

NAGYMÉRETŰ NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK SZERKEZETINTEGRITÁSI SZÁMÍTÁSAIRÓL

STRUCTURAL INTEGRITY CALCULATIONS OF LARGE SCALE PRESSURE VESSELS

Fekete Tamás

ÖSSZEFOGLALÁS. Az energetikai iparban használt, nagyméretű nyomástartó edények tervezése, üzembevételének engedélyezése és üzemeltetése során kiemelkedő szerepet töltenek be a biztonsági számítások. Manapság egy gyorsan fejlődő, multidiszciplináris tudományterület, a Szerkezetintegritás foglalkozik az üzemelő berendezések biztonsági elemzéseinek kérdéseivel. A Szerkezetintegritás új tudományos-mérnöki paradigmának tekinthető, amelynek alapja a felhasznált elméleti és kísérleti módszerek között fellelhető szinergikus kapcsolatok kihasználása. Az alábbiakban a Szerkezetintegritás koncepciójának lényegét ismertetjük.

ABSTRACT. Safety calculations are critical parts of the design, certification procedures and safety analyses of large scale pressure vessels, used in electric power generation industry. Recently a new scientific-engineering paradigm, Structural Integrity is being developed that is based on synergistic collaboration between a number of scientific and engineering disciplines. The article summarizes the essence of Structural Integrity.

1. BEVEZETÉS

A nagyméretű és nagy értékű műszaki létesítményeket, rendszereket (pl. a konvencionális és az atomerőműveket, a vegyipari üzemeket stb.) és szerkezeteket (pl. hidakat, repülőgépeket, hajókat stb.) valamilyen, korlátozott idejű – általában 15-60 éves– üzemeltetésre tervezik, az adott időszakban alkalmazott műszaki szabványok és irányelvek figyelembe vételével. A szabványok (pl. az ASME Code [3], [4], a KTA Standards [12], a VDI Standards [23]) és a tervezési irányelvek (pl. PNAE [20]) általában a megelőző néhány év vagy évtized tudományos ismeretszintjét, technológiai színvonalát jelenítik meg. A tervezés során történő betartásuk az esetek túlnyomó többségében biztosítja a szerkezetek megfelelő ideig tartó, biztonságos működtetését, azonban a technika történetében –ha ritkán is– előfordultak olyan események, ame-

lyek egy-egy szerkezet vagy berendezés emberi életet is követelő, katasztrófális tönkremeneteléhez vezettek [15] –és nem zárható ki abszolút biztonsággal, hogy ilyen események a jövőben nem fordulhatnak elő–. Ilyen esemény volt pl. a Titanic katasztrófája, majd később a Liberty-típusú hajók hideg tengeri viszonyok közötti sorozatos tönkremenetele [21]. Magyarországon a répcelaki CO₂ feldolgozó üzemben 1969 január 2-án következett be katasztrófális következményekkel járó ridegtöréses baleset. Az időjárás akkor már hosszabb ideje rendkívül hideg volt. A rendszer egyik nagyméretű és nagy nyomás alatt üzemelő nyomástartó edénye ridegtöréssel tönkrement. A baleset 9 ember életét kioltotta, sokan súlyosan megsérültek, és az anyagi kár is jelentős volt [13].

Az említett és nem említett, de hasonló balesetek hívták fel a mérnök társadalom figyelmét arra, hogy a szerkezeti acélok ridegtörésének okait, a ridegtörés bekövetkeztének feltételeit addig nem vették kellő mértékben figyelembe. A balesetek körülményeinek és kiváltó okainak tisztázása, valamint az általános tanulságok levonása után az eseményekben nem érintett, üzemelő létesítményekre vonatkozóan számításokat, anyagvizsgálatokat, valamint az elemzéseket verifikáló egyéb kísérleteket végeztek, amelyekkel felmérték a helyi kockázatokat, és javító intézkedéseket hoztak a veszélyek csökkentésére. A később üzembe állított, hasonló rendszerek esetén a tanulságokat már tervezési követelményként vették figyelembe. A szabványokba a ridegtörés veszélyével szembeni vizsgálatok, és az azokkal szemben támasztott követelmények némi késéssel kerültek be. Az atomenergetikai iparban, a nyomottvízes technológiával épített erőművek történetében a Rancho Seco (1978) és a Three Mile Island (1979) létesítményekben történt egy-egy, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség Nemzetközi Nukleáris Esemény Skáláján 5. fokozatba sorolt baleset. Ez a két rendkívüli esemény akkoriban arra hívta fel a figyelmet, hogy a rendszert kezelő személyzet tévedése, hibája miatt egy egyébként enyhe következményekkel járó üzemzavar (amely a mai besorolás szerint a

tervezési alapba tartozó várható üzemi eseménynek, vagy súlyosabb esetben tervezési üzemzavarnak lenne tekinthető) is súlyos következményekkel járó, tervezésen túli üzemzavarrá válhat (ld. az NBSZ 10. [18] és 3. [17] kötetét). Más, súlyos következményekkel járó ipari káresetekkel együtt [15] a felsorolt balesetek tanulságai jelentősen hozzájárultak a szerkezetintegritás fogalmának kialakulásához, és relatíve önálló, nagy gyakorlati jelentőséggel bíró, tudományos kutatási területté fejlődéséhez.

