Babics Péter Pál– Kovács István Soma–Oszvald Ferenc–Trampus Péter

ATOMERŐMŰ-LÉTESÍTÉS – MŰSZAKI MODUL

A létesítésen dolgozó beosztott és középvezető mérnökök számára

© Dunaújvárosi Egyetem–Ecotech Nonprofit Zrt., 2021

© Babics Péter Pál– Kovács István Soma–Oszvald Ferenc–Trampus Péter, authors, 2022

A kötet A Dunaújvárosi Egyetem Paksi Kompetencia- és Kutatóközpontjának kialakításához szükséges feladatok ellátásához kapcsolódó 1734/2019. (XII. 19.) Korm. határozat alapján kapott támogatásból valósul meg.

DUNAÚJVÁROSI EGYETEM www.uniduna.hu D=U=E PRESS

Kiadóvezető Németh István

Felelős kiadó Dr. habil András István Felelős szerkesztő Nemeskéry Artúr

Tördelés Duma Attila Készült a HTSART nyomdában Felelős vezető Halász Iván Babics Péter Pál Kovács István Soma Oszvald Ferenc Trampus Péter

ATOMERŐMŰ-LÉTESÍTÉS – MŰSZAKI MODUL

A létesítésen dolgozó beosztott és középvezető mérnökök számára

DUE Press Dunaújváros, 2022

TARTALOM

KÉPZÉSI CÉLOK	13
1. A VVER–1200 TÍPUSÚ ATOMERŐMŰ (Kovács István Soma)	14
1.1 Δ.ΚΟΝΝΥΙΊΥΙΖΗΙΊΤΕςΙΊ ΔΤΟΜΕΡΟΜΙΊΝΕΚ ΕΕΙ ΕΡΙΤΕSE	
ÉS MŰKÖDÉSE	14
1.1.1. HŐ- ÉS ATOMERŐMŰVEK ENERGIATERMEI ÉSE	14
1.1.2. NUKLEÁRIS ENERGIA	15
1.2. RADIOAKTÍV SUGÁRZÁS	17
1.2.1. RADIOAKTIVITÁS, RADIOAKTÍV BOMLÁS	18
1.3. SUGÁRZÁSOK ÉLETTANI HATÁSA	21
1.3.1. SUGÁRVÉDELMI ALAPFOGALMAK	21
1.3.2. DETERMINISZTIKUS HATÁSOK	22
1.3.3. SZTOCHASZTIKUS HATÁSOK	22
1.3.4. A SUGÁRVÉDELEM ALAPJAI	23
1.4. VVER ERŐMŰVEK	23
1.4.1. A VVER REAKTORTÍPUS FEJLŐDÉSE	24
1.4.2. A VVER–1200 ERŐMŰ FŐBB MŰSZAKI PARAMÉTEREI	24
1.4.3. FŐVÍZKÖRI JELLEMZŐK	27
1.4.4. TURBINA SZIGET JELLEMZŐI	28
1.4.5. HŰTŐVÍZ HASZNÁLATI MÓDOK, LEHETŐSÉGEK	30
1.5. A PRIMER KÖR FŐBB BERENDEZÉSEI	31
1.5.1. REAKTOR	31
1.5.2. FŐVÍZKÖRI NYOMÁSSZABÁLYOZÁS	32
1.5.3. GŐZFEJLESZTŐK	33
1.5.4. FŐ KERINGTETŐ SZIVATTYÚ (FKSZ)	34
1.6. A SZEKUNDER KÖR FŐBB BERENDEZÉSEI	35



1.6.1. FŐGŐZRENDSZER	35
1.6.2. TURBINA	36
1.6.3. CSEPPLEVÁLASZTÓ ÉS TÚLHEVÍTŐ	37
1.6.4. KONDENZÁTOR	38
1.6.5. TÁPVÍZ ELŐMELEGÍTŐK	38
1.6.6. GÁZTALANÍTÓS TÁPTARTÁLY	38
1.7. BIZTONSÁGI RENDSZEREK	39
1.7.1. AZ AKTÍV ZÓNA HŰTÉSE	40
1.7.2. A PIHENTETŐ MEDENCE HŰTÉSE	41
1.7.3. A KONTÉNMENT INTEGRITÁSÁNAK VÉDELME	43
1.8. A PRIMER- ÉS SZEKUNDER KÖR VÍZÜZEME, FONTOSABB	
PRIMERKÖRI SEGÉDRENDSZEREK	44
1.8.1. PRIMERKÖRI VÍZÜZEM	44
1.8.2. TÉRFOGATSZABÁLYOZÁS A PRIMER KÖRBEN	45
1.8.3. KÉMIAI ÖSSZETÉTEL SZABÁLYOZÁSA A PRIMER KÖRBEN	46
1.8.4. A PRIMER HŰTŐKÖZEG TISZTÍTÁSA	46
1.8.5. SZEKUNDER KÖRI VÍZÜZEM	47
1.9. NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUS	47
1.9.1. URÁNBÁNYÁSZAT	48
1.9.2. URÁNDÚSÍTÁS	48
1.9.3. NUKLEÁRIS ÜZEMANYAG	48
1.9.4. ÜZEMANYAGCIKLUS A PAKS II ATOMERŐMŰBEN	50
1.9.5. AZ ÜZEMANYAG ÚTJA AZ ERŐMŰBEN	50
1.9.6. A KIÉGETT ÜZEMANYAG TOVÁBBI SORSA	50
1.10. HIVATKOZÁSOK (1. FEJEZET)	52
2. AZ ATOMERŐMŰ JELLEMZŐ SZERKEZETI ANYAGAI	53
(Trampus Péter)	
2.1. REAKTOROK JELLEMZŐ TERHELÉSI ÉS KÖRNYEZETI VISZONY/	4 <i>I,</i>
AZ IGÉNYBEVÉTEL	53
2.2. A SZERKEZETI ANYAG VÁLASZA – KÁROSODÁS	
ÉS TÖNKREMENETEL	54
2.3. ÖREGEDÉSI HATÁSOK	55



2.3.1. TERMIKUS ÖREGEDÉS 55 2.3.2. SUGÁRKÁROSODÁS 55 2.3.3. KÚSZÁS 58 2.3.4. KORRÓZIÓ 58 2.3.5. ERÓZIÓ 61 2.3.6. FÁRADÁS 61 2.3.7. KOPÁS 63 2.4. KITEKINTÉS A JÖVŐBE 64 2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK KÖVETELMÉNYEK 64 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- 74 (Oszvald Ferenc) 31. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 74 3.1.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS		
2.3.2. SUGÁRKÁROSODÁS 55 2.3.3. KÚSZÁS 58 2.3.4. KORRÓZIÓ 58 2.3.5. ERÓZIÓ 61 2.3.6. FÁRADÁS 61 2.3.7. KOPÁS 63 2.4. KITEKINTÉS A JÖVŐBE 64 2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK KÖVETELMÉNYEK 64 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- 74 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ 74 3.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFÖBB FOLYAMATAI 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFÖBB FOLYAMATAI 74 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 77 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜL	2.3.1. TERMIKUS ÖREGEDÉS	55
2.3.3. KÚSZÁS 58 2.3.4. KORRÓZIÓ 58 2.3.5. ERÓZIÓ 61 2.3.6. FÁRADÁS 61 2.3.7. KOPÁS 63 2.4. KITEKINTÉS A JÖVŐBE 64 2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK KÖVETELMÉNYEK 64 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6.4. TOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- 74 (Oszvald Ferenc) 31.ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 77 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÁS 80 </td <td>2.3.2. SUGÁRKÁROSODÁS</td> <td>55</td>	2.3.2. SUGÁRKÁROSODÁS	55
2.3.4. KORRÓZIÓ 58 2.3.5. ERÓZIÓ 61 2.3.6. FÁRADÁS 61 2.3.7. KOPÁS 63 2.4. KITEKINTÉS A JÖVÖBE 64 2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT 64 2.5.A SZERKEZETI ÁNYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT 64 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- 74 (Oszvald Ferenc) 31.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 76 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK	2.3.3. KÚSZÁS	58
2.3.5. ERÓZIÓ 61 2.3.6. FÁRADÁS 61 2.3.7. KOPÁS 63 2.4. KITEKINTÉS A JÖVŐBE 64 2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK KÖVETELMÉNYEK 64 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- 74 (Oszvald Ferenc) 74 3.1. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÁS <t< td=""><td>2.3.4. KORRÓZIÓ</td><td>58</td></t<>	2.3.4. KORRÓZIÓ	58
2.3.6. FÁRADÁS 61 2.3.7. KOPÁS 63 2.4. KITEKINTÉS A JÖVŐBE 64 2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK KÖVETELMÉNYEK 64 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- 74 (Oszvald Ferenc) 74 3.1. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 76 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÁS	2.3.5. ERÓZIÓ	61
2.3.7. KOPÁS 63 2.4. KITEKINTÉS A JÖVŐBE 64 2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK 64 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZŐTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI 74 (Oszvald Ferenc) 74 3.1. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 74 3.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 76 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 77 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 80 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BAN 83	2.3.6. FÁRADÁS	61
2.4. KITEKINTÉS A JÖVŐBE642.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTTKÖVETELMÉNYEKKÖVETELMÉNYEK642.5.1. BEVEZETÉS642.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK652.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK652.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK672.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK682.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI692.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA732.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET)733.4 SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS-74(Oszvald Ferenc)3.1. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓELJÁRÁSOK743.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁS783.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÁS803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉI BAN83	2.3.7. KOPÁS	63
2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK 64 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI 74 (Oszvald Ferenc) 74 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 74 3.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 76 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 77 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 80 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉI BAN 83	2.4. KITEKINTÉS A JÖVŐBE	64
KÖVETELMÉNYEK642.5.1. BEVEZETÉS642.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK652.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK652.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK672.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK682.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI692.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA732.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET)73A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI74(Oszvald Ferenc)3.1. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK743.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI743.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK763.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁS783.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BAN83	2.5.A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT	
 2.5.1. BEVEZETÉS 64 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 65 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI 74 (Oszvald Ferenc) 3.1. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN 	KÖVETELMÉNYEK	64
 2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 65 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 67 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 68 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 69 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 73 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI (Oszvald Ferenc) 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 8.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN 83	2.5.1. BEVEZETÉS	64
 2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI (Oszvald Ferenc) 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.A Z ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN 	2.5.2. GYÁRTHATÓSÁGI KÖVETELMÉNYEK	65
 2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 7.3 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 7.3 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI 7.4 (Oszvald Ferenc) 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BAN 	2.5.3. ÜZEMELTETÉSI KÖVETELMÉNYEK	65
 2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 4.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 7.3 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 7.3 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI 7.4 (Oszvald Ferenc) 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.A Z ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BAN 	2.6. ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK	67
 2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI 2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 7.3 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI 74 (Oszvald Ferenc) 3.1. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 3.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BAN 	2.6.1. ÖTVÖZETLEN ÉS ERŐSEN ÖTVÖZÖTT ACÉLOK	68
2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA 2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) 73 A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI (Oszvald Ferenc) 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 74 3.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74. 3.1.2. ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74. 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 75. 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 76. 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77. 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 77. 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79. 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 80. 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉI BANI	2.6.2. A REAKTORTARTÁLY SZERKEZETI ANYAGAI	69
2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET) A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI (Oszvald Ferenc) 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 5.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 6.3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BANI 7.3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BANI 7.3.2. ACÉLGYÁRT ACÉL BANI 7.3.2. ACÉLGYÁRT ACÉL BANI 7.3.3.2. ACÉLGYÁRTÁS 7.3.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 7.3.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 7.3.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 7.3.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 7.3.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÁSI BANI 7.3.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÁSI BANI	2.6.3. AZ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK ÖSSZEFOGLALÁSA	73
A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS- TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI 74 (Oszvald Ferenc) 3.1. ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 74 3.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 76 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 77 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 80 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BANI 83	2.7. HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET)	73
TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI74(Oszvald Ferenc)3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK743.1.ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI743.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK763.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK763.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK773.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BANI83	. A SZERKEZETI ANYAGOK GYÁRTÁS- ÉS SZERELÉS-	
(Oszvald Ferenc) 3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 74 3.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI 74 3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 76 3.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 77 3.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK 77 3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS 78 3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 79 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK 80 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BANI 83	TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPVETŐ SAJÁTOSSÁGAI	74
3.1.ACÉLGYÁRTÁS ÉS ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK743.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI743.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK763.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK773.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BAN83	(Oszvald Ferenc)	
ELJÁRÁSOK743.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI743.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK763.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK773.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN83	3.1 ΔΟΈΙ GVÁRTÁS ÉS ÖΝΤΈS ΤΕCΗΝΟΙ ÓGIÁ ΙΔ. ΔΟΈΙ ΕΙΝΟΜΙΤΟ	
3.1.1. AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGFŐBB FOLYAMATAI743.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK763.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK773.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN83	FLIÁRÁSOK	74
3.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK763.1.2. ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK763.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK773.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN83	3 1 1 AZ ACÉLGYÁRTÁS LEGEŐBB EOLYAMATAL	74
3.1.2. NOLLO MARIO LLO MARIO K103.1.3. OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK773.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉL BAN83	3 1 2 ACÉLGYÁRTÓ FLJÁRÁSOK	76
3.1.6. OLIVADER (ALDORICIO ELLONGIO ELLONGIO ELLONGIO ELLONGIO ELLONGIO ELLONGIO ELLONGIO (ALDORICO)773.1.4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉLGYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK783.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN83	3 1 3 OLVADÉK REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK	77
3.1.5. ELEKTROACÉLGYÁRTÁS783.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK793.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK803.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN83	3 1 4. NYERSVAS ALAPÚ ACÉL GYÁRTÁSI ELJÁRÁSOK	77
3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK 3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK ÉS FINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN	3.1.5. FI FKTROACÉI GYÁRTÁS	78
3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK ÉS FINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN	3.1.6. DIREKT REDUKCIÓS ELJÁRÁSOK	79
ÉS FINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK 80 3 1 8 NITROGÉN AZ ACÉLBAN 83	3.1.7. KÜLÖNLEGES ACÉLGYÁRTÓ ELJÁRÁSOK	. 0
3 1 8 NITROGÉN AZ ACÉLBAN 83	ÉS FINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK	80
	3.1.8. NITROGÉN AZ ACÉLBAN	83

3.



3.1.9. VVER–1200 REAKTORTARTÁLY ANYAGÁNAK GYÁRTÁSA	
ÉS TULAJDONSÁGAI	84
3.2. KÉPLÉKENYALAKÍTÁSI ELJÁRÁSOK	92
3.2.1. A FOLYÁSI FELTÉTEL	93
3.2.2. ALAKVÁLTOZÁSI MÉRŐSZÁMOK	94
3.2.3. AZ ALAKÍTÁSI SZILÁRDSÁG HIDEG- ÉS	
MELEGALAKÍTÁSKOR	96
3.2.4V. ALAKÍTHATÓSÁG	98
3.2.5. HENGERLÉS	100
3.2.6. KOVÁCSOLÁS	102
3.3. HŐKEZELÉS	105
3.4. HEGESZTÉS	109
3.4.1. A HEGESZTŐ ELJÁRÁSOK RENDSZEREZÉSE	110
3.4.2. HEGESZTÉSI ELJÁRÁSOK CSOPORTOSÍTÁSA	
AZ MSZ EN ISO 4063 SZERINT	111
3.4.3. PAKS II ATOMERŐMŰ-LÉTESÍTÉSE SORÁN ALKALMAZOTT	
HEGESZTÉSI ELJÁRÁSOK	112
3.4.4. AUSZTENITES ROZSDAMENTES ACÉLOK HEGESZTÉSE	115
3.4.5. ÁTMENETI VARRATOK HEGESZTÉSE	116
3.4.6. HEGESZTÉSI FELÜGYELET	117
3.5. GYÁRTÁSI HIBÁK	118
3.5.1. KOVÁCSOLÁS	118
3.5.2. HEGESZTÉS	119
3.5.3. ESETTANULMÁNYOK A GYÁRTÁSI HIBÁK	
ELŐFORDULÁSÁRA	122
3.5.4. JAVÍTÓ TEVÉKENYSÉG	128

4. A GYÁRTÁS, SZERELÉS ÉS ÜZEMBE HELYEZÉS SORÁ	N ALKALMAZOTT
ANYAGVIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK	137
(Trampus Péter)	

4.1. BEVEZETÉS	137
4.2. OPTIKAI- ÉS ELEKTRONMIKROSZKÓPIAI VIZSGÁLATOK	138
4.2.1. OPTIKAI MIKROSZKÓPIA	138



ATOMERŐMŰ-LÉTESÍTÉS – MŰSZAKI MODUL

4.2.2. ELEKTRONMIKROSZKÓPIA	142
4.3. MECHANIKAI VIZSGÁLATOK	144
4.3.1. SZAKÍTÓVIZSGÁLAT	145
4.3.2. ÜTŐVIZSGÁLAT	148
4.3.3. FÁRASZTÓVIZSGÁLAT	150
4.3.4. KEMÉNYSÉGVIZSGÁLAT	151
4.3.5. TÖRÉSMECHANIKAI VIZSGÁLATOK	157
4.4. RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATOK	159
4.4.1. FELÜLETI VIZSGÁLATOK	160
4.4.2. TÉRFOGATI VIZSGÁLATOK	164
4.5. AZ IDŐSZAKOS ELLENŐRZÉS HATÉKONYSÁGA	171
4.5.1. RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLÓ RENDSZEREK	
MINŐSÍTÉSE	172
4.5.2. KOCKÁZATI SZEMPONTOKAT FIGYELEMBE VEVŐ	
IDŐSZAKOS ELLENŐRZÉS	173
4.6. ÜZEMBE HELYEZÉST MEGELŐZŐ ELLENŐRZÉSI PROGRAM	174
4.7. NYOMÁSPRÓBA A GYÁRTÁS ÉS ÜZEMBE HELYEZÉS	
SZAKASZÁBAN	175
4.8. HIVATKOZÁSOK (4. FEJEZET)	176
5. NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK ÉS CSŐVEZETÉKEK	177
(Babics Péter Pál)	
5.1. ÁLTALÁNOS FOGALMAK	177
5.2. NYOMÁSTARTÓ EDÉNYEK ÉS CSŐVEZETÉKEK TERVEZÉSI	
ELŐÍRÁSAI – NEMZETKÖZI KÓDOK	178
5.2.1. A FRANCIA KÓD	178
5.2.2. A JAPÁN KÓD	179
5.2.3. A KOREAI KÓD	180
5.2.4. AZ EN DIREKTÍVA (KÓD)	180
5.3. AZ OROSZ SZABÁLYOZÁS	182
5.3.1. AZ OROSZ SZABÁLYOZÁS FEJLŐDÉSE	182
5.4. OSZTÁLYBA SOROLÁSOK AZ OROSZ SZABÁLYZATOKBAN	184
5.4.1. BIZTONSÁGI OSZTÁLYOK	184



5.4.2. TERVEZÉSI CSOPORTOK	185
5.4.3. FÖLDRENGÉS BIZTONSÁGI KATEGÓRIÁK	186
5.4.4. A NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK ÉS CSŐVEZETÉKEK	
ÉS HEGESZTÉSI KÖTÉSEK BESOROLÁSI RENDSZERE	187
5.4.5. AZ OROSZ OSZTÁLYOZÁSI RENDSZER ÉS A NAÜ ELŐÍRÁS	SOK
ÖSSZEHASONLÍTÁSA	189
5.5. AZ OROSZ NYOMÁSTARTÓ EDÉNYEK ÉS CSŐVEZETÉKEK	
TERVEZÉSÉNEK A SZABÁLYOZÁSA	189
5.5.1. ÁLTALÁNOS ELŐÍRÁSOK	189
5.5.2. ANYAGMEGVÁLASZTÁS	190
5.5.3. MEGENGEDHETŐ FESZÜLTSÉGEK ÉS BIZTONSÁGI	
TÉNYEZŐK	191
5.5.4. NÉVLEGES MEGENGEDHETŐ FESZÜLTSÉGEK	192
5.5.5. FALVASTAGSÁG PÓTLÉKOK	192
5.5.6. ELLENŐRZŐ SZÁMÍTÁSOK	194
5.5.7. FESZÜLTSÉG KATEGÓRIÁK	195
5.5.8. HEGESZTETT KÖTÉSEK SZILÁRDSÁG CSÖKKENTŐ	
TÉNYEZŐI	196
5.5.9. ELLENŐRZÉS RIDEGTÖRÉSSEL SZEMBENI ELLENÁLLÁSF	RA 196
5.5.10. ELLENŐRZÉS HOSSZÚ IDEJŰ STATIKUS SZILÁRDSÁGRA	197
5.5.11. MÉRETEZÉS SZEIZMIKUS HATÁSOKRA	197
5.5.12. A PNAE G-7-002 FÜGGELÉKEI	197
5.6. NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK SZERKEZETI INTEGRITÁSA	199
5.7. TÖRÉSMECHANIKAI ALAPFOGALMAK	202
5.7.1. LINEÁRISAN RUGALMAS TÖRÉSMECHANIKA (LRTM)	203



KÉPZÉSI CÉLOK

A tananyag elsajátítása után a tanfolyam résztvevője:

- általános ismeretekkel rendelkezik a VVER–1200 atomerőműblokkról és annak létesítéséről,
- specifikus ismeretekkel rendelkezik a technológiai rendszerekben alkalmazott szerkezeti anyagokról és azok vizsgálatáról, különös tekintettel a nyomástartó berendezésekre és csővezetékekre.



A VVER–1200 TÍPUSÚ ATOMERŐMŰ

1.1 A KÖNNYŰVÍZHŰTÉSŰ ATOMERŐMŰVEK FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

Jelen fejezet bemutatja a hagyományos erőművi villamosenergia-termelés elvi sémáját, a hagyományos hőerőművek és atomerőművek felépítése közötti különbségeket. Ezek mellett szó esik az atomreaktor felépítéséről és működéséről, illetve a benne megvalósuló szabályozott láncreakcióról, annak fizikai tulajdonságairól.

1.1.1 Hő- és atomerőművek energiatermelése

A hő- és atomerőművekben megvalósuló energiatermelés elvi folyamata igen hasonló, melyet az 1. ábra mutat be:

1. ábra. Hő- és atomerőművi energiatermelés folyamata



A hőerőművekben egy olyan kémiai reakció játszódik le, amelynek során hő fejlődik (égés). Az égés során a részvevő elemek/vegyületek új, alacsonyabb energiaszintű kötéseket alakítanak ki, emiatt szabadul fel energia hő formájában. A hagyományos hőerőművek felépítését a 2. ábra mutatja be.



2. ábra. Hagyományos hőerőművek felépítése

A keletkező hővel az erőműben általában vizet melegítenek, ami a hő hatására a forráspont fölé melegszik és gőzzé alakul. A keletkezett nagynyomású és magas hőmérsékletű gőzt ezután egy turbinára vezetik, ahol a gőz munkát végez, megforgatja a turbinát. Eközben a gőz kitágul, nyomása és munkavégző képessége folyamatosan lecsökken.



1.

A megforgatott turbina tengelyének másik végén egy generátor található, amelyben a tekercs forgása elektromos áramot indukál, a termelt áram pedig kikerül a villamos hálózatba és azon keresztül a fogyasztókhoz.

A könnyűvizes atomerőművekben a folyamat annyiban különbözik, hogy a hő nem kémiai, hanem fizikai reakcióból származik, általában az urán-235 izotóp magjainak elhasadásából. A felszabaduló hőt viszont ugyanúgy víz segítségével szállítják, és ugyanúgy munkavégzésre alkalmas gőz képződik, amelyet egy turbinára vezetnek.

A paksi 5. és 6. blokkok általános felépítését a 3. ábra szemlélteti



3. ábra. A paksi 5. és 6. blokkok elvi sémája [1]

1.1.2 Nukleáris energia

Az atommagban protonok és neutronok, összefoglaló nevükön nukleonok találhatók. Az atommagot alkotó részecskéket összetartó ún. "erős kölcsönhatás" akadályozza meg hogy a mag szétessen. Az egy nukleonra eső fajlagos kötési energiát a *4. ábra* szemlélteti.

Az ábrán látható, hogy a fajlagos kötési energia maximuma az 56-os tömegszámú vas izotóp környékén található. Az ennél jóval könnyebb, vagy jóval nehezebb atommagok nukleonjai között a kötések gyengébbek, így ha a tömegszámot az 56-hoz közelítjük, az erősebb kötések létrejöttével energia szabadítható fel. A könnyű atommagok esetében ez magfúzió segítségével lehetséges, a nehéz magoknál pedig főként maghasadással.

Ha szeretnénk összevetni a kémiai és a nukleáris energia energiasűrűségét, az alábbi eredményt kapjuk: 12 g szén atom elégetése 0,349 MJ energiát szabadít fel, míg 12 g urán-235 elhasítása 9,8x10⁶ MJ energiát szabadít fel, azaz ugyanakkora tömegű üzemanyagból nagyjából tízmilliószor több hő szabadítható fel. A maghasadás folyamatát a *5. ábra* mutatja be.





4. ábra Az atommagot alkotó nukleonokra eső kötési energia az atom tömegszámának függvényében

5. ábra. A maghasadás folyamata [2]



A maghasadás során az urán atommagját egy "lassú" neutron találja el, a találatot követően pedig az atommag bizonyos valószínűséggel elhasad. A hasadás során két hasadvány-mag keletkezik, valamint átlagosan 2–3 gyors neutron lökődik ki a magból. Az így felszabaduló neutronok teszik lehetővé a láncreakció létrejöttét, hiszen megfelelő körülmények között további maghasadásokat lesznek képesek előidézni, amelyek aztán újabb neutronok felszabadulását eredményezik. A nukleáris láncreakció sémája a 6. ábrán látható.

A hasítás valószínűsége akkor nagy, ha egy urán atommagot egy kis energiájú, "lassú" neutron talál el. A maghasadásokból keletkező gyors neutronokat tehát valamilyen módon le kell "lassítani", mielőtt újabb maghasadást képesek előidézni. Erre szolgál a reaktorban az ún. moderátor, ami a könnyűvizes blokkokban a hűtésre is használt víz. Moderátor hiányában az atomreaktorban megszűnik a láncreakció, mert nem lesz elegendő mennyiségű lassú neutron, ami újabb hasadásokat válthatna ki.





6. ábra. A szabályozott láncreakció [2]

Mivel egy átlagos hasadás során egynél több neutron keletkezik, ezért szabályozás hiányában a láncreakció képes "megszaladni", amikor nagyon rövid idő alatt hatalmas mennyiségű hő fejlődhet, ez a folyamat játszódik le az atombombában is.

Az erőművekben a láncreakció fenntartásához szükséges neutronokon felüli "fölös" neutronokat szabályozó rudak segítségével eltávolítják a rendszerből, hogy a reaktor teljesítményét egyensúlyban tartsák. A szabályozó rudak olyan anyagot tartalmaznak, amelynek atommagjai a neutronokat nagy eséllyel elnyelik, így azok már nem fognak hasadásokat kiváltani. A rudak mozgathatók, minél nagyobb részüket tolják be a zónába, annál több neutront nyelnek el a környezetükből.

A láncreakció állapotát a Keff effektív sokszorozási tényezővel lehet jellemezni, amely megadja, hogy a neutronok száma generációról generációra miként változik:

- K_{eff} = 1: A reaktor kritikus, azaz a láncreakció önfenntartó, a neutronok száma és a teljesítmény állandó
- K_{eff} > 1: A reaktor szuperkritikus, a teljesítménye növekszik
- K_{aff} < 1: A reaktor szubkritikus, a teljesítménye csökken, a láncreakció idővel leáll</p>

Az atomreaktorban üzem közben a Keff értéke a szabályozó rudak mozgatásával vagy a hűtővízben található bórsav mennyiségével befolyásolható. A bórsavban található bór atomok ugyanis szintén képesek neutronokat elnyelni. A Keff üzemidő alatti hosszútávú szabályozását a bórsavkoncentráció lassú változtatásával végzik, a szabályozó rudakat pedig inkább a gyorsabb beavatkozásoknál veszik igénybe.

1.2 RADIOAKTÍV SUGÁRZÁS

Az atomerőműben lejátszódó folyamatok részletesebb bemutatása előtt nem kerülhető meg a radioaktív sugárzások témaköre, hiszen atomerőműi energiatermelés számos folyamatának velejárója a sugárzás, amelynek tulajdonságaival, hatásaival és a káros hatások elleni védekezés módszereivel minden munkavállalónak tisztában kell lennie.



1.2.1 Radioaktivitás, radioaktív bomlás

A radioaktivitás oka az adott atommag instabilitása. Ahogy arról szó volt az előző fejezetben, az atommagok közül vannak gyengébben (pl. ²³⁵U) és erősebben (pl. ⁵⁶Fe) kötöttek. Általánosságban elmondható, hogy az erősebben kötött magok stabilabbak. Az atommag méretén kívül a stabilitást befolyásolja az atommagon belül a protonok és neutronok aránya is, amely eltérhet még egy adott elem atomjai között is. Az azonos rendszámú, de különböző tömegszámú atommagokat nevezzük izotópnak. Ilyen izotóp pl. a ¹⁶O, a ²³⁵U, vagy a ²³⁸U. A felsorolt két uránizotóp ugyanúgy 92 protont tartalmaz, a kémiai viselkedésük teljesen megegyezik, de az egyikben 3 "ráadás" neutron található az atommagban, azaz a tömegük eltér.

Ha egy adott izotópban a protonokhoz képest a neutronok aránya túlzottan nagy, vagy túl kicsi, az szintén instabilitást eredményez. A periódusos rendszer kémiai elemeinek túlnyomó többsége rendelkezik stabil izotóppal, amely nem bomlik tovább. Különösen a nehéz elemek esetében azonban előfordul, hogy egy elemnek egyetlen stabil izotópja sem létezik. A 7. ábra mutatja az ismert izotópok neutron-proton arányait. Látható, hogy a könnyű atommagoknál a stabil arány 1:1, de a nagy atommagok esetében egyre több neutronra van szükség a stabilitáshoz.

7. ábra. Az izotópok stabilitási térképe. Az ismert izotópok (szürke) és a stabil izotópok (fekete) atommagjában lévő neutronok (N) és protonok (Z) száma [3]



Az instabil atommagok az energiaminimum felé törekszenek, azaz egy stabil állapot felé. A stabil állapot elérése különböző bomlási reakciók segítségével lehetséges. Minél instabilabb az adott izotóp, annál nagyobb a hajtóerő a stabilitás felé; annál nagyobb valószínűséggel bomlik el az adott atommag. A bomlási reakciók során bizonyos részecskék kilépnek az atommagokból, amelyek radioaktív sugárzás képében jelennek meg a bomló atommagok környezetében.

A radioaktív bomlás tehát egy olyan reakció, amelyet sugárzás kibocsátása kísér. A kibocsátott részecske fajtájától függően többféle radioaktív sugárzást különböztetünk meg, a legfontosabbak az alfa-, béta- és gamma-sugárzások.



Fontos tudni, hogy a bomlás véletlenszerű, de statisztikus jellegű, azaz egy adott atommagról nem jósolható meg, hogy pontosan mikor fog elbomlani, viszont az atomok halmazával kapcsolatban a bomlások száma megjósolható.

A radioaktív bomlásra jellemző érték az adott izotóp felezési ideje (T1/2), amely azt adja meg, hogy mennyi idő alatt bomlik el az adott izotóp atommagjainak a fele. Minél rövidebb ez az időtartam, az adott izotóp annál instabilabb. A természetben előfordulnak nagyon rövid (a másodperc törtrésze) és rendkívül hosszú felezési idejű (több milliárd év) izotópok is.

A különböző sugárzás-fajták az anyaggal különböző módokon képesek kölcsönhatásba lépni. A legjellemzőbb, hogy a radioaktív bomlásból keletkező nagy energiájú alfa-, béta- vagy gamma-részecskék más elemi részecskékbe vagy atomokba, molekulákba, kristályrácsokba ütköznek. Az ütközés során képesek az eltalált másik részecskét "kiütni" a helyéről, ezzel megváltoztatva, roncsolva az anyag szerkezetét. Ez különösen az élő szervezetekre jelenthet veszélyt.

Alfa-sugárzás:

Alfa-sugárzás az ólomnál nagyobb rendszámú elemek izotópjaira jellemző. Az alfa-bomlás során az adott atommag egy alfa-részecskét bocsát ki magából. Ez tulajdonképpen egy hélium-atommag, amely két protonból és két neutronból áll. Az alfa-bomlást követően az adott atommag tömegszáma néggyel, a benne lévő protonok száma pedig kettővel csökken, így kerül közelebb a stabil állapothoz.

Az alfa-részecskék nagy energiával rendelkeznek, viszont méretük és töltésük következtében szilárd és folyékony anyagokban is nagyon kis távolságon belül lefékeződnek, vagyis az alfa-sugárzás áthatolóképessége rendkívül alacsony (levegőben néhány centiméter, vízben néhány mikrométer). Ez egyrészt azt jelenti, hogy az alfa-sugárzás nem képes áthatolni pl. az emberi bőr felső rétegén, vagy egy papírlapon [3]. Másrészt viszont azt is jelenti, hogy az alfa-részecskék ezen a nagyon rövid távon adják le az összes energiájukat azoknak a részecskéknek, amelyekkel kapcsolatba lépnek, emiatt a sugárzás forrásának közvetlen környezetében az alfa-sugárzás jelentős roncsolásra képes.

Az alfa-sugárzás abban az esetben okozhat komoly veszélyt, ha bekerül egy élő szervezetbe, mert ekkor komolyan károsíthatja a tüdő, vagy a bél hámrétegeit, megakadályozva az oxigén vagy a tápanyagok felvételét.

Béta-sugárzás:

A béta-sugárzás a béta-bomlást kísérő sugárzás. A béta-bomlás azokra az izotópokra jellemző, amelyeknél a protonok és neutronok aránya a magban eltér az optimálistól. Attól függően, hogy a neutronok száma túl magas vagy túl alacsony a magban a stabilhoz képest, a béta-bomlás pozitív és negatív is lehet.

A pozitív béta-bomlás során az adott atommag egyik protonja neutronná alakul, és egy pozitront (az elektronnal azonos súlyú és méretű részecske, de a töltése pozitív) bocsát ki. A negatív béta-bomlásnál egy neutron alakul át protonná, és a magot egy elektron hagyja el. A természetben előforduló izotópok bomlása során leginkább a negatív béta-bomlás (β-) jellemző, így a továbbiakban a béta-sugárzást, mint elektron-sugárzást fogjuk tekinteni.

A bomlás során keletkező elektronok tömege az alfa-részecskékhez képest több nagyságrenddel kisebb, így a béta-sugárzás áthatolóképessége nagyobb, képes a testszövetekbe néhány milliméter mélyen behatolni [3]. A béta-sugárzás által kifejtett roncsoló hatás ennek megfelelően kevésbé koncentrált, hiszen a részecskék hosszabb utat tesznek meg az anyagban mielőtt teljesen lefékeződnének.



Gamma-sugárzás:

A gamma-sugárzás általában az előző két típusú bomlási reakciókat kíséri. Ezek során ugyanis az új atommag nem nyugalmi, hanem ún. gerjesztett állapotban keletkezik. Ahhoz, hogy elérje nyugalmi állapotát, a gerjesztett állapot jelentette energiatöbblettől meg kell szabadulnia. A folyamat során a többletenergia egy foton formájában távozik az atommagból, amely így nyugalmi állapotba kerül.

Egy adott gerjesztett állapothoz egy adott energiaszint tartozik, így a kibocsátott fotonok energiája is azonos lesz, tehát a fotonok energiájának elemzésével meghatározhatjuk egy adott mintában a jelenlévő radioaktív izotópokat. A fotonsugárzás nagy energiájú elektromágneses sugárzás, amelynek az áthatolóképessége az alfa- és béta-sugárzásnál jóval nagyobb, hiszen a fotonok az előbbi kettővel ellentétben elektromosan semleges részecskék, nyugalmi tömegük pedig nincs.

A gammasugarak számottevő gyengülés nélkül képesek áthatolni 8–10 cm-nyi vízen vagy testszöveten. Az áthatolóképesség is jelzi, hogy a fotonok sokkal kevésbé hajlamosak kölcsönhatásba lépni az anyaggal, amelyen áthaladnak, tehát a roncsoló hatásuk is mérsékeltebb, mint az alfa- vagy a bétasugárzásé. A leghatékonyabb árnyékolói a magas tömegszámú elemek, pl. ólom [3].

Neutronsugárzás:

A neutronsugárzás az alfa-, béta- és gamma-sugárzásoktól eltérően nem a radioaktív bomlásokat kíséri, hanem a maghasadást. Ahogy arról már volt szó az 1.2-es fejezetben, a 235U mag hasadása során átlagosan 2–3 neutron keletkezik. Ezeknek nem mindegyike hoz létre további hasadásokat, vagy nyelődik el a szabályozó rudak szerkezeti anyagában, egy részük egyszerűen "kiszökik" a reaktorból. Emiatt a reaktor aktív zónájának környezetében működés közben neutronsugárzás tapasztalható.

A neutronok nehéz, de semleges töltésű részecskék, ezért máshogyan lépnek kölcsönhatásba az anyaggal, mint az eddig említett alfa-, béta- és gamma-részecskék. A neutronok jellemzően csak az atommagokkal lépnek reakcióba, az atomok elektronjaival nem. Többféle reakció lehetséges, a legfontosabbak:

- Szóródás (rugalmas vagy rugalmatlan). A reakcióban a neutron a mozgási energiájának egy részét vagy egészét átadja az atommagnak. A rugalmatlan szóródásnál az atommag gerjesztett állapotba is kerül, nem csak mozgási energiát kap.
- 2. Elnyelődés, amikor az atommag elnyeli a neutront, egy új izotóp jön létre. Az adott atommagban ilyenkor értelemszerűen megváltozik a neutronok és a protonok aránya, hiszen eggyel több neutron lesz a magban. Ez akár azt is eredményezheti, hogy az atommag instabillá válik, vagyis valamilyen bomláson keresztül tud csak újra stabil állapotba kerülni. Ezt a jelenséget nevezzük felaktiválódásnak.
- 3. Hasadás, amikor a neutron az adott magot elhasítja.
- A neutronsugárzás áthatolóképessége magas, vastag árnyékoló rétegre van szükség. A legjobb védelmet azok az anyagok adják, amelyek jól tudják lassítani, moderálni a neutronokat, vagyis a könnyű elemek atomjai, és az ezeket tartalmazó anyagok, pl. víz, szén. A neutronsugárzás árnyékolására gyakran sok kötött vizet tartalmazó betont is alkalmaznak. A 8. ábra mutatja az egyes sugárzásfajták áthatolóképességének összehasonlítását.





8. ábra. Az egyes sugárzásfajták áthatolóképessége [4]

1.3 SUGÁRZÁSOK ÉLETTANI HATÁSA

1.3.1 Sugárvédelmi alapfogalmak

Aktivitás: Az adott anyagmintában egy másodperc alatt bekövetkező radioaktív bomlások száma, mértékegysége a *becquerel*. 1 Bq= 1 bomlás/másodperc.

Elnyelt dózis (D): Egy adott anyagban fajlagos elnyelt energia. Az energia a bomlásokból származó részecskék lefékeződéséből származik. Mértékegysége a *gray* (Gy). 1 Gy= 1 J/kg.

Egyenérték dózis (H): Az egyes sugárzásfajták nem azonos mértékben roncsolnak, ezért az elnyelt dózis mellett az anyagot érő károsodás mértéke úgy becsülhető meg pontosabban, ha figyelembe vesszük a sugárzás fajtáját is. Mértékegysége a *sievert* (Sv).

$$H = \sum_{R} D_{R} w_{R}$$

Az egyenérték-dózis (H) számításakor a testet érő sugárzásfajtákból származó elnyelt dózisokat (D_R) megszorozzuk az adott sugárzástípusokra jellemző **sugárzási súlytényezőkkel** (w_R). Az így kapott szorzatok összege az adott testet érő egyenérték-dózis. Fotonokra és elektronokra a súlytényező 1, alfa részecskékre 20, neutronokra pedig a neutron energiájától függően 5 és 20 közötti érték.

Effektív dózis (E): Az adott személyt ért dózis hatásainak megbecsülésekor azt is figyelembe kell venni, hogy a testének melyik részét milyen sugárzás érte, az egyes emberi szervek ugyanis nem ugyanannyira érzékenyek a besugárzásra. Az ivarszervek, vagy a csontvelő például érzékenyebb a sugárzásra, míg a bőr kevésbé. Az effektív dózis az emberi test összes szervére vagy szövetére vonatkozó egyenértékdózisok súlyozott összege:

$$E = \sum_{T} H_T w_T$$

Ahol H_{τ} az adott szövetet vagy szervet ért egyenérték-dózis, w_{τ} pedig az adott szövet súlytényezője. Az effektív dózis mértékegysége szintén sievert. [4]



Atomerőműi Képzési Bázis

1.3.2 Determinisztikus hatások

A determinisztikus (előre meghatározott) hatások rövid idő (néhány perc) alatt igen magas dózis elnyelése után jelentkeznek, akkor azonban mindig. A hatás erőssége a dózis nagyságától függ. Ha ugyanezt a sugárzásmennyiséget hónapok, évek alatt kapja valaki, akkor a szervezet képes közben regenerálódni, és nem feltétlenül éri maradandó károsodás [4]. A sugárzás hosszútávú hatásait a 2.2.3 fejezet mutatja be. A 9. ábra szemlélteti a determinisztikus hatások erősségét a dózis függvényében.

9. ábra. A determinisztikus hatások súlyossága az elnyelt dózis függvényében. Küszöbdózis (KD), félhalálos dózis (LD30/50), halálos dózis (LD)



A determinisztikus hatások küszöbértéke 0,1–1 Gy, ez alatt általában nem jelentkeznek tünetek. A küszöb feletti dózis hatása férfiak esetében az ideiglenes terméketlenség, illetve nők esetében a fejlődő embrió károsodása. Ilyen hatás lehet továbbá a bőr pirosodása, nagyobb dózisoknál pedig égési sérüléshez hasonló sérülések megjelenése.

1–2 Gy dózis esetén szédülés és hányás jelentkezik, ezt nevezzük akut sugárbetegségnek (és nem sugárfertőzésnek, ugyanis nem fertőz!). Ekkora besugárzásból néhány héten belül az emberek többsége teljesen felépül.

Magasabb dózisok esetén a vér és a csontvelő komolyan károsodik. Az úgynevezett félhalálos dózis az, amivel besugározva az emberek 50%-a éli csak túl a következő 30 napot (4-5 Gy). Az 5 Gy feletti dózisoknál súlyosan károsodnak a belső szervek, még magasabb értékeknél pedig a központi idegrendszer is. A halálos dózis értéke megközelítőleg 8 Gy.

Azt hozzá kell tenni természetesen, hogy az említett sugárdózis-értékek rendkívül magasak, a természetes háttérsugárzásból a legkisebb küszöbérték töredéke éri csak az emberi szervezetet egy év alatt. Összehasonlításképp, egy magyarországi lakos természetes forrásokból évente 3 mGy dózist kap (mivel ennek nagy része γ-sugárzás ez egyenlő 3 mSv effektív dózissal), amely jócskán a küszöbérték alatt van, ráadásul a teljes évre vetítve.

1.3.3 Sztochasztikus hatások

A sztochasztikus hatások csak bizonyos valószínűséggel jelentkeznek, amennyiben valaki időben elosztva összességében egy adott mennyiségű sugárdózist kapott. A hatások bekövetkezésének a valószínűsége az idő során elnyelt dózisok összegével nő, de a hatás nem feltétlenül lesz súlyosabb.



A sejtek örökítő anyagának károsodása hosszútávon rákhoz vezethet, de ennek bekövetkezését lehetetlen minden más faktortól elvonatkoztatva vizsgálni. Alacsony dózisok esetén a többletkockázat mértéke (vagy hogy van-e tényleges többletkockázat egyáltalán) nehezen megállapítható, ma is tudományos vita tárgya.

Magasabb kumulált dózis esetén a kutatások szerint a valószínűség növekedése egyenesen arányos az elnyelt dózismennyiséggel, vagyis a két mennyiség közötti összefüggést egy egyenesen ábrázolhatjuk. Az egyenes meredeksége kb. 5%/Sv, azaz a rákos halálozás esélye 5%-kal nő minden elnyelt 1 Sv dózis után [4].

Összehasonlításképpen a Paksi Atomerőműben a sugárterhelésnek kitett felnőtt dolgozók effektív dózisának korlátja évi 20 mSv [4], azaz 50 év munkavégzés alatt kaphatna valaki 1 Sv kumulált dózist, amennyiben minden évben eléri a korlátot.

1.3.4 A sugárvédelem alapjai

A sugárzással járó többletkockázatok miatt minden olyan tevékenységnél, ahol ilyen technológia felhasználásra kerül, először is meg kell indokolni annak szükségességét és be kell bizonyítani, hogy más technológia vagy módszer használatából nagyobb kockázat (kár) származna.

Másodszor, az érintett személyeket érő dózist optimalizálni kell, azaz az észszerűen elérhető legalacsonyabb szintre kell csökkenteni, a gazdasági és fizikai lehetőségek figyelembevételével. Ezt az elvet nevezik angol betűszóval ALARA (As Low As Reasonably Achievable) elvnek-is.

Harmadszor pedig a tevékenységre vonatkozó dóziskorlátokat be kell tartani. Ezt azzal biztosítják, hogy a sugárveszélyes munkakörben dolgozók számára egyéni mérőeszközöket biztosítanak, amelyek folyamatosan mérik az adott személyt érő dózist. Amennyiben a dózisteljesítmény hirtelen emelkedne, a műszer jelez, mielőtt a munkavállalót nagyobb dózis érné. Ezek a műszerek alkalmasak a dolgozót ért kumulált dózis nyomon követésére, így megelőzhető, hogy valaki túllépje pl. az adott évre vonatkozó dóziskorlátot.

A védelemnek három fő eszköze van. Először is, a sugárforrásoktól a lehető legnagyobb távolságot kell biztosítani, hiszen a sugárterhelés a forrástól mért távolság négyzetével fordítottan arányos, azaz 4-szeresre növelve a távolságot a sugárzás intenzitása 1/4^2, vagyis 16-szor gyengébb lesz [3]. Másodszor a sugárforrások közelében eltöltött időt kell minimalizálni, vagyis jól és hatékonyan kell megszervezni a feladatokat és a munkavégzést. A harmadik eszköz pedig a "védőréteg" alkalmazása, azaz védőeszközök és az árnyékolás használata.

Az alfa- és béta-sugárzó izotópok esetében a csekély áthatolóképességük miatt elsősorban a szervezetbe való bekerülést, azaz a bőrrel és nyálkahártyákkal való érintkezést, illetve a belégzést, szájba kerülést kell elkerülni.

1.4 VVER-ERŐMŰVEK

A nukleáris energiatermelés elvi alapjaira építve a 3. fejezetben bemutatásra kerül, hogy az 1.1-es fejezetben bemutatott elvi séma a gyakorlatban hogyan valósul meg a VVER típusú atomerőművekben. Röviden áttekintjük a reaktortípus történelmi előzményeit és fejlesztésének fontosabb állomásait.



