonyított eltolása után az egész folyamat megismételhető. Ezzel a maradék hiba hatása csökkenthető. A kép regisztrálását követőleg elvégezhető összehasonlításuk és a hiba kiemelése.

A referencia- és az ellenőrzött röntgenfelvétel regisztrálása

A regisztrálási algoritmust általában illesztési kritériummal definiálják. Ebben az esetben olyan képfelvételekről (a referenciakép és az ellenőrzött kép) van szó, amelyeket ugyanazon a röntgenkészüléken, teljesen azonos feltételek között vettek fel, tehát mindkét kép szürkeségiszint-eloszlásának azonos-

nak kellett lennie. Ezért a korreláció maximálása megfelelő kritérium ahhoz, hogy legalább is helyileg optimálisak legyenek a két felvétel regisztrálási feltételei. A megválasztott geometriai átalakítás lényegében blokkillesztési eljárás. Becsléssel értékelik a helyi elmozdulásokat. Az egyes képrészletek egy-egy blokknak felelnek meg.

A referencia-röntgenfelvételt blokkonként egyeztetik az ellenőrzési röntgenképpel. Ennek végeredménye olyan kétdimenziós elmozdulási tér, amely megadja minden egyes blokk eltolódását. Ezután a referencia-röntgenfelvételt, az egyes blokkok becsült transzformáltját felhasználva „bekényszerítik" az ellenőrzési röntgenfelvétel geometriai struktúrájába. A transzformálás következtében a kép egyes részei lemaradnak, és emiatt egyes esetekben a detektált hiba is elveszhet. Egyes blokkok esetében a becsült elmozdulás sem felel meg a valóságnak. Emiatt az alábbi esetekben a korrelációs kritérium nem megfelelő a becslésre:

- ha a blokk nem tartalmaz információt (olyan területet, amelyben nincs geometriai struktúra vagy háttér),
- ha a blokk geometriai struktúrája következtében határozatlan az eltolódási vektor.

Az eltolódás helyes becslése az eltolódásra merőleges irányú geometriai struktúrát vagy széleket igényel. A kevéssé strukturált blokkok esetében kedvezőbb, ha inkább a szomszédos blokkok alapján becsült eltolódási vektort veszik figyelembe. Ez oly módon oldható meg, hogy a kétdimenziós eltolódási tér szűrését a konfidencia-index alapján végzik.

Legyen a definíció szerint I az eltolódási tér és C a konfidencia-index területi eloszlása (blokkonként egy index), ekkor a szűrt kép a következőképpen számítható:

$$\text{szűrt_I} = \{(I \cdot C) * a\} / (C * a) \tag{1}$$

ahol „·" számtani szorzás és „/" a számtani osztás kifejezése a kép felszínén, „*" a konvolúciós operátor, „a" pedig a konvolúciós kernel.

Azoknak a blokkoknak az esetében, amelyeknél a konfidencia-index a szomszédosakhoz képest kicsiny, az eredő kép interpolálásnak felel meg. Ezzel a folyamattal a „rossz" területrészek kitölthetők. Másrészt azokon a területeken, ahol a konfidenciaindex egyenletes, a folyamat szűréssel egyenértékű. Ennek következményeként viszont – az elvárásokkal szemben – a nagy konfidenciájú blokkok képértéke módosul. Ezért, nehogy az eredeti kép értéke a nagy konfidenciájú blokkok esetében megváltozzon, az (1) képletnek olyan alakot kell öltenie, amely alkalmas a cor_I számítására:

$$\text{cor_I} = I \cdot C + (1 - C) \cdot \text{szűrt_I} \tag{2}$$

A kétdimenziós eltolódási terek esetére a konfidencia-index téreloszlását az előbbiekben felsorolt problémáknak megfelelő eloszlásban szerkesztik

meg, amennyiben az eltolódások becslése gyenge. A következő kritériumok érvényesek:

- átlagos szürkeségi szint: annak jelzésére, hogy a területrész a háttérnek felel meg,
- a szürkeségi szint szórásnégyzete: annak érzékelésére, hogy geometriai struktúrák érvényesülnek,
- korreláció: a regisztrálás minőségének mérésére,
- a struktúra irányítottsága: az eredeti képen a helyi szélek irányainak hisztogramja és az eltolódás iránya.