2. A SZERKEZETINTEGRITÁS FOGALMA

A nagyméretű és nagy értékű energetikai, erőművi berendezéseket korlátozott idejű üzemre tervezik. A korlátozott üzemidőre történő tervezés alapja az a régi tapasztalat, hogy a berendezések üzemeltetése közben a szerkezeti anyagok teherviselő kapacitása folyamatosan – és megfordíthatatlanul – csökken. A csökkenés annál gyorsabb, minél nagyobbak az anyagra ható igénybevételek. A szerkezeti anyagok viselkedésének ezt a fajta változását az anyag öregedésének nevezzük. A szerkezeti anyagok öregedését a bennük különböző hossz- és időskálákon zajló belső –elsősorban átrendeződéssel járó– folyamatok [16] okozzák, amelyek között keresztreakciók, keresztteffektusok is felléphetnek. Ezért az anyagok öregedésének leírása rendkívül összetett, nyitott tudományos kérdés, melynek megoldásában minden bizonynyal a modern termodinamika kulcsszerepet játszik majd [2]. Ma a nagyméretű berendezések mérnöki elemzése során a szerkezeti anyagok öregedésének gyakorlati szempontból legfontosabb megjelenési formáját, az *anyag ridegtörésre való hajlamának változását* kísérik kiemelt figyelemmel. Az öregedés egységes rendszerben történő leírása még a jövő feladatai közé tartozik [1].

A berendezések terveit a tervezés idején érvényes műszaki szabványok és irányelvek szem előtt tartásával dolgozzák ki. A műszaki szabványok és irányelvek általában ugyan a beruházást megelőző évek, évtizedek tudományos ismeretszintjét, színvonalát tükrözik, azonban figyelembevételük megkerülhetetlen, mert olyan –a szakterületre vonatkozó, az érintett szervezetek, szakértők közreműködésével létrehozott és közzétett– felhalmozott ismeretanyagot tartalmaznak, amely az előzőleg már bevált tervezési, gyártási, üzemeltetési, felügyeleti és karbantartási eljárásokat egységes rendszerben rögzíti és szabályozza. A szabályrendszer ki-

dolgozásának alapelve az, hogy az alkalmazásra ajánlott összefüggéseknek az adott szakterület problémáira egyszerűen áttekinthető és megoldható, olyan megoldásokat kell szolgáltatniuk, amelyek a berendezésekben zajló folyamatokat biztonsági szempontból kedvezőtlenebbnek ítélik meg, mint ahogyan azok a valóságban zajlanak. Ezt úgy nevezik, hogy a leíró összefüggéseknek a rendszerekben, szerkezetekben zajló jelenségeket *konzervatíván kell megítélniük*.

A műszaki szabványok, irányelvek és szabályzatok figyelembe vétele a tervezési folyamatban többek között azért nélkülözhetetlen, mert: (1) ezek a beruházásban érintettek számára közös nyelvet, értelmezési keretet teremtenek a biztonság és az elfogadható műszaki megoldások megítélése szempontjából; (2) a tervezőket segítik a jó megoldások kidolgozásában oly módon, hogy a már bevált konstrukciós elveket, megoldási módszereket ismertetik, azt feltételezve, hogy az addig kipróbált és bevált megoldások hasonló geometrián és hasonló üzemi körülmények között szintén beválnak majd. Ezzel „újrahasznosításra” kínálják fel a rögzített, ’kanonizált’ tudást; (3) a szabványok a bennük feldolgozott tudományos ismereteken túl, nagy mennyiségű, az ipari, üzemeltetési gyakorlatból, vagy mérésekből leszárt, tudományosan még nem teljesen tisztázott, fontos empirikus tapasztalatot is tartalmaznak, és ezeknek a tervekbe történő integrálása a megvalósítandó létesítmény megbízhatóságát, biztonságát növeli; (4) a szabványok a szerkezeti anyagok tulajdonságainak olyan, nagyszámú kísérleten alapuló, többszörösen ellenőrzött adatkönyvtárait tartalmazzák, amelyek még a berendezések legyártása előtt lehetővé teszik azok biztonsági határainak és a tervezési információk alapján megengedhető üzemidejének becslését.

Az erőművi berendezések, rendszerek tervei hosszú, több lépcsőből álló folyamat során alakulnak ki [11]. A tervezés első lépcsőjében a rendszer hőségmáját (termodinamikai/energetikai rendszertervét) alakítják ki. A tervek kidolgozásának második lépcsőjében a termodinamikai rendszerterv alapján –a klasszikus méretezési számításokkal– meghatározzák a folyamatok kiszolgálására létesítendő, nagyméretű főberendezések fő méreteit, és kiválasztják a hozzájuk szükséges anyagokat. A méretezési számításokat a beruházás támogatására választott műszaki szabványok előírásait követve végzik. A harmadik tervezési lépcső a részletes tervezés fázisa, melynek során a berendezések

alapvető méreteinek ismeretében kidolgozzák a rendszer megvalósításához (gyártásához, szereléséhez) szükséges részletes geometriai tervet. A részletes tervezés fázisa önmagában is igen bonyolult, iteratív folyamat, melynek eredménye a rendszer olyan pontosságú geometriai modellje a megfelelő anyagok specifikációival, amelyek alapján a komponensek gyártása, szerelése, majd a teljes rendszer készre szerelése végrehajtható. A részletes tervek kimunkálása során a méretezési számításokat folytatják azon elemekre, amelyeket ebben a tervezési fázisban specifikálnak. A tervezés negyedik fő lépésében készítik el a *tervezési biztonsági elemzéseket*, amelyek célja annak bizonyítása, hogy a nagyméretű és nagy igénybevételeknek kitett berendezések, rendszerek a beruházás célkitűzéseinek megfelelő üzemeltetés esetén, legalább a specifikációban meghatározott időtartamon át biztonságosan üzemeltethetők lesznek. A tervezők a berendezés várható élettartamát elsősorban az alkalmazott szabvány(ok) által ajánlott elemzési eljárásokkal, szabványos (ezért a ténylegesnél kedvezőtlenebb) anyagjellemzőkkel, és az üzemelési technológiából származtatott, a külső környezet és a terhelések időfejlődésére tett, előzetes feltételezésekkel becsülik meg.