1.4.1 A VVER reaktortípus fejlődése

A VVER (vodo-vodyanoi energetichesky reaktor, azaz víz-vizes energetikai reaktor) egy orosz fejlesztésű nyomottvizes atomerőmű típus. Az első VVER-blokkok Novovoronyezsben épültek, az 1960-as években, relatíve kis teljesítménnyel. Az első széles körben épített modell a VVER-440, amivel Pakson is találkozhatunk, de emellett működnek VVER-440 blokkok Szlovákiában, Bulgáriában, Csehországban és Finnországban is. Ezek az erőművek az 1970-es és 1980-as években épültek és lettek üzembe helyezve, így mára már közelednek az élettartamuk vége felé.

A VVER típus következő modellje volt a '80-as évektől kezdve a VVER-1000, ahol egy blokk villamos teljesítménye már 1000 MW volt a korábbi 440 MW-hoz képest. A VVER-1000 jelenleg a legelterjedtebb modell, 31 működő blokkal, többek között Oroszországban, Ukrajnában, Bulgáriában és Csehországban.

A VVER-1000 továbbfejlesztett változata a VVER–1200, ahol a blokk teljesítményét tovább növelték, illetve a blokkokat már a tervezési alapon túli üzemállapotokra is felkészítik. VVER–1200-as blokkok épültek és üzemelnek már Novovoronyezsben, a Leningrád-II atomerőműben és Fehéroroszországban Osztrovecben is, illetve ilyen blokkok épülnek Pakson, Finnországban, Egyiptomban és Kína is rendelt belőlük.

A VVER–1200 jövőbeni, optimalizált változata lesz a VVER-TOI, aminek a "prototípus" erőműve a Kurszk-II Atomerőmű, ahol 2 VVER-TOI blokk épül. Az új modell a VVER–1200 rendszerei és épületei egységesítésének és "áramvonalasításának" eredménye. [5]

1.4.2 A VVER–1200 erőmű főbb műszaki paraméterei

A történeti előzményekből is látható, hogy a VVER-reaktorcsalád már több évtizedes múltra tekint vissza, az egyes új modellekbe pedig mindig beépítették a tudomány akkor állása szerinti legkorszerűbb megoldásokat. Ez tetten érhető a Paksi Atomerőmű VVER-440 blokkjaival történő összehasonlítás során. Ezeket az 1970-es években tervezték, az akkori kornak megfelelően. Az új blokkokat már a three mile island-i, csernobili és fukushimai események tapasztalatait is alkalmazva tervezik, így az 1–4. blokkokhoz képest fel lesznek készítve a súlyos balesetek kezelésére is, kettős falú konténmenttel lesznek ellátva, illetve a biztonsági rendszerek tervezésekor is nagyobb hangsúlyt kapnak a passzív megoldások.

A VVER–1200-as blokkok főbb műszaki paramétereit az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat. A VVER–1200-as atomerőműi blokkok főbb műszaki adatai [1]

Reaktor típusa	nyomottvizes
Termikus teljesítmény	nyomottvizes
Villamos teljesítmény	kb. 3220 MW
Üzemanyag	kb. 1200 MW ¹
Biztonsági rendszerek	U-235, max. 4,95% dúsítással

¹ A pontos teljesítmény a helyi adottságoktól és a beszállítóktól is függ, így apróbb eltérések lehetnek az egyes blokkok között. A paksi 5. és 6. blokkok tervezett villamos teljesítménye 1262 MW.



Reaktor típusa	nyomottvizes	
Üzemi élettartam	aktív és passzív	
Rendelkezésre állás	legalább 60 év	
Erőmű hatásfoka	>90%	
Önfogyasztás	37%	
Karbantartási időigény	7,1%	
(7 éves ciklusra)	4 x 16 nap 2 x 24 nap 1 x 30 nap	
Szükséges üzemeltető személyzet (fő/MW)	0,42/MW _e	

A VVER–1200 főépületeit és az erőművi berendezések elrendezését a *10. ábra* szemlélteti. A *3. ábra* már bemutatott elvi sémának megfelelően a reaktorépületben található a reaktor, ahol a nukleáris energia felszabadításra kerül. A reaktorból a hőt a fővízkör szállítja el a gőzfejlesztőkbe, amiben a szekunderköri oldalon gőz képződik.

A gőz a reaktorépületből a turbinacsarnokba jut a főgőzvezetékeken keresztül, ahol meghajtja a turbinát és a generátort, villamos áramot termelve. Az ábrán látható konténment, zónaolvadék csapda és a konténment passzív hőelvonó rendszer a reaktor és az aktív zóna védelmét szolgálják a külső, illetve a belső veszélyeztető tényezőkkel szemben.



10. ábra. A VVER–1200 főbb berendezéseinek és épületeinek elhelyezkedése.

Reaktor épület (konténment) [1]; Reaktortartály [2]; Gőzfejlesztő [3]; Zónaolvadék csapda [4]; Konténment passzív hőelvonó rendszere [5]; Turbinacsarnok [6]; Turbina [7]; Generátor [8]. Forrás: [1]



A 11. ábra azt mutatja, hogy milyen külső veszélyeket vettek figyelembe a reaktorépület tervezésekor. Az erőmű építésének helyszínén kötelezően meg kell vizsgálni az adott telephely adottságait, és az arra jellemző klimatikus viszonyokat. A múltbéli események alapján, illetve a klímaváltozás hatásainak figyelembevételével kell meghatározni azokat a szélsőséges viszonyokat, amelyek az erőmű üzemideje során várhatóak.

A becslések alapján kerül meghatározásra, hogy a konténmentnek milyen erejű széllökést, hóterhelést, mekkora árvizet, milyen extrém hőmérsékleteket kell elviselnie. Ugyanígy vizsgálják mindegyik helyszínen a jellemző szeizmikus aktivitást, hogy az épületet felkészítsék a térségre jellemző nagyságú legnagyobb földrengésekre is. A reaktorépületet emellett nagy utasszállító repülőgép rázuhanására és külső robbanásra is tervezik, azaz ilyen események bekövetkezése esetén sem veszti el a szerkezeti integritását.

A paksi telephely 5. blokk fő-, segéd- és kiszolgáló épületeinek elhelyezkedése a 12. ábrán látható.



11. ábra. A konténment tervezése során figyelembe vett külső veszélyeztető tényezők [1]





12. ábra. A Paks II atomerőmű 5. blokk épületeinek elhelyezkedése [1]

1.4.3 Fővízköri jellemzők

Az új paksi blokkok fővízkörének felépítését és elrendezését a 13. ábra mutatja be. A középen elhelyezkedő reaktorból indul a négy melegági csővezeték (rózsaszínnel jelölt), amelyek összekötik a reaktort a gőzfejlesztőkkel. A gőzfejlesztőkből a hidegági csővezetékek (kékkel jelölt) a fő keringtető szivattyúkon (FKSZ) keresztül jutnak vissza a reaktorba.

A térfogatkiegyenlítő és a buborékoltató tartály a fővízkör nyomásának és vízszintjének szabályozásáért felel, a passzív zónahűtő tartályok (hidroakkumulátorok) pedig a reaktor és az aktív zóna hűtését biztosítják egy esetleges csőtöréses baleset során. Ezek a hidroakkumulátorok közvetlenül a reaktortartállyal vannak összekötve. A főbb fővízköri paramétereket a 2. táblázat ismerteti.

Fővízköri nyomás	16,2 MPa
Fővízköri hurkok száma	4
Gőzfejlesztők száma	4
Reaktor hűtővíz kilépő hőmérséklete	328,9 °C
Reaktor hűtővíz belépő hőmérséklete	298,2 °C
Primerköri térfogatáram	86000 m3/h

2. táblázat, A VVER-1200 főbb primerköri paraméterei [1]



13. ábra. a VVER-1200 fővízköri elrendezése [1]

1.4.4 Turbina sziget jellemzői

A turbinasziget, 14. ábra magába foglalja a szekunder kört (gőz-víz körfolyamatot) a 3. ábrán kékre színezett kör, valamint a fő berendezések kiszolgáló technológiai rendszereit is. A tápvízrendszer biztosítja a gőzfejlesztők folyamatos tápvízellátását, amiből a gőzfejlesztőkben folyamatosan gőz képződik, amely a főgőzrendszeren keresztül van a turbinára vezetve. A turbinában külön nagynyomású-, középés kisnyomású házak vannak. A nagynyomású turbinából kilépő gőz a cseppleválasztó és újrahevítő berendezésbe jut, ahol a mechanikai nedvesség leválasztás, és a gőz újrahevítése megy végbe a jobb hatásfok és a turbina lapátjainak hosszabb élettartama érdekében. A turbina utolsó fokozatából kilépő gőzt a kondenzátorba vezetik, aminek feladata, hogy a "fáradt" gőzt cseppfolyósítsa.



14. ábra. Turbina sziget



A lecsapódott kondenzátumot szivattyúkkal továbbítják a gáztalanítós táptartályba a kisnyomású tápvíz-előmelegítőkön és a kondenzátum-tisztító rendszeren keresztül. A gáztalanítós táptartályból a tápszivattyúk juttatják vissza a tápvizet (a nagynyomású tápvíz-előmelegítőkön keresztül) a gőzfejlesztőkbe. A szekunderköri paramétereket a 3. táblázat mutatja be. A szekunderköri berendezésekkel kapcsolatban bővebb információ található az 1.6. alfejezetben.

3. táblázat. A szekunder kör főbb műszaki paraméterei [1]

Turbógenerátor elektromos teljesítmény	1262 MWe
Turbina fordulatszám	1500/perc
Működési teljesítményszintek	20 és 100% között
Tápvíz hőmérséklet a gőzfejlesztő előtt	225°C
Névleges gőz tömegáram	6393,5 t/h
A gőzfejlesztőből kilépő gőz nyomása	7 MPa (abs)
A gőzfejlesztőből kilépő gőz maximális relatív nedvessége	0,2 %
A kondenzátorban lévő gőznyomás	2,8 kPa (abs)
Előmelegítő fokozatok	4 kis- és 2 nagynyomású fokozat
A paksi távhőfogyasztóknak kiadott hőteljesítmény (tél/nyár)	40/6 MW
Az erőmű épületeinek fűtésére kiadott hőteljesítmény (tél/nyár)	38/1 MW



1.4.5 Hűtővíz használati módok, lehetőségek

Az erőmű tervezése során az egyik kulcskérdés az úgynevezett "végső hőelnyelő" kérdése. A végső hőelnyelőnek azt a hőhordozó közeget tekintjük, ahová az erőműben keletkezett, villamos árammá nem átalakítható hőmennyiséget az erőmű leadja. Végső hőelnyelő lehet a légkör, vagy valamilyen természetes vagy mesterséges víz.

A légkörbe nedves, száraz vagy hibrid hűtőtornyokkal lehet eljuttatni a hőt, a vízzel történő hűtésnél pedig "frissvíz-hűtésről" beszélünk. Frissvíz-hűtést leggyakrabban tengerpartokon, vagy ritkábban (ahogy Magyarországon is) nagyobb folyók, folyamok partján alkalmazzák. Frissvíz-hűtés céljából mesterséges hűtőtó is létrehozható, ennek a környezeti lábnyoma azonban igen nagy.

A végső hőelnyelő kérdése egyrészt környezetvédelmi szempontból fontos, hiszen ez erőműnek a hőt úgy kell kibocsátania, hogy az lehető legkevesebb környezeti kárt okozza, másrészt viszont gazdasági és megbízhatósági kérdés is. Mindegyik lehetőség vizsgálatakor értékelni kell az adott megoldás bekerülési és üzemeltetési költségeit, illetve a megbízhatóságot.

Általánosságban elmondható, hogy a frissvíz-hűtés kedvezőbb, amennyiben a szükséges vízhozam az idő túlnyomó részében rendelkezésre áll (ahogy pl. a Duna vagy egy tengerpart esetében). Ennek oka az, hogy a frissvizes hűtés bekerülési költsége alacsonyabb, illetve működtetéséhez szükséges energia is kevesebb, mint a hűtőtornyokhoz, ráadásul nincs szükség a hűtővíz vegyszerekkel történő kezelésére. Vagyis amennyiben az adott telephelyen garantálható a frissvíz, úgy ennek használata mindegyik szempontból előnyösebb, mint egy hűtőtornyos megoldás.

A hűtőtornyok előnye, hogy olyan helyeken is alkalmazható így az atomenergia, ahol nem áll rendelkezésre a friss víz, akár a tengerektől távol, a sivatag közepén is képesek az erőmű hőjét a légkörnek átadni, azzal a szépséghibával, hogy az erőmű hatásfoka várhatóan néhány százalékkal alacsonyabb lesz, mint egy azonos frissvizes modellé.

A magyar szabályozás szerint az atomerőmű hűtésével kapcsolatban az alábbi korlátok érvényesek:

- A Dunába visszaengedett hűtővíz hőmérséklete a bebocsátásnál nem lehet magasabb, mint 33°C
- A bebocsátástól számított 500 m szelvénynél a Duna nem lehet melegebb, mint 30°C
- A hűtővíz hőmérsékletét nyáron maximum 8, télen maximum 11°C-kal emelheti meg az erőmű



15. ábra. A csúcshűtő hűtőcellái



Az erőműnek maximálisan 132 m³/s hűtővíz mennyiségre van szüksége a két új blokk hűtéséhez. Ehhez képest a Duna átlagos vízhozama kb. 1200 m³/s. A hűtőrendszerek tervezésekor a Duna medrének mélyülése és a klímaváltozás hatásait is figyelembe vették.

Újítás a Paksi Atomerőműhöz képest az ún. "csúcshűtő-rendszer", ami lehetővé teszi, hogy a Duna extrém magas vízhőmérséklete esetén se kelljen a blokkokat leterhelni. A csúcshűtők blokkonként 33 kisméretű, kényszerhuzatú (ventilátoros) hűtőcellából állnak [1], ezek felépítését a *15. ábra* szemlélteti.

A hűtőcellák a kondenzátorból kilépő felmelegedett hűtővizet a levegő segítségével meghűtik.

A hűtőhatás nagy részét az adja, hogy a víz egy részét a rááramoltatott levegő felveszi, az elpárolgó víz pedig hőt von el a környezetéből. Ezzel a rendszerrel az erőmű névleges teljesítményű üzeme mellett akkor is biztosítható a 30°C-os hűtővíz-visszavezetési hőmérséklet, ha a Duna maga 28°C-os.

Az új blokkok, a Duna, a hideg- és melegvíz-csatornák, illetve a csúcshűtők látványtervét a 16. ábra mutatja.





1.5 A PRIMER KÖR FŐBB BERENDEZÉSEI

1.5.1 Reaktor

A reaktor az atomerőmű egyik, ha nem a legfontosabb berendezése. A reaktorban játszódik le a szabályozott láncreakció, amelyből az áramtermeléshez szükséges hőt előállítják. A reaktorban a 2. *táblázat*ban is szereplő magas nyomás és hőmérséklet (162 bar, 328°C) uralkodik, a reaktor egy nyomástartó edény. Az aktív zónából érkező sugárzás is fontos tényező, ugyanis annak kristályrács-roncsoló hatását a berendezésnek legalább 60 éven át el kell viselnie károsodás nélkül (ugyanis a cseréje nem lehetséges). Emiatt a reaktortartály különleges anyagokból és tekintélyes falvastagsággal (20 cm) készül, és csak különleges gyártástechnológiával gyártható.





17. ábra. Az összeszerelt VVER–1200 reaktor

Az összeszerelt reaktor felépítését a 17. ábra mutatja be. A reaktortartály és az ún. felső blokk képezik a nyomástartó edény alját és tetejét, ezeket csavarok rögzítik egymáshoz. A reaktortartályon belül helyezkednek el a reaktor belső elemei: a reaktorakna, a védőcső blokk és az aktív zónát körbevevő zónapalást. Ezek az elemek egyrészt a víz útját irányítják a reaktortartályon belül, másrész helyükön rögzítik a fűtőelem kötegeket, és biztosítják a szabályozó és biztonságvédelmi (neutronelnyelő) rudak szabad mozgását az aktív zónában.

A víz a reaktortartály hidegági csonkján keresztül érkezik a reaktorba. A tartály fala és az akna közötti térben lefelé áramlik, majd a tartály alján irányt vált, és az aktív zónában található fűtőelemek mentén felfelé áramlik, miközben a hőmérséklete folyamatosan emelkedik. A zónából kiérve, a felmelegedett víz a reaktortartály melegági csonkján távozik a reaktorból.

1.5.2 Fővízköri nyomásszabályozás

A fővízkör nyomásának szabályozásáért a térfogatkompenzátor, illetve a hozzá kapcsolódó berendezések, rendszerek felelnek. A térfogatkompenzátor egy alul lyukas tartály, amely a fővízkör egyik melegági vezetékéhez kapcsolódik. A berendezés működése a radiátoros fűtési rendszereknél használatos tágulási tartályhoz hasonló:

- A fővízkörben levegőbuborékok jelenléte nemkívánatos, hiszen többek között rontják a hőátadást és a láncreakció moderálását is
- A zárt kör azonban mégsem lehet színültig megtöltve vízzel, mert akkor egy apró hőmérsékletváltozás is szétnyomhatná a rendszert, megrepeszthetné a csöveket vagy berendezéseket.

A térfogatkompenzátor a többi fővízköri berendezéshez képest magasabban helyezkedik el. A felépítését a *18. ábra* és a *19. ábra* mutatja be. A tartályát nem töltik tele, abban a hőmérséklet függvényében egy adott szintet tartanak az üzemeltetők. A víz feletti térrészt gőzpárna tölti ki, aminek fontos szerep jut a nyomás szabályozásában: a gőz nyomása az elektromos fűtőbetétekkel növelhető, a beporlasztott hideg vízzel pedig a gőz egy része kondenzálható, így a nyomás lecsökken.



18. ábra. A térfogatkompenzátor sematikus ábrája

19. ábra. A térfogatkompenzátor és a kapcsolódó berendezések [1]



Amennyiben a nyomás túlságosan megnőne, a térfogatkompenzátor tetején található biztonsági szelep kinyit, és a térfogatkompenzátorból víz és gőz keveréke áramlik ki, a fővízkör nyomása lecsökken, így a csövek, berendezések sérülése elkerülhető. A kiáramló közeg a buborékoltató tartályba kerül, ahol a gőz lekondenzál, a víz pedig lehűl.

1.5.3 Gőzfejlesztők

A gőzfejlesztő elsődleges feladata, hogy a reaktorban előállított hőt átadja a szekunder kör felé, és a turbina számára gőzt állítson elő. A gőzfejlesztő tulajdonképpen egy nagyméretű csöves hőcserélő, aminek hőátadó csöveiben belül a primer kör felmelegedett hűtőközege kering, a csöveket körbevevő köpenytérben pedig a szekunder köri tápvíz található, ami felmelegszik és felforr, gőzzé alakul. A gőzfejlesztő felépítését a 20. ábra mutatja.



20. ábra. A gőzfejlesztő felépítése: főgőzkollektor

[1], tápvíz belépési pontja [2], tápvíz elosztó [3], hőátadó csövek [4], melegági kollektor [5], hidegági kollektor [6]. Forrás: [1]



A VVER-reaktorcsalád egyik jellegzetessége az fekvő gőzfejlesztő, a nyugati fejlesztésű erőműtípusokban alkalmazott álló gőzfejlesztőkkel szemben. Mindkét konstrukciónak megvannak az előnyei és a hátrányai, a fekvő konstrukció egyik előnye hogy a korróziós termékek felgyülemlését meg lehet akadályozni a megfelelő helyekről való "leiszapolással", így a hőátadó felületek tisztasága könnyebben biztosítható.

A Pakson épülő blokkokat PGV-1200 típusú gőzfejlesztőkkel szerelik fel, melyek már alkalmasak terheléskövető üzemmódban is működni. A típus főbb műszaki paramétereit a *4. táblázat* tartalmazza.

Műszaki paraméter	PGV-1200, Paks II
A gőzfejlesztő tartály hossza, mm	14020
Hőcserélő csövek hossza, m	11263
Hőcserélő felület, m ²	6150
Hőcserélő csövek száma, db	10858
Méretezési nyomás, MPa	9,0
Tervezési hőmérséklet, °C	305

4. táblázat. A PGV-1200 gőzfejlesztő főbb műszaki adatai

1.5.4 Fő keringető szivattyú (FKSZ)

A fővízkörben a vizet folyamatosan áramoltatni kell, hogy a hőt a fűtőelem-pálcáktól elszállítsuk a gőzfejlesztők hőátadó csöveihez. Az áramlás fenntartásának érdekében minden hurok saját főkeringtető szivattyúval (FKSZ) van ellátva. Az FKSZ feladata, hogy biztosítsa az állandó vízforgalmat és kompenzálja a fővízkörben fellépő áramlási veszteségeket. A négy fővízköri hurok vízforgalma összesen 86000 m³/h, azaz egy szivattyúra 21500 m³/h jut. Az FKSZ felépítését a *21. ábra* szemlélteti.





A Pakson épülő új blokkokban az FKSZ típusa GTsNA-1753. A szivattyúk különlegessége, hogy a korábbi konstrukciókkal ellentétben ez a modell úgy lett kifejlesztve, hogy a csapágyak hűtése és kenése a korábban használt olaj helyett már megoldható vízzel, így tovább csökken a tűzesetek valószínűsége a reaktorépületben. Az FKSZ-ekbe lendkereket is építenek, ami áramkimaradás esetére is biztosítja, hogy a fővízkörben fennmaradjon a szükséges áramlás arra a rövid időre, amíg a biztonsági rendszerek beindulnak. A szivattyúk fontosabb műszaki adatait az *5. táblázat* foglalja össze.



Paraméter	Érték
Névleges térfogatáram	21800 m3/h
Emelőmagasság	6,7 bar
Nyomás a szívóoldalon	160 bar
Villamos teljesítmény (meleg/hideg blokk esetén)	5,6/7,4 MW
Fordulatszám	1000 fordulat/perc

5. táblázat. A GTsNA-1753 típusú FKSZ főbb műszaki paraméterei [5]

1.6 A SZEKUNDER KÖR FŐBB BERENDEZÉSEI

A szekunder kör fő feladata, hogy a gőzfejlesztőben előállított gőzt a turbinára továbbítsa, ahol az a gőz energiáját mechanikai munkává alakítja, mellyel a generátort hajtja meg. Ezt követően a fáradt gőzt le kell kondenzálni és tápvízként visszajuttatni a gőzfejlesztőkbe, előmelegítő fokozatokon keresztül. A szekunder kör főbb rendszerei a főgőzrendszer, a turbina, a cseppleválasztó és túlhevítő rendszer, a kondenzátor, a tápvíz-előmelegítők, illetve a gáztalanítós táptartály. A szekunder kör egyszerűsített sémáját a 22. *ábra* mutatja.



22. ábra. A szekunder kör egyszerűsített sémája

1.6.1 Főgőzrendszer

A főgőzrendszer vezetékekből és armatúrákból (szelepekből) épül fel. Elsődleges célja a gőzfejlesztőkben megtermelt gőz turbinához és egyéb turbinaszigeti fogyasztókhoz való eljuttatása. Ezen kívül a rendszerből csatlakozik ki a turbinamegkerülő (bypass) rendszere, ami képes közvetlenül a kondenzátorba juttatni a frissgőzt abban az esetben, ha erre lenne szükség (pl. turbinakiesés vagy a főgőzvezeték magas nyomása esetén).



A főgőzrendszerben találhatók még az atmoszférába redukáló (AR), illetve főgőz-izoláló szelepek (armatúrák) is, 23. ábra. Az atmoszférába redukáló lehűtésben, a biztonsági szelepek, a gőzfejlesztő túlnyomás elleni védelmében az izoláló armatúrák a gőzfejlesztő kizárásában vesznek részt.



23. ábra. Főgőz szelepcsoport

1.6.2 Turbina

A Paksra szánt turbina GE által gyártott ARABELLE típusú gőzturbina. A turbina 1 nagy-középnyomású és három kisnyomású házból áll, melyek egy közös tengelyt forgatnak meg. A turbina főbb műszaki paramétereit a 6. táblázat foglalja össze. A turbina a 24. ábrán látható.

Paraméter	Érték
Fordulatszám	1500 fordulat/perc
Névleges hatásos teljesítmény	1270 MW
Tervezett élettartam	60 év

6. táblázat. A Paksra szánt GE Arabelle turbina főbb paraméterei


24. ábra. A turbina szemléltető ábrája [1]



1.6.3 Cseppleválasztó és túlhevítő

A cseppleválasztó és túlhevítő feladata – ahogy a neve is mutatja – a gőz nedvességtartalmának leválasztása, illetve a gőz újrahevítése (túlhevített gőz előállítása). A gőzfejlesztőkben előállított gőz először a nagynyomású turbinaházba kerül, ahol munkavégzés közben kitágul, "expandál" és nedvességtartalma nő. Ennek a folyamatnak a során a gőz egy része vízzé alakul, ami azért jelent problémát, mert ekkora sebességnél az apró vízcseppek is komolyan roncsolhatják a turbinalapátokat és az érint-kező felületeket.

Ezért a nagynyomású turbinából kilépő gőzt újramelegítik, illetve a cseppleválasztók segítségével eltávolításra kerül a nedvességtartalom, ezzel védve elsősorban a kisnyomású turbina lapátjait. A cseppleválasztó és túlhevítő a 25. ábrán látható.

25. ábra. Cseppleválasztó és túlhevítő metszete [1]





1.6.4 Kondenzátor

A kondenzátor (26. ábra) feladata az ide jutó gőz kondenzálása, illetve ezzel a hő átadása a végső hőelnyelőbe (Duna). A kondenzátorban a hőmérséklet a Dunából érkező hűtővíz hőmérsékletének függvényében változó, a névleges érték 23°C és 26 mbar abszolút nyomás, azaz a kondenzátorban a légkörinél is alacsonyabb nyomás uralkodik, ez a turbinaszigetben a legkisebb nyomású rendszer. Erre a turbina hatásfokának növelése miatt van szükség.

26. ábra. A kondenzátor



1.6.5 Tápvíz-előmelegítők

A tápvíz-előmelegítők egyszerű hőcserélők, amelyeknek a feladata, hogy a kondenzátorban összegyűjtött 23°C-os kondenzátumot 225°C-ra melegítsék. Ez az előmelegítés 7 fokozatban történik, erre is az erőmű termikus hatásfokának növelése érdekében van szükség. A tápvíz-előmelegítés további előnye, hogy az előmelegített víz beadásával a gőzfejlesztők szerkezeti anyagaiban kisebb hőfeszültség alakul ki, azaz a berendezéseknek kevésbé megterhelő így üzemelni, az élettartamuk megnő. A tápvízelőmelegítőket a turbina fokozataiból megcsapolásokon keresztül elvett gőzzel fűtik.

1.6.6 Gáztalanítós táptartály

A gáztalanítós táptartály a tápvíz-előmelegítők egyike, de emellett feladata még a tápvíz tárolása és gáztalanítása is. A gáztalanítás elve a pótvíz-gáztalanítóhóz hasonló, forráshoz közeli hőmérsékleten tartva a vízből az oldott gázok távoznak. A táptartályban a tápvíz 180°C-os és 10 bar nyomású. A táptartályt az előmelegítőkhöz hasonlóan a turbináról elvett gőzzel fűtik.



1.7 BIZTONSÁGI RENDSZEREK

Atomerőművek tervezése, építése és üzemeltetése során az elsődleges szempont a biztonság. Az üzemeltetők célja természetesen a lehető legnagyobb mennyiségű elektromos energia megtermelése, illetve az erőmű minél nagyobb rendelkezésre állása, de gazdasági szempontok nem írhatják felül a nukleáris biztonsági korlátokat. Magyarországon a nukleáris erőművek számára az irányadó szabályozás az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) által kiadott Nukleáris Biztonsági Szabályzatok (NBSZ). Ez egy többkötetes szabályzat, ami összegyűjti, hogy milyen szabályok vonatkoznak bárkire, aki sugárzással járó tevékenységet folytat (sugárforrások használata orvoslásban, élelmiszeriparban, radioaktív hulladékkezelés, kutatóreaktorok, atomerőművek, stb…). Az NBSZ hiánytalan betartását az OAH folyamatosan ellenőrzi.

Atomerőművek esetén a szabályozás lényege, hogy az erőművet fel kell készíteni minden olyan "kezdeti eseményre", ami üzemzavart okoz és aminek a bekövetkezése egy meghatározott valószínűségnél nagyobb. A bekövetkezés valószínűsége szerint az eseményeket üzemállapotokhoz kell rendelni [6]:

- 1. Tervezési alap 1 (TA1): normál üzem, a leggyakoribb üzemállapot: ide tartozik a teljesítményüzem, a karbantartás, lehűtés, felfűtés, stb...
- 2. TA2, várható üzemi események (100 évente 1-szer, vagy annál gyakrabban előfordul)
- 3. TA3, kis gyakoriságú tervezési üzemzavarok (10000–100 évente egyszer fordul elő)
- 4. TA4, nagyon kis gyakoriságú tervezési üzemzavar (1000000–10000 évente egyszer fordul elő)
- Tervezési Alap Kiterjesztése (TAK), komplex üzemzavar (két TA2–3-esemény együttes bekövetkezése)
- 6. TAK2, súlyos baleset: az üzemanyagok sérülésével járó esemény kombináció

Az atomerőművet fel kell készíteni a felsorolt eseménytípusok mindegyikének kezelésére úgy, hogy meg legyen oldva az üzemanyag hosszútávú hűtése és a telephelyen kívülre történő radioaktív kibocsátás kizárható legyen. A TA1–4-eseményeknél a cél a komolyabb fűtőelem- vagy reaktortartály-sérülés nélküli lekezelés és ezt követően további üzemelés, a TAK-eseményeknél a cél a következmények minimalizálása és a lakosság védelme.

A fent említett célok elérésének érdekében a radioaktív anyagokat mérnöki gátakkal tartják vissza. Ezek a mérnöki gátak az üzemanyag maga, a fűtőelemek burkolata, a primerkör nyomáshatára és a konténment épület. A biztonsági intézkedések szinte mindegyike ezeknek a gátaknak a védelmét szolgálja. TA1-4-események alatt az első három, TAK1 és TAK2 üzemállapotban pedig már egyre inkább csak a 4. mérnöki gát védelmére fókuszál a védekezési stratégia, hiszen súlyos balesetek során adott esetben az üzemanyag és annak burkolata is megolvadhat, a reaktortartály átolvadásával pedig a 3. gát épsége is elveszik.

A biztonságra való tervezés esetén fontos szempont a mélységében tagolt védelem elve, vagyis az egyes üzemállapotok kezelésére tervezett rendszereknek egymástól a lehető legnagyobb mértékben függetlennek kell lenniük (pl. Egy TA3-esemény elhárítására tervezett rendszer villamos betápja vagy szabályozó rendszere legyen különböző, mint egy TAK1-esemény elhárítására tervezett biztonsági rendszeré).

Ugyancsak fontos elv a biztonsági rendszerek tervezésénél a redundancia és az egyszeres meghibásodás tűrésének elve. Ezek értelmében az egyes biztonsági rendszereket úgy tervezik, hogy egyetlen berendezés, rendszerelem meghibásodása ne tehesse lehetetlenné, hogy a rendszer ellássa a funkcióját. A leggyakoribb megoldás, hogy egymással párhuzamosan futó, független rendszerágakat terveznek



egy adott rendszerbe, amelyet térben is elválasztanak, így egy meghibásodás esetén is a fennmaradó működőképes rendszerágak biztosítják a szükséges feladat ellátását.

Az üzemzavarok elhárításánál további szempont, hogy a súlyosabb események kezelésénél egyre kevésbé számíthat a tervező a személyzet beavatkozására, és egyre inkább passzív megoldások alkalmazására kell törekedni. A TA2–4 kategóriákba tartozó eseményeket szinte kivétel nélkül "aktív" biztonsági rendszerek látják el, melyek áramellátást és működő automatikát igényelnek. A TAK1–2események kezelésére viszont passzív rendszerek is lettek tervezve, melyek áramkimaradás esetén és személyzeti beavatkozás nélkül is ellátják a feladatukat. A továbbiakban bemutatásra kerül, hogy az új blokkok rendszerei hogyan biztosítják az erőmű biztonságát az egyes üzemállapotokban.

1.7.1 Az aktív zóna hűtése

Az aktív zóna hűtése az egyik legfontosabb biztonsági funkció, ugyanis ha ez megoldott, akkor semmilyen komoly radiológiai következmény nem fenyegeti sem az erőművet, sem a lakosságot. Minden egyes maghasadási reakcióval a fűtőelemek anyagában radioaktív izotópok, hasadási termékek keletkeznek, melyek a két üzemanyag-átrakás közötti üzemelés során (kampány) felhalmozódnak. Ezeknek a radioaktív bomlása hőfejlődéssel jár, vagyis a besugárzott fűtőelemek akkor is termelnek hőt, amikor a láncreakció már leállt, ezt nevezzük remanens hőfejlődésnek.

27. ábra. A zónaolvadék-csapda működését szemléltető ábra [1]



A remanens hő a leállást követően fokozatosan csökken, de ha az elvitele nem megoldott akkor a fűtőelemek túlmelegedéséhez és sérüléséhez vezethet. A fűtőelemek sérülése pedig lehetővé teszi, hogy a bennük felhalmozódó hasadási termékek kiszabaduljanak, és elszennyezzék a primer kört, vagy annak sérülése esetén a reaktorépületet, vagy esetlegesen kibocsátásra kerüljenek a környezetbe.



Az aktív zónában termelt hő elvitelére tervezett rendszereket a 7. táblázat foglalja össze. Fontos megjegyezni, hogy TA1–4, illetve TAK1 üzemállapotokban a rendszerek úgy vannak megtervezve hogy a primer kör sérülése (azaz csőtörés) esetén is képesek biztosítani a zóna hosszútávú hűtését. A TAK2 üzemállapot, azaz a súlyos baleset azt jelenti, hogy az aktív zóna jelentősen károsodik, előfordulhat az üzemanyag jelentős részének megolvadása. Ebben az esetben a megolvadt zóna anyagai a reaktortartályt átolvasztják és a reaktor alatt elhelyezett zónaolvadék-csapdába (27. ábra) kerülnek, ahol a hűtés a továbbiakban biztosított.

Üzemállapot	Rendszer	Kapacitás
TA1	Fő vízkör	-
TA2	Lehűtő rendszer (JNA) Kisnyomású biztonsági befecskendező rendszer (JNG1)	4x100%
TA3	Kisnyomású biztonsági befecskendező rendszer (JNG1) Nagynyomású biztonsági befecskendező rendszer (JND) Passzív üzemzavari zónahűtő rendszer (JNG2)	4x100% 4x100% 4x33%
TA4	Kisnyomású biztonsági befecskendező rendszer (JNG1) Nagynyomású biztonsági befecskendező rendszer (JND) Passzív üzemzavari zónahűtő rendszer (JNG2)	4x100% 4x100% 4x33%
TAK1	Üzemzavari lehűtőrendszer (JNB50) Gőzfejlesztő passzív hőelvonó rendszer (JNB)	2x100% 4x33%
TAK2	Zónaolvadék lokalizáló rendszer (JMR) (passzív rendszer) Konténment passzív hőelvonó rendszer (JMP)	1x100% 4x33%

7. táblázat. A zóna hűtéséért felelős rendszerek a különböző üzemállapotokban

1.7.2 A pihentető medence hűtése

A pihentető medence fő feladata a reaktorból már kivett, "kiégett" fűtőelemkötegek átmeneti, 10 éves tárolása. Ebben a 10 évben a besugárzott fűtőelemkötegek remanenshő-termelése még túl magas ahhoz, hogy levegőn lehessen őket tárolni. A pihentető medence hűtése a zónáéhoz hasonlóan kiemelten fontos, hiszen itt a már besugárzott fűtőelemek átmeneti tárolása zajlik.

A pihentető medencében elhelyezett fűtőelemek szárazra kerülése a bennük termelődő remanens hő miatt szintén fűtőelem-sérüléshez vezet, ezért a pihentető medencéből a hőelvitelt minden üzemállapotban biztosítani kell, még súlyos baleset esetén is. A pihentető medence elhelyezkedését és felépítését a 28. ábra szemlélteti.

A hűtés ellátására TA1–4 üzemállapotokra aktív rendszereket terveztek, melyek a medence aljára adagolják a hideg vizet, a medence tetejéről pedig meleg vizet vesznek el, így tartva állandó értéken a vízszintet. Az elvett felmelegedett vizet egy hőcserélőn keresztül a rendszer lehűti és visszaadja a medencébe.





28. ábra. A pihentető medence sematikus ábrája

TAK1–2 üzemállapotokban egy ennél "bombabiztosabb" megoldás kerül alkalmazásra: a pihentető medencében a fűtőelemek a hűtés megszűnését követően fokozatosan elkezdik felmelegíteni a vizet, ami egy idő után intenzív párolgásba, majd forrásba kezd. A medence térfogata és üzemi vízszintje úgy lett méretezve, hogy a víz párolgási sebességét figyelembe véve a balesettől számított 72 órán belül a fűtőelemek teteje ne kerülhessen szárazra, így megelőzve az esetleges sérülésüket. A felforrt hűtővíz a konténment passzív hőelvonó rendszer (JMP) hőcserélőin lecsapódik és visszacsorog a reaktorépület alsó szintjén lévő zsomptartályokba. Innen TAK1-ben az üzemzavari lehűtőrendszer (JNB50) vissza tudja adni a pihentető medencébe, megakadályozva a vízszintcsökkenést a medencében. TAK2 üzemállapotban alternatív feltöltési lehetőség is biztosított az üzemzavari feltöltőrendszer (JNC) révén, ami tiszta kondenzátummal tudja utántölteni a medencét. A kiégett fűtőelemek hűtéséért felelős rendszereket a 8. *táblázat* foglalja össze.

Üzemállapot	Rendszer	Kapacitás
TA1	Pihentető medence hűtőrendszer (FAK)	3x100%
TA2	Pihentető medence hűtőrendszer (FAK)	3x100%
TA3	Kisnyomású biztonsági befecskendező rendszer (JNG1) Konténment sprinkler rendszer (JMN) Lehűtő rendszer (JNA)	3x100% 3x100% 3x100%
TA4	Kisnyomású biztonsági befecskendező rendszer (JNG1) Konténment sprinkler rendszer (JMN) Lehűtő rendszer (JNA)	3x100% 3x100% 3x100%

8. táblázat. A pihentető medence hűtését biztosító rendszerek az egyes üzemállapotokban



Üzemállapot	Rendszer	Kapacitás
TAK1	Üzemzavari lehűtőrendszer (JNB50) Konténment passzív hőelvonó rendszer (JMP)	2x100% 4x33%
TAK2	Üzemzavari feltöltőrendszer (JNC) Konténment passzív hőelvonó rendszer (JMP)	2x100% 4x33%

1.7.3 A Konténment integritásának védelme

A harmadik fontos biztonsági feladat a konténment épület szerkezeti integritásának biztosítása, hiszen ha ez a funkció teljesül, akkor még a fűtőelemek sérülése és jelentős mennyiségű radioaktív anyag felszabadulása sem vezet radioaktív kibocsátáshoz, vagyis a lakosságra nézve nincs radiológiai következmény.

A konténment egy kettősfalú beton henger, a tetején kupolával. Mindkét fal anyaga vasbeton. A belső konténment feladata, hogy a környezetet megvédje az épület belsejéből eredő veszélyforrásoktól, míg a külső konténmenté az, hogy az épületet és a benne foglalt berendezéseket megvédje minden külső veszélytől. A külső konténment tervezése során figyelembe vett veszélyforrásokat a *11. ábra* szemlélteti.

29. ábra, Hidrogén rekombinátor [1]



A belső konténment szerkezeti egységére a legnagyobb veszélyt a belül üzemzavarok során kialakuló magas hőmérsékleti és nyomásértékek jelentik, illetve az esetleges belső robbanásból eredő lökéshullámok. Vagyis az épületen belül meg kell akadályozni robbanásveszélyes gázkeverékek kialakulását, illetve a belül kialakuló nyomást egy bizonyos érték alatt kell tartani, amit a szerkezet még képes elviselni.

A konténment integritását védeni hivatott rendszerek ezt a két célt valósítják meg. A konténment hidrogén eltávolító rendszer (JMT) passzív rekombinátorai képesek az üzemzavarok esetén fejlődő hidrogént katalitikus módon vízzé alakítani, így megelőzve a robbanást, 29. ábra. Ez a rendszer minden üzemállapotban működik, amennyiben a belső tér hidrogén-koncentrációja meghalad egy bizonyos küszöbértéket.



A konténment légtérnyomását az üzemállapottól függően más-más rendszerek szabályozzák. Alapesetben a reaktorcsarnokban depressziót biztosít a normál szellőzőrendszer annak érdekében, hogy a levegő mindig befelé áramoljon az épületbe. A folyamatosan elszívott levegő tisztításra kerül. Tervezési üzemzavarok és TAK1 események során a konténment sprinkler-rendszer (JMN) felelős a nyomás csökkentéséért, ami a kupola felső részén elhelyezett szórófejekből vizet porlaszt a levegőbe, így kondenzálva az üzemzavar során felszabaduló gőzt, ezáltal csökkentve a nyomást. TAK2 üzemállapotban a konténment passzív hőelvonó rendszere (JMP) biztosítja ezt a funkciót, a kupola felső részén elhelyezett hőcserélői segítségével. A konténment szerkezeti egységének védelmét szolgáló rendszereket a 9. *táblázat* mutatja be.

Üzemállapot	Rendszer	Kapacitás	
TA1	Normál szollőzőropdszorok		
TA2		_	
TA3	Konténment sprinkler-rendszer (JMN)	4,100%	
TA4	Konténment hidrogén eltávolító rendszer (JMT)	4X100%	
TAK1	Konténment passzív hőelvonó rendszer (JMP)	1,220/	
TAK2	Konténment hidrogén eltávolító rendszer (JMT)	4x33%	

9. táblázat. A konténment belső nyomásának szabályozásában részt vevő rendszerek az egyes üzemállapotokban

1.8 A PRIMER- ÉS SZEKUNDER KÖR VÍZÜZEME, FONTOSABB PRIMERKÖRI SEGÉDRENDSZEREK

1.8.1 Primerköri vízüzem

Ahogy arról korábban szó volt, a primer körben keringtetett víznek több szerepe is van. Egyrészt hűti a fűtőelemek felületét és elszállítja a hőt a gőzfejlesztőkbe, másrészt moderálja a maghasadásból keletkező gyors neutronokat, így biztosítva a láncreakciót. Emellett a reaktor kritikusságának hosszútávú szabályozásában is részt vesz a vízbe adagolt bórsav segítségével. Mivel primer hűtővízbe más vegy-szereket is adagolnak, ezért pontosabb megnevezés a primerköri hűtőközeg, a továbbiakban ezt használjuk.

A primer körben fontos szempont, hogy biztosítani kell a berendezések lehető leghosszabb élettartamát, hiszen pl. a reaktortartály nem cserélhető. A nem megfelelő összetételű vagy kémhatású primer hűtőközeg jelentősen felgyorsíthatja a felhasznált acélok korrózióját, komoly (adott esetben helyrehozhatatlan) gazdasági károkat okozva. Emiatt a hűtőközeg kémiai összetételét, kémhatását, oldott gáz tartalmát folyamatosan bizonyos határértékek között kell tartani, a kémiai paramétereket pedig folyamatosan monitorozni kell, hogy adott esetben minél gyorsabban be tudjon avatkozni az üzemeltető személyzet.

A primer körre jellemző jelenség a víz "radiolízise", azaz gyors neutronok és az erős gamma-sugárzás hatására bekövetkező bomlása. A víz bomlása során a primer hűtőközegben oxigén és hidrogéngáz szabadul fel. A felszabaduló oxigén erősen korrozív hatású, ezért ennek mennyiségét minimalizálni kell.



Mivel a reakció reverzibilis, azaz visszafelé is lejátszódik, a hűtőközegben lévő oldott oxigén menynyisége csökkenthető, ha a visszaalakulás irányába toljuk el az egyensúlyt. Ez a hűtőközegben lévő oldott hidrogén mennyiségének növelésével érhető el. Ebből a célból hidrazint (N2H4) adagolnak a hűtőközegbe, aminek bomlásakor hidrogén szabadul fel.

További figyelembe veendő tényező a szerkezeti anyagok neutronsugárzás hatására történő felaktiválódása, amiről már esett szó esett. A felaktiválódás akkor okozhat problémát, ha a felaktiválódott magok a korróziós folyamatok eredményeképpen a hűtőközegbe kerülnek, majd a fővízkör egy adott pontján felgyülemlenek, lerakódnak. Ha az adott izotóp hosszabb felezési idejű vagy különösen erős gamma-sugárzó, ez komoly dózist jelenthet a karbantartást végző dolgozók számára.

Éppen ezért a korróziós termékek felgyülemlését a hűtőközegben folyamatos tisztítással meg kell akadályozni, illetve biztosítani kell, hogy ne alakulhassanak ki áramlási szempontból pangó részek a fővízkörben, ahol ezek az anyagok kiülepedhetnek és felgyűlhetnek.

A fűtőelemek burkolata különösen érzékeny felület. Bármilyen lerakódás jelentősen ronthatja a fűtőelemek hűtését, ami adott esetben túlmelegedéshez és sérüléshez vezethet. Tehát a fűtőelem-burkolatok elszennyeződését is meg kell akadályozni.

A hűtőközeg kémhatása a bórsav-koncentráció függvényében, kálium-hidroxid és ammónia beadagolásával állítható be, a különösen erősen sugárzó, felaktiválódásból származó kobalt izotópok kirakódása pedig cink ionokat tartalmazó oldattal előzhető meg.

1.8.2 Térfogatszabályozás a primer körben

A primerköri hőhordozó térfogatának szabályozására azért van szükség, mert a hőmérséklet függvényében a hűtőközeg kitágul vagy éppen összezsugorodik, és biztosítani kell, hogy a térfogatkompenzátorban a szint ne legyen sem túl alacsony, sem túl magas. A túl alacsony szint azt jelentené, hogy szárazra kerülhet a térfogatkompenzátor elektromos fűtőbetétje (annak károsodását okozva, illetve lehetetlenné téve a nyomásszabályozást), illetve adott esetben buborékok kerülhetnének a hurkokba, rontva a hőátadást és áramlási problémákat okozva.

A túl magas vízszint pedig nem hagyna elég teret a nyomást stabilan tartó gőzpárna számára. A térfogatkompenzátor teljes feltöltődése a fővízkör szétnyomódását és csőtörést eredményezhet, amit természetesen minden áron el kell kerülni. A térfogatkompenzátor számos szintmérő jeladóval van ellátva, így a benne lévő vízszint folyamatosan nyomon követhető. Minden hőmérséklethez előre meg van határozva az a szinttartomány ami megfelelőnek tekinthető, az operátorok ennek függvényében avatkoznak be üzemeltetés közben.

Üzem közben normál esetben a fővízköri hurkokból folyamatosan eresztenek le hűtőközeget tisztítás céljából, egy másik ponton pedig folyamatos a tisztított hőhordozó visszaadása. A két mennyiség arányának változtatásával állítható be, hogy a fővízkörben növekedjen vagy csökkenjen a hűtőközeg összmennyisége. Az elvétel és visszaadás a pótvíz és bóros szabályozás rendszerén (KBA) keresztül történik. A leeresztett mennyiség a primerköri hűtőközeg tárolórendszerben (KBB) kerül átmeneti tárolásra, az esetleges későbbi felhasználás céljából. Értelemszerűen az itt tárolt közeget lehet használni a fővízköri szint növelésére.