Mindezeket a kritériumokat blokkonként becsülik a röntgenfelvétel megfelelő részterületeire. Az értékeket 0 és 1 közötti tartományra normálják, majd ezeket kombinálva blokkonként két konfidencia-indexet alakítanak ki:

- a struktúraindex: az átlagos szürkeségi szint, a szórásnégyzet és a korrelációs kritériumok szorzata,
- a kitüntetett irány indexe: a struktúraindex és a struktúrairány kritériumok szorzata.

A kétdimenziós eltolódási tér szűrését két lépésben hajtják végre:

1. Az eltolódási vektor irányát a struktúra konfidencia-indexének felhasználásával kiegyenlítik. Amennyiben a blokkon belül nincs struktúra, a blokk eltolódási irányát a szomszédos blokkok alapján számítják.
2. A kitüntetett irány konfidencia-indexének felhasználásával kiegyenlítik az eltolódási vektor modulusát. Ha a blokk irányának konfidenciája kicsiny, a blokk eltolódását a szomszédos blokkok alapján számítással határozzák meg.

A hiba kiemelése

A regisztrálás befejezése után a lehetséges hibákat a két regisztrált röntgenfelvétel különbsége alapján emelik ki. A különbségi képen azonban a regisztrálás miatt maradék hibák lehetnek. Ezek a „hamis” hibák általában vagy a tárgy peremei közelében, vagy a blokkok határai közelében találhatók. A különbségi kép feldolgozására van szükség ahhoz, hogy kiemeljék a hibajelet. A kiemelésre az előbbiekben ismertetett konfidenciaszűrés használható. A különbségi kép szűréséhez olyan konfidencia-feltérképezést választunk, amely a regisztrált referencia-röntgenfelvételen látható széleket (kontúrokat) veszi alapul: az észlelt szél csökkenti annak konfidenciáját, hogy azon a helyen egy valódi hibára találjanak.

A különbségi kép szűrése után a hibák kiemelését közelítéses eljárással, hiszterézis-küszöbérték alapján végzik. A röntgenfelvételek olyan csillapítási feltérképezések, ahol a szürkeségi szint a röntgensugarat átbocsátó anyag vastagságától függ. Tehát fizikai szempontok és a keresett hibák hosszával vagy mélységével kapcsolatos jellemzők alapján definiálhatók a küszöbértékek. A nagy küszöbérték általában a még kimutatható legkisebb hiba csillapí-

tási értékének felel meg. A hiba kiemelése után jellemzői (mérete és alakparaméterei, csillapítása, a konfidencia) számítással határozhatók meg.

Félblokkeltolásos feldolgozás

A fent ismertetett módszer felhasználása esetén a blokkok peremei hamis hibajeleket idézhetnek elő. A probléma megoldására javasolható két olyan különböző blokkhálózat alkalmazása, amelyek blokkméretei azonosak, azonban az X és az Y irányba fél blokkméretnek megfelelően el vannak tolva. Mindegyik blokkhálózat esetében a feldolgozás az előzőknek megfelelően történik: a blokkkorrelációból és az eltolódásszűrésből kiindulva egészen a hiszterézisküszöbértékig. Ezt követőleg a két hibafeltérképezésből ún. kereszteződési kép számítására kerül sor. Amint a blokkok peremeinek helyét azonosították mindkét struktúra különböző helyein, a hamis hibákat törlik. A végeredmény egyszerűsödik és a blokstrukturától független lesz.

„Begyakoroltatott mediánszűrő”

A jelszinkronizált szűrő elvén alapuló új módszert dolgoztak ki. Az eljárást alumíniumöntvények automatizált hibavizsgálatára használják. A „begyakoroltatott mediánszűrő” (TMF, trained median filter) olyan nemlineáris, nem helyi szűrő, amelynél a kernel a teljes röntgenfelvételből áll. A szűrés során az y[i,j] kimeneti elemi képpontot a bemeneti x[i,j] és három másik hozzá hasonló képpont mediánjaként definiálják, vagyis