Mint már említettük, a szabványok tervezés során történő betartása az esetek túlnyomó többségében biztosította a szerkezetek megfelelő időn át történő biztonságos működtetését, azonban előfordultak már olyan katasztrófák is, amelyek akár emberi életet is követeltek [15]. Ezen katasztrófák utólagos elemzéseinek egyik fontos tanulsága az volt, hogy a katasztrófák jövőbeli elkerülése érdekében kiemelt figyelmet kell szentelni a biztonságos üzem és a katasztrófális meghibásodás közötti állapotok elemzésének. Ezért egészítették ki az energetikai nagyberendezések biztonsági számításait a törésmechanikai szempontokat is tartalmazó baleseti elemzésekkel, amelyek a berendezések ridegtöréssel szembeni biztonságát is értékelik. Az új szempontokkal kiegészített biztonsági számítások bevezetése idején, az akkor már üzemelő berendezésekre a hiányzó elemzéseket elvégezték, a később épülő tervezése során ezeket a számításokat már a tervezői biztonsági számítások részeként készítették el. Körülbelül innen számítható a *szerkezetintegritás*, mint önálló tudományos terület egyre gyorsabb fejlődése.

„A szerkezetintegritás a tudományos diszciplínák és a mérnöki technológiák azon

területeinek kiaknázása, amelyek a mérnöki szerkezetek biztonságos üzemeltetése érdekében a biztonságos üzem és a meghibásodás közötti tartomány elemzését szolgálják ...” áll az ESIS (European Structural Integrity Society, azaz az Európai Szerkezetintegritási Társaság) honlapján [7].

Mint már említettük, a tervező a berendezés várható élettartamát a szabvány által ajánlott számítási eljárásokkal, a szabványban rögzített (ezért konzervatív) anyagjellemzőkkel, és az üzemeltetési előírásokból származtatott, a külső környezet és a terhelések időfejlődésére vonatkozó feltételezett adatokból határozza meg, és erre vállal garanciát. A berendezések anyagvizsgálati és diagnosztikai programjait eredetileg azért írták elő, hogy azok a tervezői biztonsági számítások feltételeinek teljesülését ellenőrizzék. A konstruktőr által meghatározott *tervezési élettartam* általában rendkívül konzervatív és nagy bizonytalansággal terhelt. Az élettartam konzervatív volta könnyen belátható abból a tényből, hogy a berendezés számítások során feltételezett anyagjellemzői a valóságosnál biztosan kedvezőtlenebbek, továbbá a terheléseket és a külső környezeti feltételeket is kedvezőtlenebbnek választják, mint azok a valóságban várhatók. Mivel az elemzésekben használt, és a megvalósuló szerkezet anyagjellemzői, valamint a feltételezett és a majdan a berendezésre ható terhelések közötti különbség a tervezési biztonsági elemzések során ismeretlen, annak eredményei meglehetősen nagy bizonytalansággal terheltek.

A megvalósult, üzembe állított berendezés *műszakilag megengedhető élettartama* akkor határozható meg pontosabban (azaz kisebb bizonytalansággal), minél több és pontosabb információ áll rendelkezésre:

- a berendezés geometriájáról és az anyagában elhelyezkedő folytonossági hiányok méretéről és eloszlásáról;
- a berendezésben zajló technológiai folyamatok releváns paramétereiről és azok időfejlődéséről;
- a berendezést érő környezeti hatásokról és azok időfejlődéséről;
- a berendezésre ható mechanikai terhelésekről és azok időfejlődéséről;
- a szerkezeti anyagok viselkedéséről, és azok változásáról az üzemeltetés során (az anyag üzem közben várható öregedéséről), és

- olyan elemzési metodológiát használunk, amellyel a kérdéses érték a fenti információhalmaz alapján kellő pontossággal (és hozzá rendelt bizonytalansággal) számítható ki.

E szempontrendszer kielégítése nagyon összetett feladat. 30–50 évvel ezelőtt, amikor Amerikában, Európában és Magyarországon nagy számban építettek nagy nyomáson és magas hőmérsékleten üzemelő, nagyméretű vegyipari berendezéseket, egyre nagyobb egységteljesítményű, magas kezdeti paraméterű konvencionális erőművi blokkokat, valamint nagy egységteljesítményű, nagy nyomáson és magas hőmérsékleten üzemelő atomerőművi blokkokat, a tudományos és a technológiai információgyűjtés lehetőségei nagyon korlátozottak voltak. Az utóbbi 20-30 évben a kvantumfizikában, az arra épülő alkalmazott tudományokban, a mikroelektronikában, valamint az informatikában bekövetkezett óriási fejlődés lehetővé tette:

- olyan mérési módszerek és eljárások kidolgozását és alkalmazását, amelyek segítségével a szerkezeti anyagok multiskálás (nano-mikro-mezo-makro) szerkezetét egyre mélyebben megismerhetjük;
- olyan diagnosztikai rendszerek kifejlesztését, amelyek a korábbiakhoz képest sokkal megbízhatóbb eredményeket szolgáltatnak;
- olyan teljesítményű hardverek és szoftverek alkalmazását a problémák megoldására, amelyekkel:
 - egy berendezésről üzem közben korábban elérhetetlen mennyiségű és részletességű adat gyűjthető;
 - a számítások során egyre fejlettebb, pontosabb modelleket alkalmazhatunk a problémák megoldására;

Ezek a feltételek tették lehetővé a szerkezetintegritás, mint tudományág utóbbi időkben tapasztalható, rohamos fejlődését. A szerkezetintegritás magába foglalja a témában felhalmozott és tudományosan rendszerezett általános ismereteket, a témakörben releváns, felhasznált elméleteket (pl. kontinuumok termomechanikája, törésmechanika, anyagtudományok, méréselmélet stb.), az alkalmazott elméleti és gyakorlati módszereket (pl. szimulációs módszerek, mechanikai anyagvizsgálati módszerek, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek stb.); ám ezek nem önmagukban fontosak, hanem a közöttük fellelhető,