1.8.3 Kémiai összetétel szabályozása a primer körben

A vegyi összetétel szabályozásában a legfontosabb szerep szintén a pótvíz és bóros szabályozás rendszerének jut (KBA). Ez a rendszer mindegyik fővízköri hurokhoz csatlakozik, így biztosítható a beadagolt vegyi anyagok egyenletes elkeveredése. A KBA-rendszerbe csatlakozik a primerköri hőhordozó vegyszeradagoló rendszere (KBD30), ami a szükséges hidrazin, ammónia, kálium-hidroxid és cinkacetát-oldat mennyiségeket biztosítja a vízkémiai paraméterek megfelelő értéken tartásának érdekében.

További kapcsolódó rendszerek a primerköri hűtőközeg tárolórendszer (KBB), illetve a tiszta kondenzátum- és bóros víz ellátórendszer (KBC10). Ezen rendszerek a feladata a hűtőközeg bórsav-tartalmának szabályozása üzem közben. A hűtővízbe adagolt bórsav befolyásolja a Keff értékét, azaz a zóna kritikusságát, mivel a bór egyes izotópjai jó neutronelnyelők. Sok bórsav beadagolásával a reaktor szubkritikussá tehető, a láncreakció ekkor leáll. Üzemanyag-átrakáskor, vagy amikor a reaktor nem üzemel, a bórsav-tartalmat magas értéken tartják, hogy a láncreakció a szabályozó rudak teljes kihúzása esetén se indulhasson el.

Amikor az erőmű elindul, a bórsav-tartalmat fokozatosan csökkentik egy előre kiszámított indítási koncentrációig, a kritikusság elérésekor a láncreakció beindul, és el lehet kezdeni növelni a teljesítményt. A kampány során a fűtőelemekből folyamatosan fogynak az elhasítható 235U atomok, vagyis a Keff csökkenni fog. Ennek ellensúlyozása érdekében a hűtőközeg bórtartalmát fokozatosan csökkenteni kell, ami a kampány végére nullára csökken.

Ehhez értelemszerűen folyamatos bórkivonásra van szükség. Erre két módja van az üzemeltetőknek: amíg a bórtartalom viszonylag magas, a hűtőközegből le lehet ereszteni egy adott mennyiséget, amit aztán a KBC10 rendszerből vett tiszta kondenzátummal (bórsavmentes vízzel) helyettesítenek. Alacsony bórsav-tartalomnál ez a módszer már nem hatékony, ekkor a KBB-rendszerben található ioncserélőkön áramoltatják keresztül az elvett primer hűtőközeget, kivonva belőle a bórt tartalmazó borátionokat.

A menetrend-tartás, leállás vagy üzemzavar esetén szükség lehet a bórsav-tartalom növelésére is, ebből a célból hígabb és tömény bórsav-oldatot tároló tartályok is rendelkezésre állnak pl. a KBC10 vagy a JNK (bórosvíz-tároló) rendszerekben.

1.8.4 A primer hűtőközeg tisztítása

Korábban már említettük, hogy szükség van a hűtőközegből a korróziós termékek folyamatos eltávolítására, illetve a különböző ionok koncentrációinak határértéken tartására. A primer hűtőközegből minden hurkon folyamatos részáramú elvétel történik (azaz az áramló közegnek csak egy kis hányada kerül elvételre) víztisztítás céljából. A KBA-rendszeren az elvett hűtőközeg a fővízköri víztisztító rendszerbe (KBE) kerül, ahol a hűtőközeget ioncserélő gyantás tisztítóberendezés segítségével tisztítják meg a szennyeződésektől.

A megtisztított hűtőközeg ezután visszakerülhet a fővízkörbe a KBA-rendszeren keresztül, vagy ha a benne oldott gázok mennyisége indokolja, akkor a KBA-rendszerben elhelyezkedő pótvíz-gáztalanítóba kerül. Mint ismert, a vízben oldható gázok mennyisége a hőmérséklet emelkedésével csökken, így a gáztalanítóban forráspontig hevített hűtőközegből az oldott gázok (többek között hidrogén, oxigén, nitrogén) eltávoznak. Ezzel elkerülhető a túl magas oldott gáztartalom, ami gázbuborékok képződéséhez és egyes helyeken történő felhalmozódásához vezethetne, a hidrogén esetén pedig robbanásveszélyt is okozhat.



1.8.5 Szekunder vízüzem

A szekunder körben alapvetően a primer körhöz hasonló módszereket alkalmaznak a vízkémiai paraméterek biztosítására, de fontos különbséget jelent a bórsav hiánya, a gőzfázis jelenléte és az alkalmazott acélok eltérő tulajdonságai. Az acélok korróziójának lassítása érdekében a szekunder körben is lúgos kémhatást kell biztosítani, illetve ugyanúgy szükség van gáztalanításra.

A helyzetet egyszerűsíti, hogy a szekunder körben bórsav beadagolására nincs szükség, viszont nehezíti, hogy a gőzfázisban is meg kell őrizni a lúgos pH-t. Ismert tény, hogy az oldatok általában forralással fokozatosan töményebbé válnak, mert az oldott anyagok a folyadékban maradnak. A gőzfejlesztőben forrás történik, így ezt a tényezőt figyelembe véve illékony anyagokat, etanol-amint, ammóniát és hidrazint alkalmaznak a pH beállítására.

A szekunder körben is szükség van a szilárd és oldott szennyezők kiszűrésére, ezt az LD-kondenzátumtisztító rendszer és egyes alrendszerei végzik. A szennyeződések fő forrása a szerkezeti anyagok korróziója, illetve a kondenzátorba történő esetleges vízbetörések a hűtővíz oldalról. A tápvíz gáztalanítását a gáztalanítós-táptartály (GTT) végzi, a pótvíz-gáztalanítóhoz hasonló módon.

1.9 NUKLEÁRIS ÜZEMANYAGCIKLUS

Nukleáris üzemanyagciklus alatt az urán útját értjük egészen a bányászattól a kiégett fűtőelemek utóéletéig. A ciklus maga lehet zárt, nyitott esetleg részlegesen zárt, attól függően, hogy hogyan kerülnek hasznosításra a kiégett fűtőelemek még elméletben hasznosítható részei. Ma Magyarországon a nyitott üzemanyagciklus szerint történik az urán kezelése. Ennek lépései: bányászat, ércfeldolgozás, urándúsítás, fűtőelemek gyártása, hőtermelés az atomerőműben, átmeneti tárolás, végleges elhelyezés. A nyitott ciklus állomásait a *30. ábra* szemlélteti.



30. ábra. A nyílt nukleáris üzemanyagciklus [7]



1.9.1 Uránbányászat

Az urán főként oxidok és más ásványok formájában fordul elő a földkéregben, kötött állapotban. A bányászat és ércfeldolgozás célja, hogy az uránt valamilyen kémiailag tiszta vegyület formájában előállítsa.

A hagyományosnak mondható külszíni és mélyművelésű bányákban az uránércet kibányásszák, majd az urántartalmú ércásványokat elválasztják az azt nem tartalmazó "meddő" kőzettől. Az urántartalmú szeparátumot tömény savban vagy más vegyi anyagban feloldják, ebből az oldatból később kinyerhető egy kémiailag tiszta uránvegyület.

Az előbbi kettő kitermelési módon kívül néhány országban (pl. Kazahsztán, USA) egy harmadik módszert is alkalmaznak az urán kitermelésére. Ez az ISL (In-situ leaching) módszer, ami annyit tesz, hogy az urántartalmú kőzetrétegbe több helyen belefúrnak, majd a furatokon olyan vegyi anyagokat juttatnak a kőzetbe, ami az uránatomokat képes "oldatba vinni" anélkül, hogy a kőzet többi része feloldódna [8]. Egy másik furaton a rétegvizet felszivattyúzzák, amiben már benne lesz az oldott urán. Ezzel a módszerrel hatalmas mennyiségű érc megmozgatását és szétválogatását lehet megspórolni, viszont csak speciális talajviszonyok esetén használható, és az alkalmazott tömény vegyi anyagok miatt környezeti károkat is okozhat.

1.9.2 Urándúsítás

A kémiailag tiszta uránvegyület előállításával azonban még nem tehetünk szert könnyűvizes erőművekben is használható nukleáris üzemanyagra. A természetben ugyanis több uránizotóp fordul elő: a két legfontosabb a 235U és a 238U, amelyek közül előbbi aránya a természetben kb. 0,7%, míg az utóbbié 99,3%.

Sajnos a kettő közül a pont 235-ös izotóp az, amely jó hasadási tulajdonságokkal rendelkezik, ezt használják nukleáris üzemanyagként. A természetes összetételű urán-oxidból és vízből nem lehetne olyan reaktort építeni, amiben lejátszódik a láncreakció, mert túl kevés lenne a hasadóképes mag. Éppen ezért az uránt dúsítani szükséges, azaz meg kell benne növelni a 235-ös izotóp részarányát (általában kb. 3–5%-közötti értékre).

Mivel a két izotóp kémiai viselkedése teljesen azonos, az elválasztásuk nehéz, energiaigényes és aprólékos feladat. Többféle dúsítási technológia létezik [7]:

- gázdiffúziós ahol a két izotóp eltérő diffúziós sebességét aknázzák ki,
- centrifugás, ahol a két izotóp eltérő tömegéből eredő eltérő tehetetlenséget használják fel,
- lézeres, ahol az egyik izotópra specifikusan kalibrált lézerrel szelektíven gerjeszthető és kivonható az egyik izotóp.

1.9.3 Nukleáris üzemanyag

A megfelelő mértékű dúsítást követően az uránból üzemanyag készül. Pakson a könnyűvizes reaktorokban széles körben alkalmazott UO₂ üzemanyagot használnak. Az UO₂ kémiailag stabil, kerámiaszerű anyag, aminek olvadáspontja kimondottan magas (2865°C). Negatív tulajdonsága viszont, hogy a hővezetési tényezője egyáltalán nem mondható jónak (~ 3W/mK). Az urán-dioxid porból magas nyomáson és hőmérsékleten pasztillákat hoznak létre, ezek az üzemanyag-pasztillák.



A pasztillákból a gyárban fűtőelemeket képeznek, melyek hosszú (kb. 4,5 m), de vékony (kb. 9 mm átmérőjű) fémcsövek, amikben a pasztillákat egymásra tornyozzák. A fűtőelem feladata, hogy a pasztillákat egyhelyben tartsa, ezt úgy érik el, hogy a fűtőelem két végét dugóval zárják le, és a pasztillákat rugóval rögzítik a helyükre.

A fűtőelemek burkolata az üzemanyaggyártás egyik kulcskérdése, a burkolat anyagának kiválasztásakor számos szempontot kell mérlegelni. A burkolat rendelkezzen jó korróziós tulajdonságokkal, ne lépjen reakcióba sem a hűtőközeg, sem az üzemanyag anyagával. Jelentős mértékű neutronsugárzás hatására se öregedjen, ne veszítse el mechanikai szilárdságát és lehetőség szerint ne akadályozza a láncreakció létrejöttét, minél kevesebb neutront nyeljen el. Ezen kívül viselje el a zónában jellemző nyomás (163 bar) és hőmérséklet (330°C) viszonyokat, legyen jól alakítható és lehetőség szerint olcsó is.

A burkolat anyaga az új paksi blokkokban az E110 elnevezésű cirkónium-ötvözet. A pasztillák közötti, illetve a pasztillák és a burkolat közötti (szándékos) réseket hélium töltőgázzal töltik ki a jó hővezetés érdekében. A résekre azért van szükség, mert a sugárzás, illetve a hőmérséklet emelkedésének hatására a pasztillák kitágulnak, rés nélkül az a burkolat felrepedését is eredményezhetné az üzemidő végére. A fűtőelemek és az azokból képezett fűtőelemkötegek felépítését a *31. ábra* mutatja be.



31. ábra. Fűtőelemek és fűtőelemkötegek felépítése [1]

A fűtőelemkötegek feladata, hogy a fűtőelemeket párhuzamos pozícióban tartsa, hogy így biztosított legyen a fűtőelemek között a hűtőközeg szabad áramlása. Emellett a szabályos geometria fenntartása biztosítja a neutronok megfelelő moderálását és a láncreakció fenntartását is. A feladatot a bizonyos kiosztással elhelyezett távtartó rácsok látják el. A fűtőelemköteg részét képezi ezen kívül a fejrész és a lábrész, amelyek védik a fűtőelemek két végét a sérüléstől. Ezen kívül a fejrész teszi lehetővé a köteg biztonságos megfogását és mozgatását.



A fűtőelemkötegekben azonban nem csak a fűtőelemek helyezkednek el, a rácsban bizonyos pozíciókban vezetőcsövek vannak elhelyezve, amikbe felülről leereszthetők a szabályozó rúdkötegek. Tehát a Paksi Atomerőművel ellentétben a VVER–1200-as blokkokban nincsenek külön szabályozó kazetták, hanem a szabályozó rúdkötegek a fűtőelem pálcák közé ereszthetők le, a nekik "kihagyott" helyekre.

1.9.4 Üzemanyagciklus a Paks II atomerőműben

Az atomerőműben a kampány alatt azt az időszakot értjük, amikor két üzemanyag-átrakás között az erőmű elektromos áramot termel. Két kampány között zajlik az "átrakás", vagyis a kiégett fűtőelemek kivétele, a zónában maradók más pozícióba helyezése, az üres helyekre friss fűtőelemkötegek behelyezése, valamint ilyenkor van lehetőség arra, hogy a teljesítményüzem közben nem hozzáférhető berendezéseket karbantartsák és szükség esetén javítsák. Egy átrakás nagyságrendileg egy hónapig tart.

Ezen kívül bizonyos időközönként a blokkon "főjavítást" is végeznek. Erre főként a reaktortartály és a fővízköri berendezések állapotfelméréséhez van szükség. Ilyenkor a teljes zóna kirakodásra kerül, így a reaktortartály fala belülről is hozzáférhetővé válik roncsolásmentes anyagvizsgálatok számára.

A Paks II Atomerőmű VVER–1200-as blokkjai a tervek szerint 12 hónapos kampánnyal fognak indulni az első két évben, majd a blokkok áttérnek a 18 hónapos, azaz másfél éves kampányokra. Akampányok hossza azért lényeges kérdés, mert gazdasági szempontból a minél hosszabb kampány az előnyösebb (kevesebb megszakítás a termelésben), de ennek fizikai és biztonsági korlátjai is vannak (fűtőelemek hasadóanyag-tartalmának kimerülése, bizonyos kopóalkatrészek cseréjének szükségessége).

1.9.5 Az üzemanyag útja az erőműben

Egy adott fűtőelemköteget a beérkezése után a felhasználásig a frissüzemanyag-tároló épületében tárolják, ahol a fel nem használt fűtőelemek védve vannak mindenféle szennyeződéstől és külső behatástól. Felhasználás előtt a kötegeket konténerek segítségével a reaktorépületbe szállítják, majd az átrakógép segítségével behelyezik az aktív zónába, az előre meghatározott pozíciókba.

A kiégett fűtőelemeket a zónából szintén az átrakógép segítségével a pihentető medencében található tárolóba teszik, ahol azokat 10 évig tárolják és hűtik. A 10 évet követően a kiégett fűtőelemekben termelődő remanens hő mennyisége már kellően alacsony ahhoz, hogy levegőn is hűthetők legyenek. Ekkor a kiégett üzemanyagot átszállítják egy átmeneti tárolóba, ahol további 50 évig gondoskodnak a megfelelő hűtésről, őrzésről és tárolásról.

1.9.6 A kiégett üzemanyag további sorsa

A kiégett fűtőelemekben alapvetően három anyagcsoport található:

- Urán 235 és 238 vegyületei
- Hasadási termékek (stabil és radioaktív)
- Aktinidák (uránnál nehezebb elemek)

Az uránizotópok közül a 235-ös aránya az üzemidő végére 1% alá csökken, a kezdeti urán-238 mennyisége viszont csak kismértékben változik. Ez azt jelenti, hogy a kiégett fűtőelem több mint 90%-a



még mindig urán-dioxid lesz. A hasadási termékek értelemszerűen a maghasadás után keletkeznek, melyek között stabil és instabil magok is találhatók. Az instabil magok radioaktívak, ezek adják a kiégett üzemanyag hőtermelésének egy részét. Az uránnál nehezebb elemek akkor keletkeznek, ha az urán-238 elnyel egy neutront, vagy az 235-ös urán a neutronbefogást követően nem hasad el (ennek is van ugyanis valamekkora valószínűsége). A legnagyobb mennyiségben Pu-239 keletkezik így, ami szintén hasadóképes, de többszörös neutronbefogással nehezebb magok is keletkeznek. Ezek az izotópok adják a kiégett üzemanyag radioaktivitásának másik jelentős részét. A kiégett üzemanyag százalékos összetételét a *32. ábra* mutatja be.

Az összetételből látható, hogy a radioaktivitás túlnyomó részéért a kiégett üzemanyag kevesebb, mint 5 százaléka felel. A hasadási termékek elbomlása néhány száz év alatt végbemegy, de az aktinidák felezési ideje jóval hosszabb, akár pár 10000 év is lehet. Ennek következménye, hogy a kiégett fűtőelemek hosszú időn át veszélyesek maradnak, és hosszútávú kezelésük/elhelyezésük a nukleáris ipar egyik legnagyobb megoldandó problémája. Magyarországon jelenleg a Paksi Atomerőmű mellett található Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolójában (KKÁT) tárolják a kiégett fűtőelemeket 50 évig. A tároló üzemeltetésének kezdetét jelenleg 2064-re tervezi az ezért felelős Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. [9].



32. ábra. A kiégett üzemanyagban található főbb anyagcsoportok aránya [7]

A kiégett üzemanyagok végleges elhelyezésére a legelterjedtebb elképzelés a többi radioaktív hulladék esetén is használt mélygeológiai tárolás, azaz egy megfelelő alapkőzetbe, mélyen a föld alá elkészített tároló. Magyarországon a kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékok lerakását gránit kőzetbe épült tárolóban végzik Bátaapáti mellett.

A végleges lerakó építése azért rendkívül bonyolult, mert százezer évre kéne garantálni az elhelyezett fűtőelemek biztonságát (vagyis, hogy nem jut ki olyan radioaktív szennyezés a tárolóból, ami az élővilágra veszélyt jelentene), ilyen időskálára pedig nagyon nehéz méréseket végezni. Akár több évtizedig tartó méréssorozatokból is nehéz pontos következtetéseket levonni a százezer éves időtávra.

Jelenleg építés alatt áll a világ első végleges lerakója Finnországban, Olkiluoto közelében [9], aminek átadását 2023-ra várják. A tárolót 500 méter mélységben alakítják ki az ottani alapkőzetben (gneiszben). Az kiégett üzemanyagot réz kapszulákba zárják, amelyeket hegesztéssel légmentesen lezárnak.

A lezárt kapszulákat függőleges üregekbe rakják le, majd körbeveszik bentonit téglákkal, amelyek feladata a víz távoltartása és a réz korróziójának megakadályozása.



Azért kell ilyen mélységben kialakítani a tárolót, mert az alapkőzetben sok repedés található, amin keresztül a tengervíz képes mozogni. A természetben lejátszódó eróziós és korróziós folyamatokat nem lehet megállítani, csak lelassítani, gátakat emelni az útjukba. A kiégett üzemanyag tároló gátjai is idővel megsemmisülnek: első lépésben a repedésekből érkező víz elmossa a bentonitot, majd korrodálja a réz kapszula falát. Ezek végbemeneteléhez a jelenlegi számítások és mérések szerint több tízezer évre van szükség. Ezek után a radioaktív anyag kijuthat a kapszulákból. 500 m mélységből egy oldott radioaktív izotópnak a felszínre diffundálnia még ebben a repedezett kőzetben is sokezer évig eltart. Mire a kiégett üzemanyag anyagai a felszín közelébe juthatnának, addigra bennük a radioaktív izotópok mennyisége a folyamatos bomlás következtében a természetes szintre csökken, így nem jelentenek további veszélyt az élővilágra.

Magyarországon jelenleg a Pécshez közeli Boda község mellett zajlik geológiai kutatás, az ottani agyagkő-formáció alkalmasságát próbálják igazolni egy végleges tároló kialakításához. Az agyagkő egyik előnye az lehet, hogy a gneisszel vagy gránittal ellentétben nincs benne rengeteg repedés, illetve az esetlegesen keletkező repedésekbe behatoló víz hatására az agyag bedagad és a repedés "beforr". Ez a tulajdonság biztosítaná, hogy az agyagkő formáció belseje és a külvilág között az anyagok ne tudjanak "közlekedni".

Fontos megjegyezni, hogy Magyarországon a hatályos törvények szerint a radioaktív hulladékok elhelyezésének költségeit a Központi Nukleáris Alapból fizetik, amibe a nukleáris technológia felhasználói fizetnek be (a legnagyobb befizető értelemszerűen a Paksi Atomerőmű), így a hulladékok elhelyezésével járó anyagi terheket nem a jövő generációinak kell viselnie.

1.10 HIVATKOZÁSOK (1. FEJEZET)

- [1 Paks II. Zrt., "Az új atomerőművi blokkok létesítési engedélyezése Közérthető összefoglaló," 23 06 2020. [Online]. Available: https://www.paks2.hu/documents/20124/157426/K%C3%B6z%C3%A9rthet%C5%91+%C3%B6sszefo glal%C3%B3.pdf/cd2233fa-fd01-34eb-16ae-5c3a185c1d55. [Hozzáférés dátuma: 11. 06. 2021.].
- [2] Paks II. Zrt.: "Közérthetően az atomenergiáról" Paks II. Zrt., [Online]. Available: https://www.paks2.hu/k%C3%B6z% C3%A9rthet%C5%91en-az-atomenergi%C3%A1r%C3%B3l. [Hozzáférés dátuma: 10. 06. 2021.].
- [3] T. Back (2010): Radiation Protection, Dosimetry and Detectors. Stockholm.
- [4] Országos Atomenergia Hivatal: "Jegyzet alapfokozatú sugárvédelmi képzésekhez," 11. 2019. [Online]. Available: https://www.oah.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/BEA98D0C319A3C51C1257F41003303E7/\$File/SV_17_1.0.pdf. [Hozzáférés dátuma: 10. 06. 2021.].
- [5] Rosatom Overseas JSC: "The VVER Today," [Online]. Available: https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220 af25741375138ecd1afb18743.pdf. [Hozzáférés dátuma: 10. 06. 2021.].
- [6] Országos Atomenergia Hivatal: "Nukleáris Biztonsági Szabályzatok 3/a melléklet" 25. 06. 2020. [Online]. Available:https://www.haea.gov.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/6D1BF609318EDEE4C1257BE800681A3B/\$File/ NBSZ_3A_k%C3%B6tet_2020.pdf. [Hozzáférés dátuma: 10. 06. 2021.].
- [7] K. Z. H. Z. Zagyvai Péter (2013): A radioaktív üzemanyagciklus radioaktív hulladékai. Budapest: Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont.
- [8] World Nuclear Association. "Uranium Mining Overview" 12. 2020. [Online]. Available: https://world-nuclear.org/ information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/uranium-mining-overview.aspx. [Accessed 10. 06. 2021.].
 [9] PHK Kft [Online]. Available: https://thk.hu/nuurat.mecseki.kutatas. [Hozzátárás dátuma: 10. 06. 2021.].
- [9] RHK Kft. [Online]. Available: https://rhk.hu/nyugat-mecseki-kutatas. [Hozzáférés dátuma: 10. 06. 2021.].
- [10] World Nuclear News: "Construction of test disposal tunnel under way at Onkalo," 01. 03. 2021. [Online]. Available: https://world-nuclear-news.org/Articles/Construction-of-test-disposal-tunnel-under-way-at. [Hozzáférés dátuma: 10. 06. 2021.].



AZ ATOMERŐMŰ JELLEMZŐ SZERKEZETI ANYAGAI

2.

2.1 REAKTOROK JELLEMZŐ TERHELÉSI ÉS KÖRNYEZETI VISZONYAI, AZ IGÉNYBEVÉTEL

A terhelés és a környezeti viszonyok, az igénybevétel, a károsodás és a tönkremenetel logikusan egymásra épülő jelenségek, illetve folyamatok. Ezek jelentése, illetve kapcsolata a következő.

A szerkezeti anyagoban az üzemelési időszakban bekövetkező változásokat az üzemi körülmények, azaz a **terhelés** és a **környezeti viszonyok** váltják ki. Az üzemelő atomerőmű berendezéseinek terhelési és környezeti viszonyait általában a következők jellemzik:

- A nukleáris folyamat (maghasadás) hőfejlődéssel és különböző sugárzásokkal (elsősorban nagy energiájú neutron- és gamma-sugárzással) jár. Az üzemidő végén várható gyorsneutron-fluencia értéke 1022 és 2·1024 n/m² (E > 0,5 vagy 1 MeV).
- A berendezésekben (tartályok, hőcserélők, szivattyúk, armatúrák) és csővezetékekben nagy nyomású és nagy hőmérsékletű közegek vannak, illetve áramlanak (sebességük és áramlási képük változó). Az üzemi nyomás értéke 120 és 150 bar között van, a nyomástartó berendezések falhőmérséklete 300 °C körüli érték.
- A berendezések és csővezetékek fala érintkezik az üzemi közegekkel.
- Az atomerőmű üzeme és következésképpen a terhelés jellemzően állandósult (stacioner). Ez alól kivételt képeznek a leállások (és amennyiben az atomerőmű terheléskövető üzemmódban dolgozik, akkor a terhelés lehet ciklikus).
- A berendezések ki lehetnek téve mechanikai rezgéseknek vagy hőmérséklet fluktuációnak.
- Fémek érintkeznek egymással, különös tekintettel a karbantartási időszakra (a berendezések szétés összeszerelése során).

Az előzőekben ismertetett terhelések és környezeti viszonyok igénybe veszik a berendezéseket, azaz hatásukra azokban igénybevétel ébred. Az igénybevétel formája a szerkezeti anyag alakváltozása (rugalmas és/vagy képlékeny) – ami mérhető és a feszültség – ami számolható (alapesetben a terhelő erő és a keresztmetszet hányadosa).

2.2 A SZERKEZETI ANYAG VÁLASZA – KÁROSODÁS ÉS TÖNKREMENETEL

Az igénybevételre a szerkezeti anyag válaszol. A szerkezeti anyag válasza a károsodási folyamat (károsodási hatás), majd a károsodási folyamat végeredménye (szélsőséges esetben) a berendezés tönkremenetele.

Lássuk ezeket az előzőekben felsorolt terhelésekhez és környezeti hatásokhoz rendezve.

A meleg és a sugárzás termikus öregedést és sugárkárosodást okoz, ami az anyag szívósságának csökkenéséhez vezet. A lecsökkent szívósság (sugárkárosodás esetében a megnövekedett szívós-rideg átmeneti hőmérséklettel együtt) az anyagban található repedés vagy repedés jellegű folytonossági hiány (pl. összeolvadási hiány) instabil terjedéséhez, végső esetben a berendezés töréséhez vezethet.



- A nyomás következtében alakváltozások és feszültségek alakulnak ki a berendezések falában, amelyek nagy hőmérsékleten az anyag kúszását okozhatják. A kúszás eredménye üregek és azt követően – az üregek összeszakadása eredményeként – repedések kialakulása és terjedése, majd törés.
- A közeg és az anyag érintkezése eróziót, áramlás segítette korróziót, vagy a (többnyire lokális) korrózió egyéb fajtáját váltja ki. Ezek következménye anyagfogyás, korróziós repedések kialakulása, falvastagság-csökkenés, ami töréshez vagy a nyomástartó fal felszakadásához vezethet.
- A váltakozó hő- és/vagy mechanikai terhelés az anyag fáradását, végső esetben kifáradását okozza. A fáradás következtében az anyagban repedés keletkezik, majd a repedés terjed, aminek eredménye a teherhordó keresztmetszet csökkenése, és végül – amikor a maradék keresztmetszet teherhordó képessége elfogy – a berendezés teljes keresztmetszetű törése.
- A fémek egymáson való elmozdulása kopást idéz elő. Ez anyagfogyással és falvastagság csökkenéssel jár, ami a berendezés falának a felszakadásához, illetve töréséhez vezethet.

Összefoglalva elmondható, hogy a reaktorszerkezeti anyagok élettartam-kimerülésében több tényező játszik szerepet. Az anyagok összetétele és szerkezete határozza meg a kiinduló mechanikai tulajdonságokat (szilárdság, törési szívósság stb.). Az igénybevétel mértéke (pl. feszültség, ciklusszám) és módja (pl. statikus, dinamikus, ismétlődő), továbbá a környezeti hatások (pl. hőmérséklet, radioaktív sugárzás, korrozív közeg) vezetnek a károsodási folyamatokhoz, azaz a kiinduló tulajdonságok fokozatos romlásához. Az élettartam-kimerülés egy határállapot elérésekor a berendezés tönkremeneteléhez vezet. Nem elhanyagolható mértékben járulnak hozzá a folyamathoz az anyagban található repedések vagy más, repedésjellegű folytonossági hiányok. Az említett tényezők az atomerőmű berendezései esetében egymástól eltérő mértékben játszanak szerepet, és többnyire egy adott károsodási folyamat vezet az élettartam kimerüléséhez. Némely esetben előfordul, hogy egyidejűleg több károsodási folyamat is "aktív"; ilyenkor a szinergia hatása érvényesül (pl. környezeti hatás által támogatott fáradás, sugárzás által támogatott korrózió).

A károsodási folyamatokat együttesen öregedési folyamatoknak (hatásoknak) nevezik. A 33. ábra az atomerőművekben előforduló leggyakoribb károsodási folyamatokat és a köztük lévő szinergiákat mutatja be.



33. ábra. Leggyakoribb atomerőművi öregedési folyamatok és szinergiák



2.3 ÖREGEDÉSI HATÁSOK

A következőkben röviden ismertetjük azokat az öregedési hatásokat, amelyekkel az eddigi atomerőművi üzemeltetési tapasztalatok alapján leginkább számolni kell. Részletesebb leírás található az irodalomban. [11] Természetesen nem zárható ki, hogy a jövőben az itt tárgyaltaktól eltérő öregedési hatások is előtérbe fognak kerülni. Ennek oka lehet akár egy technológiai átalakítás vagy egy még ismeretlen károsodási forma megjelenése vagy éppen egy ismert károsodási folyamat nem várt felgyorsulása.

2.3.1 Termikus öregedés

A termikus öregedés ~250 °C feletti hőmérsékleten tartósan üzemelő technológiai rendszerek berendezéseinek szerkezeti anyagaiban megfigyelhető öregedési folyamat. Az acél mátrixában oldott szennyező elemek kiválása (precipitációja), vagy a szemcsehatárokon történő összecsomósodása (szegregációja) az acél szilárdsági tulajdonságainak a növekedéséhez vezet (ami alapvetően nem jelent gondot). A probléma ott jelentkezik, hogy ezzel egyidejűleg a szívóssági tulajdonságok általában romlanak. Ennek következtében a szerkezeti anyag (acél) rideggé válik és lecsökken a repedésterjedéssel szembeni ellenállása.

A hőmérséklet pontos értéke, amely felett az anyag termikus öregedésre hajlamos, elsősorban az anyag kémiai összetételétől, valamint a gyártás- és a hőkezelés technológiától függ. Korrózióálló acélöntvények és hegesztési varratok esetében a szövetszerkezetben előforduló δ-ferrit-fázis felbomlása eredményeként ez az öregedési mechanizmus számottevővé válhat. A δ-ferrit-tartalom küszöbértéke ausztenites szerkezetű öntvények estében 12%, hegesztési varratok esetében 6–8%.

Gyengén ötvözött és ötvözetlen acélok esetében a folyamat a termikusan aktivált folyamatok törvényszerűségei szerint zajlik. A termikus öregedési folyamat – legrosszabb következményként – instabil repedésterjedés miatt bekövetkező töréssel, és ennek eredményeként a berendezés nyomástartó, illetve a tartószerkezeti funkciójának az elvesztésével fenyeget.

2.3.2 Sugárkárosodás

A sugárkárosodás a reaktorberendezés szerkezeti anyagainak speciális károsodási formája. Lényege, hogy a nagy energiájú neutronok (az energiaspektrum szerinti gyorsneutronok) ütköznek a szerkezeti anyag kristályrácsának atomjaival, és amennyiben az ütközés energiája elegendően nagy, akkor a neutronok kimozdítják az atomokat a rácsban elfoglalt helyükről. A kimozdított atomok, elmozdulásukat követően további atomokkal ütközhetnek, és a sorozatos ütközések eredménye egy ún. elmozdulás kaszkád lesz. Kaszkád alatt a kristályrács egy adott környezetében a keletkezett üres helyek és az ezek körül, a rácsba beékelődött, intersztíciós pozícióban elhelyezkedő atomok alkotta térbeli klasztert értjük.

Az ütközéssorozat közvetlen következményeként növekszik a rácshibák (diszlokációk) mennyisége, majd a folyamatot a diszlokáció-szerkezet további módosulásai követik. A teljes folyamatot befolyásolja a neutron-sugárzás következtében megnövekedett diffúziós aktivitás, elősegítve a besugárzás előtt már meglévő rácshibák és az intersztíciósan vagy fématomot helyettesítő módon (szubsztitúciósan) oldott ötvöző- és szennyező elemekkel való különböző kölcsönhatásokat. Ezek a diszlokációs folyamatok képezik a fémmátrix közvetlen károsoda az alapját.



A másodlagos folyamatok egyrészt tovább növelik a fémmátrix felkeményedését, másrészt a szemcsehatárok mentén és a szemcséken belül a szilárdság lokális csökkenéséhez, továbbá szemcsehatár menti elridegedéshez vezetnek. A folyamatot a *34. ábra* mutatja.

Az előzőekben vázolt fémtani folyamatok jelentős változásokat idéznek elő a szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságaiban, amelyek veszélyeztetik a berendezések szerkezeti integritását. A károsodás, amelyet sugárzás okozta elridegedésnek neveznek, elsősorban a térben középpontos köbös (tkk) rácsú fémekre jellemző. Ilyenek a ferrites szerkezetű acélok, amelyek a reaktortartály nyomástartó falának szerkezeti anyagául szolgálnak. Tehát első helyen a reaktortartály esetében kell a sugárzás okozta elridegedéssel számolni.

A mechanikai tulajdonságok változásai közül a legalapvetőbb az egyezményes folyáshatár és a szakítószilárdság, valamint a szívós-rideg átmeneti hőmérséklet növekedése és a szívósság csökkenése. A szívóssággal rokonságot mutató Charpy ütőmunka megváltozására mutat példát a *35. ábra*, amelyen a paksi atomerőmű 1. blokk reaktortartály felügyeleti próbatesteinek eredményei láthatók.



34. ábra. A sugárkárosodás folyamata





35. ábra. Ütőmunka-hőmérséklet görbék (paksi atomerőmű 1. blokk varratfém)

A neutron és fématom ütközések első lépésben, ahogy ismertettük, intersztíciós helyzetű atomokat és üres helyeket hoznak létre. Az intersztíciós atomok általában egy- vagy kétdimenziósak, az üres helyek viszont háromdimenziós alakzatokat is képezhetnek. Ebből a dimenzióbéli kettősségből adódik az üres helyek halmozódása, ami a besugárzott anyag sűrűségének a csökkenéséhez és térfogatának ezzel együtt járó növekedéséhez vezet. Ezt a folyamatot nevezik radiációs duzzadásnak. A tkk rácsszerkezetű fémekben a duzzadás folyamata telítődést mutat, aminek oka az anyag önszerveződésre való képessége. Ezzel szemben a felületen középpontos köbös (fkk) rácsszerkezetű fémekben a reaktor üzemi körülményei között nem működik az önszerveződés és a telítődés, ezért a duzzadás az ausztenites szerkezetű korrózióálló acélokra jellemző. Az atomerőművek üzemidő-hosszabbítása, azaz a jelentősen megnövekedett besugárzási dózis következtében a nyomottvizes reaktorok belső szerkezeti elemei (pl. zónatartó kosár, sokszög-palást, rögzítő csavarok) esetében nem zárható ki ez a károsodási folyamat. A károsodás bizonyos alkatrészek (pl. csavarok) törését, vagy mozgó alkatrészeknek a térfogatváltozás okozta beszorulását idézheti elő.

A 36. ábra egy repedt sokszögpalást-rögzítő csavart mutat. A feszültségkorróziós (SCC) repedés keletkezésében jelentős szerepet játszott a radiációs duzzadás következtében a csavarszár és fej talál-kozásánál kialakult járulékos feszültség.

36. ábra. Sokszögpalást-rögzítő csavar repedése.





2.3.3 Kúszás

A kúszás – más néven tartós folyás – állandó húzófeszültségnek, nagy hőmérsékleten kitett berendezésrészek képlékeny alakváltozása, ami végül töréshez vezet. A könnyűvizes atomerőművek üzemi hőmérséklete általában alatta marad a kúszás hőmérséklet tartománya alsó határának, amely ferrites szerkezetű acélok esetében ~370 °C, ausztenites szerkezetű acéloknál ~430 °C. Ezért kúszással, illetve kúszás okozta meghibásodással a folyékony fémhűtésű és a nagy hőmérsékletű gázhűtésű reaktorok esetében kell számolni. Hőerőművek berendezései és csővezetékei viszont jelentős mértékben ki vannak téve kúszó igénybevételnek. A kúszás kísérő jelensége a feszültség-relaxáció, ami a növekvő alakváltozás következménye. A feszültség-relaxáció egyéb, járulékos öregedési jelenségekhez (pl. csavarkötések lazulásához) vezethet.

2.3.4 Korrózió

A korróziót a szerkezeti anyag és a környezete között fellépő kémiai vagy elektrokémiai reakció idézi elő. A korrózió az atomerőművekben, de más létesítményben is az előforduló leggyakoribb károsodási jelenség. Típusa és mértéke az adott berendezés szerkezeti anyaga, konstrukciós kialakítása és a korrozív közeg függvényében igen változatos.

Az **általános korrózió** a fémek megközelítőleg egyenletes elvékonyodása (anyagvesztés a felületükön) kémiai reakció eredményeként, agresszív környezetben. Az általános korrózióra való hajlam az ötvözetlen és a gyengén ötvözött acélból készült berendezések és csővezetékek közös jellemzője.

Az általános korrózió sebessége és egyéb jellemzői jelentős mértékben függenek az anyag kémiai összetételétől, az üzemi közeg jellemzőitől, az üzemeltetési körülményektől és a környezet egyéb jellemzőitől (hőmérséklet, nedvességtartalom, savas- és lúgos gőzök jelenléte, stb.).

A lokális korrózió olyan károsodási folyamat, amely valamely berendezés korlátozott tartományára terjed ki. Megjelenési formái igen változatosak. Elektrokémiai korrózió akkor keletkezik, amikor két különnemű fém vagy fémrész érintkezik, és felületüket elektrolitként ható folyadék fedi. Ilyenkor a nagyobb potenciálú ún. anódos anyagrészből az érintkezésen keresztül elektronok áramolnak a kisebb potenciálú ún. katódos anyagrész felé. Feszültségkorróziós repedezés arra érzékeny anyagban, agresszív közeg és húzófeszültség jelenlétében keletkezhet. A felsorolt három tényező mellett további tényezők egész sora befolyásolja kialakulását és lefolyását. A befolyásoló tényezők függvényében a keletkezett repedés (vagy repedésháló) úgy szemcsehatár menti, mint szemcsén áthaladó lehet. Öntött ausztenites acélban bekövetkezett feszültségkorróziós károsodást mutat a *37. ábra*.



37. ábra. Öntött ausztenites korrózióálló acél feszültségkorróziós károsodása



A **pontkorrózió** a károsodásnak azokra a szűk helyekre lokalizált formája, ahol a korrózió sebessége jelentősen nagyobb, mint az adott helytől távolabb. Következtében viszonylag mély üregek keletkeznek, amelyeket többnyire kémiailag aktív (korrozív) szennyeződés tölt ki, elősegítve azok további növekedését. Passzív fémek esetében (pl. ausztenites korrózióálló acélok) az üregek mélyebbek, *38. ábra.*



38. ábra. Ausztenites hőcserélő cső pontkorróziója

A pontkorrózióhoz némileg hasonló jelenség a **réskorrózió**. Ez szintén lokálisan felgyorsult károsodás konstrukciós résekben, illeszkedő alkatrészek között, repedésekben és lerakódások alatt. A résnek elegendően szélesnek kell lennie ahhoz, hogy lehetővé tegye a közeg bejutását, de ezzel együtt elegendően szűknek is, hogy a közeg ne áramoljon tovább, hanem a stagnáló állapot eredményeként feldúsuljon.

Mikrobiológiai hatás jelenléte meggyorsítja általában a korrózió, de különösen a stagnáló vagy lassú közegáramlással jellemezhető pont- és réskorrózió folyamatát. Ilyen esetben mikrobiológiai korrózióról beszélünk. A leggyakoribb baktériumok csökkentik a szulfátok mennyiségét, illetve elősegítik a kén és a vas oxidációs folyamatait.

Mikrobiológiai korrózió előfordulásának a legnagyobb valószínűsége a kezeletlen vízzel üzemelő, illetve a földalatti csővezetékek és hőcserélők esetében van. Egy ilyen eredetű cella kialakulását mutatja sematikusan a 39. ábra. A bemaródás felett, amelyből kioldódik a vas, kialakul a gümő (tuberkulum), amelyet a korróziótermékek, a baktériumok alkotta biofilm és az anyagcseretermékeik együtt alkotnak.



39. ábra. Bemaródás és gümő ausztenites acélon



A kristályközi korrózió a szemcsehatárok károsodása, ami a szemcsék közötti kohézió elvesztéséhez és lényegében az anyag károsodott részeinek a "széteséséhez" vezet. A szemcsehatárok kitüntetett érzékenységének több oka lehet. Képlékenyen alakított anyag esetében a szemcsehatárok alakításához szükséges nagyobb alakváltozási munka adja a határok nagyobb kémiai aktivitását, és vezet az elektrokémiai korrózió jelenségéhez. 18% Cr és 8% Ni ötvözésű, ausztenites korrózióálló acélok esetében a hevítés (pl. hegesztéssel történő javítás) is érzékennyé tudja tenni a szemcsehatárokat azáltal, hogy a fémmátrixban oldott króm az anyagban lévő karbonnal krómkarbidokat alkot, amelyek a szemcsehatárokon összefüggő hálót képeznek. Ez a szemcsehatár környezetének krómban történő elszegényedésével, és következésképpen ebben a régióban a korrózióállóság elvesztésével jár együtt, 40. ábra.

A jelenség elkerülésének egyik kézenfekvő módja a krómnál kémiailag aktívabb karbidképző elem (pl. Ti vagy Nb) adagolása az acélhoz, ami megakadályozza a króm kidiffundálását a szemcsehatár környezetéből. Ezt a kezelést az acél stabilizálásának nevezik.



40. ábra. Szemcsehatár krómban elszegényedése

Ha az áramló korrozív környezetben helyileg felgyorsul az anyag feloldásának a sebessége, akkor eróziós korrózióról beszélünk. Ennek lényege, hogy az anyag felületén lévő védőoxid-réteget egy szűk környezetben az üzemi közeg folyamatosan vagy periodikusan, lokálisan eltávolítja. Eróziós korrózió jellemzően áramló vizet vagy nedves gőzt tartalmazó ötvözetlen acél csővezetéki rendszerekben következik be (nyomottvizes atomerőművek szekunder köre). A folyamatot számos tényező komplex hatása befolyásolja, mint pl. a szerkezeti anyag, a geometriai és hidrodinamikai feltételek, a közeg hőmérséklete, pH-ja és oldott oxigéntartalma.

A berendezés meghibásodásából vagy egyéb, nem tervezett üzemi eseményből következő egyedi károsodás a **bórsavkorrózió**. A bórsav a nyomottvizes reaktorok üzemi közegének az anyaga; koncentrációja max. 40 g/kg. A berendezések üzemi közeggel érintkező felületeit ezért a bórsavkorróziónak ellenálló anyagból (korrózióálló acélból, nikkelötvözetből) készítik. Ezzel szemben az üzemi közeggel nem érintkező alkatrészek (pl. tömítőegység elemei, tartószerkezetek, korrózióálló plattírozással ellátott tartályok külső felületei) a bórsavkorróziónak kevésbé ellenálló ötvözetlen vagy alacsonyan ötvözött acélból készülnek. Ezért az üzemi közeg szivárgása vagy bármilyen egyéb okból való kikerülése esetén bórsavkorróziós károsodást szenvedhetnek.



A bórsavkorrózió akkor okoz jelentős károsodást, ha szivárgás miatt bórsavoldat kerül ki a forró fémfelületre, ahol betöményedik és forrásnak indul. A folyamat akkor válik veszélyessé, ha a szivárgás folyamatosan pótolja a betöményedő bórsavoldatból elpárolgó vizet. Ha ugyanis a bórsavoldat beszárad a felületen, azaz minden víz elpárolog belőle, akkor a korróziós folyamat gyakorlatilag leáll. A *41. ábra* egy amerikai atomerőmű reaktortartálya fedelének egy kivágott darabját mutatja azzal az üreggel, amelyet egy szabályozórúd-átvezetés több éven keresztül tartó szivárgása és a szivárgás által előidézett bórsavkorrózió okozott.



41. ábra. A Davis Besse (USA) reaktortartály fedeléből kivágott minta, a bórsavkorrózió által kioldott üreggel

2.3.5 Erózió

Az erózió elsődlegesen az üzemi közeg nagy sebességű áramlási helyeit határoló (pl. szűkítők), illetve hirtelen irányváltozást okozó rendszerelemeken (pl. csőívek, elágazások) fellépő, anyagelhordással járó károsodási folyamat. Az erózió hatását növelik az üzemi közegben lévő szilárd szennyeződések, illetve a többfázisú közeg jelenléte. Ha egyidejűleg korrózió is fellép, akkor eróziós korrózióról beszélünk, erre vonatkozóan lásd az előző pontban írottakat.

2.3.6 Fáradás

A fáradás ciklikusan ismétlődő mechanikai és/vagy hőterhelés hatására kialakuló lokális károsodási folyamat, amelynek során az anyagban repedés keletkezik. A repedés minden egyes terhelési ciklus hatására mindaddig növekszik (stabil repedésterjedés), ameddig a maradó keresztmetszet már nem képes egyetlen további ciklus terhelésének az elviselésére sem. Ekkor – instabil repedésterjedést követően – bekövetkezik a törés. Az egyes terhelési ciklusokban az anyagban ébredő feszültségek jellemzően nem haladják meg az anyag folyáshatárát.

A fáradásos repedés kialakulásának mechanizmusát mutatja a 42. ábra. A terhelési ciklusok kezdeti szakaszában egy jellegzetes felületi topográfia alakul ki: a felületközeli, alacsonyabb energiaszintű anyagrészekben kitüremlések és behúzódások keletkeznek. Ezt követően, az ábrán I. jelű szakaszban



Atomerőműi Képzési Bázis

a nyíró feszültség hatására több egyedi repedés csíra keletkezik, amelyek hossza összemérhető a szemcsemérettel. A II. szakaszban már a húzó-nyomó feszültség az uralkodó, és a repedések közül a legkedvezőtlenebb terhelési körülmények közötti indul terjedésnek.