$$y[i,j] = \text{median}\,(x[i,j],R1,R2,R3).$$

A begyakoroltatási fázisban a kép minden egyes elemi képpontja számára három hasonló elemi képpontot választanak. Az eljárás lényege, hogy egy azonos módszerrel előállított hibátlan öntvényről, azonos helyzetben készült (teljes) felvételen megtalálják azokat az elemi képpontokat, amelyek az x[i,j] képponthoz hasonlók. Miután az ellenőrző felvétel hibátlan darabról készült, a „begyakoroltatás” ellenőrizetlen abban az értelemben, hogy a szakaszokra bontás folyamán kapott tartományok a „reguláris struktúrák” osztályához tartoznak. Az ellenőrizetlen begyakoroltatás folyamán a TMF a hibátlan öntvényről készült röntgenfelvétel ismereti adatbázisát hozza létre. Az ismereti adatbázis az olyan osztályozási folyamat céljait szolgálja, amely lehetővé teszi a hibás és a hibátlan struktúrák automatikus megkülönböztetését. Akár egészen gyengén kontrasztos, egészen kis hibák, akár nagyméretű, fedő struktúrák által takart, kis képintenzitású hibák kimutatására lehetőség van.

Hibafelismerés alaki tulajdonságok alapján

A hegesztési hibák automatikus felismerését a mintázatfelismerés módszerével a következőképpen oldják meg:

a) Szakaszokra bontás: morfológiai jellemzők algoritmusa alapján különböztetik meg az egyes elemi képpont-csoportokat.
b) Jellegkiemelés: ezeket a képpont-csoportokat mérés és alaki jellemzők (átmérőváltozás, az invariáns tényezők fő irányai) alapján kvantálják.
c) Az egyes csoportok kiemelt ismérveit elemzik és a „legközelebbi k-adik szomszéd” szerint osztályozzák. Az eljárás egyszerű és kedvező felismerési biztonság elérését teszi lehetővé.

Hibafelismerés lineáris osztályozás alapján

A hegesztési hibák felismerésére szolgáló módszer első lépése a kép előfeldolgozása. A röntgenfelvétel minőségét mediánszűrő alkalmazásával és a kontrasztosság növelésével javítják. A hibát az említett mintázatfelismerési eljárással ismerik fel:

a) A röntgenfelvételen szakaszokra bontják a potenciális hibahelyeket.
b) Kiemelik a geometriai és a szürkeségi sajátosságokat (a [C] kontrasztosságot, a [P] helyzetet, az [a] felismerhetőségi arányt, az [e/A] szélesség/terület arányt, az [L/A] hosszúság/terület arányt és az [R] kerekséget). Lineáris korrelációs együttható elemzésével értékelik az ismérvek és az egyes figyelembe vett hibaosztályok (salakzárványok, porozitás, beolvadási hiány, alámetszés) közötti korrelációt.
c) Mérvadó ismérveket használnak fel bemenetként egy hierarchikus struktúrájú lineáris osztályozó hálózaton.

Az eredmények megbízhatóságának elérése érdekében a Nemzetközi Hegesztéstechnológiai Intézet (IIW, International Institute of Welding) referencia-röntgenfelvételeinek gyűjteményét használták. A 86 filmen a fő hibatípusok találhatók. A kísérleti eredmények szerint a P és az e/A ismérvek alapján lehet osztályozni az alámetszéseket és a beolvadási hibákat. Viszont az említett hat ismérvre van szükség ahhoz, hogy hatékonyan lehessen osztályozni a porozitást és a zárvány jellegű hibákat.

Mozgó munkadarabok vizsgálata

Az alumíniumöntvények mozgás közben végzett automatikus vizsgálatának lényege a potenciális hibák követése. Az eljárás az alábbi öt lépésből áll:

1. Ügyelve arra, hogy a darabok ne csússzanak el, mozgás közben felvételsorozat készül az öntvényekről.
2. Az öntvény mozgása következtében létrejövő elmosódás hatásának kiküszöbölése érdekében a röntgenfelvételt helyre kell állítani.
3. Egyetlen képfeldolgozó szűrő segítségével azonosítják a sorozat minden egyes felvételén a potenciális hibákat. A szűrőáramkör független a munkadarab felépítésétől. Ennél a lépésnél a tényleges hibákat azonosítják, a hamis hibajelzéseket figyelmen kívül hagyják.
4. Annak érdekében, hogy a potenciális hibákon belül csökkentsék a hamis észlelések számát, statisztikai elveken alapuló osztályozást végeztek. Ennek során több mint 10 000 tartományban, több mint 70 ismérvet elemeztek. Érdekes eredményre jutottak a textúra ismérv és egy újonnan kifejlesztett kontraszt ismérv felhasználásával.
5. Végül algebrai többpólusú korlátok igénybevételével illesztik és nyomon követik a képsorozatot. Ennek a lépésnek az alapvető célja azoknak a potenciális hibáknak hamis figyelmeztető jelként való észlelése, amelyeket a képsorozatban nem lehet nyomon követni.

A módszer megbízhatóságát olyan ténylegesen elkészült röntgenvizsgálati képsorozatok alapján ellenőrizték, amelyeket ismert hibákkal készült alumíniumöntvényekről vettek fel. Az eljárás igazolta, hogy a tényleges hibákat nagy biztonsággal lehet kimutatni, a hamis figyelmeztető jelzések pedig hatékonyan megkülönböztethetők.

A röntgen-hibavizsgálat digitalizálásának lehetőségei

A számítástechnika újabb fejlesztési eredményei olyan elméleti és gyakorlati problémák megoldását tették lehetővé, amelyek korábban nem voltak kezelhetők. Ki kell emelni a képsorok feldolgozásán túlmenőleg a felvételek részleteinek digitális feldolgozási lehetőségeit. Az eljárás hatékonyságát kísérletileg is ellenőrizték.

Az EU „Rasqual” kutatási programjának keretében vizsgálták a nagy teljesítőképességű röntgensugaras vizsgálati eljárással elérhető eredményeket. A berendezés szcintillátorból, lencseoptikából, kamerarendszerből (3072×2048 elemi pont = 40×30 cm, 12 bit alapján digitalizálva), 420 keV röntgensugárforrásból és öttengelyű mechanikai egységből áll. A szokásos továbbítási tengelyeken kívül a nagyítási tengely körüli billenő mozgatás feltételeit és a függőleges tengely körüli elfordítás lehetőségét is biztosították.

Az előkísérletek igazolták a mechanikai rendszerrel végzett mintadarabhelyezés igen kedvező pontosságát és reprodukálhatóságát. A hibavizsgálat eredményei teljes mértékben kielégítették az elvárásokat.

A gyakorlat szempontjából meg lehetett állapítani, hogy a számítástechnikai algoritmus teljesítőképessége érzékenyen reagál a blokkméretre. A

blokkméretet a munkadarab helyi struktúrájának megfelelően kell megválasztani úgy, hogy nagyobb legyen a várható hibaméretnél. Ellenkező esetben regisztrálás után a visszamaradó különbségek hatása erőteljesebben érvényesül. Az ilyen eltérések járulékos hamis hibákat eredményeznek, vagy zavarhatják a valódi hibák kimutatásának lehetőségeit. A szürkeségi szint jelentős folytonossági hiányai következtében a maradék eltérés hibajel formájában érezteti hatását. Viszont, amennyiben a folytonossági hiány túlságosan is gyenge, ez a hiba becsült méretét megnöveli.

A zajszint erőteljes hatást fejt ki a hibakimutatásra. A regisztrálás, a kép szűrése és a normalizálás rendben elvégezhető. A konvolúciós kernel előzetes beállítása előnyös a téves, vagy a megbízhatatlan adatok interpolálással való kiküszöbölése szempontjából. Ugyanakkor a konfidenciaindexek használata a hiba kimutatásának lehetőségeit korlátozza a kis konfidenciaszintű tartományokban.

Amennyiben a kétdimenziós hibakiemelést és jellemzést különböző referenciapontokból kiindulva megismétlik, a kapott információk kombinálásával az öntvény belsejében levő hiba háromdimenziós helyzetmeghatározására és jellemzésére nyílik lehetőség.

(Dr. Barna Györgyné)

Mery, D.: New approaches for defect recognition with X-ray testing. = Insight, 44. k. 10. sz. 2002. p. 614–615.

Vincent, A. G.; Rebuffel, V. stb.: Defect detection in industrial casting components using digital X-ray radiography. = Insight, 44. k. 10. sz. 2002. p. 623–627.