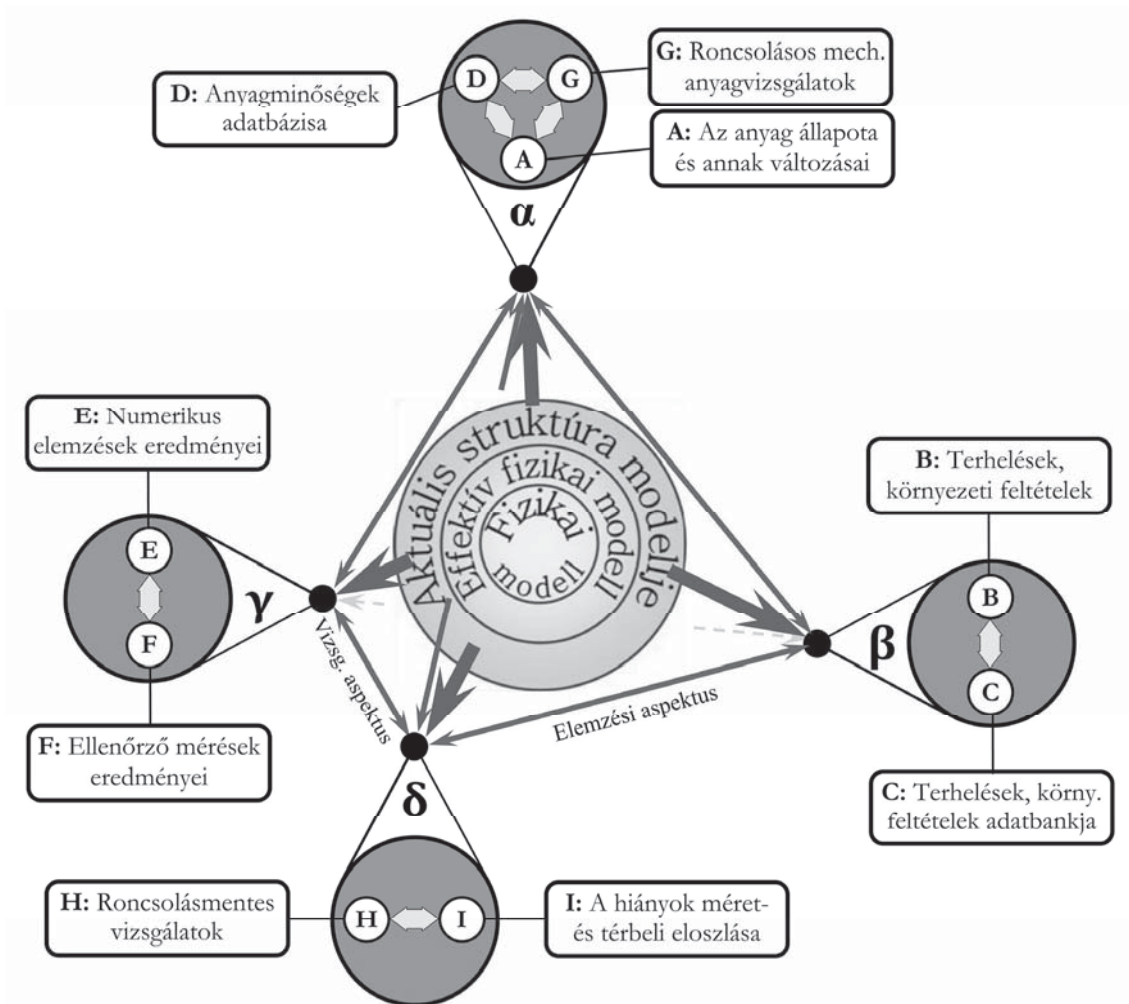
szinergikus kölcsönhatásokkal együtt, egységes rendszerben kezelve. Ez a megközelítés az utóbbi évtizedekben egy egyre inkább terjedő problémamegoldási modellé vált. Ilyen értelemben a szerkezetintegritás Kuhn nyomán [14] speciális tudományos-mérnöki paradigmának tekinthető.

Bár egy erőművi berendezés szerkezetintegritási számításai során mindig *az adott rendszerre vonatkozó, egyedi feladatot* kell megoldani, a problémakör egységes módszertani keretben tárgyalható. Eszerint a szerkezetintegritási vizsgálatok eredményei az alábbi négy kulcsszempont egységes rendszerben történő tárgyalásával érhetők el:

- Modellezési aspektus, melynek célja a szerkezetek számítási modelljének elméleti megalapozása, és a berendezés-specifikus modellek kidolgozása; a modellezés a következő tevékenységeket foglalja magába:
 - a jelenségkör általános fizikai modelljének kérdései (a jelenségkör mögött álló fizikai háttérelmélet megtalálása);
 - a rendszer effektív fizikai modelljének kidolgozása az általános fizikai modelltől (a konkrét rendszer leírására szolgáló speciális egyenletek levezetése az általános modelltől);
 - a berendezés aktuális modelljének megalkotása (a konkrét, numerikus számításokra alkalmas modell kidolgozása az effektív fizikai modell alapján);
- Elemzési aspektus, melynek feladata, illetve célja a szerkezet állapotának számításokkal történő meghatározása, figyelembe véve:
 - az anyagban létező vagy feltételezett folytonossági hiányok méret- és térbeli eloszlását;
 - a terhelési, környezeti feltételek időfejlődését;
 - a szerkezeti anyagok állapotának időben történő változását.
- Vizsgálati aspektus, amely kísérleti/mérési eljárásokkal szolgáltat adatokat az elemzések számára:
 - roncsolásmentes anyagvizsgálatokkal, amelyek adatokat szolgáltatnak az elemzések során figyelembe vett folytonossági hiányok méret- és térbeli eloszlásáról, illetve verifikálják a számításokban figyelembe vett hiányok megfelelőségét;