A fáradással szembeni érzékenység jellemzésére általában a feszültségamplitúdó és a törést okozó ciklusszám összefüggését használják (hagyományos Wöhler-görbe). Ezt kísérleti úton állapítják meg, nagyszámú próbatest, állandó feszültség- vagy nyúlás amplitúdójú ismétlődő terhelésével. A töréshez vezető ciklusszám nagyságrendjétől függően megkülönböztetnek kisciklusú és nagyciklusú fáradást. Ezek eltérnek egymástól a repedés keletkezése és korai terjedése mechanizmusában, továbbá a stabil terjedés törvényszerűségeit tekintve. Nincs a kettő között jól meghatározható határvonal, de elméleti és gyakorlati szempontok alapján kijelenthető, hogy akkor beszélünk kisciklusú fáradásról, amikor a ciklusonkénti képlékeny alakváltozási amplitúdónak a teljes alakváltozási amplitúdóhoz viszonyított hányada meghaladja a 10%-ot. A gyakorlat számára elfogadható, ha azt mondjuk – ami nem mond ellent az előzőekben írottaknak – hogy a kisciklusú fáradás tartománya ~5·104 ciklusszámig tart. A kisciklusú fáradást atomerőművekben általában a felmelegítések, a lehűtések és a terhelésváltozások hőmérsék-let ciklusai kiváltotta gátolt hőtágulások váltakozása okozza.

Nagyciklusú fáradást jellemzően forgógépek (pl. szivattyúk, motorok) vagy közegáramlás előidézte rezgések váltanak ki.

A fáradás speciális esete a közeg hőmérsékletrétegződése kiváltotta hőfáradás. Ez elsősorban nagyátmérőjű, eltérő üzemi paraméterekkel rendelkező berendezésekhez csatlakozó, kis áramlási sebességű vagy stagnáló üzemi közeget tartalmazó, vízszintes csővezetékekben fordul elő. A csővezetékben pangó vagy lassan áramló közeg rétegződik: a meleg üzemi közeg a csővezeték felső keresztmetszetében gyűlik össze, a hidegebb az alsóban. Kisebb vagy időszaki mozgások (áramlás, szivárgás stb.) hatására a meleg- és a hideg közeg határfelülete elmozdul, ami a csővezeték kerületének adott szakasza mentén a hőfeszültségek ingadozásával jár, megteremtve ezzel a feltételeket a fáradásos repedés(ek) kialakulására, 43 ábra.





43. ábra Feszültség-eloszlás a rétegződött áramlás következtében

2.3.7 Kopás

A kopás egy berendezés felületének a károsodása azáltal, hogy arról a vele érintkező és hozzá képest elmozduló másik alkatrész, folyékony, illetve gáznemű közeg (vagy ezek kombinációja) mechanikai úton anyagot távolít el. Általában minden gépészeti alkatrész, amelyik siklik (súrlódik) vagy gördül egy másikon, valamilyen mértékben ki van téve kopásnak. A kopás a hosszú ideig elhúzódó, lágy "fényesítéstől" a gyors és a felület durva érdességét előidéző anyagleválasztásig a legkülönbözőbb károsodási módokat foglalja magába (pl. hideghegedéses, meleghegedéses, oxidációs, fáradásos, illesztési és karbantartási kopás).



2.4 KITEKINTÉS A JÖVŐBE

Az eddig eltelt kb. húszezer reaktorév tapasztalatainak birtokában akár ki is jelenthetnénk, hogy eleget tudunk a reaktorszerkezeti anyagok viselkedéséről üzemi és esetleges üzemzavari körülmények között. A kijelentés megkérdőjelezhető, mert az utóbbi évtizedben egyre több reaktorblokk kezdi meg üzemelését az eredetileg engedélyezett üzemidőn túl. Ennek nyilvánvaló következménye, hogy a berendezéseket érő öregedési hatások növekednek, de nem zárhatjuk ki azt sem, hogy egyes öregedési folyamatok felgyorsulnak, sőt, eddig figyelembe nem vett anyagkárosodások is megjelenhetnek.

2.5 A SZERKEZETI ANYAGOKKAL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK

2.5.1 Bevezetés

A 2.1 alfejezetben ismertettük a gépésztechnológiai berendezések jellemző üzemi terhelési viszonyait és környezeti körülményeit. Alapvető, hogy a szerkezeti anyagoknak meg kell felelniük ezeknek a körülményeknek, más kifejezéssel élve rendelkezniük kell a terhelésnek/környezetnek, illetve az igénybevételnek megfelelő teljesítőképességgel. A teljesítőképességhez a gyártástól, feldolgozástól lehet eljutni, aminek a modelljét szemlélteti a *44. ábra* [12]. A modell értelmezéséhez annak eredeti angol nyelvű változatát használjuk.

44. ábra. Az ipar és a felhasználó kapcsolatrendszerét bemutató, úgynevezett láncmodell.



A modell értelmezése első rátekintésre kézenfekvőnek tűnik. Az ábra három "láncszemből" áll, és ezekben négy fogalom szerepel: nevezetesen a *performance*, a *properties*, a *structure* és a *processing*. Ezek közül a fogalmak közül egyértelmű magyar megfelelője csak a *properties*-nek, a tulajdonságoknak van. A *performance* magyar jelentésére vonatkozóan az ipar és a felhasználó kapcsolatrendszerének leírásához a lehetséges változatok közül a teljesítőképesség felel meg leginkább. A *properties*, tulajdon-ságok az egyedüli a láncmodellben szereplő négy fogalom közül, amelyik többes számban van. Ennek nyilván az az oka, hogy anyagainkat, alkatrészeinket és szerkezeteinket nem egyetlen tulajdonság, hanem azok összessége jellemzi. Talán az egyszerű többes számnál még kifejezőbb a tulajdonság-együttes fogalmának alkalmazása.

A structure fogalma nyilván az anyag szerkezetére vonatkozik. Nem elegendő azonban a vizsgált összefüggés-rendszerben csak a leggyakrabban használt szövetszerkezet fogalmára gondolni, hiszen anyagaink szerkezetének leírása magában foglalhatja az atomi szinttől egészen a makroszintig terjedő megközelítéseket. A processing fogalom alatt a következők érthetők: feldolgozás, termelés és megmunkálás. Magyarul a legmegfelelőbb kifejezés talán a feldolgozás.



A baloldali láncszemet a *processing*, vagyis a feldolgozás fogalma, míg a jobboldalit a teljesítőképesség, *performance* fogalom jellemzi. A középső láncszemnek a feldolgozás láncszemével való közös területében jelenik meg a szerkezet, a *structure* fogalom, míg a középső láncszem és a teljesítőképesség kapcsolatát jelző közös területhez a tulajdonságok, a *properties* fogalom kötődik. Ennek megfelelően tehát a középső láncszemben két fogalom együttesen szerepel, nevezetesen a szerkezet és a tulajdonságok fogalma. A láncmodell megalkotói nyilvánvalóan ezzel a megközelítéssel kívánták szemléletesen érzékeltetni és hangsúlyozni azt a tényt, hogy anyagaink tulajdonságait a szerkezet, pontosabban a szövetszerkezet határozza meg. A három láncszem átfedése nemcsak az egymás mellett lévő láncszemek kapcsolatát jeleníti meg, hanem a *processing* és a *performance* közötti, a dolgok természetéből adódó kapcsolat is kifejezésre jut benn.

Az általános gondolatmenet előre bocsátása után nézzük a szerkezeti anyagokkal szemben támasztott követelményeket. Az atomerőműben alkalmazott szerkezeti anyagokkal szemben támasztott követelményeket két nagy csoportra lehet osztani: a *gyárthatósági* követelményekre és az *üzemeltetési* követelményekre. Az utóbbiba beleértjük a berendezések karbantartása és ellenőrzése támasztotta követelményeket is.

2.5.2 Gyárthatósági követelmények

A gyárthatósági követelmények többségének azt kell figyelembe vennie, hogy az atomerőművi berendezések (különösen a főberendezések, pl. reaktortartály, térfogatkiegyenlítő tartály, gőzfejlesztő köpeny) gyártásához az átlagosnál nagyobb méretű kiinduló- vagy félgyártmányokat (hengerelt lemezeket, kovácsolt öveket) kell tudni gyártani. A gyárthatósági (technologizálhatósági) követelmények között fontos helyet foglal el a jó feldolgozhatóság. Ezt a következők biztosítják: önthetőség (metallurgiai szempont), hegeszthetőség, képlékeny alakíthatóság és forgácsolhatóság, azaz a felsorolt technológiai lépéseket különleges intézkedések nélkül végre kell tudni hajtani. Igen fontos, hogy az anyag repedésképződésre való hajlama alacsony legyen. Ennek a hegesztési és a hőkezelési műveletek során van jelentősége. A mechanikai tulajdonságok berendezésfal keresztmetszete menti homogén eloszlásának a biztosítása szempontjából ebbe a tulajdonság csoportba tartozik az átnemesíthetőség kérdése.

2.5.3 Üzemeltetési követelmények

A követelmények között első helyre a szerkezeti anyag üzemi hőmérsékleten érvényes szilárdságát és szívósságát lehet helyezni. Fontos e két anyagtulajdonság megkülönböztetése. A szilárdsági tulajdonságokat a hagyományos szakító vizsgálattal határozzák meg (folyáshatár, szakítószilárdság, nyúlás, kontrakció) és a tervező ezeket alkalmazza a berendezések méretezésekor. Ezzel szemben a szívósság, ami az anyag repedésterjedéssel szembeni ellenállását jelenti, a berendezések szilárdsági (elsősorban a ridegtöréssel szembeni) ellenőrzése során játszik szerepet. Mivel a berendezések szerkezeti anyaga ki lehet téve úgy nagyciklusú (pl. rezgés), mint kisciklusú (pl. felmelegítés-lehűtés) fárasztó igénybevételnek, ezért fontos tulajdonság a kifáradással szembeni ellenállóképesség. Igen fontos az anyagok korrózióval szembeni ellenállóképessége. A primerkör esetében ezt a korrózióálló szerkezeti anyagok alkalmazása, vagy a nyomás tartását biztosító anyagok korrózióvédő bevonattal (plattírozás) történő ellátása biztosítja.

Az előzőekben felsorolt általános követelmények mellett vannak atomerőmű-specifikus, sőt csak bizonyos berendezésre érvényes követelmények. A reaktortartály anyaga ki van téve a gyorsneutronok bombázó hatásának, ami sugárkárosodáshoz vezet. Ezért alapvető az olyan kémiai összetételű



anyagok alkalmazása, különös tekintettel az elridegedést elősegítő szennyező anyagok tartalmának a korlátozására, amelyek nem járulnak hozzá a sugárkárosodás folyamatához. Ilyenek pl. a foszfor és a réz. Egy másik speciális követelmény a kis neutronbefogási hatáskeresztmetszet, ami azt jelenti, hogy a szerkezeti anyag a lehető legkisebb mértékben rontsa le a reaktor neutronháztartását. Természetesen a szabályozó és biztonságvédelmi rudak anyagától ennek az ellenkezőjét várják el, azaz elegendően nagy neutronbefogási hatáskeresztmetszetük legyen. Szintén fontos speciális követelmény a hosszú felezési idejű izotópokat képező elemek alacsony hányada az anyagban, ami sugárvédelmi szempontból kedvező, úgy az üzemeltetés időszakában, mint az erőmű végleges leállítását követő leszereléskor.

Az utóbbi követelmény már átvezet a *karbantarthatóság/ellenőrizhetőség* követelményei területére. Egy atomerőmű üzemeltetési időszakában számolni kell hegesztéssel történő javítással, aminek a feltételei lényegesen korlátozottabbak, mint a gyártás során, műhely körülmények között végrehajtott hegesztésé. Ezért a hegeszthetőséget, mint követelményt itt is meg kell említeni. Az üzemeltetés időszakában periodikus roncsolásmentes vizsgálatokat végeznek a berendezéseken, első sorban azok hegesztett kötésein. A vizsgálhatóság (a leghatékonyabban és ezért leggyakrabban alkalmazott ultrahangos vizsgálat esetében) szoros összefüggésben van a hegesztett kötés és környezete geometriai kialakításával és a szövetszerkezetével. A geometriai kialakítás korlátozhatja az ultrahangvizsgáló fejek mozgatását a varrattengelytől távolodva, különösen, ha nagy falvastagságokról van szó és 45°-os, illetve 60°-os szögfejekkel kell végezni a vizsgálatot. A szövetszerkezet okozta gyengítő és az ultrahang nyalábot az ideális haladási irányától eltérítő hatás első sorban az ausztenites szerkezetű varratok, valamint az átmeneti hegesztett kötések (ferrites és ausztenites alapanyagok kötése) esetében nehezíti a vizsgálatot. Ezért ezeket a szempontokat a tervezés során figyelembe kell venni.

A 45. ábra egy reaktortartály két körvarratának az elhelyezkedését mutatja. A rózsaszínű tartomány az ASME BPVC XI. kötet (MSZ 27011) szerinti vizsgálandó tartomány, a 45°-os vizsgálófej mozgatása által igényelt távolságot kékkel, a 60°-os vizsgálófej által igényeltet zölddel jelöltük. Nyilvánvaló, hogy az időszakos ellenőrzési kód szerinti vizsgálat nem végezhető el teljes terjedelemben.



45. ábra. Reaktortartály körvarratok ultrahangos vizsgálhatósága [13]



2.6 ATOMERŐMŰVEKBEN ALKALMAZOTT SZERKEZETI ANYAGOK

A berendezések szerkezeti anyagát a tervezési alapban meghatározott üzemi terhek és körülmények, és célszerűen a várható öregedési hatások alapján választja meg a tervező. A konstrukciós kódok és szabványok az anyagok megfelelő választékát kínálják, megadva az anyagok legfontosabb mechanikai, fizikai és egyéb felhasználási tulajdonságait a hőmérséklet függvényében. A ma üzemelő atomerőművek szerkezeti anyagai általában ismert tulajdonságú, "hagyományos" anyagok, amelyek legfontosabb anyagcsoportjai a következők:

- Ötvözetlen és alacsonyan ötvözött acélok (utóbbiakból készül pl. a reaktortartály). Ezek termikus stabilitása az üzemi hőmérsékleten, a tervezett (és a meghosszabbított) üzemidő alatt megfelelő. A reaktortartály acélok sugárkárosodását a felügyeleti program keretében monitorozzák; a sugár-károsodással szembeni ellenállásuk jelentős mértékben függ a szennyezőiktől (pl. réz, foszfor). Nem állnak ellent bórsavkorróziónak.
- Erősen ötvözött korrózióálló acélok. Legelterjedtebb a krómmal és nikkellel ötvözött acélcsoport, amelyet a kristályközi korrózió megakadályozása érdekében titánnal vagy nióbiummal stabilizálnak. Bizonyos öregedési folyamatokkal szembeni ellenállásuk a gyártástechnológiától (öntött vagy alakított termék), továbbá a δ-ferrit tartalmuktól függ.
- Nikkelbázisú ötvözetek. Elsősorban nyugati típusú reaktorokban alkalmazzák őket a primerkör szerkezeti anyagaként. Elterjedt, mint a gőzfejlesztő hőátadó csövek anyaga. Bizonyos típusai érzékenyek feszültségkorróziós repedések kialakulására, aminek következtében igen sok gőzfejlesztőt ki kellett cserélni a tervezett üzemidő lejárta előtt.
- Az előző csoportokon túl előfordul még titán ötvözet (kondenzátor hőátadó csőköteg), a generátor esetében rézötvözet és a fűtőelem jellemző szerkezeti anyaga a cirkónium és ötvözetei. Kutató- és oktató reaktorok esetében alumíniumötvözeteket is használnak.

Részletes összefoglalás található az alkalmazott szerkezeti anyagokról, tulajdonságaikról és üzemi körülmények közötti viselkedésükről a irodalomban. [14] Miután az öregedési folyamatok az üzemelési idő előrehaladásával fejlődnek ki és válnak aktívvá, ezért kulcsfontosságú az anyagtulajdonságok időbeli stabilitása. Ezek közül kiemelkedik a szívósság csökkenése, illetve a szívós-rideg átmeneti hőmérséklet eltolódása. E változások a sugárkárosodás esetében mutatják a legnagyobb változásokat, de észlelhetők a fáradás és a termikus öregedés következtében is.

A szerkezeti anyagoknak a fejlesztése napjainkig általában evolúciós úton történt, ami azt jelenti, hogy tulajdonságaikat lépésről lépésre, az üzemeltetési tapasztalatok folyamatos figyelembe vétele, majd a gyártástechnológia optimalizálása útján javították.

A szerkezeti anyagokkal szemben előreláthatólag a "jövő atomerőművei" (a negyedik generációs, maghasadáson alapuló atomerőművek) sem fognak a ma megszokottnál lényegesen szigorúbb követelményeket támasztani, így ezek anyagai sem fognak lényegesen eltérni a jelenleg alkalmazottaktól. Illusztrációként, a *46. ábrán* egy (nyugati típusú) nyomottvizes atomerőmű berendezéseinek szerkezetianyag-választékát mutatjuk be. Az ábrán az alkalmazott anyagok amerikai szabvány szerinti jelölései olvashatók.





46. ábra. Nyomottvizes atomerőmű primer- és szekunder körének vázlata és az alkalmazott szerkezeti anyagok [15]

2.6.1 Ötvözetlen és erősen ötvözött acélok

A legjáratosabb orosz és amerikai ötvözetlen acélok szakító vizsgálatból meghatározható mechanikai tulajdonságait a 10. táblázat, a korrózióálló acélokét a 11. táblázat mutatja.

10.1	táblázat.	Ötvözetlen	acélok	mechanikai	tulajdonság	ai
------	-----------	------------	--------	------------	-------------	----

	22 (VV	2 K ER)	SA533 Grade A Class 1 (Westinghouse)		
	20°C 350°C		20°C	350°C	
Szakítószilárdság (R _m), MPa	430	392	552	527	
Folyáshatár (R _{p0.2}), MPa	215	177	345	285	
Nyúlás (A ₅), %	18	18	18	-	
Kontrakció (Z), %	40	40	-	-	



	08H18 (VV	BN10T ER)	316 (Westinghouse)		
	20°C	350°C	20°C	350°C	
Szakítószilárdság (R _m), MPa	510	412	515	-	
Folyáshatár (R _{p0.2}), MPa	216	177	205	-	
Nyúlás (A ₅), %	35	26	40	_	
Kontrakció (Z), %	55	51	50	_	

11. táblázat. Korrózióálló acélok mechanikai tulajdonságai

2.6.2 A reaktortartály szerkezeti anyagai

A legfontosabb főberendezés, egyúttal az atomerőmű egyetlen redundanciával nem rendelkező (és nem cserélhető, legalább is napjainkig nincs rá példa) berendezése a reaktortartály, ezért ennek az anyagával külön foglalkozunk. A reaktortartály szerkezeti anyaga általában alacsonyan ötvözött, ferrites szerkezetű (térközepes köbös kristályrácsú) acél, amelyet a kiválásos keményedés állapotára hőkezelnek (nemesítenek). A viszonylag nagy falvastagság és az ebből adódó hűlési viszonyok miatt többnyire bainites szövetszerkezet érhető el az edzést követően. A hőkezelést követően kapott anyag-szerkezeti állapot a tartós mechanikai és hőigénybevétel szempontjából stabil, és csak a neutron-sugár-zás anyagszerkezet-módosító hatása érvényesül a reaktortartály középső, hosszú öve (zónaöv) mechanikai tulajdonságainak a megváltozásában.

A reaktortartály gyártásához alkalmazott acélok kémiai összetételének változása magán viseli a már említett evolúciós fejlődés jeleit. A korai amerikai reaktortartályok jellemző anyaga az ASTM szabvány szerinti SA302 Grade B jelű acél volt (ötvözője: Mn és Mo), majd ezt követte az SA533 Grade B Class 1, valamint az SA508 Class 2 (mindkét acél Mn, Mo és Ni ötvözésű). Elterjedt tartályacél lett a csökkentett Cr-tartalmú SA508 Class 3. A német atomerőművek reaktortartályainak anyaga a 22NiMoCr37 (ötvözője: Ni, Mo és Cr), valamint a 20MnMoNi55 (ötvözője: Mn, Mo és Ni) acél. Az utóbbival lényegében egyenértékű 16MnD5 és 18MnD5 jelű acélokat Franciaországban használják. A Cr-tartalom csökkentésének az oka a plattírozás alatti tartományban keletkezett repedések elkerülése volt.

A korai tartályok esetében nem fordítottak kiemelt figyelmet az acélban található és a sugárkárosodásra való érzékenységet fokozó szennyező elemek (pl. P, Cu) mennyiségére. Ahogy egyre több adat alapozta meg ezeknek a szennyező elemeknek a káros hatását, úgy szigorították megengedhetőségüket a reaktortartály acélokban.

A VVER-reaktorok tervezői a hosszú idejű termikus stabilitás elérése érdekében a Ni-tartalmat 0,4%-ban korlátozták a 440 MW teljesítményű reaktoroknál, továbbá a hegeszthetőség érdekében a C-tartalom felső határát 0,18%-ban határozták meg. A reaktortartály acél fő ötvözőjének a krómot választották. Ezen túlmenően, alapvetően gyártástechnológiai okból (bizonyos hegesztési varratokat többször kell megeresztő hőkezelésnek alávetni), erős karbidképző ötvözőket (molibdént és vanádiumot) is adagoltak az acélhoz. Ez utóbbiak termodinamikai szempontból stabil, speciális MC típusú karbidokat képesek alkotni, továbbá részt vesznek az M7C3 és M23C7 típusú komplex karbidok képzésében is. Így alakult ki a 15H2MFA jelű reaktortartály-acél, amelyet a VVER¹¹440 reaktorok tartályainak a gyártásához alkalmaztak. A '70-es években — a sugárkárosodással kapcsolatos ismeretek bővülése eredményeként — szigorították ennek az acéltípusnak a szennyezőtartalmát, azaz szigorúan korlátozták a Cu, S, P, Sb, As és Sn tartalmakat egyedileg és összességükben. A szigorított szennyező tartalmú acél jele 15H2MFAA, és a neutronsugárzásnak kitett zónaövet ebből a típusból gyártották.



Atomerőműi Képzési Bázis

A VVER–1000 reaktortartályhoz új acélt fejlesztettek ki, amellyel egyrészt magasabb szilárdságot akartak elérni, másrészt – tekintettel a nagyobb falvastagságra – javítani akartak a hegesztési varratok elkészítésének folyamatán (csökkenteni akarták az előmelegítési és az utóhőkezelési hőmérsékletet). Ennek eredménye lett a vanádium szinte teljes elhagyása, és a nikkel, mint ötvözőelem megjelenése (15H2NMFA jelű acél). Ez az acél az alaptípusa a VVER–1200 reaktorok tartályainak. A következő három változata van – egyre szigorúbb szennyező tartalommal és a Class 1 változat esetén alacsonyabb maximális nikkel tartalommal: 15H2NMFA, 15H2NMFA-A és 15H2NMFA Class 1. Az ismertetett reaktor-tartály-acélok kémiai összetételét mutatja a *12. táblázat.*

A					Elemek,	tömeg %									
Anyagminoseg	С	Si	Mn	Cr	Мо	V	Ni	Cu	S	Р					
SA 302 B	max. 0,25	0,15– 0,30	1,15– 1,50		0,45– 0,60				max. 0,040	max. 0,035					
SA 533 B Class 1 (1971)	max. 0,25	0,15– 0,30	1,15– 1,50		0,45– 0,60		0,40– 0,70		max. 0,040	max. 0,035					
SA 533 B Class 1 (1989)	max. 0,25	0,15– 0,40	1,15– 1,50		0,45– 0,60		0,40– 0,70		max. 0,040	max. 0,035					
SA 508 Class 2	max.	0,15–	0,50–	0,25–	0,55–	max.	0,50–		max.	max.					
(1971)	0,27	0,35	0,90	0,45	0,70	0,05	0,90		0,025	0,025					
SA 508 Class 2	max.	0,15–	0,50–	0,25–	0,55–	max.	0,50–	max.	max.	max.					
(1989)	0,27	0,40	1,00	0,45	0,70	0,05	1,00	0,15	0,015	0,015					
SA 508 Class 3	max.	0,15–	1,20–	max.	0,45–	max.	0,40–		max.	max.					
(1989)	0,25	0,40	1,50	0,25	0,60	0,05	1,00		0,015	0,015					
22NiMoCr37	0,17–	0,15-	0,50–	0,25–	max.	max.	0,60–	max.	max.	max.					
	0,23	0,35	1,00	0,50	0,60	0,02	1,20	0,10	0,008	0,012					
20MnMoNi55	0,17–	0,15–	1,20–	max.	0,40–	max.	0,50–	max.	max.	max.					
	0,23	0,30	1,50	0,20	0,55	0,02	0,80	0,10	0,008	0,012					
16MnD5	max.	0,10–	1,15–	max.	0,43–	max.	0,50–	max.	max.	max.					
	0,22	0,30	1,60	0,25	0,57	0,01	0,80	0,20	0,012	0,02					
18MnD5	max.	0,10–	1,15–	max.	0,45–	max.	0,50–	max.	max.	max.					
	0,20	0,30	1,55	0,25	0,55	0,01	0,80	0,20	0,012	0,015					
15H2MFA	0,13–	0,17–	0,30–	2,50–	0,60–	0.25–	max.	max.	max.	max.					
	0,18	0,37	0,60	3,00	0,80	0,35	0,40	0,30	0,020	0,020					
15H2MFAA	0,13–	0,17–	0,30–	2,50–	0,60–	0,25–	max.	max.	max.	max.					
	0,18	0,37	0,60	3,00	0.80	0,35	0,40	0,08	0,015	0,012					
15H2NMFA	0,13–	0,17–	0,30–	1,80–	0,50–	0,10–	1,00–	max.	max.	max.					
	0,18	0,37	0,60	2,30	0,70	0,12	1,50	0,30	0,005	0,006					
15H2NMFA-A	0,13–	0,17–	0,30–	1,80–	0,50–	0,10–	1,00–	max.	max.	max.					
	0,18	0,37	0,60	2,30	0,70	0,12	1,50	0,10	0,005	0,005					
15H2NMFA	0,13–	0,17–	0,30–	1,80–	0,50–	0,10–	1,00–	max.	max.	max.					
Class 1	0,18	0,37	0,60	2,30	0,70	0,12	1,30	0,06	0,004	0,005					

12. táblázat. Reaktortartály-acélok kémiai összetétele



A VVER–1200 (és annak még fejlettebb típusa, a VVER–TOI) anyaga esetében a táblázatban közölt szennyező elemeken túl a következő korlátozások is érvényesek:

- As < 0,02% (alaptípus) és <0,01% (A-A és Class 1),
- ◆ Co < 0,03%,</p>
- Sn < 0,05% (alaptípusnál nincs megadva),
- Sb < 0,05% (alaptípusnál nincs megadva),
- Σ (P+Sn+Sb) < 0,015% (A-A) és < 0,012% (Class 1)
- Σ (P+S) < 0,014% (alaptípus).

A reaktortartály hegesztési varratai általában fedett ívű hegesztési eljárással készülnek. Ehhez eleinte rézbevonatos elektródát alkalmaztak a villamos érintkezés javítása, valamint az elektródatárolás során bekövetkező korrózió megakadályozása céljából. Csak miután ismertté vált a réznek a sugárkárosodást erősítő hatása, változtattak a technológián. Igen fontos a hegesztési hozaganyag szennyezőtartalmának minimális szinten tartása is, és – tekintettel a nagy térfogatú varratokhoz szükséges jelentős hozaganyag-mennyiségre – a kémiai összetétel homogenitásának biztosítása.

A reaktortartály teljes belső felületét titánnal vagy nióbiummal stabilizált króm-nikkel ötvözésű korrózióálló acél (VVER-reaktoroknál 08H18N10T), néhány esetben nikkelötvözet bevonattal látják el, azaz plattírozzák. A plattírozott réteg vastagsága néhány mm-től 9–10 mm-ig terjed. A vékonyabb réteg a nyugati nyomottvizes, a vastagabb a VVER-tartályokra jellemző. A plattírozás célja a bórsav tartalmú primerköri hűtőközeg által előidézett általános korrózió elleni védelem, valamint a hűtőkörben keletkező korróziótermékek kialakulásának minimalizálása.

A 13. táblázatban a VVER reaktortartály-acélok mechanikai tulajdonságait foglaltuk össze, és kiegészítettük a táblázatot két amerikai acél adataival. Szerepelnek a táblázatban mechanikai tulajdonságokkal összefüggésben lévő átmeneti hőmérséklet értékek is.

	R _m , MPa	R _{p0,2} , Мра	A ₅ , %	Z, %	Т _{к0} , °С			
Szobahőmérséklet								
15H2MFA	540	430	14	50				
15H2MFA varrat	540	390	14	50				
15H2NMFA	610	490	15	55				
15H2NMFA-A	610	490	15	55				
15H2NMFA Class 1	610	490	15	55				
15H2NMFA varrat	540	420	15	55				
SA 533 B Class 1	550	345	18	_				
SA 508 Class 3	550	345	18	38				

13. táblázat. Reaktortartály acélok mechanikai tulajdonságai.



	R _" , MPa	R _{р0,2} , Мра	A ₅ , %	Z, %	Т _{к0} , °С				
	350°C								
15H2MFA	490	390	14	50	0				
15H2MFA varrat	490	370	12	45	20				
15H2NMFA	540	440	14	50	-20				
15H2NMFA-A	540	440	14	50	-45				
15H2NMFA Class 1	540	440	14	50	-45				
15H2NMFA varrat	510	390	14	50	-45				
SA 533 B Class 1	-	285	-	-	-12				
SA 508 Class 3	_	285	-	-	-12				

A reaktortartály biztonságos üzemeltetésének alapja, hogy anyagának átmeneti hőmérséklete alacsony legyen a teljes üzemideje alatt. Ez két úton érhető el: (i) a falat érő neutron fluxus csökkentésével és (ii) neutronsugárzásnak és termikus ridegedésnek ellenállóbb szerkezeti anyag használatával. A nyugati nyomottvizes reaktorok tervezői az első lehetőséggel élnek (növelik a tartály átmérőjét), míg a VVER tervezői kénytelenek voltak elvetni az első lehetőség alkalmazását a vasúti szállítás korlátjai miatt, és anyagfejlesztés útján biztosítják a tartály biztonságát.

A reaktortartály szerkezeti anyagai élettartam-kimerülési folyamatának ismerete és előrejelzése az atomerőmű hosszútávú, biztonságos üzemeltetésének alapvető követelménye. A sugárkárosodás előrejelzésének alapját általában az átmenetihőmérséklet-eltolódás értékek képezik. Az átmeneti hőmérsékletet a gyorsneutron-fluencia függvényében ábrázoló görbét trendgörbének nevezik, aminek a leírására – fizikailag megalapozott egyenlet hiányában – számtalan empirikus formula létezik. A trendgörbék legáltalánosabban elterjedt alakja a következő hatványfüggvénnyel írható le:

$$\Delta T_k = A(K\ddot{O}, T_s, \phi) \cdot F^n + C$$

A képletben A a kémiai összetételtől (KÖ), a Ts besugárzási hőmérséklettől és a Φ gyorsneutron fluxustól függő paraméter; F a gyorsneutron-fluencia, n a hatványkitevő és C egy állandó.

A modellek megegyeznek abban, hogy a szívósságvesztéshez és az átmeneti hőmérséklet növekedéséhez három alapvető folyamat járul hozzá. Ezek a következők: a fémmátrix diszlokációsűrűségnövekedés okozta közvetlen felkeményedése, az elsősorban a réz által előidézett precipitációs keményedés, valamint a foszfor szegregációnak a hatása. Ezek a trendgörbe-összefüggés egy-egy additív tagjai, amit a 47. ábra mutat.




47. ábra. Trendgörbe összetevői

2.6.3 Az alkalmazási területek összefoglalása

A 14. táblázatban összefoglalóan bemutatjuk a reaktortechnikában alkalmazott szerkezetianyagcsoportokat, azok jellemző alkalmazási területeit és az alkalmazás maximális üzemi hőmérsékletét.

Szerkezeti anyag	Alkalmazási terület	Maximális alkalmazási hőmérséklet, °C
Alumínium és ötvözetei	Vízhűtésű kutatóreaktorok fűtőelemburkolatai, szerkezeti elemei és technológiai csatornái	250
Cirkónium és ötvözetei	Víz -és folyékonyfém-hűtésű reaktorok fűtőelem- burkolatai, kötegei és technológiai csatornái	400
Ausztenites rozsdamentes acélok	Fűtőelemburkolatok, technológiai csatornák, reaktor- tartály belső felületei, primerköri csővezetékek, gőzfejlesztők hőtádó csövei, szivattyúk	600
Perlites acélok	Reaktortartályok, egykörös atomerőművek és gőz- fejlesztők túlhevített gőzének vezetékei	500
Krómtartalmú rozsdamentes acélok	Primerköri szivattyúk tengelyei, csapágy- perselyek, fogaskerekek, hűtőelemek, rugók	500
Bórtartalmú rozsdamentes acélok	Neutronelnyelő rudak	600
Nikkelbázisú ötvözetek	Gőzfejlesztők és előmelegítők hőátádó csövei, folyékonyfém-hűtésű reaktorok közbenső hőcserélői	800

14. táblázat. Alkalmazott anyagok és alkalmazási területek

2.7 HIVATKOZÁSOK (2. FEJEZET)

- [11] Ph. G. Tipping (Ed.) (2010): Understanding and mitigating ageing in nuclear power plants. Woodhead Publishing Ltd.
- [12] Verő B.–Trampus P.: A láncmodell A teljesítőképesség fogalmától az anyag fogalmán keresztül a feldolgozásig. Anyagvizsgálók Lapja. 31. I. 2021. Pp. 45–63.
- [13] M. Link (2020): Fulfilment of Finnish safety regulations in design, execution and condition monitoring of welded joints in nuclear pressure equipment of VVER–1200 reactor. *Master's thesis*. Oulu University.
- [14] Csom Gy. (1997): Atomerőművek üzemtana I. kötet. A reaktorfizika és -technika alapjai. Budapest: Műegyetemi Kiadó.
- [15] S. J. Zinkle-G. S. Was (2013): Materials challenges in nuclear energy. Acta Materialia. 61. Pp. 735–758.



Atomerőműi Képzési Bázis

A szerkezeti anyagok gyártás- és szereléstechnológiájának alapvető sajátosságai

3.1 ACÉLGYÁRTÁS ÉS -ÖNTÉS TECHNOLÓGIÁJA, ACÉLFINOMÍTÓ ELJÁRÁSOK

Az erőmű építése során az acél a felhasznált anyagok tekintetében a második helyen áll, és első helyen a technológiai rendszerek tekintetében. Az acélgyártás is mint a más ipari eljárások az ipari forradalom óta folyamatosan fejlődik. Az acélgyártási folyamat világszerte elsősorban két fő nyersanyagra, a vasércre és a kokszra támaszkodik, amelyek az acél két fő alkotóelemét alkotják: a vasat és a szenet. Sokféle acél létezik, amelyek egyedi felhasználást igénylő, különféle alkalmazásokra specializálódtak, olyan tulajdonságokkal, mint a szívósság, keménység, rugalmasság, korrózióállósság stb. Ezek a tulajdonságok lehetnek finomhangolhatóak más nagy (pl. C, Cr, Ni) vagy kisebb komponensek (pl. Mn, Ti) tartalmának beállításával, amelyek kölcsönhatásba lépnek egymással és a vassal is, hogy elérjék a kívánt tulajdonságokat. Az acélgyártás legfontosabb alapanyaga a nyersvas, amit vasércek redukciójával állítanak elő. A nyersvas finomításával lehet az acélt előállítani, ahol a nyersvas széntartalmát általában 1% alá csökkentik.

3.1.1 Az acélgyártás legfőbb folyamatai

Frissítés:

A frissítő periódus célja az acélfürdő C-, H₂- és P-tartalmának csökkentése és a hőmérséklet növelése. Az oxidáció többféleképpen oldható meg:

- levegő oxigénjével (Bessemer- és Thomas-eljárás)
- oxidáló salakkal (Siemens–Martin-eljárás)
- tiszta oxigénnel (oxigénfúvatásos eljárások)
- oxigén és argon együttes befúvásával (AOD).

A kísérő elemek oxidációja oxigén vagy levegő befúvásos frissítés esetén közvetlenül az oxigén vagy a keletkező FeO hatására megy végbe. A lejátszódó reakciók a következők:

- ◆ 2Fe + O2→2FeO
- ♦ 4Fe + 3O2→2Fe2O3
- Si + O2→SiO2 szilícium eltávolítása
- ◆ 2C +O2→2CO szén eltávolítása
- ◆ 2Mn + O2→2MnO mangán eltávolítása
- ♦ 4P + 5O2→2P2O5 foszfor eltávolítása

Az oxidáló salakokkal történő frissítéskor a nagy FeO-tartalmú salak végzi el a fém-salak fázishatáron a megoszlási törvénynek megfelelően. Az egyes elemek oxidációjakor jelentős hőmennyiség szabadul fel, ami emeli a fürdő hőmérsékletét. A karbon kiégésekor keletkező CO és CO2 élénk fővésbe (mozgásba) hozza a fürdőt, ami a fürdőt átkeveri, növeli az egyes fázisok közötti érintkezési felületet, növeli a reakciók sebességét, intenzívebbé teszi a hőátadást és elősegíti a gázok és a zárványok eltávozását. A karbonleégés sebessége a technológiai lépés fontos jellemzője, a szél- és oxigénfrissítéses eljárások esetén kb. 0,3% C/min, az oxidáló salakos eljárásnál kb. 0,3% C/h.



3.

A foszfor eltávolítása bázikus, nagy CaO-tartalmú salakkal történik, a vasban oldott foszfor oxidációjával keletkező savanyú jellegű P2O5-ot a kis bázicitású FeO-val szemben az erősen bázikus CaO stabilan megköti.

Dezoxidálás:

Azért, hogy az acélfürdőben oldott kísérő elemek oxidációja kellő sebességgel menjen végbe, az oxidálószer feleslegben történő adagolása szükséges. Így a frissítés után az acél túlzottan nagy mennyiségű oxigént tartalmaz, többet, mint amennyit szilárd állapotban oldani képes. Ez a kristályosodás során a kristályhatárokon FeO-zárványok formájában kiválna és rontaná a szilárdsági tulajdonságokat. A folyékony vasban az oldott oxigéntartalom már igen kis mennyiségben is FeO-ként van jelen. A káros oxigénmennyiséget csökkenteni kell, vagy kevésbé káros oxidok formájában kell megkötni.

Kicsapásos dezoxidálás

A kicsapásos dezoxidálás lényege, hogy az acélfürdőben oldott oxigént (vagy FeO-t), olyan elemmel kötik meg, amelyiknek az oxigénhez való affinitása nagyobb, mint a vasé. A kicsapásos dezoxidálás általános reakcióegyenlete:

$[FeO]+Me \rightleftharpoons Fe+(MeO),$

ahol Me a dezoxidáló elem, amely az oxigénhez való affinitás növekvő sorrendjében lehet: Mn, Si, Ti, Al stb. (Al az acélban kettős szemcsenagyságot okozhat). A Mn-t és a Si-ot ferroötvözetek, az Al-ot legtöbb esetben tiszta fém formájában használják. A csak Mn-nal dezoxidált acélokban még marad oxigén, dermedéskor a karbontartalom hatására CO keletkezik. Az ilyen acélokat csillapítatlan acéloknak nevezik. A Mn-Si-mal és a Mn-Si-Al-mal dezoxidált acélok esetén dermedéskor nincs CO fejlődés. Ezeket csillapított acéloknak nevezzük.

A képződött oxidnak kis olvadáspontúnak kell lennie, hogy ezáltal koagulálhasson, és így a dezoxidációs termékek növekedését elősegítse, valamint kis fajsúlyúnak kell lennie, hogy gyorsan a salakba emelkedhessen. A gömb alakúnak feltételezett dezoxidációs termék felemelkedését a Stokes-tétel írja le.

Diffúziós dezoxidálás:

Az acélfürdő oxigéntartalmát nemcsak az [FeO] redukciója útján, hanem az [FeO]-nak a salakba való eltávolításával is lehet csökkenteni. Ezt a módszert, amikor az FeO az acélfürdőből a redukáló salakba diffundál, diffúziós dezoxidálásnak nevezzük. A megoszlási törvény értelmében a salakban lévő szabad FeO-t csökkentve az acél FeO-tartalma is csökken anélkül, hogy dezoxidáló anyagot adnánk a fürdőbe. A vasnak a salakból a fémfürdőbe való visszaredukciójára speciális dezoxidáló keverékeket használnak, amelyek fő alkotója valamilyen karbonhordozó (koksz, faszén, grafit, kalciumkarbid, stb.) és legtöbbször emellett még ferrosziliciumot is hozagolnak. Ez két egyenlettel jellemezhető:

$$(FeO)+(Me) \rightleftharpoons (MeO)+Fe$$

 $[FeO] \rightarrow (FeO)$

A vasnak a salakból való redukciója történhet szintetikus salakkal is, de ekkor a vas nem redukálódik vissza az acélfürdőbe, hanem a salak valamelyik fém oxidja köti meg a salakban. Ez a következő egyenlettel fejezhető ki:



A diffúziós dezoxidáció esetén a karbonnal vagy karbiddal való dezoxidáció terméke gáznemű, így eltávozik az acélfürdőből, azonban a diffúziós dezoxidáció túl lassú, ezért általában összekapcsolják a kicsapásos dezoxidációval.

Dezoxidálás vákuumban:

Vákuumban történő dezoxidáláskor olyan dezoxidálószerek kerülnek előtérbe, amelyek terméke elszívható gáz, így a reakció a termék keletkezésének irányába tolható el. Ez azonban csak akkor érvényes, ha reakció bal oldalán kevesebb mólnyi gáz van, mint a jobboldalon. A vákuum által a dezoxidáció hatékonyságára gyakorolt hatás kihasználására tökéletes lehetőséget csak a kondenzált állapotban lévő, illó oxidokat alkotó elemek alkalmazása nyújt. Ilyen alkalmas elem a szén. A szénnel történő dezoxidálás reakcióegyenlete:

$$y[C] + [Me_x O_y] = x[Me] + y[O]$$

A karbonnal, vákuumban végzett dezoxidáció előnye, hogy az egyensúlyi [C%][O%] szorzat értéke a CO parciális nyomás csökkenésével jelentősen csökken. Az elérhető legkisebb szorzatérték kb. 2.12·10-12, amely 10-3... 10-4 torr pCO esetén érhető el. Ez azt jelenti, hogy O% = 0,001..0,002 és C% = 0,002..0,006. A pCO értéke argonbefúvással is csökkenthető (AOD acélgyártás).

3.1.2 Acélgyártó eljárások

Direkt és indirekt módszerű acélgyártást különböztetünk meg aszerint, hogy az acélgyártó eljárás közvetlenül az ércből, vagy a megelőző nyersvasgyártási lépés termékéből, a nyersvasból állítja elő az acélt. A legfontosabb mai acélgyártó eljárások csoportosítását az 48. ábra mutatja:



48. ábra. A fontosabb mai acélgyártó eljárások csoportosítása

A direkt módszerű acélgyártási technológiák a szilárd vasterméket, az ún. vasszivacsot előállító direkt redukciós eljárások és a folyékony (általában a nyersvashoz hasonló) vasterméket előállító olvadékredukciós eljárások csoportjára oszthatók. Ezek a technológiák még ma is lassan terjednek, jelenleg a teljes acéltermelésből kb. 5%-ban részesednek.



3.1.3 Olvadék redukciós eljárások

Az olvadékredukciós eljárásokban ércporokat, előredukált vagy előredukálatlan érckoncentrátumokat, többnyire gyenge minőségű szenek vagy szénporok felhasználásával, folyékony halmazállapotban, többnyire nyersvashoz hasonló összetételű folyékony vassá, illetve vasötvözetté redukálnak nagy hőmérsékleten (1500–1900°C-on).

Az olvadékredukciós eljárások három csoportba oszthatók. A ritkán alkalmazott egylépcsős eljárás során az olvadékredukcióban keletkező CO-ot oxigénnel elégetve közvetlenül fedezik a folyamat hőszükségletét. A kétlépcsős eljárás esetén az olvadékredukciós részben keletkezett CO-t visszavezetik az előredukciós térbe, ahol a CO elvégzi az érc előredukcióját. A hőt a távozó torokgázok elégetésével nyert villamos energiával biztosítják. Elterjedt kétlépcsős olvadékredukciós technológia az Inred- és az Elred-eljárás. A háromlépcsős technológiában az olvasztó és a redukciós tér között egy harmadik térben elhelyezett kokszágyon végzik az olvasztó térből érkező égéstermékek redukáló gázzá történő konverzióját. A redukáló gázt ezután a redukciós térben az érc előredukciójára hasznosítják. Elterjedt háromlépcsős olvadékredukciós technológia a Plasmamelt-, Kawasaki- és a Pirogas-eljárás.

3.1.4 Nyersvas alapú acélgyártási eljárások

Siemens-Martin-eljárás:

Az 1864-ben kialakult Siemens–Martin (SM) eljárás berendezése a regeneratív tüzelésű lángkemence, 49. ábra.





Az SM eljárás betétje lehet hulladék-nyersvas, nyersvas-érc és hulladék-szén. A frissítést nemcsak a kemenceatmoszféra oxigéntartalma, hanem az oxidáló salak is végzi a fém-salak fázishatáron a megoszlási törvénynek megfelelően. Így a fémfázisban oldódó [FeO] a kísérőelemeket oxidálja. Az oxidáció sorrendje, Si, Mn majd P, a hőmérséklet növekedésével kerül egyre inkább előtérbe a C oxidációja. Az oxidálódott foszfor bázikus salakban (nagy MgO- és CaO-tartalom) megköthető. Az SM-eljárás dezoxidációs szakaszában FeMn, FeSi, AI, FeTi esetleg CaSi közvetlenül a csapolás előtt az üstbe vagy a folyadéksugárba történő adagolásával kicsapásos dezoxidálást, vagy redukáló salakkal diffúziós dezoxidálást is alkalmaznak.



Oxigén-befúvásos konverteres acélgyártás, Linz Donau (LD):

Az oxigén-befúvásos konverteres eljárásoknak három nagy csoportja létezik. A ráfúvásos oxigén konverteres eljárásnál az adag 75-90% folyékony nyersvas mellett acélhulladékból, vagy ércből áll. A tűzálló bélésű konverterbe az oxigént vízzel hűtött lándzsán keresztül 10–14 bar nyomással juttatják be, *50. ábra.*

50. ábra. Oxigén-befúvásos konverter



A fenékfúvatásos oxigén konverteres eljárásnál az oxigén a konverter fenekén önmagát hűtő fúvókarendszeren jut a fémfürdőbe. Az argon–oxigén-befúvásos konverteres eljárás (AOD) során oxigén és argon gáz keverékét fújják be a konverterbe, így csökkentve a keletkező CO parciális nyomását, ezáltal javítva a dekarbonizálás hatásfokát. Ezzel az eljárással állítják elő a kis karbontartalmú, korrózióálló acélokat.