- roncsolásos vizsgálatokkal, amelyekből az elemzések számára szükséges, releváns anyagjellemző adatok levezethetők –a vizsgálatok megtervezése és végrehajtása során figyelembe véve az anyagok öregedését–;
 - ellenőrző mérésekkel, amelyek az elemzésekkel meghatározott állapotjellemzőket verifikálják.
- Informatikai aspektus, amelynek feladata:
- a terhelésekről, környezeti feltételekről rögzítendő adatok gyűjtése és azok megfelelő rendszerben történő feldolgozása, tárolása;
 - a szerkezeti anyagok –elemzések során felhasználandó jellemzőinek– gyűjtése és tárolása;
 - a számítások végrehajtásának, a keletkezett eredmények rögzítésének, további feldolgozásának és tárolásának lehetővé tétele.

A fenti kulcsszempontok egységes rendszerben történő ábrázolására fejlesztettük ki Lukács szerkezetintegritási tetraéder modellje [15] (200. old.) alapján a szerkezetintegritás hipergráf modelljét, melyet az 1. ábrán mutatunk be. A modell kialakítása mögött álló megfontolásokat részletesebben egy korábbi tanulmányban ismertettük [8]. A hipergráf modellben a modellezési aspektust a tetraéder súlypontjába helyezett koncentrikus gömbök rendszere ábrázolja, amely azt fejezi ki, hogy a szerkezetintegritási vizsgálatok során a berendezés állapotát egy, az aktuális szerkezet alkotta geometrián értelmezett fizikai probléma leíró egyenleteinek megoldásai jellemzik. A konkrét rendszerre vonatkozó összefüggések mögött egy általános fizikai elmélet áll (amely ma még további kutatások tárgyát képezi). A tetraéder csúcaiban a gráf ún. hipercomópontjai helyezkednek el, amelyek az egymással valamely módon összehasonlítható mennyiségek egymással való erős kapcsolatát fejezik ki.



1. ábra: A szerkezetintegritás hipergráf modellje

3. A KONCEPCIÓ ALKALMAZÁSA NAGY-MÉRETŰ NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK BIZTONSÁGI ELEMZÉSEI SORÁN

Az előzőekben vázolt szerkezetintegritási koncepciót ipari feladat megoldása során alkalmaztuk. A cél az MVM PA Zrt. blokkjaiban üzemelő, négy VVER-440/V-213Cs típusú reaktortartály *műszakilag megengedhető üzemidejének* realisztikus becslése volt. Mind a négy tartály a nyomottvízes reaktorok második generációjába tartozik, és 1976 és 1986 között a pilseni Skoda művekben gyártották azokat. A reaktortartályok tervezői biztonsági számításai szerint a *tervezési üzemidejük* legalább 40 üzemév. A tervezői biztonsági elemzések az 1980-as évek elején készültek, az akkor érvényes szovjet műszaki szabványok előírásai és anyagjellemző adatai alapján. Tekintettel arra, hogy a berendezéseket a gyártóműben felszerelték a szerkezeti anyagok gyorsított öregítésére alkalmas rendszerrel, valamint megfelelő mennyiségű, a tartályok gyártása során, azok anyagából készített anyagvizsgálati próbatesttel, valamint az előírt anyagvizsgálati ellenőrző programot végrehajtották, a munka megkezdésének idejére ismertté váltak azok az anyagjellemző adatok, amelyek az egyedileg legyártott reaktortartályokat külön-külön jellemezték. Ezen felül a gyártóműben a tartályokat gondosan átvizsgálták, és dokumentálták az anyagokban észlelt, számottevő méretű hibákat. A berendezéseket üzembehelyezésük előtt, majd üzembe helyezés után is az előírásoknak megfelelő rendszerességgel, roncsolásmentes vizsgálatoknak vetették alá. A roncsolásmentes vizsgálatokat az időközben felmerült követelményeknek eleget téve minősítették, így azok eredményei kellően megbízhatónak tekinthetők. Mindezek összegezve azt jelentik, hogy a biztonsági számításokat a szabványban rögzített értékek helyett az egyes berendezésekre jellemző anyagjellemzőkkel lehetett elvégezni. A vizsgálatok berendezés-specifikus jellege azért volt fontos, mert az anyagvizsgálati ellenőrző program eredményei szerint az egyes tartályok anyagjellemző mennyiségei és öregedési tulajdonságai között szisztematikus eltérések vannak.

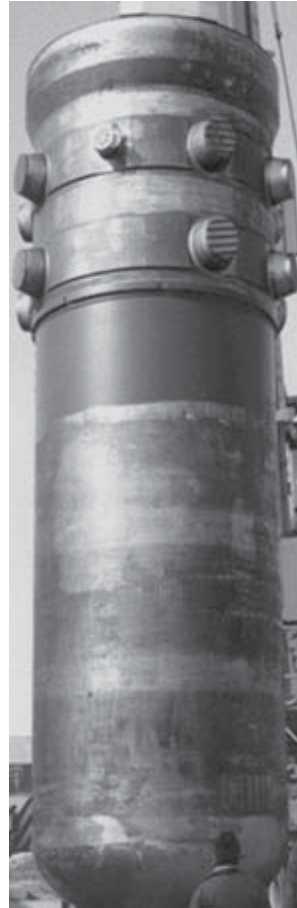
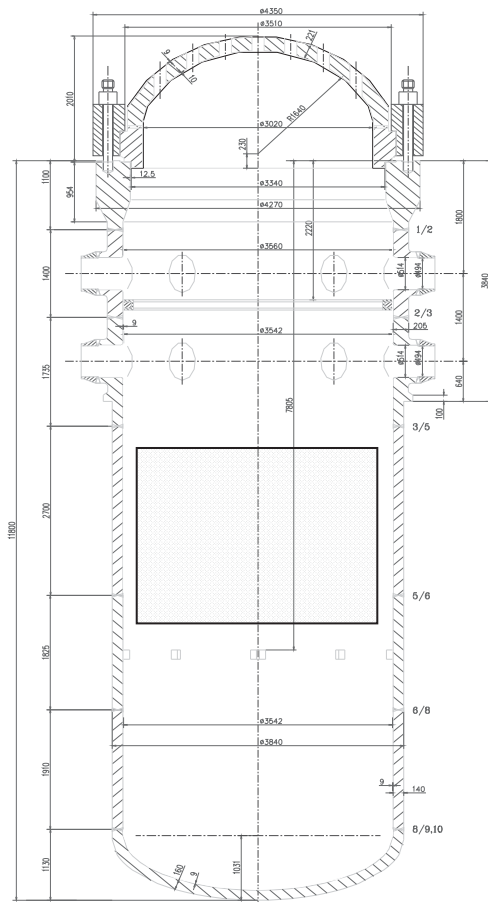
3.1. A VVER-440 reaktortartályok fő jellemzői

Egy VVER-440/V-213Cs reaktortartályt hét részből, a peremből, a felső és az alsó csonkzónából, három hengeres gyűrűből, valamint az alsó elliptikus fenékből állították össze, fedettívű hegesztési technológiával. A teljes szerkezet magassága 11 800 mm, belső átmérő-

je $\approx 3\,540$ mm. A tartály hét fő komponensét 15H2MFA típusú, Cr-Mo-V-mal ötvözött reaktoracélból, kovácsolással készítették. A perem felül 465 mm vastag, alsó része a csonkzónával megegyezően 205 mm vastagságú. A hengeres gyűrűk 140 mm vastagságúak, míg az elliptikus fenék 160 mm vastag. A csonkzónák mindegyike hat csonkot tartalmaz, amelyekhez a fővízköri vezetékek egy-egy $\varnothing 492$ mm ága csatlakozik. A reaktortartály belső felületét 08H18N10T típusú, fedőporos hegesztéssel felvitt, korrózióálló acéllal plattírozták. A plattírozás termomechanikai jellemzői jelentősen különböznek az alapanyagétól, ami makroszkopikus szinten is észrevehetően inhomogénná teszi a rendszert. A tartály 15H2MFA alapanyaga a mikroskálán BCC kristályszerkezettel bír, ennek következtében makroszkopikus skálán határozott törési tulajdonságaiban határozott rideg-szívós átmenettel jellemezhető viselkedést mutat. A rideg-szívós átmenetet a kritikus ridegtörési átmeneti hőmérséklettel jellemzik, amely a szerkezeti anyag öregedésére igen érzékeny. Az energiatermelő zóna hossza $\approx 2\,500$ mm; vízszintes metszete hatszög-szimmetriát mutat. A 2. ábrán bemutatjuk a reaktortartály fő méreteket tartalmazó hosszmetsetét, valamint egy még beszerelés előtt álló tartály fényképét.

3.2. A VVER-440 reaktortartályok nyomás alatti hőítés számításainak módszere és eredményei

A reaktortartályok biztonsági elemzéseinek módszertana a nemzetközi jó gyakorlaton [10], [22] alapult, de azt az előző pontban bemutatott általános koncepció alapján tovább fejlesztve, saját számítási metodikát alkalmaztunk [9]. Mint említettük, a projekt célja a tartályok műszakilag megengedhető üzemidejének realisztikus becslése volt. A tartályok műszakilag megengedhető üzemideje az az üzemidő, amelyet elérve a berendezés egy igen kis valószínűséggel bekövetkező esemény, a zóna üzemzavari vészhűtőrendszer beavatkozása következtében hirtelen hűtése során fellépő nyomás alatti hőítés esetén is még gyors –katasztrofális következmények veszélyével járó– repedésterjedés nélkül túlél. A *nyomás alatti hőítés* eseményt az angol *Pressurized Thermal Shock* kifejezésből alkotott *PTS* rövidítéssel nevezik még a magyar szaknyelvben is. A továbbiakban a szerkezetintegritási koncepció szerint, vázlatosan áttekintjük a számítások módszerét. Az érdeklődők a módszertan részletesebb kifejtését a [8] és [9] publikációkban találhatják meg.



2. ábra: Egy VVER-440/V-213Cs reaktortartály metszete a fő méretekkel (bal) és a tartály fényképe

Az elemzéseket a következő, berendezés-specifikus adatfajtákra alapoztuk, amelyek egy tartály esetén a következők:

- a tartály geometriai adatai, amelyeket a berendezések gyártási dokumentációja tartalmaz;
- a tartályon végzett ISI vizsgálatok eredményei: ezen adatok alapján bizonyítható volt, hogy a reaktortartályok plattírozása az öregedéssel érintett zónákban makroszkopikus szinten hibamentesnek tekinthető, továbbá az alapanyagaikban a gyártás után észlelt hibák stabilak maradtak; ezek alapján a számítási modellekben ésszerűen konzervatív méretű, ám realiztikus elhelyezkedésű (plattírozás alatti) repedéseket lehetett feltételezni;
- a neutron fluencia számítások eredményei: a validált reaktorfizikai számítások eredményei teremtettek alapot a tartályok öregedett állapotban érvényes anyagjellemzőinek a valóságot jobban közelítő meghatározásához;
- a tartály szerkezeti anyagainak termomechanikai jellemzői, amelyeket a gyártási dokumentáció tartalmaz;