3.1.5 Elektroacélgyártás

Az elektroacélok jelentős része csak nagyon tiszta, meghatározott szennyezőmentes és kedvező fizikai, illetve morfológiai tulajdonságokkal rendelkező acélhulladékokból gyártható a szükséges minőségben és gazdaságosan. Az ilyen minőségű hulladék azonban már nem minden esetben és helyen biztosítható megfelelő áron és mennyiségben, illetve folyamatosan, és az elektroacélgyártás folyamata sem a 100%-os acélhulladék felhasználásakor mutatja a legkedvezőbb gyártási paramétereket. Mindebből következik, hogy szükség van olyan vaskohászati termékre, amely – a nyersvashoz képest – kis C-tartalmú, minimális meddőtartalmú, szennyező- és kísérőelemektől gyakorlatilag mentes, nagy Fetartalmmal és fémesítési fokkal, valamint kedvező fizikai, illetve morfológiai tulajdonságokkal rendelkezik. Ez az anyag a vasércek, pelletek szilárd halmazállapotban végbement redukciója eredményeként képződött vasszivacs, illetve DRI-termék (Direct Reduced Iron), ami alkalmas az acélhulladék meghatározott mértékű helyettesítésére.

Az elektroacélgyártás során a kemencében, (51. ábra) az oxidációs periódus alatt megtörténik az oxigénhez a vasnál kisebb affinitású fémek beötvözése is (Mo, Ni, Co, Cu). Az oxidációs periódus végén a keletkezett salakot lehúzzák. A salak eltávolítása után a dezoxidáló periódusban redukáló salakot képeznek, mész, folypát és kokszpor keverékéből (diffúziós dezoxidálás). A további dezoxidálás ferroötvözetekkel történik (kicsapásos dezoxidálás).





51. ábra. Elektromos ívkemence

Azokat az ötvözőfémeket, amelyek oxigénhez való affinitása a vasnál kisebb, a dezoxidáló periódus végén ötvözik be (Cr, V, Ti, Ce, Ta, B, Nb) azért, hogy kevés legyen az oxidos formában megkötődő veszteség. Az ívfényes kemencében a betét megolvasztásához és az acélfürdő felhevítéséhez szükséges hőt elektródák közötti villamos ív termeli. Az indukciós kemencében a betét a benne gerjesztett középfrekvenciás váltóáram Joule-hője hatására olvad meg. Az indukciós kemencében a fürdő álladó mozgásban van az indukált áram hatására, ez kedvez a gáztalanításnak. Az ívkemencében azonban a redukáló periódusban elmarad a fürdő fővése, így jelentős a fürdő gáztartalma. Ezt a káros gázok parciális nyomásának csökkentésével lehet elkerülni.

3.1.6 Direkt redukciós eljárások

A direkt redukciós eljárások körébe tartozik minden olyan eljárás, amely dús (kis meddőtartalmú) vasércekből, szilárd állapotban, gáznemű (gázredukciós) vagy szilárd redukálószerek felhasználásával (szilárd karbon redukciós) kis C-tartalmú vasterméket állít elő. A nagy fémesítési fokkal (Fefém/ Feössz>0,92) és minimális meddőtartalommal rendelkező vasszivacs elsődlegesen az elektroacélgyártás betétanyagaként használható fel. A kisebb fémesítési fokkal rendelkező vasszivacsok, mint előredukált betétanyagok a nagyolvasztóban kohósíthatók.

A gázredukciós eljárás két fő egysége az aknás kemence típusú reaktor, amelyben a lefelé haladó érc vagy pellet színvassá történő redukcióját a CO és a H₂ végzi. A másik fő egységben, a konvertálóberendezésben, a torokgázokat (CO2, H₂O) többnyire földgázzal reagáltatva állítják elő a redukálógázt, amelynek összetétele általában CO=25-40%, H2=35-55%, hőmérséklete 760–900°C.

A szilárd karbonredukciós-eljárás során a finomszemcsés ércből, nagy reaktivitású kokszdarából és a salakképző anyagból álló betétanyag keverékét forgócsöves kemencében reagáltatják, így állítanak elő vasszivacsot, *52. ábra*. A redukciós hőmérséklet kb. 900–1100°C. 2008-ban a világ kb. 1200 Mt-ás acéltermeléséből a direkt redukciós technológiával előállított acél mennyisége 68,5 Mt volt. A termelés 75%-a gázredukciós (Midrex 60% és HyL 15%), 25%-a szilárd karbonredukciós-technológia alapú volt.







3.1.7 Különleges acélgyártó eljárások és finomító eljárások

Az acélok szennyező anyagai közé soroljuk azokat a nem kívánatos elemeket, amelyek a gyártási folyamat valamely szakaszában (nyersvasgyártás, acélgyártás, további feldolgozás) akaratunk ellenére kerülnek az acélba. Ilyen szennyező anyagoknak számíthatjuk a S, P, O, N, H elemeket. A nemfémes zárványok és gázok, valamint a dúsulások rontják az acél több fontos tulajdonságát, ezért ezek meny-nyiségét csökkenteni kell a különleges igénybevételnek kitett acélok esetén. A metallurgiai folyamatok szerint három csoportba sorolhatók az acélfinomító eljárások.

- A salak-fém reakción alapuló eljárások során a salak legkedvezőbb összetételével állítják be a kívánt reakciók optimális egyensúlyi helyzetét a megoszlási törvény alapján. Így dolgoznak az elektrosalakos olvasztókemencék és a szintetikus salakos eljárások.
- Az eljárások másik csoportjában elsősorban fizikai folyamatok érvényesülnek, amikor vákuumban vagy védőgázban olvasztják át az acélt, így csökkentve a gáz- és szennyezőtartalmát. Ide tartozik a vákuumos és a vákuumindukciós átolvasztás.
- Az előző két eljárás kombinációi az egyidejűleg salakkal és vákuummal, vagy védőgázzal dolgozó eljárások. Ilyenek a plazmasugaras, plazmaíves, vákuumindukciós, vákuumíves elektrosalakos leolvasztási eljárások, 53. *ábra.*



Elektrosalakos újraolvasztás Elektróda Hűtőviz ki Vizzel hűtött öntőforma Hűtőviz be Buga

53. ábra. Elektrosalakos átolvasztás

Kéntelenítés:

A kén a nyersvasgyártás során kerül a nyersvasba. A nyersvasat további felhasználás előtt üstmetallurgiai módon kéntelenítik. A nyersvas üstmetallurgiai kéntelenítésére azok az elemek alkalmasak, amelynek szulfidképződési standard szabadentalpia-változása negatívabb, mint a FeS képződésé. Gyakorlati szempontból a következő elemek jöhetnek szóba: Na, Ca, Mg, Na₂CO₃, CaO és CaC₂.

Ha az acélfürdő csak vasat és kenet tartalmazna, akkor a kén oxidációja nem lenne lehetséges az acélfürdőből, mert a vas oxigénhez való vegyrokonsága nagyobb mint a kéné. Az acélgyártásban két lehetőség adódik a kéntelenítésre. Az acélfázis kéntartalmának eltávolítása történhet fémmel vagy a salakfázis fémoxid tartalmával. A fémmel történő kéntelenítés esetén olyan elemek jöhetnek szóba, amelyeknek a kénhez való vegyrokonsága nagyobb, mint a vasé. A szulfidképző elemek közül csak a mangán, az acél egyik kísérőeleme áll rendelkezésre, mert az acélfázisba nem lehetséges a többi szóba jöhető színfém elem beadagolása (Mg, Na, Ca, Ce) ugyanis ezek az oxigénhez is erős vegyrokonságot mutatnak, így a fémfázisban hamar oxidálódnának. A Mn-nal történő kéntelenítő reakció:

[FeS]+[Mn] = [MnS]+[Fe]

A Mn-nal történő kéntelenítés során vasszulfid helyett mangánszulfid keletkezik, amely a vas olvadáspontja fölött, 1620°C-on olvad meg. Kristályosodáskor nem hálószerűen jön létre, mivel az olvadékból hamarabb kristályosodik, mint a fémes fázis, így szemcsehatár menti repedést nem okozhat. A MnS azonban a ként csak kedvezőbb alakban, mint a FeS, de továbbra is nemkívánatos nemfémes zárványok alakjában tartalmazza. A salakfázis fémoxid- tartalmával történő kéntelenítés esetén az üstmetallurgiai kéntelenítéshez hasonlóan kéntelenítenek. A salakhoz elsősorban CaO-ot adagolnak.



Foszfortartalom csökkentése az acélban:

A foszfor a nyersvasgyártás során a vasércből kerül nyersvasba. A nyersvas foszfortartalmának csökkentése már a nyersvas csapolásakor, a csapolócsatornában megkezdődik. A használatos reagens mész és folypát meghatározott arányú keveréke, amit a csapolócsatorna elején vezetnek az áramló nyersvasba. Ezzel a módszerrel 0,03%-nál kisebb P-tartalom nem érhető el.

A foszfor nagyobb mértékű eltávolítása csak az acélgyártás során lehetséges. Mivel a foszfor az acél tulajdonságait hátrányosan befolyásolja, így minden acélgyártási technológia elsődleges feladata a foszfortalanítás. A foszfor kioxidálódására az acélfürdőből három lehetőség van. Oxidáció az oxidáló gázok oxigéntartalmával:

$$\frac{4}{5}[P] + \{O_2\} = \frac{2}{5}(P_2O_5)$$

A salakfázis FeO tartalmával:

$$\frac{4}{5}[P] + 2(FeO) = \frac{2}{5}(P_2O_5) + 2[Fe]$$

A fémfázisban oldott oxigénnel:

$$\frac{4}{5}[P] + 2[O] = \frac{2}{5}(P_2O_5)$$

A keletkező P₂O₅ a salakba kerül. A savas kémhatású P₂O₅ a salak bázikus oxidjaival reagál. A salak P₂O₅-tartalmának megkötése elsősorban CaO-dal történik:

$$(P_2O_5) + 4(CaO) = 4(CaO \cdot P_2O_5)$$

Ha a salak savas kémhatású, akkor benne a P_2O_5 szabad állapotban marad, a pillanatnyilag keletkező P_2O_5 -ot a fémfázis C, Mn és Si tartalma foszforrá redukálja, tehát nem következhet be a foszfor elsalakulása.

Hidrogén az acélban:

Az acélok H felvételi forrásai a következők lehetnek:

- az acélgyártás betétanyagainak nedvesség tartalma,
- az acélgyártás betétanyagainak H-tartalma,
- gázfázis H-tartalma,
- kemencefalazat, öntőszerelvények.

A vízgőz a folyékony vassal érintkezve a következő egyenlet szerint reagál:

A keletkező H a fémfázisba beoldódik. A H felvételi források közül a gázfázis a legjelentősebb. A folyékony fém csapolás és öntés közben a levegővel történő érintkezésekor, annak nedvességtartalmával reagál és jelentős mennyiségű H-t vesz fel.



Az acélban intersztíciósan oldott alakban jelenhet meg. Oldott állapotban elektronját leadja, így a proton méretű hidrogén diffúziós úthossza sokkal nagyobb a többi gázhoz képest. Az acél a hőmérséklet csökkenésével mind kevesebb H-t tud oldani. A hidrogén egy része az acélban bennreked. A H az acél keménységét növeli, nyúlását csökkenti, tehát ridegítő hatású. Az oldott H a diszlokációk expandált zónájában gyűlik össze. Kellő mennyiségű hidrogén csoportosulása esetén ismét felveszi elektronjait, és a keletkező H₂ gáz miatt helyileg akár 104–105 bar nyomás is keletkezhet. Ez repedéseket indíthat el, ún. pelyhességet, vagyis a törésfelületen fénylő, foltosságot okoz (Cr és Cr-Ni acéloknál lehet gyakori).

Az acélok gáztartalmának csökkentésére az acélgyártás során a fővetési fázis áll rendelkezésre. A folyékony fém gáztartalmát ugyanis a fémfürdőn áthaladó CO jelentősen csökkenti. A H-tartalom csökkentésére a következő módszerek lehetségesek:

- argonozás,
- a folyékony acél vákuumozása,
- az acéltermék átolvasztása.

A folyékony acél argonnal történő átöblítésekor a gáztartalom a fővetéshez hasonló módon csökken. A vákuumozás során az olvadt acélt vákuumtérbe helyezik, ahol a Sieverts megoszlási törvény értelmében gáztalanítják, azonban ez soha nem megy végbe az egyensúlyi határig. A vákuumozás során a fémfürdő ismét fővésbe jön, a gáztartalom eltávozását ez is elősegíti.

3.1.8 Nitrogén az acélban

Nitrogén az acélgyártás folyamán 0,001–0,03% mennyiségben kerül az acélba. Az acélok N-felvételi forrásai a következők lehetnek:

- gázfázis N-tartalma,
- oxidáló pótlék (levegő),
- betétanyag.

A gázfázisból történő N-felvétel csapolás és öntés közben történik. A folyékony fém ekkor igen nagy felülettel érintkezik a levegővel és nagymennyiségű gáz képes felvenni. A N-felvétel szintén jelentős lehet, ha az oxidáló pótlékot levegő formájában adagolják. A betétanyagok közül elsősorban a folyékony nyersvas és a karbonizáló anyagok nitrogéntartalma jelentős.

A nitrogén intersztíciósan oldódik a ferritben és öregedésre és elridegedésre hajlamossá teszi az acélt. Az öregedés folyamatában a N-atomok a diszlokációk expandált helyein gyűlnek össze, akadályozzák a diszlokációk mozgását, és ezzel a képlékeny alakváltozást. A mechanikai tulajdonságokban ez úgy jelentkezik, hogy a szilárdsági értékek növekednek (R_m, R_{p0.2}), míg az alakváltozási jellemzők értékei (A, Z) lecsökkennek. Az ütőmunka (KV) jelentős csökkenése is jelzi a N jelenlétét. Csillapítatlan acélnál az öregedési folyamat hatásai kb. 3 hónappal a gyártás után jelentkeznek. Ezért öregedésre hajlamos acél nagy dinamikai igénybevételnek kitett alkatrészek készítésére teljesen alkalmatlan. A nitrogén öregedést okozó hatása már 0,006% felett észrevehető, ezért öregedésálló lágy acélokban 0,01%-nál több nitrogén nem lehet.

Az acélok N-tartalmának csökkentésére elterjedt módszer a nitridképző elemek beötvözése. Az acélban atomosan oldott N nitridképző elemekkel megköthető. A keletkezett nitridek az acélban oldhatatlan fázisként jelennek meg. Nitridképző elemek: Al, Ti, Zr. Ezek közül – olcsósága miatt – főleg az Al-tot használják.



3.1.9 VVER–1200 reaktortartály anyagának gyártása és tulajdonságai

A reaktortartály alapanyagát képező acélt DSP–120 (EAF–120) elektromos ívkemencékben állítják elő. A kemencékből a fémet üstökbe csapolják. Ezután az üstökben következik a pontos összetétel beállítása a következők szerint:

- hőmérséklet beállítása (elektródokkal),
- keverés,
- ötvözés,
- kéntelenítés,
- keverés,
- mintavétel.

Ezt követően az üstöket a vákuum gáztalanítóba (VD Vacuum Degassing) viszik. Itt végzik az ötvözést és a gáztalantást (argon átöblítéssel).

A zónával szembeni öv – a sugárkárosodás szempontjából kritikus tartályelem – öntőformája vákuum tartályban van, ebbe négy üstből egymást követően, egy tányéron keresztül öntik a kész adagokat, 54. ábra. A legnagyobb tömege ennek az övnek van (384 t), a többi elem tömege kisebb. A zónával szemben levő öv acéljának végső kémiai összetételét a következő képlet szerint kell kiszámítani:

$$C_{\rm ö} = \frac{C_1 M_1 + C_2 M_2 + C_3 M_3 + C_4 M_4}{M_1 + M_2 + M_3 + M_4}$$

ahol C1÷4 az üstben levő elem koncentrációja, M1÷4 az üstben levő folyékony acél tömege. A többi rész (csonkzónák, perem...stb) esetében a számítás akövetkező:

$$C_{\rm \ddot{o}} = \frac{C_1 M_1 + C_2 M_2}{M_1 + M_2}$$

54. ábra. Az acéllal telt üstök mozgatása az öntéshez





A reaktortartályhoz három anyagminőséget állítanak; ezek kémiai összetételben csak a szennyezők (S, P, As,) és Cu tekintetében térnek el egymástól. A mechanikai tulajdonságok tekintetében az ütőmunka értékek különböznek, *15.* és *16. táblázat*.

Anyagminőség	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	As	Co	Cu
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
15H2NMFA	0.13	0.17	0.30	max.	max.	1.80	1.00	0.50	0.10	max.	max.	max.
class1 (zóna öv)	0.18	0.37	0.60	0.004	0.005	2.30	1.30	0.70	0.12	0.010	0.03	0.06
15H2NMFA -A	0.13	0.17	0.30	max.	max.	1.80	1.00	0.50	0.10	max.	max.	max.
(csonkzóna)	0.18	0.37	0.60	0.005	0.005	2.30	1.30	0.70	0.12	0.010	0.03	0.10
15H2NMFA	0.13	0.17	0.30	max.	max.	1.80	1.00	0.50	0.10	max.	max.	max.
(karima, fenék)	0.18	0.37	0.60	0.005	0.006	2.30	1.30	0.70	0.12	0.020	0.03	0.30

15. táblázat. 15H2NMFA minőségű acélok kémiai összetétele

16.	táblázat.	15Cr2NiMoVA	minőségű	acélok me	echanikai tu	Ilaidonságai
	tubiuzut.		mmoocgu			najaonoagai

	Vizsa	álati hőm	érséklet (20°C)	Vizsaá	Átme-				
Anyagminőség	Rm (MPa)	Rp0.2 MPa	A (%)	Z (%)	Rm (MPa)	Rp0.2 MPa	A (%)	Z (%)	neti hőm. (°C)	
15H2NMFA class1 (kovác-	minimálisan								nem maga- sabb	
SOIT)	610	490	15	55	540	440	14	50		
15H2NMFA -A (kovácsolt)	610	490	15	55	540	440	14	50	-45	
15H2NMFA (kovácsolt)	610	490	15	55	540	440	14	50	-20	
15H2NMFA (hengerelt)	610	490	15	55	540	440	14	50		
15H2NMFA (sajtolt)	610	490	15	55	540	440	14	50	-10	

Öntést és megszilárdulást követően eltávolítják a tuskó felső és alsó részét és a tuskót a kovácsoláshoz szállítják, közben a felületi hőmérsékletnek legalább 480°C-nak kell lennie. Vizuális vizsgálatnak vetik alá, amelyet hőállapot, felületi minőség, jelölés, a felső rész minősége alapján értékelnek (maradt-e szívódási üreg). A továbbiakban egy csonköv gyártásának részletes bemutatása következik. Azért választottuk ez, mert ez tartalmazza a legtöbb műveletet (csonkok lyukasztása), 55. ábra.







A bugát 1220°C-ra hevítik (felületi hőmérséklet), a felmelegítés és a hőntartás 56–62 óra. A kovácsolási művelete 1220–1280 °C-on, zömítés az eredeti buga mérettől Ø2350 mm-re, majd lyukasztás. Nyújtás és zömítés a kovácsolás befejező méretére, ami alatt a hőmérséklet nem csökkenhet 850 °C alá (ausztenit hőmérséklet). A kovácsolás végén a hőmérséklet minden szakaszban ≥850 °C. Az átkovácsolási arány az öntvénytől a végső kovácsolásig ≥ 5,0. Az egyes fázisok termékének fényképét mutatja az 56. ábra.

56. ábra. A csonkzóna övének gyártása





Ezt követi a pelyhesedés megakadályozására szolgáló előzetes hőkezelés termikus gázkemencékben, amelynek a maximális hőmérséklete 1150°C, és a kemence testének hőmérséklettartománya legfeljebb 20°C. Hőmérséklet mérése a kemence testében álló termoelektromos készlettel, adatregisztráció automatikus potenciométerrel.

Ezután következik a forgácsolás a csonkok lyukasztásához, és levágják az anyagvizsgálati próbatestek gyűrűjét, majd elvégzik az ultrahangos vizsgálatot, a vizsgálati technológiának megfelelően.

A következő lépés a nyersdarab felmelegítése a csonkok lyukasztásához. A kemence hőmérséklete az első lyukasztáshoz történő hevítéshez nem haladhatja meg a 800°C-ot; a további lyukasztások megkezdése előtti hevítéseknél a kemence hőmérséklete 1050°C. Az öv felmelegítése 1050–1100°C hőmérsékletre. Első lépcsőben a hevítés 900°C-ra 100°C/h sebességgel, majd 1050°C-ra a kemence kapacitásától függően. Hőntartás ezen a hőmérsékleten 1,0÷1,5 min/mm (a vastagságtól függően) az első lyukasztásnál, a további lyukasztásoknál 0,8÷1,2 min/mm. A lyukasztás kezdetének hőmérséklete 950–980°C, a végén minden esetben nem lehet kevesebb, mint 800°C.

A lyukasztások művelete a következő, 57. ábra:

- az övet kiveszik a kemencéből,
- az övön lévő reve eltávolítása,
- az övet a sajtó szerszámába helyezik (a hőmérsékletmérés folyamatos),
- a lyukasztót pozicionálják,
- a keresztfej lefelé haladva kilyukasztja az övet (az erő 45–50 MN),
- a lyukasztó szerszám kihúzása (az erő 80 MN),
- az első csonk lyukasztása után az övet eltávolítják a készülékből, és áthelyezik a fűtőkemencébe fűtésre,
- az első csonk lyukasztásához hasonlóan a további csonkokat is hasonló módon készítik,
- az összes csonk befejezése után az öv további hőkezelésre és méretvizsgálatra kerül.

57. ábra. A lyukasztás művelet és a kész csonköv metszete





A lyukasztások után az övet normalizálni kell, ennek hőmérséklet-idő diagramja az 58. ábrán látható.



58. ábra. Normalizálás lyukasztás után

Az övet ezt követően forgácsolással (esztergálással) az előírt méretre munkálják és ellenőrzik a méreteit, 59. ábra.

59. ábra. Méretellenőrzés forgácsolás után



A következő művelet a nemesítés. Az edzés előtt az övet termikus gázkemencébe teszik, amely maximális hőmérséklete 1060°C. A hőmérséklet mérése a kemence testében álló hőelemekkel, az adatregisztráció automatikus adatgyűjtő rendszerrel történik, 60. ábra.

A nemesítés lépései a következők:

- hevítés 910–25°C hőmérsékletre,
- kemencében történő hűtés 700-600°C hőmérsékletre,
- hevítés 70°C / h-nál nem nagyobb sebességgel 910±25°C hőmérsékletre,
- edzés vízben, legfeljebb 100°C-ig,



Atomerőműi Képzési Bázis

- hevítés a megeresztés hőmérsékletére,
- hűtés levegőn.



60. ábra. A nemesítés hőmérséklet-idő diagramja

A készre munkált darab felső részéből esztergálással gyűrűt forgácsolnak, amiből próbatesteket munkálnak ki a minőségellenőrzéshez és a hegesztés minősítéshez, *61. ábra.*





A kimunkált próbatestek vizsgálatával ellenőrzik az előírt mechanikai tulajdonságokat, illetve makroszkópi és mikroszkópi csiszolatokkal ellenőrzik a zárványosságot és a gáztartalmat. A műveletek sorát a roncsolásmentes vizsgálatok zárják.

A készre munkált reaktortartályelemek belső felületén hegesztéssel (fedőporos ívhegesztéssel SAW) három rétegben ausztenites korrózióálló acélt hegesztenek a belső felületre, 62. ábra.







A plattírozáshoz 60×0,5 mm méretű szalagelektródát használnak. A három réteghez kétféle hozaganyagot hegesztenek fel. Az első réteg (párnaréteg) Szv-07H25N13 típusú, nem stabilizált, a második és a harmadik réteg Szv-08H19N10G2B típusú, nióbiummal stabilizált acél. A hegesztés OF–10 vagy OF–40 típusú fedőpor alatt történik, 64. ábra.

64. ábra. A felrakó hegesztés sorai



Ahol nem lehet automata-hegesztéssel felvinni a plattírozott rétegeket, ott kézi ívhegesztést kell alkalmazni. Ebben az esetben az első réteget ZIO–8 Ø 3–4 mm elektródával, a második és a további réteget EA-898/21V típusúval, 50–200°C előmelegítési hőmérsékleten végzik. A létrehozott varrathernyók esetén a varrat szélessége nem haladhatja meg a hozaganyag huzalátmérőjének háromszorosát. Az egymást követő, párhuzamos varrathernyók szélessége legalább 1/3-ban át kell, hogy fedje az előzőt.

Egy elkészült sor után a varrat teljes terjedelmét vizuálisan vizsgálják, a környező felületeket (az elkészült varratokat és az alapanyagot) megtisztítják az esetleges fröcskölésektől és salaktól. A hegesztés helyén biztosítani kell, hogy az előzőleg lerakott sor hőmérséklete ne haladja meg a 100°C-ot.

A következő sor lerakása csak ezután kezdhető el. A hegesztést követően feszültségmentesítő hőkezelést végeznek 610–630°C-on 4,5–5 óráig.

A tartályt egy elliptikus fenékből és gyűrűkből hegesztik össze, melyek az osztósíktól rendre a következők: karimás rész a menetes fészkekkel, felső csonkzóna, a reaktortartályhoz csatlakozó reaktor hűtőkör vezetékek és az üzemzavari hűtőrendszer és mérések csonkjait magába foglaló alsó csonkzóna,



továbbá az aktív zónával szemközti gyűrű, és a fenék. A varratprofil aszimmetrikus X varrat, 65. ábra. A gyűrűk összehegesztése fedett ívű hegesztéssel történik. A gyök hegesztése Szv-08AA huzallal, FC-16A fedőpor alatt, 3 rétegben készül. A további rétegek hegesztés Szv-09CrMnNiMoTiAA-WI huzallal, FC-16A fedőpor alatt történik. Az gyűrűket 150–300°C-ra kell előmelegíteni. Az előmelegített darabok hegesztését automata végzi, 66. ábra. Mivel a gyűrűk falvastagsága tekintélyes, a teljes varratot több rétegben készítik el. Hegesztés utáni hőkezelés 610–630°C-on, 4,5–5 óra tartási idővel, lehűtés levegőn. A reaktortartály gyártása során minőségellenőrzéseket hajtanak végre az elkészült félgyártmányokon. Ez a körvarratok és a plattírozott felületek roncsolásmentes (radiográfiai, ultrahangos és folyadékbehatolásos) vizsgálatát jelenti.



65. ábra. VVER-1200 tartály V2-es varrata csiszolás után

66. ábra. VVER-1200 tartály varratának automata hegesztése



Az elkészült varratok belső felületén is el kell végezni a felrakó hegesztést; ezt a 67. ábrának megfelelően ívhegesztéssel, az első réteget ZIO–8 Ø 3–4 mm elektródával a második és a további réteget EA-898/21V típusúval, 50–200°C előmelegítés hőmérsékleten végzik.



A tartályvarratok belső védelme után a kész tartályt T = 610–630°C-on, 4,5–5 óráig feszültségmentesítő hőkezelésnek vetik alá, 68. ábra.





68. ábra. VVER–1200 tartály kemencébe helyezése a befejező hőkezeléshez



3.2 KÉPLÉKENYALAKÍTÁSI ELJÁRÁSOK

A képlékenyalakítás olyan gyártási módszer, amellyel a szilárd test (az előgyártmány) alakját és méreteit külső erőrendszer segítségével jelentős mértékben megváltoztatjuk úgy, hogy eközben a test térfogata változatlan marad. Ahhoz, hogy a képlékenyalakítás megtörténhessen, az alábbi két feltételnek teljesülnie kell:



- Az anyag alakított részében ébredő mechanikai feszültségek biztosítsák a képlékeny alakváltozás feltételeit.
- Az anyag ne repedjen meg és ne törjön el az alakítás közben (alakíthatóság).

3.2.1 A folyási feltétel

A szilárdságtanban tanultak szerint a külső erőrendszerrel terhelt test tetszőleges P pontjában ébredő feszültségállapotot a feszültségtenzor jellemzi. A terhelt test minden pontjában létezik három egymásra kölcsönösen merőleges sík, amelyekben csúsztató feszültség (τ) nem ébred. Ezek a fősíkok, az ezekre merőleges irányok a főirányok. A feszültségtenzor ismeretében a fősíkokban ébredő normál feszültségek, az ún. főfeszültségek (σ 1> σ 2> σ 3) meghatározhatók. A feszültségtenzor a főfeszültségek-kel felírva:

$$\mathbf{F} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}$$

A szilárdságtanban a redukált (összehasonlító) feszültség kiszámítására két elmélet a legismertebb, a Tresca–St.Venant és a Huber–Mises–Henky (HMH). A képlékeny (maradó) alakváltozás megindulásához a legnagyobb csúsztató feszültségnek kell elérnie egy, az anyagtól (összetételtől, szerkezettől, hőmérséklettől stb.) függő, K-val jelölt értéket, ami "a tiszta nyírás folyáshatára", lásd a 69. ábrát.



69. ábra. Vázlat a Tresca–St. Venant folyási feltételhez

A 69. ábrán a folyási határfeszültségig terhelt szakító próbatest Mohr-köre látható (a feszültségállapot egytengelyű). Eszerint a próbatest képlékeny alakváltozásának megindulásakor, más szavakkal a "képlékeny folyás" megindulásakor az anyagban ébredő legnagyobb csúsztató feszültség a következő:

$$\tau_{max} = k = \frac{R_{p0.2}}{2}$$

Az 69b. ábrán egy háromtengelyű feszültségi állapotban, képlékenyen alakított test P pontjában kialakuló feszültségállapot Mohr-köre látható, aminek alapján a következő összefüggés írható fel:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$



Atomerőműi Képzési Bázis

A Tresca–St.Venant-elmélet szerint, az előző összefüggések egyenlőségéből adódik a folyási feltétel:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = R_{p0.2}.$$

Ez az összefügés szobahőmérsékleten végzett alakításkor csak az alakváltozás megindulásához érvényes, mivel az anyag a hidegalakítás hatására keményedik és a folyási határfeszültség nő (R_{p0.2} az anyag eredeti állapotában mért folyáshatára). Az alakváltozás hatására változó folyási határ jelölésére az alakítási szilárdság fogalma a használatos, amelyet kf-fel jelölünk. A Tresca–St. Venant folyási feltétel így a következőképpen alakul:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_f$$
.

A szilárdságtanban a redukált (összehasonlító) feszültség összefüggése a következő:

 $\sigma_{red} = \sigma_1 - \sigma_3$.

A folyási feltétel tehát általánosan a következőképpen is felírható:

 $\sigma_{red}=k_f$

Ha a redukált feszültség HMH-elmélet szerinti összefüggését ebbe az összefüggésbe helyettesítjük, akkor a folyási feltétel bonyolultabb és pontosabb összefüggését kapjuk, nevezetesen:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = k_f$$

A két különböző elmélet szerinti összefüggés legfeljebb 15% eltérért eredményez, ezért az egyszerűbb összefüggést (Tresca–St.Venant) alkalmazzuk.

3.2.2 Alakváltozási mérőszámok

A 70. ábrán a vázolt d_0 átmérőjű, A_0 keresztmetszetű és I_0 hosszúságú darabot I_k hosszúságúra nyújtunk, aminek következtében átmérője d_k -ra, keresztmetszete A_k -ra csökkent. A nyújtás közbeni pillanatnyi hossz I, a pillanatnyi átmérő d.

70. ábra. Vázlat az alakváltozási mérőszámok értelmezéséhez





Ha az / hossz dl-lel megnő, akkor a tengelyirányú mérnöki nyúlás elemi része a következő:

$$d\epsilon_z = \frac{dl}{l_0}$$

a valódi nyúlás elemi része pedig:

$$d\varphi_z = \frac{dl}{l}.$$

A hossz I_0 -ról I_k -ra változásához tartozó véges nyúlásértékek a következő összefüggésekkel számolhatók:

$$\epsilon = \int_{l_0}^{l_k} d\epsilon_z = \frac{1}{l_0} \int_{l_0}^{l_k} dl = \frac{l_k - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l_k}{l_0}$$
$$\varphi = \int_{l_0}^{l_k} d\varphi_z = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln l_k - \ln l_0 = \ln \frac{l_k}{l_0}$$

Képlékeny alakításnál – tehát nagy alakváltozásoknál – célszerűbb a valódi nyúlás használata. Hengeres darabok hengerszimmetrikus alakításakor a valódi nyúlás az átmérőből is kiszámítható. Hengerszimmetrikus alakváltozások esetén az alakváltozás jellemzésére a fajlagos keresztmetszet-változást (*q*) is használjuk, ami a 70. ábra jelölésével a következő:

$$q = \frac{A_0 - A_k}{A_0} = \frac{\Delta * A_k}{A_0}$$

Az ϵ és a q értékei puszta számok, amelyeknek a százalékos értékét is használjuk. A φ esetében a %-nak nincs értelme. Az alakított darab térfogatállandóságának feltételéből az előző alakváltozási mérőszámok egymásból átszámíthatók.

Az alakváltozás sebességét sz egységnyi idő alatt megvalósult valódi nyúlásként értelmezzük, azaz:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$$

Ha a 70. ábrán vázolt / hosszúságú darab alsó végét rögzítjük, felső végét pedig v sebességgel húzzuk, akkor az dt idő alatt dl=v·dt-t mozdul el, így

$$d\varphi = \frac{dl}{l} = \frac{vdt}{l}$$

Ezt behelyettesítve kapjuk az alakváltozási sebességre a következőt:

$$\dot{\varphi} = \frac{v}{l}$$

Az alakváltozási sebesség tehát nem azonos a szerszám sebességével; mértékegysége [1/s]. A 71. ábrán egy fősíkkal határolt hasáb képlékenyalakítás előtti és utáni méretei láthatók.



71. ábra. Vázlat a térfogatállandóság levezetéséhez



Képlékenyalakítás hatására a test térfogata gyakorlatilag nem változik, így az ábra alapján igaz az x₀*y₀*z₀=x_k*y_k*z_k egyenlőség. Ebből elemi átalakítással kapható a következő összefüggés:

$$\frac{x_k}{x_0} * \frac{y_k}{y_0} * \frac{z_k}{z_0} = 1$$

majd mindkét oldal természetes logaritmusát véve kapjuk:

$$ln\frac{x_k}{x_0} * ln\frac{y_k}{y_0} * ln\frac{z_k}{z_0} = 0$$

A kifejezés bal oldalán a három irányban megvalósult valódi nyúlások szerepelnek, így kifejezhető a térfogatállandóság az adott koordináta rendszerben:

$$\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z$$

illetve a főnyúlásokkal:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$$

3.2.2 Az alakítási szilárdság hideg- és melegalakításkor

A képlékeny alakváltozáskor a kristálytani síkok egymáson történő elcsúszásával, transzláció valósul meg. Az alakváltozás közben a diszlokációk mozognak, sokszorozódnak és egymásra torlódnak. Hidegalakítás fémtani értelemben akkor történik, ha az alakítás közben nem játszódik le olyan jelenség, amely a növekvő diszlokációsűrűséget nem csökkentené, tehát ha az alakítás közben nincs újrakristályosodás. Ez a színfémek esetén hozzávetőleg a Kelvin fokban mért olvadáspont 40%-ánál kisebb hőmérsékleten áll fenn. Hidegalakításkor az alakítás következményei a következők:

- a szilárdsági jellemzők (R_m, k_p) növekedése és az alakváltozási jellemzők (A, Z) csökkenése, amelyeket együtt "a hidegalakítás okozta keményedésnek" nevezünk,
- a krisztallitok nyújtottá válnak,
- az általában inhomogén feszültségi és alakváltozási állapot miatt ún. maradó feszültségek keletkeznek,



 a csúszósíkok igyekeznek befordulni a legnagyobb főnyúlás irányába, így a különböző krisztallitok kristályrácsa – amely az alakítás előtt rendezetlen volt, rendeződik. Ezt a rácsrendeződést alakítási textúrának nevezzük.

Melegalakításkor, tehát az újrakristályosodási hőmérsékletnél nagyobb hőmérsékleten végzett alakításkor, az alakítás hatására szintén nő a diszlokációsűrűség, de egy bizonyos energiaszint elérésekor megindul az újrakristályosodás, és ennek hatására a megnövekedett diszlokációsűrűség csökkenése is. Ez a dinamikus újrakristályosodás. Az egységnyi térfogatú anyagban időegységenként létrejövő diszlokációsűrűség növekedés az alakváltozási sebességtől (φ) függ, a diszlokációsűrűség időegységenkénti csökkenése pedig adott hőmérsékleten az energiaszint, tehát az aktuális diszlokációsűrűség függvénye. Ebből következik, hogy adott hőmérsékleten végzett alakításkor az aktuális diszlokációsűrűség, így az alakítási szilárdság (k_p) is annál nagyobb, minél nagyobb az alakváltozási sebesége. Melegalakításnál az adott összetételű anyag alakítási szilárdsága a hőmérséklet és az alakváltozási sebesség függvénye.

A melegalakítás közben megnőtt diszlokációsűrűség az alakítás befejezése után, még az alakítás hőmérsékletén eredeti értékére csökken, így a lehűlés után nem érzékelhető alakítás okozta keményedés. Az előzőek értelmében hidegalakításkor az alakítási szilárdság (k_p) – kivéve a szélsőségesen kicsi és a szélsőségesen nagy alakváltozási sebességeket – csak igen kis mértékben függ az alakváltozás sebességétől, és ha ettől eltekintünk, akkor csak a hőmérsékletnek és az utolsó lágyítás óta bekövetkezett alakváltozás nagyságának a függvénye. Adott anyag szobahőmérsékleten végzett alakításakor az alakítási szilárdságot a k_r - φ görbe, az úgynevezett "folyási görbe" alapján határozhatjuk meg.

A 72. ábrán egy koordinátarendszerben láthatók a $(k_f - \varphi)$ az $(R' - \varphi)$ és az $(R_m - \varphi_e)$ görbék. Ismert, hogy a szakítóvizsgálat eredményeiből megszerkeszthető $(R' - \varphi)$ diagram. Ha ezt a maradó valódi nyúlás függvényében szerkesztjük, akkor a szakító próbatest egyenletes nyúlásának a végéig, azaz az mpontig a folyási görbét nyerjük. A egyenletes nyúlás végétől a szakadásig a szakító próbatest kontrahál, és a kontrahált rész feszültségállapota nem egytengelyű húzás, hanem három húzó főfeszültséggel jellemezhető ($\sigma_r = \sigma_r > 0$), ezért ebben a tartományban az $R'(\varphi)$ görbe a $k_f(\varphi)$ görbe fölött van. Az utolsó lágyítás után hidegen $\varphi > \varphi_m$ mértékben alakított anyagból kimunkált szakító próbatest kontrakcióval kezdi maradó alakváltozását. Ezért ebben a tartományban igaz az $R_m(\varphi) \cong k_f(\varphi)$ közelítő egyenlőség.



72. ábra. A folyási görbe, a szakítóvizsgálattal felvett valódi feszültséggörbe és a hidegen alakított huzalokon mért $(R_m - \varphi_c)$



Ahhoz, hogy egy egytengelyű húzással terhelt próbatestnek egyenletes (kontrakció nélküli) nyúlása legyen, az szükséges, hogy teljesüljön a következő feltétel:

$$\frac{dk_f}{d\varphi} > k_f \quad .$$

A kis alakváltozási sebességgel ($\varphi = 0.02s^{-1}$) járó melegszakító vizsgálatoknál ez a következő:

$$\frac{dk_f}{d\varphi} \approx 0$$

Így a próbatest kontrakcióval kezdi a maradó alakváltozást, azaz a szakító szilárdság és a folyási határ, ami az alakítási szilárdság, azonos:

$$k_{f[\tau,\phi]} = R_{m[\tau,\phi]}$$

A 73. ábrán látható, acélokon, magas hőmérsékleten mért szakítószilárdság-értékek, a melegalakítás hőmérsékletén (T > 600°C), a mérésnél alkalmazott alakváltozási sebességhez tartozó alakítási szilárdságnak tekinthetők. 1100°C-on (φ =0.02 1/s alakváltozási sebességgel végzett alakítás-kor) az alakítási szilárdság a hidegen mérhető folyáshatárnak ($R_{\rho 0.2} = k_{\rho}$) hozzávetőleg a tized része. Az egészen nagyméretű darabokat ezért nagy hőmérsékleten és kis alakváltozási sebességgel – kovácso-lás helyett sajtolást alkalmazva – alakítják.

73. ábra. Különböző szakítószilárdságú acélok alakítási szilárdsága T ≥ 600 °C hőmérsékleten



3.2.4 Alakíthatóság

Egy anyagot akkor tekintünk jól alakíthatónak, ha törésig nagy mértékű alakváltozást visel el és ha az ehhez az alakváltozáshoz szükséges, térfogategységre vonatkoztatott munka kicsi. A törésig elviselt alakváltozást befolyásoló tényezők az alábbiak:

- feszültségállapot,
- hőmérséklet,
- alakváltozási sebesség.



A törésig elviselt alakváltozást célszerű a om / kf függvényében ábrázolni, 74. ábra, ahol

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

az anyagban ébredő közepes, más szóval hidrosztatikus feszültség, k, pedig a vizsgált anyag alakítási szilárdsága.

A gyakorlati alakító műveleteknél σ_m/k_f értéke +0,5 (lemezek nyújtó húzása) és –20 közé esik. Az utóbbi érték az ún. hidrosztatikus extrudálásra jellemző, ahol nagy nyomású (5000–20000 MPa) munkafolyadék sajtolja ki a az anyagot a szűkülő résen és – alumíniumot extrudálva – az egy műveletben elérhető keresztmetszetarány elérheti akár a 15000 értéket is. Ehhez $\varphi=\ln A_0/(A_{kész}=9,6$ tartozik.

Az alakítási hőmérséklet növelésével – néhány kivételtől eltekintve – nő az alakváltozási képesség. Ez a hatás különösen jelentős a primer karbidokat nem tartalmazó acéloknál, amelyek szobahőmérsékleten α+Fe₃C fázisokból álnak és A₃ fölött viszont csak ausztenit fázist tartalmaznak.

Az alakítási sebesség acéloknál szobahőmérsékleten nem befolyásolja az alakíthatóságot.

A melegalakítás hőmérséklet-tartományban az alakváltozási sebesség növelése általában növeli az alakíthatóságot.

> 74. ábra. Különböző anyagok alakíthatósága szobahőmérsékleten a feszültségállapot függvényében



Az előzőkből következik, hogy az alakíthatóság nem elidegeníthetetlen tulajdonsága az anyagnak, ezért a különböző alakító műveleteknél a törés bekövetkezése nélküli alakváltozásokat az ún. technológia vizsgálatokkal határozzák meg. Ha az alakítás a melegalakítás hőmérséklet-tartományban (az újrakristályosodási hőmérséklet fölött) történik, akkor az egymást követő alakító műveletek (pl. a rúd szál-keresztmetszetét csökkentő hengerlő műveletek, a "szúrások") általában addig ismételhetők, amíg az anyag le nem hűl.

Az acélok melegalakítási hőmérséklete 1100–1200°C, a befejező hőmérséklete pedig az A3-nál nem sokkal magasabb hőmérséklet. Az acél szemcsenagysága az alakítási hőmérsékletre való hevítés és az ottani hőntartás során eldurvul. A melegalakítás hatására kialakuló szemcsenagyságot az ún. melegalakítási újrakristályosodási diagramokon ábrázolják, 75. ábra.





75. ábra. Két különböző széntartalmú acél újrakristályosodási diagramja

A diagramokon látható, hogy a legnagyobb mértékű szemcsedurvulás ~5–10% duzzasztás esetén következik be.

Ha nagy hőmérsékleten kismértékű alakítást végzünk, akkor – hasonlóan a hidegalakítás utáni újrakristályosító izzításhoz – durva újrakristályosodás megy végbe. Finomszerkezetű melegen alakított terméket akkor kapunk, ha $\varphi > 0,25$ mértékű alakítást végzünk és az alakítást nem nagy hőmérsékleten, hanem az A₃ hőmérséklet közelében fejezzük be. Hidegalakításnál az alakváltozás következményei megmaradnak, így a hidegalakítás törés bekövetkezte nélkül megvalósítható mértéke korlátozott. Ezért a kis falvastagságú termék estén 5–6 újrakristályosító izzítást kell alkalmazni. Megjegyezzük, hogy a hidegalakítás okozta keményedést, mint szilárdságnövelő hatást, ki is szokták használni. Ilyenkor előre megtervezik, hogy az utolsó lágyítás után milyen mértékű hidegalakítást végeznek.

3.2.5 Hengerlés

A hengerlést, mint technológiai folyamatot úgy lehet jellemezni, mint forgó hengerekkel folyamatossá tett nyújtó kovácsolást. Ennek során az anyag előírt mértékű képlékenyalakváltozást szenved. Ez az alakváltozás az anyag belső mikroszerkezetének változásával jár, amelynek következtében az alakított fém tulajdonságai megváltoznak. Ezért lényegesen különbözik a fémek alakjának forgácsolással történő megmunkálástól, mivel ez utóbbi művelet során csak a termék alakja változik a belső tulajdonságok lényeges változása nélkül A hengerlés során a fém képlékenyen deformálódik azáltal, hogy az ellentétes irányban forgó hengerek között áthalad. A hengerlés fő célja a fém vastagságának csökkentése. Rendszerint elhanyagolható a szélesség növekedése, így a vastagság csökkenése a hossz növekedését eredményezi. A 76. ábrán az elemi hengerlés vázlata látható, feltüntetve a hengerelt darab méreteit.



76. ábra. A hengerelt darab méretváltozásai



- Szúrás előtti méretek: magasság h, szélesség b, hosszúság 1, ;
- Szúrás utáni méretek: magasság h, szélesség b, hosszúság 1, .

A magasság és a szélesség szorzatából kapjuk a szúrás előtti (A₀) és a szúrás utáni (A₁) keresztmetszetet. Szúrásnak nevezik a munkadarab egyszeri áthaladását a hengerek között. A kívánt végső szelvényt, illetve méretet több szúrással alakítják ki. A darabnak a hengerek közötti összes áthaladásának számát **szúrásszám**nak nevezik.

A nyújtási tényező a hengerelt darab szúrásonkénti meghosszabbodásának mértékét fejezi ki:

$$\lambda = l_1 / l_0 > 1$$

A *l* értéke mindig nagyobb 1-nél, hiszen a szúrás keresztmetszet-csökkenést, ezáltal meghosszabbodást eredményez.

A hengerlési folyamat a befogással kezdődik. Befogásnak nevezik azt a folyamatot, amikor a hajtott hengerek maguk közé behúzzák a munkadarabot, 77. *ábra*. A befogás végén látható, hogy a munkadarab a nyomott ív mentén érintkezik a hengerek palástjával. A nyomott ív két pontja (A és B), valamint a henger középpontja által meghatározott szöget befogási szögnek nevezik.



77. ábra. A befogási szög



A hengerlésnél arra törekednek, hogy minél nagyobb nyomásokkal és így minél kevesebb szúrásszámmal érjék el a végső szelvényméretet. Azonban egy adott hengerátmérőnél a magasságcsökkentésnek (a befogási szög növelésének) határt szab a henger és a darab között fellépő súrlódás mértéke. A hengerlendő darabokat csak akkor képesek a hengerek behúzni, ha a befogási szög tangense kisebb, mint a súrlódási tényező. Ez a befogás feltétele, vagyis $tg\alpha < \mu$. A befogás tehát akkor megy könnyen végbe, ha nagy a súrlódási tényező, és ha kicsi a befogási szög.

A különböző fémek mind hideg, mind meleg állapotban képlékenyek. Az, hogy egy fém állapota milyen hőmérséklet-tartományban tekinthető hidegnek, illetve melegnek alapvetően az adott fém (vagy ötvözet) olvadáspontja határozza meg. Ezt legegyszerűbben az anyag homológ hőmérsékletével (T_{μ}) tudjuk egységesen kifejezni:

$$T_h = \frac{T_{akt}}{T_{olv.}}$$

ahol T_{akt} a fém tényleges hőmérséklete K-ben, T_{akt} az adott fém olvadáspontja K-ben kifejezve.

3.2.6 Kovácsolás

A szabadalakító kovácsolás alapműveletei a következők:

Nyújtás (szélesítés):

A művelet célja a munkadarab (szélességének) növelése, a keresztmetszet, illetve a magasság egyidejű csökkentésével. Rendszerint a nyújtó szerszámbetétek kőzött végzik, 78. ábra.



78. ábra. Nyújtás



Duzzasztás:

A párhuzamos nyomólapok között elhelyezett munkadarab keresztirányú mérete az erőhatás növelésével növekszik, a magasság egyidejű csökkenése mellett. Ha a párhuzamos nyomólapok közötti duzzasztást túl kis ütésekkel végzik, akkor a munkadarab középső keresztmetszetei kevéssé növekednek, mint a szerszámhoz közelálló részek. Normális körülmények között a szerszámtól távolabbi keresztmetszetek növekedése lesz nagyobb, 79. ábra.

79. ábra. Az ütés energiájának hatása a zömített darab alakjára.



Vágás:

A vágás célja a leszabás, egyes esetekben a felesleg eltávolításával (alakadás). Hidegen és melegen is végezhető. Rideg anyag és nagy keresztmetszet esetén többnyire csak melegvágást alkalmaznak, A vágott felület nem merőleges a munkadarab tengelyére (a vágóél szögétől függ), *80. ábra.*



80. ábra. Szerszám eltolódása vágásnál



Lyukasztás:

A lyukasztás egy vagy két oldalról végezhető. Első esetben a lyuk teljes térfogatának megfelelő anyagmennyiség a hulladékba kerül. Ha a lyukasztást két oldalról végzik, akkor a lyuk térfogatának megfelelő anyagmennyiség jelentős része a lyukasztó tüske elől oldal irányban kitér, csak bizonyos százaléka nyíródik el és kerül hulladékba, *81. ábra*. Abban az esetben, ha a furat átmérője nagyobb 450 mm-nél és a hossza meghaladja a másfél métert, a lyukasztást üreges tüskével végzik. Előnye az ilyen lyukasztásnak, hogy az öntecs középső, szennyezőkben dús részét eltávolítják.



81. ábra. Nyújtás egyoldalról, nyírásos vágással (a). Lyukasztás két oldalról (b).

Hajlítás:

A hajlítást megfelelő idomdarab, görgő- vagy hajlítószerszám felhasználásával végzik. Gépi hajlításnál hajlítószerszám alkalmazása szükséges, 82. ábra.







3.3 HŐKEZELÉS

A hőkezelés olyan szabályozott hevítésből, hőátadásból és hűtésből álló technológiai művelet, amellyel a termék tulajdonságai felhasználásának megfelelően módosíthatók. Vannak bizonyos hőkezelések, amelyeket meghatározott ötvözetcsaládhoz használnak, és vannak olyanok, amelyek függetlenek a hőkezelendő anyagtól. Az elvégzett hőkezelés eredményessége attól függ, hogy mennyire ismertek a munkadarabban lejátszódó folyamatok. Pontosan tudni kell, hogy milyen benne a hőmérséklet-eloszlás, és milyen annak időbeli változása.

Egyszerű lágyítás:

Az ötvözetlen és ötvözött szerkezeti acélok leggyakoribb lágyító eljárása, a hőkezelés két legfontosabb paramétere a hevítés hőmérséklete TI és a hőntartás ideje tl, az acél kémia összetételétől és szövetszerkezettől függ. Az egyszerű lágyítás hőmérséklete: $T_i = A_{c_1} - \Delta T$, ahol: $\Delta T=20-40^{\circ}$ C. Ötvözetlen acélok esetén az A_{c_1} hőmérséklet a Fe-Fe₃C állapotábra A_{η} hőmérsékletével (723°C) vehető egyenlőnek. Ötvözött acélok esetén (az ötvözők A_{c_1} hőmérsékletre kifejtett hatásának figyelembevételével) a lágyítás hőmérséklete a kémiai összetétel ismeretében számítható.

Izotermás lágyítás

Izotermás lágyítással jól megmunkálható szemcsés perlites szövetszerkezet érhető el viszonylag rövid hőkezelési ciklussal. Izotermás lágyításkor az ausztenitesítési (edzési) hőmérsékletről az A_{r1} hőmérséklet alatt választott izotermára hűtjük a darabot, és e hőmérsékleten tartjuk a perlites átalakulás befejezéséig, majd levegőn hűtjük a környezeti hőmérsékletre, 83. ábra.



83. ábra. Izotermás lágyítás



Teljes lágyítás:

A teljes lágyítás célja a megfelelő keménységű ferrit-perlites (vagy perlites) szövetszerkezet előállítása. A hőkezelés elvi hőmérséklet–idő diagramja a *84. ábrán* látható. A teljes lágyítás tervezéséhez alapvető segédlet az adott acél folyamatos hűtési C-görbéje. Az ausztenitesítési hőmérsékletről az előírt keménységet biztosító lehűlési vonal mentén a perlites átalakulás végét jelző görbeág alá (P pont) hűtik a munkadarabot a környezeti hőmérsékletig.

84. ábra. Hőkezelés hőmérséklet–idő diagram





Újrakristályosító hőkezelés:

A képlékeny hidegalakítással készített alkatrészek előállítása többnyire csak az alakító műveletek közé iktatott újrakristályosító izzítással oldható meg. A szükséges izzítások száma és helye a műveleti sorrendben műszaki és gazdasági tényezők függvénye. Az újrakristályosított acél legfontosabb jellemzője a szemcsenagysága. Az adott acél újrakristályosodási diagramja, (*85. ábra*) az alakított, majd adott ideig izzított próbák szemcsenagyságát (d) tünteti fel az alakítás mértékének(φ) és az izzítás időtartamának a függvényében (T). Az ábrán látható, hogy van egy olyan mértékű alakítás, amely jelentős mértékű szemcsedurvulást eredményez. Ezt mindenképpen kerülni kell.



85. ábra. Acél újrakristályosodási diagram

Feszültségcsökkentő izzítás:

A feszültségcsökkentő izzítás célja különböző alkatrészekben a maradó feszültségek csökkentése olyan szintre, hogy közben a jellemző mechanikai tulajdonságok ne csökkenjenek. Ezért a feszültségcsökkentő izzítás hőmérséklete általában kisebb, mint 650°C. A hőkezelés elvi hőmérséklet–idő diagramja a 86. ábrán látható.





86. ábra. Feszültségcsökkentő izzítás hőmérséklet-idő diagram

Martenzites edzés:

Célja: martenzites vagy bainites szövetszerkezet létrehozása. A martenzites edzés hőmérséklete a hipoektoidos acélok (C<0,80%) edzésére érvényes $T_{edz} = A_{c3} - \Delta T$, összefüggéssel számíthatjuk, ahol a ΔT ,=20–40°C. Az Ac3 hőmérsékletet Fe–Fe3C állapotábrából olvashatjuk le. A cél az, hogy az alkatrész olyan hőmérsékleten legyen, ahol a szövetszerkezet ausztenit. Ennek a műveletnek másik jellemzője a hűlési sebesség, amit úgy kell kiválasztani, hogy a darab minél jobban átedződjön. A gyakorlatban három hűtőközeget alkalmaznak, amelyek a hűlési sebesség függvényében a következők: víz, olaj, levegő. A nem kellően választott hűtőközeg edzési repedéshez vezethet. Az nagy ötvözőtartalmú acélok esetén a levegőhűtés is teljes keresztmetszetben imartezitet eredményez. A martenzit a γ - α átalakulás eredménye, az α vasnak a C-nel túltelített szilárd oldata.

Megeresztés:

A megeresztés célja az edzett, rideg, martenzites szövetszerkezetet az igénybevételek számára megfelelővé tenni, azaz a rideg állapot csökkentése és a szívósság növelése. Ezt az A₁ hőmérséklet alatt végrehajtott hevítéssel, hőntartással és azt követő hűtéssel érhetjük el, *87. ábra.*



87. ábra. Megeresztés



Atomerőműi Képzési Bázis
Nemesítés:

A nemesítés, amelynek elvi hőmérséklet–idő diagramja a 88. ábrán látható, két művelet eredménye. Az első művelet a martenzites edzés, a második művelet pedig a nagyhőmérsékletű megeresztés.





3.4 HEGESZTÉS

A hegesztés olyan oldhatatlan kötést eredményez, amely az anyagokat (fémeket vagy nemfémes anyagokat) megfelelő hőmérsékletre való emeléssel, nyomás alkalmazásával vagy anélkül, vagy csak nyomás alkalmazásával hevítés nélkül, hozaganyaggal vagy anélkül egyesíti. A hegesztés olyan kötést képvisel, ahol az alkatrészek rendkívül erős kohéziós kapcsolatba kerülnek egymással, szilárdságilag ez a lehető legerősebb kötés (mintha az anyagokat az atomi vonzások tartanák össze).

Az egyesítendő részek anyagai között molekuláris kapcsolat létesül. Molekuláris kapcsolat az anyag molekuláit szilárd állapotban összetartó igen nagy erő, az ún. kohéziós erő. A hegesztés során ezt a belső erőt az anyag felmelegítésével legyőzzük, az atomok elmozdulnak egymáson, az anyag megolvad. Ez a megolvadt anyag az ömledék. Az egyesítendő munkadarabok atomjai egymásban elvegyü1nek, majd az ömledék lehűlése során az összekevert anyag megszilárdul és ismét létrejön a korábbi szilárd állapotban meglévő összetartó belső erő. A munkadarabok anyagát alapanyagnak, a leolvasztásra kerülő hegesztőpálcát, bevont elektródát, huzalt pedig együttesen hegesztőanyagnak nevezzük. A megolvadt alapanyag és a leolvasztott hegesztőanyag együttesen alkotja a hegfürdőt, majd megszilárdulás után a hegesztési varratot.

Ha összehasonlítjuk a hegesztést a szerkezetgyártásnál még gyakori oldható (pl. csavarozott) és roncsolással oldható/oldhatatlan (pl. szegecselt) kötésekkel, az alábbi főbb *előnyeit* említhetjük meg:

- az átlapolások, szegecsek, csavarok elmaradása kb. 25%-os anyagmegtakarítást eredményez,
- az illesztési helyeken a keresztmetszet nem gyengül,
- a kötés szilárdsága a legnagyobb.



Hátrányai:

- a hegesztendő alapanyag minőségével és a hegesztés előtti előkészítésével szemben nagyobbak a minőségi követelmények,
- a helyileg korlátozott hőhatás kedvezőtlen belső feszültségeket ébreszt, deformáció következhet be, amely a szerkezet felhasználhatóságát csökkentheti, illetve amelynek elkerülésére külön gondot kell fordítani.

A hegesztett tompakötés fő részei a következők: varratfém, hőhatásövezet (ahol felmelegszik az anyag, de nem olvad meg), alapanyag, 89. ábra.



89. ábra. Tompakötés fő részei

A hegesztéseket két vagy több elem oldhatatlan kötésére használva kötőhegesztésről, egy elem felületére egy célszerűen megválasztott anyagot felhegesztve, felrakóhegesztésről (plattírozás) beszélünk. A hegesztett kötés központi része a varrat, amely hozaganyag és az alapanyagok olvadékának heterogén keverékéből dendritesen kristályosodott. A varrat kétoldalán attól függően, hogy az összehegesztett darabok milyen vastagságúak, az alapanyagok szerkezete a hőbevitel hatására megváltozik ezért hőhatásövezetnek nevezzük. Ennek határa a varrattól az a távolság, ahol a hőmérséklet már nem haladta meg a 100°C-ot.

3.4.1 A hegesztő eljárások rendszerezése

A hegesztőeljárások osztályozása az eljárások fizikai és kémiai hátterének sokszínűsége miatt összetett feladat. Alapvetően két hegesztési főcsoport különböztethető meg: ömlesztő és sajtoló, lásd a táblázatot.

Hegesztési főcsoport	Hegesztési alcsoport	Külső sajtolóerő	Helyi hevítés maximális hőmérséklete
Ömlesztő	_	Nincs	Olvadáspontot meghaladja
Soitoló	Szilárd fázisú	Van	Olvadáspontot nem éri el
Sajtolo	Folyékony fázisú	Van	Olvadáspontot meghaladja



Hegesztési mód (a hegesztés folyamata) szerint:

- ömlesztő hegesztések, melyeknél az alapanyagot valamilyen hőenergia közléssel megolvasztják, és hozaganyag hozzáadásával/vagy anélkül hozzák létre a hegesztési varratot,
- sajtoló hegesztések, ahol az alapanyagokat nagy mechanikai energiával (felületegységre eső nagy erővel) sajtolják össze.

Energiaforrás szerint:

- villamos energia segítségével végzett eljárás (pl. ívhegesztések, plazmahegesztés),
- termokémiai elven működő eljárások (pl. gázhegesztés, termithegesztés),
- sugárenergia által végzett eljárások (pl. elektronsugaras, illetve lézersugaras hegesztés),
- villamos ellenállás elvén működő eljárások (pl. ellenálláshegesztések),
- mechanikai energia felhasználásán alapuló eljárások (pl. sajtoló hegesztés).

Varratvédelem szerint:

- látható ívű hegesztési eljárások,
- nem látható ívű hegesztési eljárások (pl. por alatti hegesztés).

Hegesztéshez szükséges eszközrendszer, a hegesztés kivitele szerint:

- kézi hegesztési eljárások,
- részben gépesített hegesztő eljárások,
- gépesített hegesztő eljárások.

3.4.2 Hegesztési eljárások csoportosítása az MSZ EN ISO 4063 szerint

Az ISO tagszervezete az Internetional Standardisation of Welding, mint a Nemzetközi Hegesztési Intézet (International Institute of Welding, IIW) szabványosítási szervezete, készített egy eljáráscsoportosítást és az egyes eljárásokat a gépi adatkezelés megkönnyítése érdekében háromjegyű számkóddal látta el. Az ISO-csoportosítás szerint a hegesztésnek és rokon eljárásainak kilenc főcsoportja van, ebből az ívhegesztések az elő főcsoportba tartoznak. A főcsoporton belül vegyes szempontok szerint csoportokat és alcsoportokat hoztak létre. Az ívhegesztések közül döntően salakvédelmi eljárások kapták a 11 és 12, a gázvédelműek a 13, 14 és 15 csoportjelet.



17. táblázat. Az atomerőműi gyakorlatban előforduló hegesztési eljárások az MSZ EN ISO 4063 szerint

Jelölés	Hegesztési eljárás
111	Fogyóelektródás, védőgáz nélküli ívhegesztés (MMAW) Manual metal-arc welding
121	Tömör huzalelektródás, fedett ívű hegesztés Submerged Arc welding with solid wire electrode
131	Tömör huzalelektródás, semleges védőgázos ívhegesztés (MIG-hegesztés tömör huzalelektródával) Metal Arc inert gas welding: MIG-welding
135	Tömör huzalelektródás, aktív védőgázos ívhegesztés (MAG-hegesztés tömör huzalelektródával) Metal Arc active gas welding
136	Porbeles huzalelektródás, aktív védőgázos ívhegesztés (MAG-hegesztés porbeles huzalelektródával) Flux-cored arc welding with active gas shield
14	Volfrámelektródás, védőgázas ívhegesztés Gas-shielded welding with non-consumable elektrode
141	Tömör huzallal/pálcával végzett volfrámelektródás, semleges védőgázas ívhegesztés (tömör hozaganyagos TIG-hegesztés), Tungsten Inert Gas (arc) welding (wolfram electrode) with solid -wire or -rod and inert gas
151	Huzalelektródás, semleges védőgázos plazmaívhegesztés (plazmasugaras MIG-hegesztés)
152	Poradagolásos plazmaívhegesztés; Powder Plasma Arc Welding
51	Elektronsugaras hegesztés. Electron beam welding

3.4.3 Paks II atomerőmű-létesítése során alkalmazott hegesztési eljárások

Fogyóelektródás, védőgáz nélküli ívhegesztés (MMAW):

Kézi ívhegesztés, más néven árnyékolt fémíves hegesztés (SMAW), bevonatos elektródás hegesztés a legelterjedtebb ömlesztő hegesztési eljárás. A kézi hegesztés során a hozaganyagként működő elektróda és a munkadarab között elektromos ív gyúl. A 90. ábrán látható, hogy a fém elektróda szolgál mind az ív hordozására, mind pedig az ömledék képzésére. Amint a huzal leolvad, a bevonat lebomlik, védőgázt bocsát ki, salakréteget képez, ezáltal mindkettő megvédi a hegesztés területét a szennyeződésektől. A bevonat a varrat védelme mellett ívgyújtó és ívstabilizáló hatást is kifejt, emellett metallurgiai szerepe is van a hegfürdő dezoxidálásában, nitrogéntelenítésében, továbbá a varratfém ötvözésében.







90. ábra. Tömör huzalelektródás, semleges védőgázos ívhegesztés (MIG)

A bevonatokat a salakjuk kémhatása, illetve az összetevők alapján savas, bázikus, rutilos és cellulózos fő típusokra oszthatjuk. Az alkáliföldfémeket, karbonátokat (pl. CaCO₃), folypátot (CaF₂) és ferroötvözőket tartalmazó, bázikus bevonatú elektródával készített varratok mechanikai tulajdonságai a legkedvezőbbek. A bevonat higroszkópos tulajdonsága miatt az elektródákat felhasználásuk előtt 250-300°C-on, 2–3 órán át szárítani szükséges.

A hegesztett anyagtól függően egyen vagy váltóáram használható. Egyenáram használatakor, ha a fém pozitív és az elektróda negatív, akkor egyenes polaritásról beszélünk; ellenkező kapcsolásnál fordított polaritásról van szó. Az egyenes polaritásnál általában nagyobb a hőhatás. Az MMAW olcsó eljárás, vastagságok és hézagok széles skáláján alkalmazható. Sokoldalú, szabadban és nehéz helyeken is elvégezhető.

Gáz-fém ívhegesztés (GMAW):

Az eljárás korábbi neve MIG (metal, inert gas, azaz fém, inert gáz) hegesztés, argonnal vagy más inert gázzal árnyékolt fogyóelektródás hegesztés, 91. ábra. Némi oxigént vagy szén-dioxidot (aktív gáz) szoktak hozzáadni a hegesztési fröccsenés csökkentésére és az ívstabilitás javítására (néha MAG-nak hívják – Metal Active Gas). Az elektróda a tekercselt, bevonat nélküli huzal, amelyet automatikusan meghajt a motor.



91. ábra. Tömör huzalelektródás hegesztés (MIG)



A hegesztési helyzet és a fémvastagság meghatározza az alkalmazott átviteli módszert. A GMAW gyors és gazdaságos, mivel nincs gyakori elektródacsere, könnyen használható minden helyzetben, és tiszta a fluxus hiánya miatt. A berendezés összetettebb és költséges, és nehéz hegeszteni vele sarkokban vagy más nehéz területeken.

Volfrámelektródás ívhegesztés (TIG):

Az eljárás a nem fogyóelektródás, védőgázos ívhegesztések csoportjába tartozik. A folyamat hőforrása a nem leolvadó, nagy olvadáspontú volfrámelektróda és a munkadarab között égő elektromos ív. Az ív a gázban létesül, amelyet az elektródát koncentrikusan körülvevő gázfúvókával vezetnek a munkadarab, illetve az ömledék fölé. A védőgáz legtöbbször semleges: argon, de lehet hélium is. A hozaganyagot külön adagolják, ami történhet a hegesztő által vagy huzalelőtoló-berendezés segítségével. Az eljárást az angol tungsten inert gas kifejezésből képzett TIG betűszóval, vagy jellemzően az amerikai kontinensen elterjedt *gas tungsten arc welding* kifejezés GTAW rövidítésével azonosítják.

A hegesztési folyamatot és a hegesztőégőt a 92. ábra szemlélteti. A villamos áram lehet egyenirányított és váltakozó. Egyenirányított esetben az egyenes polaritású kapcsolás preferált – azaz a W-elektróda a negatív, a munkadarab a pozitív pólus –, mivel így a katódfolt stabilan az elektródán helyezkedik el, az ív égése nyugodt, és az energia nagyobb része a munkadarabot hevíti. Az ausztenites rozsdamentes acélok hegesztését általában egyenárammal végzik. Váltakozó áram használatakor a pólusok időben folyamatosan cserélődnek a munkadarab és a W-elektróda között, lehetővé téve a vastag oxidhártyával borított fémek, például alumínium és magnézium hegesztését.





Egyes hegesztő áramforrások lehetőséget biztosítanak az alapáram periodikus, lüktetésszerű növelésére. Az ún. impulzusos üzemmódban a hegesztési folyamat jellemzői, mint például az anyagátvitel vagy a hőbevitel könnyen szabályozhatóvá válik. Utóbbi rozsdamentes acélok hegesztésénél kívánatos, mivel lehetőséget ad kisebb hőbevitellel történő hegesztésre. Az impulzusos hegesztés másik előnye a könnyű automatizálhatóság, így a gépesített hegesztési eljárások nagy számban alkalmazzák A 141 jelű eljárásnál az áramerősség értékei 25–30 %-kal nagyobbak, mint a 111-es eljárás értékei, annak ellenére, hogy az elektróda mérete nagyobb, mint a pálcáé. Mivel a 141-es eljárással végzett hegesztés lassabb, a kisebb termikus hatásfok ellenére a hőbevitel értékei 22–27%-kal nagyobbra adódnak.



Fedettívű hegesztés (SAW):

Ez az eljárás lényegében az ívhegesztés automatikus formája. Az elektródatartóba beépített adagoló cső fedőport (porított fluxust) táplál az előkészített kötés helyére, közvetlenül az elektróda előtt. A fluxus beborítja az elektróda olvadó végét és az ívet, nagy része megolvad, és salak védőbevonatot képez a hegesztett fém tetején, *94. ábra*. A salak könnyen leválasztható, amikor a fém lehűlt. Jó minőségű varratot nagy sebességgel és mély behatolással lehet előállítani. Az eljárást széles körben használják nagy mennyiségű hegesztéshez, például nagy átmérőjű csövek vagy tartályok gyártása során. Ezt alkalmazzák a VVER–1200 reaktortartály kovácsolt öveinek az összekötésére is. Általában csak vízszintes pozícióban alkalmazzák.



94. ábra. Fedőpor alatti hegesztés

3.4.4 Ausztenites rozsdamentes acélok hegesztése

Az ausztenites rozsdamentes acélok hegeszthetőségét az anyag mechanikai és hőfizikai tulajdonságai befolyásolják. Mivel hőtágulásuk az ötvözetlen acélokénál ~50 %-kal nagyobb, ez a hegesztésük során kedvezőtlen és a befogott darab vetemedhet. Az ausztenites típusok kis hővezető képességük miatt kevésbé vezetik el a hőt a varrattól, ezért hegesztésük a szénacélokéhoz képest kevesebb hő bevitelével elvégezhető. Így nem csak a fent ismertetett hibák kerülhetők el, de a bevitt hő által az anyag korrózióállóságát csökkentő folyamatok is. Ellenben a hegesztés környezetében kialakuló nagy hőmérséklet gradiens a darab hűlésekor maradó feszültséget eredményezhet. Felrakó hegesztésnél a hűlés közbeni zsugorodás növeli a szerkezet sajátfeszültségeit, amit hegesztés utáni hőkezeléssel lehet csökkenteni. A fröcskölést meg kell akadályozni, mivel az alapanyagon megszilárdult cseppek megbontják a passzív réteget, és korróziós helyek létrejöttét okozhatják.

A rozsdamentes acélból készült munkadarabok hegesztésre való előkészítésénél a tisztaság elsőrendű szempont. A darabok vágásához, leélezéséhez, csiszolásához olyan eszközöket kell használni, amelyeket másféle, pl. ötvözetlen acél alkatrészekhez nem használtak. Kerülni kell a munkadarab nem korrózióálló anyagokkal való elszennyezését, a vágásból, köszörülésből származó vaspor lerakódását. Ez a műhelyi gyakorlatban jelentheti akár a rozsdamentes anyag térbeli elkülönítését. A hegesztést megelőzően a munkadarabot, illetve a kialakítandó varrat környezetét zsírtalanítani kell, nagy figyelmet fordítva a hegesztés közbeni elszennyeződés, például rézsaruk, rögzítés által okozott sérülések elkerülésére.



Atomerőműi Képzési Bázis

Az elkészült varraton és hőhatásövezetén kialakult futtatási színt pácolással vagy mechanikai úton el kell távolítani. Utóbbi esetben használt drótkefe drótkorong anyaga rozsdamentes acél vagy műanyag lehet.

3.4.5 Átmeneti varratok hegesztése

A leggyakoribb eltérő tulajdonságú fémpár, amelyet hegesztéssel kötnek össze, a szénaacél és rozsdamentes acél, bár hasonló problémák merülnek fel más fémpárokkal is. A fő probléma oka a hővezetőképesség, a hőtágulás és a mikroszerkezeti problémákat okozó összetétel. Az első kettő gyakran a beolvadási hibákat és deformációt okoz. Ezeket megfelelő előmelegítéssel és megfelelő befogási eljárásokkal el lehet kerülni. Az összetétel és a mikrostruktúra miatti problémákat nehezebb megoldani. Ha az ausztenites rozsdamentes acélhez szénacélt hegesztünk az ömledék szenet old (95. ábra), ami keményedéshez és repedéshez vezethet.

95. ábra. Átmeneti varrat szénacél oldali hőhatás övezete széneloszlással (SEM EDS)



A probléma megoldásához általában egy "vajazó" réteget (párna réteget), hegesztenek a szénacél felületére. Ez a kisebb méreteknél nem minden esetben lehetséges, ilyenkor a vajazó réteg lesz a varrat. A Schaeffler-diagram felhasználható a különböző fémvarratok mikrostruktúrája meghatározásához, 96. ábra.







A króm és a nikkel ekvivalenseinek kiszámolásával a két alapanyag pontjait a diagramon ábrázolva és azok az összekötő vonallal a mikrostruktúra becsülhető. A piros színnel jelöltek szerint szénacélt (A pont) hegesztenek össze 316 korrózióálló acéllal (B pont). Ha hegesztés hozaganyag nélkül történik, akkor a varratfém fém 50/50 összetételű lenne (C pont). Ha 309 töltőanyagot (23Cr/13Ni) használunk (D pont), akkor a hegesztési összetétel valahol a CD vonal mentén lesz. 30%-os hígítással számolva (E pont) már megfelelő (2–8%) mennyiségű ferritet tartalmazó ausztenites mikrostruktúrát lehet elérni.

3.4.6 Hegesztési felügyelet

Az atomerőművek létesítése és üzemeltetése során meghatározó tevékenység a hegesztés. A biztonsági osztályba sorolt berendezések gyártása és/vagy szerelése során hegesztést végző szervezetnek rendelkeznie kell hegesztési felügyelettel. Így az MSZ EN ISO 14731:2019 szabványnak megfelelő hegesztési felügyelet létrehozása már a létesítési fázisban célszerű. E fázisban a hegesztési felügyelet fő tevékenysége a tervdokumentációk felülvizsgálata és a beszállítók tanúsítása, felügyelete. A feladatok és felelősségek meghatározásánál a szabvány előírásai az irányadók. A hegesztési felügyelet tevékenységének sajátossága, hogy az atomenergia alkalmazása körében eljáró független műszaki szakértőről szóló 247/2011. (XI. 25.) Korm. rendelet szerinti hegesztési nukleáris szakértő nem áll rendelkezésre.

N9.4 OAH útmutató 1. verzió – Új atomerőmű berendezéseinek hegesztése:

Az atomerőművi berendezések gyártása során a hegesztési tevékenységek végzéséhez az alkalmazni kívánt hegesztéstechnológiát minősíteni kell. A minősítést a nyomástartó berendezések és rendszerek biztonsági követelményeiről és megfelelőség tanúsításáról szóló 44/2016. (XI. 28.) NGMrendelet alapján feljogosított független szervezet adhatja ki. Az adott tevékenységre a minősítést kiadó szervezetnek a Nemzeti Akkreditáló Hatóság által kiadott akkreditációval kell rendelkeznie. A minősítés alapját minden esetben az MSZ EN ISO 15607 szabvány előírásai adják. A hegesztéstechnológia minősítése alapvetően az MSZ EN ISO 15614 szabványsorozat 2. szintje előírásainak megfelelően történjen, de lehetőség van a következő módokon történő minősítésre is:

- Hegesztéstechnológia minősítése szabványos hegesztéstechnológia átvételével, az MSZ EN ISO 15612 szabvány előírásainak megfelelően;
- Hegesztéstechnológia minősítése gyártás előtti hegesztési próbával, az MSZ EN ISO 15613 szabvány előírásainak megfelelően;

Hegesztési utasítás (WPS):

A WPS-t a tanúsított WPQR alapján a gyártónak kell elkészítenie. Az ABOS 1–3 osztályba sorolt berendezések hegesztése esetén minden hegesztési varrathoz kell WPS-t készíteni, és a hegesztést csak annak előírásai alapján szabad elkészíteni. A WPS-t az MSZ EN ISO 15607 szabvány és az MSZ EN ISO 15609 szabványsorozat eljáráshoz tartozó szabványának előírásai alapján kell összeállítani. A WPS-nek tartalmaznia kell a szabvány által kötelezőnek megjelölt adatokat, valamint ezeken kívül a következőket:

- a berendezés megnevezését és azonosítóját, amely hegesztéséhez a WPS készül;
- a berendezés ABOS-besorolását;
- a varrattérkép azonosítóját, amelyhez a WPS tartozik;
- a hegesztés helyszínét (gyártómű vagy helyszíni).



Atomerőműi Képzési Bázis

A hegesztéstechnológia minősítésének jegyzőkönyvét (WPQR) az útmutató szerint kell elkészíteni. A WPQR tartalmára az MSZ EN ISO 15607 szabvány ad általános előírásokat. A WPQR-hez minden esetben csatolni kell a felhasznált alapanyag(ok) és hegesztőanyag(ok) MSZ EN 10204 szerinti műbizonylatait. A WPQR alapján elkészíthető a végleges, gyártásba adható WPS.

3.5 GYÁRTÁSI HIBÁK

3.5.1 Kovácsolás

A kovácsolt acélgyártmányokban található hibák származásuk szerint négy csoportba sorolhatók. Az első csoportba tartoznak az anyaghibák, vagyis már a kovácsolásra kerülő öntött acél meglevő hibái. Ennek okai: helytelen betétanyag és olvasztási eljárás vagy helytelen öntéstechnológia. A normálisnál nagyobb kén- és oxigéntartalom salakosságot okoz, aminek követelménye az elnyújtott salakzárványok és az azokból kiinduló repedés lehet.

Az úgynevezett melegtörékenység szintén az acél születési hibája. A szokásosnál nagyobb kén és oxigéntartalom esetén, az acélban alacsony hőmérsékleten olvadó vas-oxiszulfid eutektikumot hoz létre. Ez a primer kristályhatárok mentén helyezkedik el és a melegalakítás hőmérsékletén már folyékonnyá válik, és a szemcsék közötti kohéziós erőt lecsökkenti. Az acél ezt követően különösen a húzóigénybevétel esetén veszti el ellenállóképességét, így a melegtörékenység elsősorban a húzóigénybevételnek kitett helyek felszakadásában nyilvánul meg.

A pelyhesség rendszerint nagyobb méretű ötvözött (pl. 1–3% CrNi-tartalmú) kovácsdarabokban fordul elő. A pelyhek az acél csiszolt keresztmetszetén apró, a kristályhatároktól függetlenül haladó repedések, a töretben pedig kör vagy ellipszis alakú foltok formájában jelentkezik, *97. ábra*. A pelyhes foltok törésfelülete rendszerint fehér, csillogó, durvább szemcsézetű, mint a darab többi része. A pelyhek a melegalakítás után a lehűlés közben keletkeznek. Okozójuk az acél hidrogéntartalma. A folyékony acélban oldott hidrogén egy része a megszilárdulás után is oldatban marad. A melegalakítás után, amikor az acélt lehűtjük, a H oldóképessége és a H diffúzióképessége egyaránt jelentősen csökken.

A γ - α -átalakulás szintén csökkenti az acél hidrogénoldóképességét. Ha hűlés lassú és a keresztmetszete nem túl nagy, a hidrogén kidiffundálhat az acélból. Gyorsabb lehűlés esetén ez a folyamat csak a darab felületén megy végbe, a darab belsejében a H₂ nyomása annyira megnő, hogy a kritikus hőmérséklet közben (200°C–150°C) repedéseket okoz. Ha a pelyhes acélt a kovácsolás hőmérsékletére újból felmelegítjük, átkovácsoljuk, azután lassan hűtjük, a pelyhek elmaradnak. Az acél hidrogéntartalmát kb. 300...400°C-on való huzamos izzítással lehet csökkenteni. Ilyen kezelés a pelyhesedést megszünteti.

A második csoportba a kovácsolási hibák tartoznak. Az első hibát az okozza, hogy a kovácsolási hőmérséklet túl magas. Ez főképpen a keményebb, ötvözött acélminőségeknél szokott előfordulni. Egyrészt azért, mert ezek az acélok ridegebbek, repedésre hajlamosak, mint a lágy minőségűek, másrészt pedig azért, mert az ötvözött acélok hővezetőképessége kisebb, mint a szénacéloké, így a gyors felmelegítéskor a darab széle és közepe hőmérséklete között nagy a különbség. A felmelegített és kitágult külső réteg a hidegebb belső részre nagy húzóigénybevétel fejt ki, ez a darab belsejében rendszerint hosszirányú repedéseket okoz.



A kovácsolt darabok felületén gyakran láthatunk kovácsolási gyűrődésből (rálapolódásból) származó repedést.

A harmadik csoportba a konstrukcióból, a helytelen forgácsoló megmunkálásból eredő hibákat soroljuk. A hibák e három csoportját bármilyen állapotban levő (hőkezeletlen, normalizált, nemesített, kérgesített) kovácsdarabban megtalálhatjuk. A negyedik csoport a hőkezelési hibák csoportja. Ezek a különféle acéloknál más és más formában jelentkeznek.



97. ábra. Pehelyrepedések

3.5.2 Hegesztés

Hegesztési hibáknak az adott hegesztési fémben, a hegesztési technológia helytelen alkalmazása eredményeként kialakult eltéréseket nevezzük. Hegesztési hibák előfordulhatnak a hegesztett fémen (varratfémen) kívül vagy belül. Néhány hiba megengedett, ha azok a megengedett határértékek alatt vannak, de más hibákat, például repedéseket nem lehet elfogadni.

A hegesztési hibák két típusba sorolhatók: mint külső és belső hibák, 98. ábra.







A hegesztési repedés a hegesztési hibák közül a legkevésbé megengedett hiba. Hegesztési repedések lehetnek a hegesztési anyag felületén, belsejében, vagy a hőhatásövezetben. A repedések különböző hőmérsékleten jelenhetnek meg. A meleg repedés a hegesztési kötések kristályosodása során keletkezik, ahol a hőmérséklet meghaladhatja 1000°C-ot. A hideg repedés a hegesztési folyamat végén jelentkezik, amikor a hőmérséklet meglehetősen alacsony. Néha a hidegrepedés néhány órával a hegesztés után vagy akár néhány nap múlva keletkezik.

A hegesztési repedés okai:

- az adott fém gyenge rugalmassága,
- maradó feszültség jelenléte,
- a kötés merevsége, ami megnehezíti a fémek tágulását vagy összehúzódását,
- magas kén- és széntartalom,
- hidrogén használata védőgázként.

A hegesztési repedések elkerülhetők megfelelő anyagok használatával, a hegesztendő anyag előmelegítésével és a hűtési sebesség csökkentésével, illetve a hegesztési varrat szélességének csökkentése útján.

A szélbeégés okai:

- magas ívfeszültség,
- nem megfelelő elektróda használata, vagy az elektróda szöge nem megfelelő,
- a szükségesnél nagyobb átmérőjű elektróda használata,
- nagy elektródasebesség.



Atomerőműi Képzési Bázis

A szélbeégés elkerülhető az ívhossz és az ívfeszültség csökkentésével, az elektróda szögének 30–45 fok közötti tartásával, kisebb átmérőjű elektróda alkalmazásával, az elektróda haladási sebességének csökkentésével.

A fröcskölés okai:

- magas hegesztőáram,
- minél hosszabb az ív, annál nagyobb a valószínűsége ennek a hibának,
- helytelen polaritás,
- nem megfelelő gázvédelem.

A fröcskölés elkerülhető az ívhossz és a hegesztőáram csökkentésével, a megfelelő polaritással és a lemez szögének növelésével, illetve megfelelő gázvédelem alkalmazásával.

A porozitás okai:

- az elektróda nincs megfelelően bevonva,
- hosszabb ív használata,
- nagy hegesztőáram,
- rozsda vagy olaj a hegesztési felületen.

A porozitás elkerülhető az elektróda megfelelő kiválasztásával, a hegesztőáram csökkentésével, kisebb ív használatával, a folyamat lelassításával, hogy a gázok kiszökhessenek, a felületen lévő rozsda vagy olaj eltávolításával.

Magas korona okai:

- nem megfelelő hegesztési technika,
- nagyméretű elektródák használata,
- nagy hegesztőáram.

Elkerülése érdekében megfelelő technikát kell alkalmazni, kis átmérőjű elektródát és kisebb hegesztőáramot kell használni.

A kráter okai:

- helytelen szög,
- nagy átmérőjű elektróda használata,
- nem megfelelő hegesztési technika.

Kráter képződése elkerülhető megfelelő szög, kisebb elektróda és megfelelő technika használatával.



A salakosság okai:

- a hegesztési áram sűrűsége nagyon kicsi és nem biztosítja a szükséges hőmennyiséget a fémfelület olvasztásához,
- a hegesztési sebesség túl nagy,
- a hegesztési felület szélét nem tisztítják meg megfelelően,
- helytelen hegesztési szög.

A salakosság elkerülhető az áramsűrűség növelésével, a hegesztési sebesség megfelelő beállításával, a hegesztési szélek megtisztításával és a korábbi hegesztési rétegek salakjának az eltávolításával, megfelelő elektróda szög és haladási sebesség beállításával.

A hiányos beolvadás okai:

- az alacsony hőbevitel,
- a hegfürdő túlságosan nagy és az ív előtt fut,
- a hegesztő elektróda vagy huzal szöge túl kicsi,
- kis élelőkészítési szög.

A hiányos beolvadás elkerülhető a hegesztőáram növelésével és a menetsebesség csökkentésével, a leolvadás csökkentésével, az élelőkészítési szög növelésével, az elektródák és a pisztoly szögének megfelelő beállításával.

3.5.3 Esettanulmányok a gyártási hibák előfordulására

Pelyhesség belga reaktortartályokban:

A belgiumi Doel atomerőmű 3. blokkja reaktortartályán 2012-ben kiegészítő ultrahangos vizsgálatot végeztek a tervezett időszakos ellenőrzés során. A kiegészítő vizsgálat célja a reaktortartály belső felületén lévő plattírozás alatti folytonossági hiányok detektálása volt a tartály alapanyagának egy részében. A blokk 1982 óta üzemelt, az üzemeltetés közbeni időszakos ellenőrzése az ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI alapján történt. Ez a kód nem írja elő az alapanyag vizsgálatát, ezért az ultrahangos vizsgálatok a tartály hegesztett kötéseire és azok közvetlen környezetére terjedtek ki.

A kiegészítő vizsgálat során nem találtak plattírozás alatti hiányokat az alapanyagban, de detektáltak 158 "lamináris", azaz a tartályfal felületével párhuzamos vagy közel párhuzamos folytonossági hiányt. A váratlan eredmény hatására megismételték a vizsgálatot a tartály alapanyagának 100%-án, aminek során több ezer indikációt észleltek. A folytonossági hiányok átlagos átmérője 10–14 mm volt. Néhány hónappal később a szintén belga Tihange 2 atomerőmű reaktortartályának alapanyagában ugyan kisebb számban, de hasonló indikációkat találtak (a két reaktortartályt azonos technológiával, ugyanott gyártották). A blokkok újraindítását a belga hatóság nem engedélyezte. Az újraindítás engedélyezése érdekében az üzemeltető Electrabel (GDF–SUEZ Csoport) elvégeztette az esetek részletes elemzését és a tartályok biztonságának igazolását a hatóság felé.

A belga és a felkért nemzetközi szakértők véleménye szerint a folytonossági hiányok gyártási eredetűek voltak és az acél túlságosan nagy hidrogéntartalmával voltak összefüggésben. A hidrogén,



ahogy korábban ismertettük, az acél tulajdonságait kedvezőtlenül befolyásolja, kritikus mennyiségen túl pelyhesedéshez, azaz a kristályhatároktól függetlenül haladó repedések keletkezéséhez vezet.

A pelyhesedés függ az öntött tuskó makro-dúsulási jellemzőitől (vegyi összetétel, dermedéskor kialakuló összetételi inhomogenitások, és a gyártás során fellépő zavarok).

Az adott esetben az is feltételezhető volt, hogy a pelyhesedést okozó hidrogén a reaktortartály gyártástechnológiájának későbbi lépéseiben (gyűrűk kovácsolása, hőkezelése) került az acél anyagába. A belga reaktortartályok falának anyagában kialakult pelyhek (azaz repedések) "lamináris" elhelyezkedéséből arra lehetett következtetni, hogy a pelyhesedés a gyártás második szakaszában, azaz a gyűrűk kovácsolása után, feltehetően a viszonylag nagy hőmérsékletű edzés utáni lehűlés közben, vagy ez után a művelet után néhány órával következett be. A gyártóműi vizsgálatok dokumentumai nem igazolták a folytonossági hiányok gyártási eredetét. A 99. ábra egy hasonló gyártástechnológiával, a reaktortartályok gyártóművében készült gőzfejlesztő köpeny metszetét mutatja. Jól láthatók benn a dúdulások mentén elhelyezkedő pehelyrepedések.

99. ábra. Pehelyrepedések



Dúsulás a Flamanville 3 reaktortartály elemeiben:

2015 közepén fedezték fel a Franciaországban épülő EPR-típusú atomerőművi blokk (Flamanville 3) reaktortartály acél összetételének eltérését. A reaktortartály fenék- és fedél alapanyagában karbon dúsulást találtak. A fedél karboneloszlását mutatja a *100. ábra.*



100. ábra. Flamanville 3 reaktortartály fedél anyagának karbontartalom-eloszlása



A felső blokk átmérője 4720 mm, vastagsága 232 mm (a fenék 4675 mm külső átmérőjű és 147 mm vastag). Anyaguk öntöttvas kokillába öntött, 16MnD5 jelű acél, amelynek karbontartalma max. 0,22%, foszfortartalma max. 0,020%, kéntartalma max. 0,012. A gyártástechnológia elemzése adott magyarázatot arra, hogy miként fordulhatott elő ez az állapot. Az öntés befejezése után az acél úgy kristályosodik, hogy a tuskó keresztmetszet közepén még teljesen folyékony, amikor a szélén már egészen szilárd a kéreg. Ezen belül pedig pépszerű állapotban levő rész van.

A acélok szilárd oldatként kristályosodnak, ennek következtében a kialakuló pozitív hőmérsékletgradiens ellenére az ún. konstitúcionális túlhűlés következtében lehetséges a sugaras kristályosodás, aminek dúsulás a következménye. Ennek az a magyarázata, hogy a kristályosodó acél mindkét fázisa más összetételű, mint maga az acél. A kristályok kevesebbet, az olvadék pedig többet tartalmaz valamennyi ötvöző- és szennyező elemből, mint a kokillába öntött olvadék. Ha a két fázis bármelyike az eredeti helyétől elmozdul, ez az összetétel helyi megváltozását is okozza. A tuskó anyagának a kristályosodása közben ilyen mozgás mindig van, ennek eredményeképpen a tuskó részeiben jelentős összetételi különbség, dúsulás jön létre, *101. ábra.*



101. ábra. Öntött acéltuskó kristályai és pozitív és negatív dúsulási helyei

A tuskó további feldolgozása során a pozitív és negatív dúsulások a késztermékben az alakítástól függően fognak elhelyezkedni. Ez attól függően, hogy ennek milyen a mértéke, az anyagtulajdonságokban is jelentkezhet. A bemutatott esetben karbon dúsulását mutatták ki a fedél és a fenék meghatározott helyein. Mindkét elem gyártása azonos módon történt, és ennek megfelelően az eltérés is azonos helyen jelentkezett. A meleg alakítás előtt az acéltuskó két végét eltávolították, majd zömítéssel a darabot lapították. Ezáltal a megmaradt dúsulási helyek a középre kerültek. A továbbiakban a készre alakítás előtt még kimunkáltak egy darabot, azonban a dúsulás a helyén maradt.



Kristályközi korrózió RBMK-reaktor ausztenites korrózióálló acél vezetékein

RBMK ejtőcsövek károsodása 1997-ben vált ismertté. Itt a szeparátor ejtőcsövek hegesztési varratainak hőhatásövezetében keletkeztek repedések, *102. ábra.* A repedések kristályközi korrózió kialakulására utaltak. Az alkalmazott szerkezeti anyag titánnal stabilizált 08H18N10T acél, ezért a károsodás meglepetésként érte az akkori szakembereket. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség külön programot indított az okok megállapítására; a program eredménye a következő okokat sorolta fel:

- Az alapanyag érzékenysége, amelyet a nagy széntartalom, az alacsony stabilizációs arány és a hegesztés alatti magas hőbevitel idézett elő.
- A cső belső felületének deformációja a hegesztés előkészítése során.
- A hegesztés geometriai eltérései, amelyek gyorsítják a repedés kialakulását (a hőhatás-övezetben a hegesztés zsugorodása miatt).
- Maradó (é /vagy üzemi) feszültség.
- A repedés felületén kloriddal jelzett környezeti paraméterek (ismert kondenzátorszivárgás), ezért lehetetlen kizárni a szulfát behatolást, a víz szennyeződéseit és a víz oxidáló erejét.
- Üzemelés során fellépő feszültségingadozások.

102. ábra. Kristályközi korróziós repedés RBMK-reaktor NA300 mm vezetéke hegesztési varrat hőhatásövezetében



Az anyag érzékenységével kapcsolatban – több hegesztési kísérlet után – nyilvánvalóvá vált, hogy voltak olyan esetek, amikor a hőhatásövezet hosszabb ideig volt az érzékenységi zónában, 103. ábra.







A kiterjedt vizsgálatok azt is kimutatták, hogy az érzékenység nem minden esetben érinti az összes kristályhatárt. Ez olyankor fordul elő, amikor az érzékenységi mezőben kevesebb ideig volt az adott anyagtérfogat.