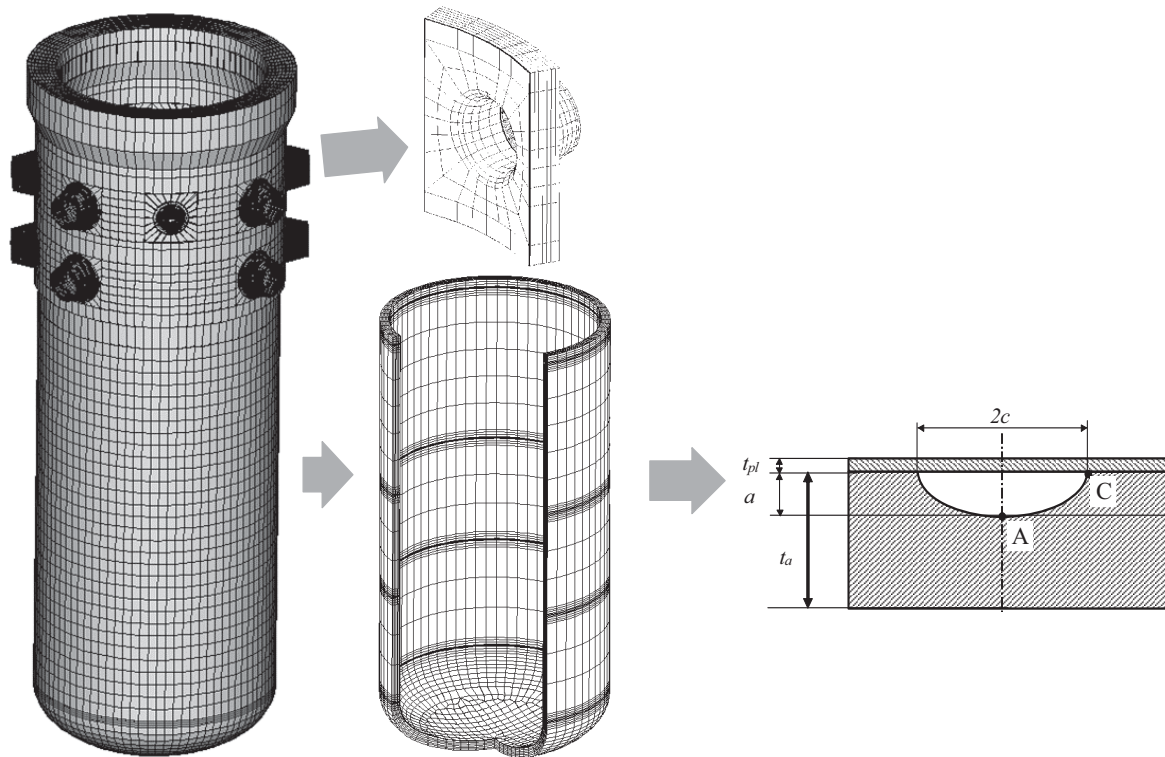
- a tartály anyagainak rugalmas-képlékeny jellemzői: a reaktortartályok anyagvizsgálati ellenőrző programja során elvégzett mérések eredményein alapulnak;
- a tartály anyagainak törési szívósságát leíró törésmechanikai adatok: a reaktortartályok anyagvizsgálati ellenőrző programja során elvégzett mérések eredményein alapuló adatok;
- a termohidraulikai tranziens-számítások által szolgáltatott eredmények: a termohidraulikai elemzések a megvalósult rendszerek aktuális –és jövőben feltételezhető– állapotaira készültek, és az üzemeltetés megkezdése óta végzett módosítások, átalakítások hatásait is figyelembe vették.

A számítások kiinduló adataiban figyelembe vettük a berendezések egyedi gyártásából adódó különbségeket is. Ezt egyebek között az indokolta, hogy a reaktortartályok anyagvizsgálati ellenőrző programja során végzett mérések kimutatták, hogy az egyes berendezések anyagtulajdonságai és öregedési jellemzői között olyan szisztematikus eltérések léteznek, ame-

lyek indokoltá teszik a tartályok egyedi vizsgálatát.

A reaktortartályok elemzéseikhez 3 dimenziós véges elemes modelleket fejlesztettünk ki. Ezt egyfelől a zónából kiszökő inhomogén neutronfluxus okozta öregezés térben inhomogén volta, másfelől a tartály ejtőkamrájába beáramló hűtőközeg erősen aszimmetrikus, inho-

mogén hőmérséklet- és sebesség-eloszlása indokolta. Így a számítások a valóságot lényegesen jobban közelítő geometriai modelleken készültek, mint a tervezői elemzések. A tartály teljes 3 dimenziós modellje, legjobban terhelt részeinek térbeli modelljei és a repedés sematikus modellje a 3. ábrán látható.



3. ábra: A VVER-440/V-213Cs reaktortartály teljes VEM modellje (bal), részmodelljei (közép) és a számítások során feltételezett repedések sematikus modellje (jobb)

A berendezések biztonsági számításai minden termohidraulikai tranziens esetre egy hőfeszültség [19] és hozzá csatolt törésmechanikai elemzést [6] jelentettek, a következő eljárás szerint (részleteiben ld. a [8] és [9] publikációkat):

- hőtani számítás, melynek során a tranziens idején a tartály falában kialakuló hőmérséklet-eloszlásokat határozzák meg a hűtőközeg hőmérséklete és a hűtőközeg – fal közötti hőátadási tényező függvényében, a falban hővezetést, a fal és a hűtőközeg között konvektív hőátadást feltételezve;
- szilárdsági számítás, melynek során a hőmérséklet-tranziens és a tartályban kialakuló nyomás hatására a tartályfalban kialakuló alakváltozási- és feszültségmezőt határozzák meg a rugalmasság- (ill.

képlékenységtan) egyenletei rendszerének [5] megoldásával;