A meghibásodások vizsgálata során kifejlesztettek egy elektrokémiai mérési módszert, aminek a mérőszáma a kritikus érzékenység КПДР. Ez a szám arányos azzal, hogy milyen mértékű a kristályhatárokon a karbidkiválás. A *104. ábra* mutatja a kritikus érzékenységű kristályhatárok maródását és a hozzá tartozó КПДР-mérőszámot. A mérőszám függ a szemcsemérettől.





Megvizsgálták a kritikus érzékenységet a talált és feltárt repedések mentén. A 105. ábra azt mutatja, hogy a repedések maximális mérete 13 mm volt. Ebben a mélységben már lecsökkent az érzékenység mértéke, és a maradó feszültég értéke is olyan mértékben változott, hogy további repedésterjedéshez már nem volt elegendő.





105. ábra. A kritikus érzékenységi tényező a feltárt repedések mélysége függvényében

Volt még egy olyan körülmény, amire a vizsgálatok során derült fény, ez pedig a Ti/C arány. Ennek eredménye azt mutatta, hogy a szabványnak megfelelő Ti/C esetén volt a legnagyobb a repedésterjedés valószínűsége, *106. ábra.*



106. ábra. A repedésterjedés valószínűsége a Ti/C függvényében

Látható, hogy a titánnal stabilizált ausztenites acéloknál is kialakulhat korróziós érzékenység, ami adott körülmények között kristályközi korróziós repedéshez vezethet. Mivel a TTT diagramok érzékenységi területének alsó burkolója nem vízszintes, ezért 50 üzemév felett már nem zárható ki egyértelműen ezeknél az acéloknál az ún. alacsony hőmérsékletű érzékenység megjelenése. A paksi blokkok hosszú távú üzemeltetésének megalapozásához mindenképpen indokolt ennek a lehetőségnek a további vizsgálata, illetve kizárása.



3.5.4 Javító tevékenység

A berendezések gyártásakor a technológia betartásának ellenére, különböző okok miatt, hibák keletkezhetnek. Az atomerőmű-létesítésekor a berendezéseket már készen szállítják a helyszínre, ezeket a vonatkozó előírások szerint gyártották. Ezekben csak olyan eltérés lehet, amit a kódok/szabályzatok megengednek. A helyszíni szerelés során többnyire hegesztett kötések készülnek. Ezek vizsgálata roncsolásmentes módszerekkel történik. Fontos, hogy a vizsgálatok a gyártás, szerelés olyan szakaszában történjenek, amikor egy nem megengedhető folytonossági hiány eltávolítása a legkisebb mennyiségű anyag eltávolításával történik.

Ha a hiány felülete kifutó és mérete nem nagy, akkor egy egyszerű lemunkálással eltávolítható. A nagyobb hiányok esetén az eltávolított anyagmennyiséget pótolni kell, ami hegesztéssel történik. A javításhoz természetesen hegesztéstechnológiát kell készíteni. Ennek alapeleme a WPS, aminek megalapozásához ismerni kell a javítandó anyag tulajdonságát, ami meghatározza a technológiai folyamatot. A VVER–1200 blokkokhoz ötvözetlen, különböző mértékben ötvözött és korrózióálló acélokat használnak. Ezek hegesztéses javításához az adott anyagminőséghez készített javítástechnológiák állnak rendelkezésre.

Egy hiba megszüntetését jó esetben egyszeri javítással meg lehet oldani, de van olyan eset, is főként a létesítéskor, a helyszínen készült varratoknál, hogy a javítás nem sikeres. Ebben az esetben az ismételt javításhoz újabb műszaki megfontolást (csőszakasz csere) figyelembe véve lehet a hibát javítani. A következőkben a különböző anyagok hegesztéssel történő javítására mutatunk példákat.

Reaktortartály-hegesztések javítása:

A reaktortartály 15Cr2NiMoVA, 15Cr2NiMoVA-A, 15Cr2NiMoVA Class 1 alapanyagainak, hegesztési varratainak javítása a következők szerint történik.

Minden hegesztési varratból el kell távolítani a következő, nem megengedhető hibákat:

- A varrat alakja és mérete nem felel meg a termék szabványának, műszaki előírásának vagy a műszaki rajzán szerepló követelményeknek.
- Repedések, égési sérülések, lyukak, alámetszések, beolvadási hiányok, amelyek meghaladják az roncsolásmentes vizsgálat elfogadási szintjét.
- Egyéb hibák, amelyek meghaladják a hegesztésekben a roncsolásmentes vizsgálat során a NP-105-18 követelményét.

A hegesztett kötésnek vagy a környezetének hibáit legfeljebb háromszor szabad javítani. Ebben az esetben a korrigált terület az a legkisebb területű téglalap, amelybe a hegesztendő, eltávolítandó terület illeszkedik, és a szomszédos felületek megegyeznek a megadott téglalap szélességének háromszorosával, *103. ábra*).





107. ábra. A javítható terület méretének meghatározására szolgáló rajz

A hegesztési kötések hibáinak kijavításakor a következő rendelkezéseket kell betartani:

- ha repedést észlel, a hegesztést le kell állítani, és csak a repedések eltávolítása és a megelőzésük megtétele után lehet folytatni,
- a varratgyök eltávolításának száma ugyanazon a területen nem haladhatja meg a hármat,
- az eltávolítások száma (kivéve a hegesztési gyökérrész eltávolítását) az eltávolítási mélységben a hegesztési varrat két rétegének névleges vastagságán belül nincs korlátozva,
- a leszerelések száma (kivéve a gyökhegesztési rész eltávolítását), amelynek eltávolítási mélysége meghaladja a varrat két rétegének azonos területen lévő névleges vastagságát, nem haladhatja meg a hármat.

Egy jellemző hiba (csonkvarrat) kimunkálás példája látható a 108. ábrán.





108. ábra. Csonkvarrat-kimunkálás



Az eltávolításnak sima körvonalakkal kell rendelkeznie, éles átmenet és sorja nélkül. A kiköszörülés végének legfeljebb 5 mm-es lekerekítéssel kell rendelkeznie. Az eltávolítási mélységet a hiba mélysége határozza meg. Ha egy repedést távolítanak el, a kimunkálás végeit pontosan (helyszíni metallográfia, folyadékbehatolásos vagy mágnesezhető poros vizsgálati módszerrel) kell meghatározni, és a repedés végénél 2–3 mm-rel nagyobb átmérőjű fúróval kell fúrni, majd a hibás fémet teljesen el kell távolítani.

A hiba eltávolítását követően a hegesztésre előkészített felületet és a szomszédos, legalább 20 mm szélességű fém ellenőrzését folyadékbehatolásos vagy mágnesezhető poros vizsgálati módszerrel kell elvégezni. Kétes esetekben a hibák eltávolításának teljességét ultrahangos vizsgálattal is ellenőrizni kell.

A 15Cr2NiMoVA, 15Cr2NiMoVA-A és 15Cr2NiMoVA Class 1 acélok hegesztett kötéseinek javításához a hegesztőanyagokat a *18. és 19. táblázat*ban megadott (NP-104-18, GOSZT R 58721-2109) követelményeknek megfelelően kell használni.

Alapanyagok	Bevonatos elektródák kézi ívhegesztéshez	Hegesztőhuzalok és fedőporok automata hegesztéshez	Hegesztőhuzalok kézi argon ívhegesztéshez
15Cr2NiMoVA, 15Cr2NiMoVA-A vagy 15Cr2NiMoVA 1.oszt.	РТ-45А РТ-45АА РТ-45Б	Sv -12Cr2Ni2MoA Flux ФЦ-16, Flux ФЦ-16A Sv -12Cr2Ni2MoAA, Sv -12Cr2Ni2MoAA- BД, Sv -12Cr2Ni2MoAA-BИ Flux ФЦ-16A Sv -09XГНМТА Flux HФ-18M Sv -09XГНМТАА-BИ Flux HФ-18M, Flux 4Q-16A	Св-12Сr2Ni2MoA, Св-12Сr2Ni2MoAA, Св-12Сr2Ni2MoAA-ВД, Св-12Сr2Ni2MoAA-ВИ, Св-09ХГНМТА, Св-09ХГНМТАА-ВИ

	18.	táblázat.	Hegesztőany	yagok hegeszte	ési hibák javítá	sához varratokbar	i és alapanyagokban
--	-----	-----------	-------------	----------------	------------------	-------------------	---------------------



Alapanyagok	Bevonatos elektró- dák kézi ívhegesz- téshez (felrakáshoz)	Hegesztőhuzalok és fedőporok automata hegesztéshez (felrakáshoz)	Hegesztőhuzalok kézi argon ívhegesztéshez (felrakáshoz)
15Cr2NiMoVA, 15Cr2NiMoVA-A vagy 15Cr2NiMoVA 1.oszt.	УОНИИ-13/45 УОНИИ-13/45А УОНИИ-13/55	Sv-08AA Sv-08A Flux ФЦ-16 Flux ФЦ-16A Flux AH-42 Flux AH-42M	Sv-08ΓC, Sv-08Γ2C

19. táblázat. Hegesztőanyagok hegesztési hibák javításához varratok gyökében és perlites felrakó hegesztésekben

Védőgázként, ha nem fogyóelektródával hegesztenek, akkor a GOSZT 10157-2016 szerinti legmagasabb vagy első osztályú argon gázt kell használni.

A hibák hegesztéssel történő javítását előzetes és utólagos 150–300°C-ra történő melegítéssel kell elvégezni. A hegesztéssel javított hibákat, anélkül, hogy a hegesztési zóna 150°C alá hűlne, hőkezelni kell. A javított terület hevítését elektromos, gáz- vagy más fűtőberendezésekkel kell elvégezni, amelyek biztosítják a fém hőmérsékletét a varrat teljes hosszában, figyelembe véve az alapanyag egy részét is.

A hőmérséklet mérését a hegesztés előtt és hőkezeléskor a hegesztési oldalon, a fém felületén kell végezni, és a hőmérsékletnek a hegesztett (felrakott) varrattól 50 mm falvastagság esetén 100÷150 mm-re, ha a falvastagság 50 mm-nél nagyobb, akkor 150÷200 mm-re azonosnak kell lenni

Ferrit-perlites acélok hegesztési varratainak javítása:

Ebbe a körbe a következő alapanyag párosítások tartoznak:

- 10ГН2МФА, 10ГН2МФА-А; 10ГН2МФА, 10ГН2МФА-А alapanyagok hegesztett kötései
- 10ГН2МФА, 10ГН2МФА-А acélok hegesztett kötéseinek javítása szénacélokkal-Ст3сп5, 10, 15, 15Л, 20, 20Л, 25Л, 20К, 22К és szilícium-mangán acélokkal 15ГС, 16ГС, 20ГСЛ, 09Г2С, 09Г2СА-А;
- 10ГН2МФА, 10ГН2МФА-А acélból készült alkatrészek előzetes perlites felrakása

A leírás megfelel az NP-104-18, az NP-105-18, a GOST R 58721-2019 követelményeinek.

Hibák eltávolítása:

A hegesztett kötés azon részét kell javítani, amelyben a roncsolásmentes vizsgálat (RT vagy UT) a megengedhető méretet meghaladó méretű folytonossági hiányt (hibát) mutatott ki.

A hibák eltávolítása az előzőekben leírtakkal azonos módon, a NP-105-18 követelményeinek megfelelően történik. A hegesztésben a kimunkálás mérete nem korlátozott. Az eltávolítás hosszának mindkét oldalon 2–3 mm-rel meg kell haladnia a hiány hosszát. Az eltávolítási profilt a hibához képest szimmetrikusan kell elhelyezni, *109. ábra*. Az eltávolítási mélység 2–3 mm-rrel nagyobb, mint az ultrahangos vizsgálat által észlelt hiba mélysége.



A kimunkálás alján lévő sugár (keresztmetszetben) az 5 mm-nél kisebb falvastagságú daraboknál nem lehet kevesebb, mint 1,5 mm, az 5–10 mm-es falvastagságúaknál legalább 3 mm, a 10 mm-nél nagyobb falvastagságúaknál legalább 5 mm, *110. ábra.*





110. ábra. Kimunkálás varratban, hosszirányban (a) és keresztirányban (b)



A hibák eltávolításának teljességét, az eltávolítás konfigurációját, a hegesztésre előkészített felület és a szomszédos felületek minőségét szemrevételezéssel és méretellenőrzéssel kell ellenőrizni, majd 100%-os PT és/vagy MT-vizsgálatot kell végezni, beleértve az eltávolítás körüli fémet is legalább 20 mm szélességben. Kétség esetén a hibakimunkálás teljességét RT vagy UT segítségével is ellenőrizni kell.

Hegesztőanyagok:



A hegesztési varratok hibáinak javításához felhasználható anyagokat a 20. táblázat foglalja össze.

A hegesztendő anya- gok anyagminősége	Bevonatos elektródák kézi ívhegesztéshez	Hegesztőhuzalok és fedőpor automata hegesztéshez	Hegesztőhuzalok volf- rám elektródás kézi ívhegesztéshez
10ΓH2MΦA vagy10ΓH2MΦA- A-t 10ΓH2MΦA, 10ΓH2MΦA-A-hoz 22K-t 10ΓH2MΦA-hoz szén és mangán- szilicium acélokat 10ΓH2MΦA, 10ΓH2MΦA-A-hoz	ПТ-30 ЦЛ-59 ЦУ-7 ЧУ-7А УОНИИ-13/45, УОНИИ-13/45А, УОНИИ-13/45, УОНИИ-13/45А, УОНИИ-13/45А, УОНИИ-13/55, ЦУ-7, ЦУ-7,	Св-10ГН1МА Св-10ГН1МА-ВИ Flux ФЦ-16 Flux ФЦ-16A Св-10ГНМА Flux ФЦ-16, ФЦ-16A Св-08A, Св-08AA Flux АН-42, Ан-42M, Flux ФЦ-16, ФЦ-16A	Св-10ГН1МА, Св-10ГН1МА-ВИ, Св-10Г1СН1МА Св-08ГС Св-08Г2С Св-08Г2С, Св-08Г2С

20. táblázat. A hegesztési varratok hibáinak javításához felhasználható anyagok

Védőgázként, ha nem fogyóelektródával hegesztenek, akkor a GOSZT 10157-2016 szerinti legmagasabb vagy első osztályú argon gázt kell használni. Minden hegesztőanyagot az NP-104-18 követelményeknek megfelelően, a gyártásba bocsátás előtt minőségellenőrzésnek kell alávetni.

Előmelegítés, hőntartás és hőkezelés:

A 10ΓH2MΦA, 10ΓH2MΦA-A acélból készült hegesztett kötések javításakor, beleértve a szén- és szilícium-mangán acélból készült kötések hőmérsékletét, az acél minőségétől és a javított alkatrészek vastagságától függően kell beállítani. A temperálási hőmérsékletet a *21. táblázat* tartalmazza.

A hegesztendő anyagok anyagminősége	A hegesztendő alkatrészek névleges vastagsága, mm	Minimális hevítési hőmérséklet, ° C
10ГН2МФА	50 -ig	50
10I H2MΨA-A		120
2011 20K	100-ig 100 felett	100
22K	35 -iq	nem szükséges
10ГН2МФА	50 -ig	50
10ΓΗ2ΜΦΑ-Α	50 felett	120
22K	35 felett	100

21. táblázat. Temperálási hőmérsékletek



Különböző minőségű alkatrészek hegesztésekor az acél minimális előmelegítési hőmérsékletét állítják be, amelyhez magasabb előmelegítési hőmérséklet biztosított. A maximális fűtési hőmérséklet 150°C-nál nem haladhatja meg a beállított minimális fűtési hőmérsékletet. A javított terület előzetes és egyidejű fűtését elektromos-, gáz- vagy más fűtőberendezéssel kell elvégezni, amely biztosítja a fém előmelegítését a kötés teljes hosszában (kerületén), figyelembe véve az alapfém szomszédos zónáját.

Ausztenites korrózióálló acélból készült hegesztett kötések javítása:

A 12X18H9T, 12X18H9TЛ, 06X18H10T, 08X18H10T, 12X18H10T, 08X18H12T, 12X18H12T, 08X18H9, 09X18H9, 08X18H10, 10X18H93, 131, 1218, 9X18 ausztenites korrózióálló acélok hegesztési varratainak javítása védőgázos volfrámelektródás ívhegesztéssel (GTAW), félautomata argon védőgázos ívhegesztéssel (SAAW), védőgázos fém ívhegesztéssel (SMAW) és kombinált hegesztéssel (GTAW+SMAW) történik. Ezeknek a követelményeit az NP-104-18 és az NP-105-18 szabályzatok tartalmazzák.

Ezeknél az acéloknál is érvényes, hogy minden olyan hegesztett kötést meg kell javítani, amely az alábbi, nem elfogadható méretű hibákkal rendelkezik:

- A hegesztési varratok alakja és mérete nem felel meg a termék szabványának, műszaki előírásának vagy a műszaki rajzán szereplő követelményeinek.
- Nem lehetnek repedések, égési sérülések, lyukak, alámetszések, beolvadási hiányok, amelyek meghaladják a roncsolásmentes vizsgálat által megállapított értékeket.
- Egyéb hibák, amelyek meghaladják a hegesztésekben, a roncsolásmentes vizsgálat során a NP-105-18 követelményét.

A nem megfelelő korona esetén varratsor pótlással, túl magas varratkorona esetén lemunkálással lehet javítani. Abban az esetben, ha repedést találnak a hegesztett kötésben, a repedés végét maratással vagy behatoló folyadékos vizsgálattal pontosan meg kell határozni. A hibás szakasz eltávolítása előtt a repedésvégeken be kell fúrni olyan fúrószárral, amelynek átmérője 2–3 mm-rel nagyobb, mint a repedés szélessége. A repedések eltávolításának minőségét a PT-vel ellenőrizni kell.

Hegesztőanyagok:

A korrózióálló ausztenites acélok hegesztett kötéseinek javításához az NP-104-18, 2. függeléke követelményeinek megfelelő hegesztési anyagokat kell alkalmazni, 22. és 23. táblázat.



22. táblázat. Hegesztőanyagok ausztenites acélok hegesztett kötései hibáinak hegesztéséhez (kivéve az Ін és ІІн kategóriájú hegesztési kötéseket)

Felhasználható hegesztőanyagok				
Hegesztendő alkatrészek acélminőségei	Bevonatos elektróda kézi ívhegesztéshez	Hegesztőhuzal ar- gon védőgázos ívhe- gesztéshez (egyéb védőgázhoz is)		
12X18H9T,12X18H9TЛ, 06X18H10T,08X18H10T,12X18H10T, 08X18H12T,12X18H12T, 12X18H12M3TЛ, 10X17H13M3T	ЭА-400/10У,ЭА-400/10Т ЦТ-15К, ЦТ-26, ЦТ-26М ЭА-898/21Б	Св-04Х19Н11М3 Св-08Х18Н9Ф2С2 Св-08Х19Н10Г2Б Св-04Х20Н10Г2Б Св-03Х15Н35Г7М6Б		

23. táblázat. Hegesztőanyagok az IH és IIH kategóriájú hegesztett kötések hibáinak hegesztésére

Felhasználható hegesztőanyagok					
Hegesztendő alkatrészek acélminőségei	Bevonatos elektróda kézi ívhegesztéshez	Hegesztőhuzal ar- gon védőgázos ívhe- gesztéshez (egyéb védőgázhoz is)	Maximális üzemi hőmérséklet (°C)		
08X18H9, 09X18H9, 10X18H9,08X18H10, 08X18H10T*,12X18H10T*, 08X18H9, 09X18H9, 10X18H9,12X18H9, 08X16H11M3 03X16H9M2 08X16H11M3 08X16H11M3 08X18H10T*, 12X18H10T* acélból készült alkatrészek vastagságuk legfeljebb 10,0 mm lehet.	А-1, А-1Т А-2, А-2Т А-1, А-1Т ЦТ-26, ЦТ-26М А-1, А-1Т	Св-04Х17Н10М2, Св-02Х17Н10М2-ВИ Св-04Х17Н10М2 Св-03Х16Н9М2 Св-04Х17Н10М2	600 600 (12X18H9 esetén 450) 550 550		

Hegesztés:

A kimunkálásokat az NP-104-18 szabályzatban meghatározott hegesztési módszerek egyikével fel kell hegeszteni, a hegesztett kötések előállításához megfelelő hegesztő (töltő) anyagok felhasználásával. A következő hegesztési módszerek használata javasolt:

- védőgázos fém ívhegesztéssel (SMAW)
- védőgázos volfrámelektródás ívhegesztéssel (GTAW)
- kombinált hegesztéssel (GTAW+SMAW)
- félautomata argon védőgázos ívhegesztéssel (SAAW).

A hegesztési varrat gyöke javításainak száma ugyanabban a szakaszban nem haladhatja meg a hármat. A javítások száma (kivéve a gyök javítását), ha a hegesztési mélység a hegesztési varrat két



rétegének névleges vastagságán belül van, nincs korlátozva. Azon javítások száma, amelyeknél a kimunkálási mélység meghaladja a hegesztési varrat két rétegének névleges vastagságát ugyanabban a szakaszban, a javítás nem haladhatja meg a hármat.

Az ausztenites korrózióálló acélból készült alkatrészeket legalább +5°C környezeti hőmérsékleten kell hegeszteni. A hegesztés megkezdése előtt újra meg kell köszörülni az éleket és zsírtalanítani kell. Többrétegű varrat gyártásakor a hegesztési varrat minden felületének lerakása után a széleket alaposan meg kell tisztítani a salaktól, fémfröccsenéstől, és szemrevételezéssel ellenőrizni kell a repedések, elfogadhatatlan salak (volfrám) zárványok, pórusok, felületi hiányosságok (alámetszések) szempontjából. Ha kézi ívhegesztéssel javítunk, akkor célszerű 3 mm átmérőjű elektródával kezdeni a hegesztést. Folytatásként 4 mm átmérőjű elektróda is használható (4 mm-nél nagyobb átmérőjű elektródák használata nem ajánlott). Az ausztenites acélból készült alkatrészek többszörös hegesztett kötéseinek előállításakor a hegesztést minden egyes sor után le kell állítani, amíg a hegesztési varrat le nem hűl 100°C-nál nem magasabb hőmérsékletre.



A gyártás, szerelés és üzembe helyezés során alkalmazott anyagvizsgálati eljárások

4.1 BEVEZETÉS

4.

Anyagvizsgálatok végzése az atomerőmű életciklusa valamennyi szakaszában szükséges. Az életciklus legfontosabb szakaszai a következők:

- tervezés,
- berendezések gyártása
- technológiai szerelés, üzembe helyezés
- üzemeltetés (beleértve a karbantartást és ellenőrzést)
- leszerelés.

Az egyes szakaszok azon tevékenységeit, amelyek igénylik valamilyen anyagvizsgálat alkalmazását, a 111. ábra mutatja.



111. ábra. Anyagvizsgálat az atomerőmű életciklusának egyes szakaszaiban.

A tervezés során általában nem tényleges vizsgálatokról van szó, hanem arról, hogy a tervezőnek ismernie kell a későbbi szakaszokban végzendő vizsgálatokat és azok igényét figyelemben kell vennie a tervekben (pl. térbeli és időbeli hozzáférés). A gépésztechnológiai berendezések gyártása felöleli a kohászati eljárásokat, a képlékeny alakítást (hengerlés, kovácsolás, sajtolás), a hőkezelést, az esetleges kémiai (felület) kezelést, hegesztett szerkezetek (pl. tartályok) esetében a hegesztett kötések elkészítését és a forgácsoló megmunkálást. Mindezek során szigorú minőségi követelményeket kell betartani, azaz a berendezések nek a lehetőségek határain belül "hibamentesnek" kell lenniük, továbbá bizonyítani kell a berendezések hibatűrő képességét, mert így biztosítható az erőmű későbbi biztonsága és gazdaságossága. A vonatkozó elemző munkát az elvégzett anyagvizsgálatok eredménye verifikálja. A minőségi követelmények megjelennek a kémiai összetétel, a szövetszerkezet, szemcsenagyság,



zárványosság, a mechanikai tulajdonságok, átmeneti hőmérséklet, korrózióállóság, illetve az anyagok /hegesztési varratok folytonossági hiányoktól (szerkezeti inhomogenitás, repedés, gáz- és nemfémes zárványok, kötéshiba) való mentessége vonatkozásában.

Hasonló követelmények vannak a technológiai rendszerek szerelése közben. Itt nem csak az elkészült, számtalan hegesztett kötés ellenőrzéséről van szó, hanem a hegesztési technológiák alkalmasságának a minősítéséről, továbbá maguknak a hegesztőknek a minősítéséről is. Ezeknek a szabályai a világban egységesek és nemzetközi szabványokban találhatóak.

Az atomerőmű több évtizedet átfogó üzemeltetési időszakában talán a legfontosabb alaptevékenység a nyomástartó berendezések és csővezetékek időszakos ellenőrzése, ami periodikusan végzendő roncsolásmentes vizsgálatokból és nyomás-, illetve tömörségi próbákból áll. Az üzemeltetés közbeni vizsgálatok elvégezhetősége általában korlátozott. Ez jelentheti a hozzáférhetőség korlátozott voltát, de a reaktor hűtőkör berendezései esetében a radioaktív környezet okozta időbeli korlátozást. Ezért a periodikus roncsolásmentes vizsgálatokat jellemzően távirányítású manipulátorokkal végzik.

Az üzemeltetés időszakának másik – mechanikai és törésmechanikai vizsgálatokat igénylő – tevékenysége a reaktortartály-felügyelet kiszolgálása. Ennek lényege, hogy a 2.3.2 alfejezetben ismertetett sugárkárosodási folyamatot a reaktortartályban elhelyezett és besugárzott, majd meghatározott időközönként kiemelt próbatestek vizsgálata útján monitorozzák. Természetesen a besugárzott és felaktiválódott próbatestek vizsgálata csak speciális laboratóriumban végezhető.

Már az üzemeltetés időszakában, de a leszerelés közben és azt követően lehetőség adódik a szerkezeti anyagok üzemi viselkedésének tanulmányozására. Ezért az üzemből kivett, illetve a leszerelt berendezések értékesek, magukban hordozzák az üzemi igénybevétel és környezeti körülmények kiváltotta károsodási folyamatok jegyeit. Ezek megismerése és az eredmények visszacsatolása fontos információt jelenthet az üzemeltető szervezetnek, de hasonlóképpen a tervezőnek és a berendezések gyártójának is.

A következőkben áttekintjük a leggyakrabban alkalmazott anyagvizsgálati eljárásokat, ismertetjük azok fizikai alapjait és főbb alkalmazási területüket az atomerőművek vonatkozásában. Természetesen számtalan más anyagvizsgálati eljárás is létezik, amelyeket egy-egy adott, általában a hétköznapi vizsgálati feladatok szintjét meghaladó, speciális feladat elvégzéséhez alkalmazunk. Ezek tárgyalása meghaladja jelen könyv terjedelmét.

4.2 OPTIKAI- ÉS ELEKTRONMIKROSZKÓPIAI VIZSGÁLATOK

Utaltunk rá a 2.5.1 alfejezetben, hogy anyagaink tulajdonságait azok szövetszerkezete határozza meg. A szövetszerkezet összetevői lényegesen kisebb méretűek annál, hogy azokat szabad szemmel vizsgálni lehessen. Ezért vizsgálatuk általában nagyobb nagyításban, mikroszkóp segítségével történik. Optikai vagy más elnevezéssel fénymikroszkópia esetében a minta megvilágítására a látható hullámhossztartományába eső elektromágneses sugárzást (fényt) használunk, míg az elektronmikroszkóp sugárforrása egy nagy energiájú elektronnyaláb.

4.2.1 Optikai mikroszkópia

Az optikai mikroszkóp – szerkezetét tekintve – egy viszonylag egyszerű, összetett optikai eszköz, mely két gyűjtőlencséből áll:

- a tárgyhoz közelebbi gyűjtőlencse az objektív, más néven tárgylencse,
- a szemhez közelebbi gyűjtőlencse az okulár, más néven szemlencse.



Atomerőműi Képzési Bázis

A tárgylencse igen nagy dioptriájú, általában síkdomború lencse (a tárgy felőli oldala a síkfelületű). Ez határozza meg a mikroszkóp tényleges felbontóképességét. A felbontóképesség azt mondja meg, hogy mekkora az a két legközelebbi apró folt, amit még külön fontoknak látunk (azaz nem mosódik össze a szemünkben). Az okulár már csak ún. üres nagyítást végez, azaz nem jelenít meg újabb részleteket, hanem csak tovább nagyítja a látványt, mint egy digitális zoom. A két lencsével együttesen – általában – legfeljebb 1500-szoros nagyítás érhető el.

A 112. ábra mutatja az optikai mikroszkóp elvi felépítését és a sugármeneteket. Látható, hogy az objektív az y tárgyról y' nagyított reális, fordított képet alkot az okulár tárgyoldali gyújtósíkjában.

Az okulár ezt a már felnagyított képet újra felnagyítja és az y" virtuális képet hozza létre – a szem alkalmazkodási fokától függően a végtelenbe vagy a tisztalátás távolságába vetítve.

Ahhoz, hogy a minta (mikroszkópi csiszolat) láthatóvá váljék, a mikroszkópot megfelelő megvilágítással kell ellátni. A megvilágító egység részei maga a mikroszkóplámpa, a tükör és a kondenzor.

A mikroszkóplámpa általában henger alakú, megfelelő erősségű égővel, íriszrekesszel, kollektorlencsével és színszűrővel ellátott lámpa. Célja az, hogy megfelelő erősségű koncentrált fénnyel lássa el a mikroszkópot. A tükör arra szolgál, hogy segítségével a külső fényforrás fényét a kondenzorlencsébe vagy a vizsgálandó csiszolatra irányítsuk. Két, egymásra merőleges tengely körül minden irányban elfordítható, melynek egyik oldala sík, a másik homorú. A sík oldalát akkor alkalmazzák, amikor a csiszolat megvilágítása a kondenzoron át történik (világos látótér), a homorú oldalt akkor, amikor a kondenzort oldalra kihajtva eltávolítják a fény útjából (sötét látótér). A kondenzor szerepe az, hogy a tükrön át közvetített külső fényforrás fényét a vizsgált minta síkjába vetítse a lehető legnagyobb fénysűrűséggel. Alkalmaznak polarizált fényt a kristályorientáció meghatározására. Van fáziskontrasztos képalkotás a kép kontrasztjának növelésére.



112. ábra. Az optikai mikroszkóp elvi felépítése [16]



A vizsgálathoz a mintát elő kell készíteni, ami a vizsgálandó felület csiszolását, polírozását és maratását jelenti. A *113. ábra* egy átlagos optikai mikroszkópot mutat.

113. ábra. Optikai mikroszkóp.



A következőkben néhány példát mutatunk az optikai mikroszkópia alkalmazására. A 114. ábra a VVER–1200 reaktortartály háromrétegű plattírozott rétegének a szerkezetét mutatja (szalagelektróda anyag: 08H18N10T).



114. ábra. Ausztenites korrózióálló acél plattírozás (elektrolitikus maratás: ASTM A-262-15)

A 115. ábra VVER–1200 reaktortartály alapanyagának (15H2NMFA) üzemi állapotra hőkezelt szövetszerkezetét mutatja. A kép egyenletes baintes szövetet mutat, itt-ott ferrit szigetekkel; felismerhetők az eredeti ausztenit szemcsehatárok.





115. ábra. Reaktortartály alapanyag-szövetszerkezete (maratás: Nital)

A 116. ábra egy ausztenites korrózióálló acél jellegzetes szövetszerkezetét mutatja.

116. ábra. Jellegzetes ausztenites szövetszerkezet, átlagos szemcsemérettel (maratás: Calling 2)



A 117. ábrán egy ausztenites korrózióálló acél (08H18N10T) csővezeték falából vett minta maratlan képe látható, rajta az alakítás hatására sorokba rendeződött oxidzárványok.



117. ábra. Zárványosság vizsgálata (maratlan)



Atomerőműi Képzési Bázis

4.2.2 Elektronmikroszkópia

Az elektronmikroszkópiában a minta megvilágítására használt sugárforrás egy nagy energiájú elektron nyaláb. Az elektronmikroszkópok rendkívül összetett berendezések, ezért drágák, valamint sokkal bonyolultabb a használatuk, mint az optikai mikroszkópoknak. Olyan előnyökkel rendelkeznek viszont, ami elengedhetetlenné teszi használatukat a korszerű anyagtudományban és természetesen számtalan egyéb anyagvizsgálati területen. A legnagyobb előny a megvilágító sugárzás hullámhosz-sza és az elméleti felbontó képesség közötti összefüggésből következik. Ugyanis a látható legkisebb részlet a megvilágító sugárzás hullámhosszának a fele. Ez 200 nm körül van a látható fény esetében, míg az elektronmikroszkópiában ez az érték nagyságrendekkel kisebb. Tehát elektronmikroszkóppal sokkal apróbb részletek figyelhetők meg. Így, szemben az optikai mikroszkópok általában maximális 1000–1500-szoros nagyítást elérő felbontásával, elektronmikroszkóppal könnyen elérhető akár több 100 000-szeres nagyítás is.

Jelentősen jobb az elektronmikroszkópos képek mélységélessége is, összehasonlítva ugyanarról a mintáról készült, ugyanolyan nagyítású optikai mikroszkópos képpel. Ezért gyakran olyan nagyítás tartományban is indokolt lehet a használatuk, amit még optikai mikroszkóppal is elérhetnénk, viszont a mintafelületünk térbeli (azaz háromdimenziós) felület.

Az elektronmikroszkópia egy másik előnye az, hogy a nagy energiájú elektronok által, a mintában gerjesztett karakterisztikus röntgensugárzás detektálása és szétválogatása alapján megmérhető az anyag kémiai összetétele igen kis térfogatból (néhány µm³).



118. ábra. TEM és optikai mikroszkóp felépítésének összehasonlítása [16]



Alapszerkezetükben az elektronmikroszkópok hasonlítanak az optikai mikroszkópokhoz, csak a szükséges technikai megoldásokban térnek el, ami az eltérő megvilágító sugárzás használatából adódik. Az elektronmikroszkópokat – felépítésük szerint – két nagy csoportra lehet felosztani: pásztázó, azaz "reflexiós kiépítésű" (scanning electron microscope, SEM) és transzmissziós, azaz "átvilágításos kiépítésű" (transmission electron microscope, TEM) elektronmikroszkópokra. A *118. ábra* TEM és optikai mikroszkóp elvi felépítését hasonlítja össze. Látható a felépítés hasonlósága, de a műszaki megvalósítás természetesen eltérő.

TEM-vizsgálat esetében nagyon vékony (néhány 10 nm) mintát világít át az elektronnyaláb, ami nagy energiájú 100 kV–1 MV (általában: 200–400 kV). A TEM-ben előállítható nagy nagyítású (akár 1.000.000 X), atomi felbontású kép, valamint megjeleníthetők a kristályrácson diffraktálódott elektronok, a diffrakciós kép is. Vizsgálható energiadiszperzív spektrometriával (EDS) az átvilágított térfogat kémiai összetétele is. A TEM igen hasznos eszköz bizonyos anyagvizsgálati problémák (pl. fázisazonosítás, kristályszerkezet-meghatározás) megoldásában.

A pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vastag, az elektronnyaláb számára áthatolhatatlan mintákat vizsgálnak 0,5–40 kV (általában: 10–25 kV) energiájú elektronnyalábbal. Ebben az esetben a mintáról visszaverődő és a mintában képződő sugárzásokat detektálva lehet a minta felületéről nagy nagyítású (akár 300 000-szeres) képet kapni. Visszaszórt elektronsugárzás segítségével elemösszetételre (rendszámra) érzékeny képet, a képződött karakterisztikus röntgensugárzást mérve vagy hullámhossz diszperzív spektrometriával kémiai összetételt lehet kapni. Lehetőség van a minta kristályszerkezetének vizsgálatára is a visszaszórt elektron diffrakció mérésére alkalmas detektorral.

A SEM-ek képalkotási és kémiai elemző funkciója más-más fókuszáltságú és intenzitású elektron nyalábbal valósítható meg, amelyek általában egymással ellentétesen változtatható paraméterek. Ezért együttes, tökéletes megvalósításukra nincs lehetőség, csak valamilyen optimalizálásra a kívánt felhasználás szerint.

A 119 a. ábra egy transzmissziós elektronmikroszkópot, a 119b. ábra a Dunaújvárosi Egyetemen üzemelő pásztázó elektronmikroszkópot mutatja.



119. ábra. TEM (a) és SEM (b)



A következőkben néhány példát mutatunk TEM és SEM alkalmazásra. A *120. ábra* VVER-440 reaktortartály acél (15H2MFA) diszlokáció szerkezetének TEM-felvételét mutatja. A mintát kisciklusú, termomechanikai fárasztó vizsgálattal az elméleti élettartama 70%-áig fárasztották, majd ott megszakí-tották a kísérletet (CUF = 70%).

A 121. ábra egy törésig fárasztott reaktortartály acél töretfelületének SEM-felvételét mutatja.

120. ábra. Reaktortartály acél diszlokáció szerkezete, megszakított termo-mechanikus fárasztó vizsgálatot követően, TEM [17]



121. ábra. Reaktortartály acélfárasztás után vizsgált töretfelülete, SEM



4.3 MECHANIKAI VIZSGÁLATOK

A mechanikai vizsgálatokkal (gyakran nevezzük roncsolásos vizsgálatoknak) a szerkezeti anyag mechanikai jellemzőit vagy, például hegesztett kötések esetén, a varrat lokális szilárdsági, törésmechanikai, illetve alakváltozási képességét mérik. A mechanikai vizsgálatokat az alapanyagból vagy hegesz-


tett kötésből kivágott próbatesteken végzik el. Ha a vizsgálat céljára külön próbadarab készül, akkor azt ugyanolyan körülmények között (azonos alapanyagból, azonos technológiával, stb.) kell készíteni, mint magát a szerkezetet. A próbatesteket általában forgácsolással készítik. Termikus vágás vagy hidegvágás esetén, amelyek megváltoztatják a próbatest anyagszerkezetét, a próbatestet a vizsgálati hossz mentén megmunkálási ráhagyással kell készíteni, amelyet a próbatest elkészítésekor le kell forgácsolni.

A mérnöki gyakorlatban a szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságait (pl. szakítószilárdság, folyáshatár, keménység) szabványokban rögzített mérőszámokkal minősítik és ezek egyértelmű értelmezése alapján használják az anyagokat a tervezés, a gyártás technológiai utasítások szerint. A mechanikai tulajdonságokat jellemző paraméterek csaknem mindegyike azt mutatja meg, hogy egy meghatározott mechanikai terhelés a szóban forgó anyagot milyen mértékű alakváltozásra kényszeríti. Ennek megfelelően, a szakítószilárdság az a feszültség, amely egytengelyű húzóterhelés hatására az egyenletes nyúlás kimerülésével és a helyi kontrakció (keresztmetszet-csökkenés) megindulásával jár. A rugalmassági határ az a maximális feszültség, mely csak rugalmas alakváltozást okoz, és a feszültség megszüntével az alakváltozás még éppen eltűnik. A keménység az a szám, mely megmutatja, hogy egy pontosan meghatározott alakú szerszám adott nagyságú terhelés hatására mekkora nyomot hagy az anyagban stb. A mechanikai tulajdonságok nem csak egy adott berendezés szerkezeti épségével, azaz biztonságával kapcsolatosak, hanem nagymértékben függ tőlük a berendezés tömege, mérete, üzemideje és a termelés gazdaságossága.

4.3.1 Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat a mérnöki gyakorlatban a mechanikai tulajdonságok jellemzésének leggyakrabban alkalmazott eljárása. A szakítógépeken (vagy újabban univerzális anyagvizsgáló gépeken) a – szabványban meghatározott méretű – próbatest végeit a befogó pofának nevezett készülékbe erősítik. Ezek egyike áll, a másikat pedig egy meghajtószerkezet egyenletes sebességgel távolítja az álló befogótól. Az állandó sebességű meghajtás következtében minden pillanatban a próbatestre a befogó pofákon keresztül akkora erő hat amekkorára szükség van a próbatest állandó sebességgel történő alakváltozásához. A névleges alakváltozási sebesség a következő:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{1}{L_0} v$$

ahol ε a fajlagos nyúlás, *t* az idő, *L*_o a próbatest eredet hossza, *L* a megnyúlt hossz és $\frac{dL}{dt}$ a szakítógép mozgó befogófejének sebessége.

A 122. ábra egy szakítógép munkaterének vázlatát szemlélteti [18]. A korszerű szakítógépek sebességét változtatni lehet, mert a szabvány – bizonyos esetekben – előírja az alakváltozási sebességet is (annak változtatásával ugyanis befolyásolni lehet a szilárdsági jellemzőket). A próbatest egyik befogója és az álló keresztfej közé erőmérő cellát helyeznek el, amely régebben mechanikus, ma már elektronikus eszközökkel felrajzolja a mindenkori F erőt a hozzá tartozó ΔL megnyúlás függvényében.



122. ábra. Szakítógép munkaterének vázlata



Az automatikusan felrajzolt $F = f(\Delta L)$ görbéből adódik – a koordinátatengelyek megfelelő átskálázása után – a $\sigma = g(\varepsilon)$ feszültség–alakváltozás görbe, azaz a szakítódiagram. Lágyacél jellegzetes szakítódiagramját mutatja az 123. ábra. A szakítódiagramból kivehetők, illetve segítségével kiszámolhatók a legáltalánosabban használt mérőszámok, mint a szakítószilárdság, a folyáshatár, a fajlagos nyúlás és a fajlagoskeresztmetszet-csökkenés (kontrakció).



123. ábra. Szakítógörbe



Egy elszakított hengeres, lágyacél próbatest jellegzetes, kúpos-kráteres, nyírt peremes töretének (*cup and cone fracture with "shear" lip*) SEM-felvételét, illetve a törés sematikus vázlatát mutatja a *124. ábra.* A *125. ábra* egy korszerű, szervohidraulikus működtetésű univerzális anyagvizsgáló gépet mutat, ami nemcsak környezeti hőmérsékleten, hanem attól eltérő hőmérsékleteken (-180°C-tól egészen 1200°C-ig) képes szakító-, nyomó-, fárasztó- és törésmechanikai vizsgálatok végzésére.

124. ábra. Lágyacél szakítópróbatest törete



125. ábra. Korszerű univerzális anyagvizsgáló gép





4.3.2 Ütővizsgálat

lsmert, hogy az anyagok mechanikai tulajdonságai jelentősen változnak az állapottényezők függvényében. Ezek a hőmérséklet, a terhelés sebessége és a próbatest feszültségi állapota. A szakítóvizsgálat egy kvázi-statikus vizsgálat és az így meghatározott ismeretek dinamikus terhelési körülmények között nem alkalmazhatók. Ennek áthidalására nyújt lehetőséget a dinamikus ütővizsgálatot, amelyet a módszert kidolgozó mérnök után Charpy-féle ütővizsgálatnak neveznek. Az eljárás lényege az, hogy a (szabványban rögzített alakú, többnyire 10x10x55 mm befoglaló méretű, egyik oldalán bemetszett hasáb) próbatestet két ponton megtámasztják, majd annak közepére egy adott mozgási energiájú ingát ütköztetve a próbatestet eltörik. Az ütközés, majd a törés következménye az inga energiájának a csökkenése, ami jellemzi az anyag dinamikus feltételek közötti viselkedését. Az *126. ábrán* látható a berendezés vázlata és a mérés elve.



126. ábra. Charpy ütőmű elvi vázlata [18]

A próbatest törése lehet rideg, szívós és a kettő közötti átmeneti jellegű. Elegendő szívósságú anyag esetében előfordul, hogy a próbatest nem törik el, csak meghajlik A legkevesebb energiát a ridegtörés igényli, és a szívós törés fogyasztja a legtöbbet. A törés jellege az ütőmű kalapácsának a sebességtől (állapottényező) is nagymértékben függ, ezért az eltérő sebességű ingával mért értékek nem vethetők össze, és ennek következtében a töretfelület minősége is eltérő. Megjegyezzük, hogy a bemetszés egyértelműen háromtengelyűvé teszi a terhelést annak megindulásától kezdve, ami a második állapottényező. A harmadik – és az anyag dinamikus viselkedésére talán leginkább ható – állapottényező a hőmérséklet.

Az atomerőművek esetében az ütővizsgálatnak első sorban a reaktortartályok szerkezeti integritásának elemzésében, pontosabban a reaktortartályfal ridegtöréssel szembeni ellenállásának az ellenőrzésében van szerepe. A reaktortartályokat úgy tervezik és gyártják, hogy üzemidejük alatt ne sérüljenek



meg, aminek legdrasztikusabb formája a ridegtörés, azaz a tartályfalban található repedés instabil terjedése és a fal teljes keresztmetszetű törése. A tartályfal szerkezeti anyaga eredetileg szívós állapotú, de az aktív zóna magasságában lévő tartályfalat az üzemelés alatt érő gyorsneutron fluxus azt rideg állapotúvá teszi. Az elridegedési folyamat a reaktortartály nyomástartó fala szerkezeti anyagának (térközepes köbös rácsszerkezetéből adódó) sajátossága.

A reaktortartály-acélokra alacsony hőmérsékleten a rideg viselkedés jellemző, azaz itt, az adott körülmények között egy repedés hasadással terjed. A hőmérséklet növekedésével fokozatosan növekszik a hasadást megelőző képlékeny repedésterjedés aránya, míg végül az anyag teljesen szívósan viselkedik. Létezik egy átmeneti hőmérséklet-tartomány, amelyben együttesen van jelen a rideg és a szívós törési mechanizmus. Ennek a folyamatnak az eredményét a szívós-rideg átmeneti hőmérsékletgörbével lehet leírni.

A sugárkárosodási folyamat kinetikájának, azaz a reaktortartály állapotának a monitorozása céljából a reaktortartályokba ún. felügyeleti próbatesteket helyeznek el, amelyek anyaga és kiinduló állapota megegyezik a monitorozandó szerkezeti részek (alapanyag, varratfém, hőhatásövezet) anyagával és kiinduló állapotával. Ezek között vannak Charpy ütőpróbatestek. A reaktor üzemelési időszakában, meghatározott időközönként próbatesteket vesznek ki és vizsgálják azokat. A szívós-rideg átmeneti hőmérséklet meghatározása a Charpy ütővizsgálatok eredményeire illesztett átmeneti hőmérséklet görbe alapján történik. A különböző hőmérsékleteken elvégzett ütővizsgálatok során mérik az ütőmunkát (KCV), azaz a próbatest eltöréséhez felhasznált energiát, az oldalirányú expanziót (EXP), azaz a próbatestütés irányára merőleges oldalának alakváltozását és/vagy a töretfelület szívós jellegű hányadot (SZT). Az ütővizsgálatok eredményét a következő függvénnyel közelítik:

$$KCV, EXP, SZT = A + B \tanh\left(\frac{T - T_0}{C}\right)$$

ahol A, B, C és T0 állandók, T a vizsgálat hőmérséklete. A függvényből a maximális ütőmunkát, egy adott ütőmunka (az átmeneti hőmérséklet eltolódásának meghatározásához általában 41 J), a 0,9 mm oldalirányú expanzió, valamint az 50% szívós töretfelülethányad-értékhez tartozó átmeneti hőmérsékleteket határozzák meg. A *127. ábra* egy valódi reaktortartály hegesztési varratának szívós-rideg átmeneti hőmérséklet-változását mutatja be kiinduló és különböző mértékig besugárzott állapotban [19].