- törésmechanikai elemzés, melynek során a falban feltételezett repedések stabilitási viszonyait elemzik a tranziens teljes során. A törésmechanikai számítás kiindulási adatait az előző lépésekben meghatározott hőmérséklet-, alakváltozási- és feszültség-eloszlások szolgáltatják. A stabilitásvizsgálat a következő lépésekből áll:
 - a repedésekre (pontosabban azok megfelelő pontjaira) jellemző törésmechanikai mérőszámok (K_I feszültségintenzitási tényező, vagy a J -integrál) meghatározása a repedés körüli deformáció, ill. feszültségmező alapján;
 - az anyag törési szívósságának (K_{Ic}) meghatározása a repedések megfelelő pontjaira;

- a megfelelő paraméterek összehasonlítása, azaz a stabilitási feltétel teljesülésének vizsgálata –a vonatkozó szabályzatban megadott– $K_I \leq K_{Ic}$ törés kritériumon keresztül,

A számítások eredményei azt bizonyították, hogy a vizsgált reaktortartályok műszakilag megengedhető élettartama az eredetileg garantált 40 üzemévet jelentősen –akár évtizedekkel is– meghaladhatja.

4. ÖSSZEGZÉS, KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmány vázlatosan áttekintette a nagyméretű és nagy értékű energetikai berendezések szerkezetintegritási elemzéseinek alapjait. Bemutatta, hogy a szerkezetintegritási számítások gyökerei a tervezői biztonsági számításokra nyúlnak vissza, azonban míg a tervezői biztonsági elemzések nagymértékben szabványos, általános adatokra és becslésekre támaszkodnak, az üzemelő berendezésekre végzett számítások reálisabb alapokra helyezhetők. Ezt a szerkezetintegritási koncepció alapján megtervezett üzemeltetési, anyagvizsgálati és karbantartási program teszi lehetővé. Mindezek együtt vezethetnek oda, hogy megfelelő információk birtokában egy berendezés műszakilag megengedhető élettartama akkor is nagyobb, mint a tervezői elemzések alapján garantált érték, ha időközben a berendezéssel szemben támasztott biztonsági követelmények lényegesen megnöttek a tervezés idején érvényben lévőkhöz képest.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott VKSZ_14-1-2015-0021 azonosító számú projekt keretében zajlott. A szerző ezúton is kifejezi külön köszönetét Dr. Elter Józsefnek és Rátkai Sándornak a több mint két évtizede tartó, sikeres szakmai együttműködésért és támogatásért.

7. IRODALOM

- [1] Amiri M., Khonsari M.M.: On the Role of Entropy Generation in Processes Involving Fatigue. *Entropy* 14(1), 24–31. (2012) doi: 10.3390/e14010024
- [2] Amiri M., Modarres M.: An Entropy-Based Damage Characterization. *Entropy* 16, 6434–6463. (2014) doi:10.3390/e16126434
- [3] ASME Boiler & Pressure Vessel Code. The American Society of Mechanical Engineers, Section XI. New York (2007)

- [4] ASME 2015 Boiler and Pressure Vessel Code Complete Set, ASME, New York (2015)
- [5] Béda Gy., Kozák I., Verhás J.: *Kontinuummechanika*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1986)
- [6] Broek D.: *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, Springer Netherlands (1982)
- [7] ESIS, <http://www.structuralintegrity.eu/esis/> megtekintve: 2017. szeptember 27.
- [8] Fekete T.: Methodological Developments in the Field of Structural Integrity Analyses of Large Scale Reactor Pressure Vessels in Hungary. *Fratt. ed Int. Strutt.* 36 78-98. (2016) DOI:10.3221/IGF-ESIS.36.09
- [9] Fekete T.: Review of pressurized thermal shock studies of Large Scale Reactor Pressure Vessels in Hungary, *Fratt. ed Int. Strutt.* 36 100-112. (2016). DOI: 10.3221/IGF-ESIS.36.10
- [10] Kang K.S., Kupča L. (eds.) *Pressurised Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment, Handbook on Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel*. IAEA TECDOC-1627, IAEA, Vienna (2010)
- [11] Kolonits F.: *Energetikai csővezetékek tervezése*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1985)
- [12] KTA Program of Standards, http://www.kta-gs.de/common/regel_prog1.htm megtekintve: 2017. október 1.
- [13] Kurucz I.: *Indulatok nélkül: a répcelaki robbanásról*. Magyar Olajipari Múzeum, Zalaegerszeg (2009)
- [14] Kuhn T.: *A tudományos forradalmak szerkezete*. Gondolat Kiadó, Budapest (1984)
- [15] Lukács J. (szerk): *Fejezetek a Szerkezetintegritás témaköréből*. Miskolci Egyetem, Miskolc (2012)
- [16] Maugin G.A.: *Configurational Forces. Thermomechanics, Physics, Mathematics and Numerics*. CRC Series: Modern Mechanics and Mathematics. CRC Press Taylor&Francis Group Boca Raton, London, New York (2010)
- [17] NBSZ 3. kötet. *Üzemelő atomerőművek tervezési követelményei*. OAH, Budapest (2015)
- [18] NBSZ 10. kötet. *Nukleáris Biztonsági Szabályzatok meghatározásai*. OAH, Budapest (2015)

- [19] Nowacki W.: Thermoelasticity. Pergamon Press, Oxford (1986)
- [20] PNAE G-7-002-86: Equipment and pipelines strength analysis norms for nuclear power plants. (in Russian) Energoatomizdat, Moscow (1990)
- [21] Sawyer L.W., Mitchell W.H.: The Liberty Ships: The History of the 'Emergency' Type Cargo Ships Constructed in the United States During World War II, Cornell Maritime Press, Cambridge, Maryland (1970)
- [22] Trampus P.: Ensuring Safety of Structures and Components at Nuclear Power Plants. Proc. Eng. 86 486–495 (2014)
DOI:10.1016/j.proeng.2014.11.062
- [23] VDI Standards, <http://www.vdi.eu/engineering/vdi-standards/> megletekintve: 2017. szeptember 15.