127. ábra. Reaktortartály átmeneti hőmérséklet-változása gyorsneutron sugárzás következtében



Atomerőműi Képzési Bázis

4.3.3 Fárasztóvizsgálat

A szerkezetek váratlan meghibásodásának, törésének egyik leggyakoribb oka a fáradás. A műszaki gyakorlatban még napjainkban is az anyagok/alkatrészek tönkremeneteleinek 90%-a vezethető vissza fáradásra. Meg kell jegyeznünk, hogy fáradás esetében a terhelőfeszültség nem éri el az anyag folyáshatárát. Időben váltakozó (ciklikus) igénybevétel gyakorlatilag minden mérnöki szerkezet alkatrészeit terheli és a terhelés nagysága és annak időbeli változása az esetek túlnyomó többségében nem ismert. Így van ez a hidak szerkezetébe épített anyagoknál, a daruknál, nem beszélve a forgó vagy más jellegű mozgást végző alkatrészekről, mint amilyenek a gépjárművek tengelyei. Atomerőművek technológiai rendszereiben is megtalálhatók ezek és hasonló terhelésű berendezések, mint pl. a különböző épületszerkezetek, a szivattyúk és armatúrák, de ide sorolandók a nyomástartó berendezések is, amelyek váltakozó mechanikai- és hőterhelésnek vannak kitéve, amikor felhevítik és nyomásra hozzák vagy lehűtik és lecsökkentik a nyomásukat.

A fáradásos törés oka lehet a hirtelen túlterhelés, a terhelés gyakori és nagy ingadozása és az ismétlődő igénybevételek túl nagy száma. Ezeken kívül még fontos a feszültségkoncentrációs helyek jelenléte, a hőmérséklet ingadozása, a korrózió, az anyag belső feszültségeinek nagysága és eloszlása, az anyag szerkezete, a többtengelyű feszültségi állapot, amelyek mint külső vagy belső befolyásoló tényezők majdnem minden berendezés működésénél jelen vannak.

Fárasztóvizsgálatokkal azt határozzák meg, hogy egy adott feszültséggel vagy alakváltozással hányszor terhelhető az anyag vagy a szerkezet, azaz mennyi a lehetséges N igénybevételi ciklusszám. A vizsgálatot több különböző feszültség- vagy alakváltozás amplitúdóval végzik és meghatározzák a törés bekövetkezéséhez tartozó ciklusszámot. A nagyciklusú fárasztóvizsgálatokat ($N > 10^4$) általában állandó feszültség-amplitúdóval végzik, míg a kisciklusú fárasztóvizsgálatokra ($N < 10^4$) az állandó alakváltozás-amplitúdó a jellemző.

A fárasztásnak kitett anyagok paraméterei meghatározására ciklikusterhelés megvalósítására alkalmas laboratóriumi berendezéseket használnak, melyeken a terhelés és annak időbeli változása szinte korlátozás nélkül változtatható és mérhető. A fárasztóvizsgálatok és berendezéseik döntően két csoportba sorolhatók. Az egyikbe a forgó-hajtogató fárasztást soroljuk, amelynél a terhelésből adódóan hajlítással terhelt próbatest forgása közben mérik a fordulatoknak azt a számát, amely jellemző a kifáradásra. A másik esetben a vizsgálandó anyag teljes keresztmetszetében azonos feszültséget keltenek meghatározott feszültség–idő függvény szerint, többnyire húzó-nyomóterheléssel, amit többnyire hidraulikus úton hoznak létre.

Atomerőművek nyomástartó berendezéseiben és csővezetékeiben a hőmérséklet változása vagy a hideg és meleg közeg gyors betáplálása okozta hőfeszültség előidézte fáradás a kisciklusú fáradás tartományába esik. A kisciklusú fáradás során a feszültség és az alakváltozás közötti kapcsolat erősen nemlineáris, nagy alakváltozások jönnek létre, ezért a feszültség állandó értéken tartása sok körültekintést és bonyolult vizsgálattechnikát igényel. Emiatt a kisciklusú fáradás vizsgálatát állandó alakváltozásamplitúdó mellett végzik, amely során az egyes ciklusokban a feszültség értéke változik, annak megfelelően, hogy a vizsgálati anyag felkeményedik vagy lágyul az ismételt igénybevétel hatására. További fontos vizsgálattechnikai kérdés a hőmérséklet és a mechanikai terhelések kapcsolata. Atomerőművi berendezések esetén általában állandó hőmérsékleten végzik a fárasztó vizsgálatot. Ezek azonban figyelmen kívül hagyják a hőmérséklet tranziensek következtében fellépő hőfeszültségek hatását. A valós üzemi körülményeket jobban közelítik a termomechanikai fárasztóvizsgálatok, amelyek lehetőséget nyújtanak a mechanikai ciklusokkal párhuzamosan hőmérsékleti ciklusokat működtetni a próbatestre, így a berendezés tényleges terhelése pontosabban modellezhető.



A kisciklusú fárasztóvizsgálatokhoz merev, nagy rugóállandójú berendezéseket használnak, amelyen a keresztfej elmozdulása megfordítható, és a húzó-nyomó igénybevételhez szükséges alternáló mozgás a próbatest hossz-, illetve keresztirányú mérete szerint vezérelhető. Általában elektronikus vagy elektrohidraulikus mozgató berendezést alkalmaznak, amellyel a vezérlés könnyen megvalósítható.

Anyúlásmérés történhet hossz- és keresztirányú extenzométerek alkalmazásával. Termomechanikus fárasztás során és növelt hőmérsékleten történő mérésekhez optikai elven működő érzékelőket, vagy megfelelő hőálló anyagú tapintóval rendelkező elmozdulásmérőket használnak. A próbatest előírt hőmérsékletre történő felfűtése történhet konvektív módon klímakamrában, indukciós tekercsekkel, valamint ellenállásfűtéssel. A hűtés a befogó pofákon keresztül vízhűtéssel, a próbatestre szórt vízpermettel, valamint a próbatestre fújt sűrített levegővel lehetséges.

Kisciklusú fárasztó vizsgálat megvalósítható a 125. ábrán bemutatott univerzális anyagvizsgáló berendezéssel. Megvalósítható más célberendezés megfelelő kialakításával is, mint pl. a Dunaújvárosi Egyetem Gleeble fizikai szimulátora. Ez utóbbira mutat példát a 128. ábra.



128. ábra. Reaktortartály-acél kisciklusú fárasztása a Gleeble-szimulátoron.

4.3.4 Keménységvizsgálat

A keménységmérés (vagy keménységvizsgálat) egyszerű és gyors mérési eljárás, amely olyan mutatószámok meghatározására szolgál, amelyekből közelítő és összehasonlító adatok nyerhetők a bonyolultabb szakítóvizsgálattal nyert paraméterekre. Meg kell jegyezni, hogy a keménységértékből becsült folyáshatár vagy szakítószilárdság soha nem fogadható el olyan bizonyossággal, mint a szakítóvizsgálattal meghatározott érték.

A módszer lényege az, hogy egy edzett acélból, keményfémből vagy gyémántból készült, pontosan meghatározott geometriájú szúrószerszámot (behatolótestet) a mérendő anyag felületére merőlegesen ható, előírt nagyságú terheléssel nyomnak a felületbe, ami nyomot hagy az anyagban. A keménységi mérőszámot a szúrószerszám által okozott lenyomat nagysága vagy mélysége és a terhelés mértéke alapján határozzák meg. A keménységmérés nem roncsolja a munkadarabot, mint pl. a szakítóvizsgálat,



így az a kész munkadarabon is elvégezhető annak számottevő károsodása nélkül. Ezért a keménységmérést gyakran a roncsolásmentes anyagvizsgáló eljárások közé sorolják.

Brinell-keménységmérés:

A Brinell-keménységmérés a legelterjedtebb eljárás, amelynek során egy edzett acélból vagy keményfémből készített golyót nyomnak *F* erővel a mérendő darab előkészített felületére. A szúrószerszám okozta lenyomatról feltételezik, hogy az egy deformálatlan golyó okozta gömbsüveg, amelynek átmérője azonos a szúrószerszáméval, lásd a *129. ábra*.

129. ábra. Brinell-keménységmérés elvi vázlata.



A Brinell-keménységmérés mérőszáma (HB) az F erőnek és a lenyomat felületének a hányadosa:

$$HB = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Az összefüggés minden méretű golyóra és tetszőleges terhelésre használható. Azonban a mérési eredmények jobb összehasonlíthatósága és a mérés egyszerűbb elvégezhetősége érdekében a szabvány 10 – 5 – 2,5 – 2 és 1 mm átmérőjű golyókat ajánl, és ezekhez 29,42 kN és 9,807 N közé eső nyomóerőket. A vékony és kisméretű munkadarabok, valamint a lágyabb anyagok mérésére kell nagyobb golyót és kisebb terhelést használni, de ugyanezt kell tenni a munkadarabok szélén való méréskor is.

A Brinell-keménységmérés alkalmas arra is, hogy a laboratóriumban telepített mérőberendezéstől távol (pl. az erőmű egy technológiai berendezésén) határozzák meg a keménységet. Ilyen mérésre szolgál a Poldi-kalapács, *130. ábra*.



130. ábra. Poldi-kalapács.



A *B* rugó a H_{BZ} ismert keménységű, *Z* anyagot állandó erővel szorítja a berendezés alján elhelyezett 10 mm átmérőjű acélgolyóhoz, a mérőszerszámhoz a *C* rúd segítségével. Az egész rendszert az *A* hüvely tartja össze. A mérés úgy történik, hogy a golyót a mérendő tárgyra kell szorítani, az arra merőlegesen álló hüvely segítségével, majd egy kalapáccsal a *T* tüskére kell ütni. Az ütés következtében a golyó az ismert keménységű darabon D_z , az ismeretlen keménységű X anyagon pedig D_X átmérőjű nyomot hagy. A keménységek fordítottan arányosak azoknak az átmérőknek a négyzetével, amelyek a két anyagon az ütés okozta benyomódásokon mérhetők, amiből az következik, hogy a vizsgált anyag keresett H_{RX} -keménysége a következő:

$$HB_X = HB_Z \frac{D_Z^2}{D_X^2}$$

Vickers-keménységmérés:

A golyó szúrószerszámot használó keménységmérési eljárásnál a lenyomatátmérő mérésének a bizonytalanságát úgy lehet elkerülni, hogy olyan szerszámot használnak, amelynek a lenyomatát – a terheléstől és a lenyomat méretétől függetlenül – azonos pontossággal lehet meghatározni. Ilyen szerszám a gúla és a kúp. A 136°-os lapszögű, négyzetalapú, egyenes gúlát alkalmazó Vickers-keménységmérés abban hasonlít a Brinell-eljáráshoz, hogy szintén a terhelőerőnek és a lenyomat felületének a hányadosát használja mérőszámként. A mérőgúla anyaga gyémánt. Ezzel a módszerrel csökken a mérési pontatlanságból eredő bizonytalanság, és az is, hogy a golyó a nagy terheléseknél maga is deformálódik. A Vickers-keménységmérés elvi vázlatát a *131. ábra* mutatja.







A lenyomat felületének meghatározásához annak átlóit mérik meg. Előfordul, hogy a két lenyomatátló nem azonos hosszúságú. Ennek oka lehet a felület egyenlőtlensége, vagy az, hogy a terhelés nem volt merőleges a felületre, de lehet az anyag mikroszerkezeti egyenlőtlenségeinek a következménye és a lenyomat okozta képlékeny alakváltozás is. Ezért mindkét átlót le kell mérni, és azok átlagát kell az egyenletben figyelembe venni. A Vickers keménység mérőszáma (HV), ha az erő mértékegysége N, a lenyomaté mm:

$$HV = 18,192 \frac{F}{D_{\acute{a}tl}^2}$$

A Brinell- és a Vickers-keménység mérőszámai csak azoknál a szerkezeti anyagoknál vethetők össze, amelyek keménysége jóval alatta marad a Brinell-golyó keménységének, azaz ahol a golyó alakváltozása elhanyagolható. Az 132. ábra mutatja a két keménységmérés mérőszámainak kapcsolatát.

132. ábra. A Brinell- és Vickers-keménység kapcsolata





A szabvány elírja, hogy a Brinell-keménységet edzett golyóval 450 HB, keményfém golyóval 650 HB ért ékig lehet használni. A keményebb anyagoknál kisebb értékek adódnak a Brinell-mérésből, mert a golyó is deformálódik, és ezért nagyobb lenyomat keletkezik.

Rockwell-keménységmérés:

Úgy a Brinell-, mint a Vickers-eljárás esetében meg kell mérni a lenyomat valamilyen kiterjedését, és ennek pontossága attól is függ, hogy a mérendő felület mennyire tekinthető síknak. Ezt a Rockwellkeménységmérési eljárás megkerüli azzal, hogy nem a lenyomat felületének valamely méretére, hanem annak mélységére vonatkoztatja a keménységet, amit egy, a keménységre kalibrált mérőóra azonnal mutat. Az eljárás másik előnye, hogy nem kell a felületet gondosan megmunkálni, mert egy F_0 =98,1 N nagyságú előterhelés kiküszöböli az egyenetlenségeket, ugyanis azt a mértékadó benyomódást, amit az F_1 főterhelés okoz, mindig az előterhelési mélység szintjéhez mérten határozzák meg.

A Rockwell-eljárás többféle lehetőséget kínál a keménységmérésre, amelyek a következők: 120°-os gyémántkúp, 1/8 vagy 1/16 hüvelyk átmérőjű acélgolyó. Ezzel összhangban többféle mérőszerszámot használnak a vizsgálandó anyag milyensége szerint, továbbá még a főterhelés nagyságának a kiválasztásával is megkönnyíti a mérést. A főterhelések nagysága rendre 589 N, 981 N vagy 1472 N. Az előterhelés minden Rockwell-mérésnél 9,81 N. A *133. ábra* mutatja a Rockwell-keménységmérés elvét.



133. ábra. Rockwell-keménységmérés elve

A mérés menete az, hogy először az F0 előterheléssel bocsátják a mérőszerszámot az anyagra, és ebben a helyzetben zéruspontra állítják a mérőórát. Ezután megterhelik a szerszámot az F főterheléssel, végül megszüntetik a főterhelést, és az előterhelés megtartása mellett leolvassák a keménységet.

Műszerezett keménységmérés:

Üzemelő atomerőmű csővezetékei anyagának hosszú távon rendelkeznie kell a szükséges szilárdsági tulajdonságokkal. Ha nem oldható meg próbatestekkel történő monitorozás, akkor akár egy-egy, bizonyos időszakonként (pl. 100 000 üzemóra) kivágott csődarabon igazolják a tulajdonságok meglétét. A kivágás kiváltható az ún. műszerezett keménységméréssel (Automated Ball Indentation Test, ABIT).



Ez a helyszínen elvégezhető mérés nem hagyományos keménységmérés, hanem a mérés közben rögzített erő–benyomódás-diagram kiértékelése [20].

Egy erő-benyomódás görbét mutat a 134. ábra.



134. ábra. Erő-benyomódás görbe [21]

Az ABIT-módszer lényege, hogy a mérési pontban ciklikusan növekvő-részben visszacsökkenő terheléssel veszik fel a benyomódási görbét. Minden ciklusban megmérik a leterhelés-meredekséget és iterációs módszerekkel meghatározzák az adott ciklusra jellemző paramétereket (maximális terhelés, bemélyedés, lenyomatátmérőjét stb.). Ebből meghatározható a folyáshatár, a valódi feszültség-valódi képlékenynyúlás-diagram és a szakítószilárdság.

A 135. ábra baloldali képén a Paksi Atomerőműben alkalmazott készülék 3D illusztrációja, jobboldali képén maga a műszer látható mérés közben.



135. ábra. Műszerezett keménységmérő berendezés (modell és tényleges mérés) [21]



A műszerezett keménységmérő berendezés rögzítése a mérendő felületre kétféle módon történhet: ferromágneses anyagok (ötvözetlen és alacsonyan ötvözött acélok) esetén állandó mágnesek segítségével, ausztenites korrózióálló acélok esetén pedig hevederekkel. Hevederes rögzítés alkalmazható abban az esetben is szénacéloknál, ha a berendezés mérendő felülete nem teszi lehetővé a mágnesek alkalmazását.

4.3.5 Törésmechanikai vizsgálatok

A törésmechanika a repedést tartalmazó anyagokban a repedés méretétől függően határozza meg azokat a jellemzőket, amelyek ismeretében a tervező megállapíthatja azt a maximális terhelő feszültséget, amit az anyagnak, a törés bekövetkezése nélkül el kell viselnie. A legelterjedtebb törésmechanikai elmélet, a lineárisan rugalmas törésmechanika a K_{lc} kritikus feszültségintenzitási tényezőt tekinti annak az anyagjellemzőnek, amely leírja a repedést tartalmazó anyagnak a töréssel szembeni ellenállását.

A K_{IC} kritikus feszültségintenzitási tényezőt (síkbeli alakváltozási állapotban mérhető törési szívósságot) hárompontos hajlító- vagy kompakt szakítóvizsgálat segítségével határozzák meg. Mindkettő lényege, hogy a próbatesten forgácsolással kialakított bemetszésből kiindulva további repedést állítanak elő váltakozó terheléssel (fárasztással). Hárompontos hajlító (*TPB, three point bending*) próbatestet mutat a 136. ábra, kompakt szakító (*CT, compact tensile*) próbatestet mutat a *137. ábra.* A próbatestek jellemző méreteit és a feszültségintenzitási tényező meghatározására szolgáló egyenleteket szabványok, illetve kézikönyvek tartalmazzák. A síkbeli alakváltozási állapot biztosítása érdekében a próbatestek legkisebb vastagságát a következő összefüggés adja meg:

$$B \ge 2,5 \left(\frac{K_{lc}}{R_{eH}}\right)^2$$

136. ábra. Hárompontos hajlító próbatest









A vizsgálatot statikus terheléssel végzik, a feszültségintenzitás növelésének a sebessége 20–85 MPa√m/s, az időtartam 30–300 s, az erőmérés pontossága ±1 %. A bemetszés kinyílásának alapján lehet meghatározni a próbatest deformációját és a repedésterjedés kezdetét. A törési szívósságot a regisztrált erő–bemetszés-kinyílás görbe kiértékelése alapján határozzák meg. Az értékelés módszere megtalálható például az MSZ EN ISO 12737 szabványban illetve szakkönyvekben. A *138. ábra* három jellegzetes erő–bemetszés-kinyílás görbét mutat be, feltüntetve a kiértékelés során alkalmazott jellegzetes pontokat.



138. ábra. Klc-mérésnél felvett különböző erő-elmozdulás-görbék.



4.4 RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATOK

A roncsolásmentes vizsgálat egy lehetséges meghatározása a következő: műszaki eljárások kifejlesztése és alkalmazása berendezések anyagának a vizsgálatára oly módon, hogy a vizsgálat végrehajtása ne akadályozza a berendezés későbbi felhasználását és üzemeltethetőségét. A roncsolásmentes vizsgálatok célja a következő:

- eltérések (anyagfolytonossági hiányok, inhomogenitások) detektálása, helyzetük és méretük meghatározása, valamint értékelése a berendezés integritásának, tulajdonságainak és összetételének az elemzéséhez,
- berendezések geometriai és anyagai fizikai jellemzőinek a megmérése.

A roncsolásmentesvizsgálat-elnevezés hagyományos angol változata Non-Destructive Testing (NDT), de ezt egyre inkább felváltja a Non-Destructive Evaluation (NDE) forma. A két elnevezés közötti különbség lényege abban áll, hogy NDT esetében – amennyiben a hibakeresés a cél – a végtermék a detektált folytonossági hiány (annak helyével, méretével, egyéb tulajdonságaival jellemezve), és a továbbiakról vagy az elfogadási szinteket tartalmazó szabvány vagy egyéb ismeretek (pl. törésmechanikai elemzés) alapján a tervező dönt. Ezzel szemben, ha NDE-ről beszélünk, akkor ezzel azt fejezzük ki, hogy az elfogadás (visszautasítás) is része a roncsolásmentes vizsgálati folyamatnak.

Általánosságban kijelenthető, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok célja a mérnöki szerkezetek használatra alkalmas állapottól való eltéréseinek a felderítése. Az eltérések lehetnek folytonossági hiányok (repedés, gázhólyag, zárvány, varrat összeolvadási hiány), de lehetnek szövetszerkezeti inhomogenitások, vastagság-csökkenés, deformáció, stb. A roncsolásmentes vizsgálat elvégzését egyidejűleg két különböző cél vezérli. Az egyik az ember és a környezet védelme abban az esetben, amikor a mérnöki szerkezet vagy annak egy eleme, roncsolásmentes vizsgálat által fel nem derített eltérés következtében tönkremegy (törik, lyukad) és a tönkrement szerkezet vagy létesítmény veszélyforrás a környezetére nézve. Ez a "társadalmi" cél. A másik cél a vizsgált szerkezet vagy létesítmény teljesítőképességének, teljesítmény kihasználásának optimalizálását szolgálja, ami "üzleti" cél.

Meg lehet különböztetni egymástól a termék megfelelőségének tanúsítására szolgáló, azaz a minőségellenőrzés kategóriába tartozó (*Quality Control NDT, QC-NDT*), és az üzemelő berendezések további biztonságos üzemeltetésre való alkalmasságának (*Fitness-For-Service, FFS*) eldöntését szolgáló, azaz az üzemeltetés közbeni időszakos vizsgálatokat. Az alkalmazott vizsgálati eljárások mindkét esetben azonosak ugyan, de jelentősen eltér egymástól a vizsgálatok célja (és ennek megfelelően az alkalmazott eszköztár), továbbá különböznek az igények a vizsgáló személy felkészültségével szemben is. Az elmúlt évtizedekben az FFS-vizsgálatok jelentőségének határozott növekedése figyelhető meg. Ez a nagy ipari létesítmények (különös tekintettel az atomerőművekre) fokozatos öregedésével, a szisztematikus élettartam-gazdálkodás térnyerésével, a berendezések öregedéskezelésének a bevezetésével, az üzemidő hosszabbítással, tehát az üzemelő berendezések szerepének a felértékelődésével magyarázható.

A szerkezeti anyagokban előforduló folytonossági hiányok és egyéb inhomogenitások jellemző mérete a geometriai méret skáláján 10–9 m és 100 m (azaz 1 nm és 1 m) között fordulhat elő. Az alsó tartományban (nagyságrendileg 1 nm és 1 µm között) találhatók a kristályhibák. Az alsó tartomány felső részében vagy afelett helyezkednek el a szemcsehatárokon kialakuló rendezetlenségek, valamint a fémmátrix és a kiválások, illetve zárványok határfelületének inkoherenciájából adódó inhomogenitások. A fémes és nemfémes zárványok, gázhólyagok, üregek, hegesztési kötéshibák mérete általában 10 µm és 1 mm nagyságrend közé tehető.

Veszélyességük miatt külön kell szólni a repedésekről. Fémtani értelemben repedésen a szomszédos atomok egymástól történő olyan mértékű eltávolodását értjük, amikor a köztük lévő kötőerők már nem hatnak; kontínuum-mechanikai értelemben a repedés az alakváltozásmező folytonosságának a megszakadása (diszkontínuitása). Egyik definíció sem foglalkozik a repedés méretének alsó határával. A hibakeresésre használatos roncsolásmentes vizsgálati módszerek kimutathatósági határa a tized mm környékén van, tehát ettől a mérettartománytól felfelé indokolt repedésekről beszélni. A *139. ábra* a folytonossági hiányoknak több nagyságrendet átfogó skáláját mutatja. A jelen képzési anyag tárgyát képező roncsolásmentes vizsgálattal kimutatható folytonossági hiányok tartománya 10–4 m és 100 m között található, a tartományt jeleztük az ábrán.

A következő alfejezetekben a nukleáris iparban leginkább használt roncsolásmentes vizsgáló eljárásokat ismertetjük [19]. Az eljárásokat felületi és térfogati vizsgáló eljárásokra osztottuk. A csoportosítás lényege, hogy felületi vagy felületközeli, illetve az anyag térfogatában előforduló folytonossági hiányok kimutatására alkalmazzák azokat. Az eljárások megnevezése után mindenhol feltüntettük az eljárás nemzetközi szinten ismert jelölését, ami az angol elnevezés rövidítése.



139. ábra. A folytonossági hiányok elhelyezkedése a geometriai méretskálán.

4.4.1 Felületi vizsgálatok

A felületi vizsgálatok a munkadarab felületére nyitott vagy a felület alatti, de a felülethez közeli eltérések vizsgálatára szolgálnak.

Szemrevételezéses vizsgálat (VT):

A szemrevételezéses (vizuális) vizsgálat az egyik legrégebben alkalmazott és legegyszerűbbnek tűnő vizsgálati módszer, amelyet az általános felfogás gyakran indokolatlanul lekezel. Fontosságát, alapvetőségét mi sem bizonyítja jobban, mint hogy egy technológiai folyamat befejezését követően, ha sokszor nem is tudatosan, de elvégzésre kerül. Egy hegesztett kötés esetében például az élelőkészítés, maga a hegesztett kötés, vagy a szerkezet egyes tulajdonságai más módon nem, vagy csak nagyon körülményesen meghatározhatók. A vizsgálati módszer alkalmazása nem csak a becslés, a szemmérték használatát jelenti, hanem mérőeszközök, idomszerek segítségével történő számszerű adatok nyerését is.



A vizsgálat szakszerű elvégzésének sok feltétele van. Ilyenek: a megvilágítás, a nagyítók alkalmazása, a hozzáférhetőség, a vizsgálatot végző személlyel szembeni követelmények (MSZ EN ISO 9712 szerinti tanúsítás, megfelelő jártasság a szabványokban, a technológia ismerete) stb. Szemrevételezéses vizsgálatoknál a közvetlenül nem hozzáférhető helyeken megengedett és szokásos különböző segédeszközök használata, mint pl. tükrök, nagyítók, endoszkópok, TV-rendszerek. Endoszkóp használatakor figyelembe kell venni, hogy nehezen ellenőrizhető a színhelyesség, illetve a méretek meghatározása igen nagy gyakorlatot kíván meg.

Az eljárást felületi repedések, üregek, pórusok, zárványok, geometriai méretek vizsgálatára, illetve a felület általános értékelése céljából alkalmazzák, bármelyik anyagfajta esetében.

Folyadékbehatolásos vizsgálat (PT):

A folyadékbehatolásos (penetrációs) vizsgálat a felületre nyitott folytonossági hiányok (repedések, pórusok) kimutatására alkalmas, viszonylag egyszerű és kis eszközigényű. Fizikai elve a kapillaritás és a háttérkontraszt. A vizsgálat menetét az *140. ábra* mutatja sematikusan (d az emberi szem felbontó képessége): a megfelelően előkészített (szennyeződéstől, zsírtól, olajtól megtisztított) felületre (a) felhordják az igen kis felületi feszültségű, élénkvörös színű behatoló folyadékot (b), majd a behatolási idő (15 perc, 15–20°C hőmérséklet esetén) letelte után eltávolítják a felesleges behatoló anyagot (c). Az időt a hőmérséklet csökkenése jelentősen hosszabbítja, illetve a magasabb hőmérséklet csökkenti. Ezt követően a felületre felvitt, fehér előhívó anyag kiszívja a folytonossági hiányokból az azokba behatolt jelzőfolyadékot (d), és az eltérések láthatóvá válnak. A fehér előhívóanyagon megjelenő vörös behatoló anyag kontraszthatása és a hibánál nagyobb kiterjedésű (szélesebb) megjelenése biztosítja a nagyobb felbontóképességet. A hiba kimutathatósága növelhető fluoreszkáló behatoló folyadék alkalmazásával.



140. ábra. Folyadékbehatolásos vizsgálat menete

Ügyelni kell arra, hogy a vizsgálat azonos helyen jelentkező hiba esetén legfeljebb 2–3-szor végezhető el egymás után, mert a folytonossági hiányba beszárad a jelzőfolyadék. A vizsgáló anyagok folyadék változatai különböző módon állnak a felhasználó rendelkezésére: a legáltalánosabban használt a hajtógázos palack, ami a legkényelmesebb, de a legköltségesebb is. Különleges esetekben (pl. atomerőműben) a vizsgálószerek összetételét, halogén-, kéntartalom vagy gyúlékonyság, a felhasználás speciális igényéből adódóan figyelembe kell venni.

A kiértékelés regisztrálása vázlattal, fotóval, videóval és ritkábban lefejthető előhívóval, illetve tapadó szalaggal is történhet.



A folyadékbehatolásos vizsgálatot nem mágnesezhető anyagok (ausztenites korrózióálló acélok, nem-vas fémek) esetében kizárólagosan alkalmazzák.

Mágneses vizsgálat (MT):

A mágneses (korábbi elnevezéssel: mágnesezhető poros) vizsgálat ferromágneses anyagokon végezhető el, a felületre nyitott és a felület közvetlen közelében elhelyezkedő folytonossági hiányok kimutatására alkalmas eljárás. Szerkezeti anyagaink közül az ötvözetlen, gyengén ötvözött és egyes közepesen ötvözött acélok tekinthetők a vizsgálat szempontjából ferromágnesesnek. Az eljárás fizikai elve az, hogy a vizsgált darabban haladó mágneses erővonalak a hibák helyén eltérülnek, azaz "kilépnek a felületre" és a mágneses fluxus a levegőben záródik. A felületre felvitt mágnesezhető por (indikáló anyag) a szórt fluxus helyein összegyűlik és információt ad a folytonossági hiány helyéről, lásd a 141. ábra.





A munkadarab felmágnesezése többféle módon történhet. A leggyakrabban járommágnest és áramátfolyással történő felmágnesezést használnak. Állandó mágnesek alkalmazására viszonylag ritkábban kerül sor, elsősorban helyszíni vizsgálatok során. A felmágnesezés történhet egyenárammal vagy váltóárammal. Az egyenáramú felmágnesezés alkalmazásának előnye a mélyebb hibakimutathatóság, viszont hátránya a kisebb érzékenység. Mágnesezhető poros vizsgálatnál alapértelmezett esetben váltóáramú (50 Hz) mágnest alkalmazunk.

A vizsgálat megtervezése és alkalmazása során figyelembe kell venni, hogy a térerősség iránya és a hiba főtengelye között bezárt szögtől függ annak kimutathatósága. Például, hegesztési varratok vizsgálata során a felmágnesezést úgy kell elvégezni, hogy a kereszt- és hosszirányú hibák is kimutathatóak legyenek, lásd az 142. ábrát (a varrat tengelyével 45°, illetve 135°-ot bezáró szöggel, megfelelő átfedéssel).

142. ábra. Hegesztési varrat mágnesezése





Az indikáló anyag lehet száraz por vagy folyadék formájú. A feketefehér eljárás mellett gyakran alkalmazásra kerül a fluoreszkáló módszer használata. Ebben az esetben az indikáló mágnesezhető por fluoreszkáló anyaggal van bevonva és a kiértékelés ultraibolya fényben történik. Ez bonyolultabbá teszi ugyan a vizsgálatot, de nő a módszer érzékenysége.

Örvényáramos vizsgálat (ET):

Az örvényáramos vizsgálat villamos vezető anyagok vizsgálatára alkalmas. Fizikai elve, hogy a vizsgálandó anyag inhomogenitása (kémiai összetétel, vastagság,...), a felületén található repedések, üregek, zárványok előidézte villamos vezetőképesség és/vagy mágneses permeabilitás-változás detektálható. A *143. ábra* mutatja a vizsgálat elvi elrendezését.



143. ábra. Örvényáramos vizsgálat elve.

A váltakozó árammal átjárt vizsgáló tekercset (szondát) közelítik a villamos vezető darabhoz. A váltakozó áram mágneses tere örvényáramokat indukál a darabban, amelyeknek szintén kialakul a saját mágneses terük. A megfelelően kialakított szonda érzékeli a két mágneses tér eredőjét. Inhomogenitás vagy folytonossági hiány esetén az eredő mágneses tér eltér a "hibátlan" anyag esetén érzékelt eredő mágneses tértől. Az eltérés – alkalmas hitelesítés mellett – detektálható.

Örvényáramos vizsgálatot atomerőműben jellemzően a hőcserélők hőátadó csöveinek a vizsgálatához alkalmaznak. Az eljárás a gőzfejlesztő hőátadó csövek kizárólagos vizsgálata világszerte.

Az 144. ábra a VVER–440 atomerőmű gőzfejlesztő hőátadó cső örvényáramos vizsgáló berendezésének két részletét mutatja. A baloldali képen a manipulátor látható, amit a primer kollektoron rögzítenek. A jobboldali kép a kollektorban található részt mutatja. Látható a szondapozícionáló, illetve -bevezető cső. Az adatgyűjtés a szonda egyenletes sebességgel történő kihúzása közben történik. Az eljárás teljesen hasonló a VVER–1200 reaktor gőzfejlesztőinél is.

Ezen kívül örvényáramos vizsgálatot alkalmaznak a tőcsavarok menetes részének, valamint a menetes fészkeknek, továbbá a reaktortartály belső, plattírozott felületének a vizsgálatára.





144. ábra. VVER-atomerőmű gőzfejlesztő hőátadó cső vizsgálat

4.4.2 Térfogati vizsgálatok

A térfogati vizsgálatok a darab belsejében található eltérések vizsgálatára szolgálnak. Bizonyos körülmények között felületi hiányokat is lehet velük vizsgálni.

Radiográfiai vizsgálat (RT):

A radiográfiai vizsgálat elsősorban térfogati jellegű folytonossági hiányok kimutatására alkalmas eljárás, de kedvező körülmények között képes detektálni síkszerű hibákat is. A vizsgálat fizikai elve, hogy a kis hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás áthatol a szilárd testeken, fémeken. Az elektromágneses hullámok a vizsgálandó darabon való áthaladásuk közben valamilyen mértékben elnyelődnek, azaz intenzitásuk csökken. Az elnyelődés mértéke a darab anyagának gyengítési tényezőjétől és vastagságától függ. Az intenzitásgyengülést a következő képlet írja le:

$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$,

ahol *I* a sugárzás intenzitás, I_0 az intenzitás kiinduló értéke, μ az anyag gyengítési tényezője és x a vastagsága.

A darabban található folytonossági hiányok az áthaladó sugárzást általában kevésbé gyengítik, ezért a darabból kilépő sugárzás intenzitása nagyobb lesz, amelynek detektálásával a hiány helye, közelítő mérete felderíthető. A detektálást leggyakrabban erre a célra kifejlesztett röntgenfilmekkel végzik. Az utóbbi évtizedben megjelent és terjed a többször felhasználható lemez, illetve a digitálismátrix-detektor (azaz a digitális radiográfia elemei). A lemezről a kép egy kiolvasó eszköz segítségével digitális formában kerül rögzítésre, a mátrixdetektor közvetlenül, digitális formában rögzíti a képet.

A radiográfiai vizsgálat végzése során az egészségre káros sugárzások keletkeznek, az ezekkel kapcsolatos védő intézkedések nehezítik az eljárás alkalmazását. Az ipari gyakorlatban két fő vizsgálati módszert különböztetünk meg a sugárforrások szerint: az egyik a röntgencsővel történő vizsgálat (nem állandó sugárzás), a másik a γ-sugárzó radioaktív izotóppal történő vizsgálat (állandó sugárzás). Egy radiográfiai vizsgálat elvi vázlatát mutatja a *145. ábra.*







A radioaktív izotópok élettartama, azaz felhasználhatóságuk ideje felezési idejük függvénye (pl. az Ir-192 felezési ideje 74,4 nap, a Co-60 izotópé 5,26 év). A radiográfiai vizsgálati technikára jellemző izotópok: Tm-170, Yb-169, Se-75, Ir-192, Co-60. A radioaktív izotópok, miután folytonos sugárzók, a megfelelő védelmükről gondoskodva tárolhatók és szállíthatók csak. Használatuk során a munkatartóból kerülnek kitolásra, majd a felvétel elkészülte után, visszahúzásra. Az 146. ábra egy munkatartót mutat.





A radiográfiai vizsgálatok alapvető kérdése a képminőség. Ez határozza meg a részletek felismerhetőségét. A felvételek képminőségének meghatározásához képminőség-jelzőt használnak, amely változó méretű elemekből álló, sorozatot alkotó eszköz (huzalokból vagy furatos lépcsőkből álló sorozatok). A hiba felismerhetősége az intenzitás különbség (ΔI) érzékelésén, kimutatásán múlik. Az alkalmazott filmek intenzitás-feketedés görbéi nem lineárisak, így nagyobb feketedésnél azonos intenzitás-különbség esetén, nagyobb a feketedés-különbség, vagyis jobb a hiba-kimutathatóság.

Ultrahangos vizsgálat (UT):

Az ultrahangos vizsgálat fizikai elve az, hogy szilárd testekben, fémekben az ultrahanghullámok (azaz a hallható hang frekvenciatartományánál nagyobb frekvenciájú hanghullámok) viszonylag jól, kis



Atomerőműi Képzési Bázis

csillapodással egyenes vonalban terjednek, és az eltérő akusztikai impedanciájú határfelületekről viszszaverődnek. Az akusztikus impedancia az anyag sűrűségének és a hanghullám terjedési sebességének a szorzata. Ez a jelenség teszi lehetővé, hogy ultrahangos vizsgálat alkalmazásával folytonossági hiányok (elsősorban síkszerű) kimutatása lehetséges.

A vizsgálatok során az ultrahanghullámok (a gyakorlatban 0,5–20 MHz frekvenciatartomány) gerjesztése és érzékelése is piezoelektromos vizsgáló fejekkel történik. Az esetek jelentős részében a gerjesztés és az érzékelés ugyanazzal a fejjel történik. A vizsgálathoz különböző szög alatti besugárzást és különböző frekvenciájú vizsgálófejeket használnak. A 90°-tól eltérő besugárzókat szögfejeknek nevezik, a hegesztett kötések vizsgálatára általában ilyeneket használnak. A visszaverődő jelek, a vizsgáló készülék képernyőjén jelennek meg, melyek alapján következtethetünk a folytonossági hiányok nagyságára és helyére.

A hagyományos vizsgálattechnika alapvetően két módszert különböztet meg: átsugárzásos technika, illetve impulzus-visszhang technika. Az átsugárzásos technika alapja a tárgyon keresztül haladó ultrahang-energia gyengülésének a mérése. A vizsgálatok általában két vizsgáló fejjel (adó és vevő) történnek, elsősorban lapos termékek (lemezek) ellenőrzésére, merőleges és szögvizsgáló fejekkel is. A módszerrel a hiba mélység irányú elhelyezkedése nem azonosítható. A vizsgálati módszer alkalmas lehet lemezek rétegességének kimutatására, illetve hanggyengülés mérésére. Egy esetleges elrendezés a 147. ábrán látható.





Az impulzusvisszhang-technika lényege, hogy a munkadarab belsejében lévő határfelületről (folytonossági hiány) visszaverődött (vagy eltérült) jeleket használják fel a vizsgálat során, lásd *148. ábra.* A visszaverődött jelet amplitúdója és az időskálán elfoglalt helye jellemzi, az előbbiből a visszaverő felület nagyságára, az utóbbiból a vizsgálófej és a reflektáló felület (hiány) távolságára lehet következtetni. A jel-amplitúdó nagyságát a reflektor méretének meghatározásához valamilyen kiválasztott jellemzőhöz hasonlítják. Ilyenek lehetnek például a következők: összehasonlítóreflektor-görbe (ÖRG-módszer), távolság–erősítés–nagyság (TEN-módszer), hátfalvisszhanghoz való viszonyítás.



148. ábra. Ultrahangos vizsgálat, impulzus-visszhang módszer



A korszerű ultrahangos vizsgáló eljárások közé soroljuk a fázisvezérelt, a futásidő-szóródásos vagy a vezetett hullámokat alkalmazó technikát.

A fázisvezéreelt (*Phased Array, PA*) ultrahangos technika lényege, hogy a mechanikus rezgést kibocsátó hagyományos mono-kristály helyett több egyedi kristályból (multi-kristály) álló szabályos elrendezést (*array-t*) alkalmaznak hangforrásként. A kis egyedi források hangtereinek hullámfrontjai interferálnak és egy közös hullámfrontot képeznek. Az egyedi hangforrások gerjeszthetők egymáshoz képest késleltetéssel, valamint szinkronizálhatók fázis, illetve amplitúdó szerint és így egy vezérelhető, fókuszált hangnyaláb hozható létre, aminek szoftver úton változtatható a szöge, a fókusztávolsága, a fókuszban mért átmérője.

A 149. ábra sematikusan mutatja a mono- és a multi-kristály (PA) közötti különbséget. A monokristály hangnyalábja egytengelyű és divergens, ezért ez kis valószínűséggel reflektál a hangnyaláb tengelyén kívül eső repedésekről. A fázisvezérelt vizsgálat esetében a nyaláb fókuszált és többtengelyű, ezért a legkülönbözőbb orientációjú repedések detektálásának is nagy a valószínűsége.



149. ábra. Általános irányú hiányok kimutathatósága hagyományos és fázisvezérelt technikával [22]



Amíg a hagyományos impulzus-visszhang módszernél az inhomogenitásokról visszaverődő hangenergia nagyságát és a hang által megtett út hosszát mérik, elemzik, addig a futásidő-szóródásos módszer (*Time-Of-Flight-Diffraction, TOFD*) esetén a reflektorok végpontjain, szélén, például a repedések élén szóródó jeleket észlelik. TOFD-módszerrel három hasznos jelet látunk a képernyőn a vizsgálófejek adó-vevő elrendezése kapcsán. Az első egy felületi hullám, amely az adó- és vevőfej között alakul ki; amikor nincs anyaghiba, az elsődleges hátfaljelet a hátfalról közvetlen visszavert longitudinális hullám okozza, ami a második hasznos jel; a harmadik jel egy újabb hátfal jel, amely az előző jelet létrehozó hullám átalakulásakor (longitudinális-transzverzális átalakulás). Inhomogenitás (anyaghiba) jelenléte esetén az annak tetejéről (2) és aljáról (3) szóródó hang longitudinális összetevője okozza az anyaghiba felső és alsó indikációját. A két élről érkező hangutak közti különbség alapján az anyaghiba mélységi mérete meghatározható. Az előzőeket mutatja a *150. ábra*.





A TOFD-módszer a felületre merőlegesen elhelyezkedő síkbeli anyaghibák mélységének mérésére, illetve a varratgyök korróziós repedéseinek észlelésére és mérésére a legpontosabb ultrahangos módszer, elterjedten használják a nukleáris iparban.

Amíg az ultrahangos vizsgálatok jelentős részét továbbra is korlátozott kiterjedésű hangnyaláb alkalmazásával (azaz hagyományos módon) végzik, amely esetben az ultrahang hullámhossza lényegesen kisebb, mint a vizsgálandó tárgy mérete, és így viszonylag lokalizált információt kapunk, addig megjelent és rohamosan fejlődik egy másik ultrahangos terület, a vezetett hullámok (*Guided Wave vagy* más elnevezéssel *Long Range UT, LR UT*) alkalmazása. Ennek a lényege, hogy az alkalmazott hang hullámhossza a vizsgálandó berendezés falvastagságának a nagyságrendjében van vagy nagyobb annál, és ez az alacsony frekvenciájú ultrahang úgy terjed a vizsgálandó tárgyban, hogy annak geometriai határa vezeti. A vizsgálat hatótávolsága nagy és általában globális információt szolgáltat. Az *151. ábra* mutatja a hagyományos és az LRUT közötti elvi különbséget.





151. ábra. A hagyományos és a vezetett hullámokkal történő ultrahangos vizsgálat elve

LRUT esetében az ultrahangot vagy piezoelektromos vagy magnetosztrikciós elemekkel juttatják be az anyagba. Fő alkalmazási területe a csővezetékek vizsgálata, elsősorban azok korróziós károsodási helyeinek az azonosítása. Az LRUT egy keresőtechnika, és általában nem alkalmas a detektált hiány pontos jellemzésére. Alkalmas viszont a hiányok osztályozására amplitúdójuk alapján és – megfelelő kalibrálás esetén – a falvastagság csökkenése is meghatározható. Rendkívüli előnye, hogy rövid idő alatt nagy terjedelmű vizsgálatot lehet vele végezni.

Akusztikus emissziós vizsgálat (AT):

Az akusztikus emissziós vizsgálatot általában hegesztett szerkezetek (pl. nyomástartó edények) épségének globális ellenőrzésére használják. A vizsgálat fizikai elve az, hogy a berendezés növekvő terhelése során, az esetlegesen benne elhelyezkedő hiányok terjednek, ami a berendezésben a terhelés hatására felhalmozódott rugalmas energia felszabadulását eredményezi. A rugalmasenergia-felszabadulás ultrahangok keletkezésével jár együtt, amelyek megfelelő érzékelőkkel detektálhatók. A vizsgálat alkalmas lehet az ultrahang futásidejének (a hangforrástól mért hangútnak) a figyelembevételével – több érzékelő használata esetén – a hangforrás helyének meghatározására (lokalizáció).

Akusztikus emissziós vizsgálatot a nukleáris iparban nyomástartó berendezések nyomáspróbája során végeznek. A nyomáspróba történhet a berendezés gyártásának a befejezésekor a gyártóműben, a felállítás helyén, az üzemelést megelőzően és üzemeltetés közben, időszakosan.

Reaktortartály nyomáspróbája során végzett akusztikus emissziós vizsgálat egy jellegzetes görbéjét mutatja a 152. ábra, ahol a vízszintes tengelyen a próba (illetve a vizsgálat) ideje, a függőleges tengelyen az összegzett akusztikus eseményszám növekedése, illetve a próbanyomás változása látható.





152. ábra. Akusztikus emissziós vizsgálat nyomáspróba során

Látható az ábrán, amikor az eseményszámok növekedési üteme jelentősen csökken, illetve megáll a terhelések állandósulásakor, ami a szerkezet stabilitására utal. Akusztikus eseményeket idézhet elő a diszlokációk mozgása, a képlékeny alakváltozás, a repedésterjedés és egyéb, mikroszerkezeti (zárványokkal kapcsolatos) esemény, de folyamatos akusztikus jeleket okoz a szivárgás jelensége is. A kiértékelés során a különböző jellemzők eloszlását, a terhelésnek az összegzett eseményszám vagy amplitúdó, vagy a hangjelek energiájának az alakulását valamilyen változó függvényében veszik figyelembe.

Tömörségi vizsgálat (LT):

A nyomástartó rendszerek esetében szükség van a tömörség vizsgálatára. A tömörség a berendezés összes elemének azon tulajdonsága, amely a szerkezet falán keresztül a folyadékok vagy gázok olyan kis mennyiségű átáramlását biztosítja, amit még meg lehet engedni. Abszolút tömörségről nem beszélhetünk. A tömörség ellenőrzése gáz- vagy folyadék-halmazállapotú vizsgálóanyagokkal történik, amelyeknek a berendezés falán történő áthatolását mérik, azok valamilyen fizikai tulajdonságán keresztül. A gáz- és folyadéktömörségi vizsgálatok közül az előbbi érzékenyebb, ezért meg kell különböztetnünk őket egymástól, mert a folyadékkal történő vizsgálattal tömörnek talált berendezés nem biztos, hogy egyúttal gáztömör is.

A tömörségvizsgálati eljárások sokféleségük miatt különbözőképpen csoportosíthatók. Beszélhetünk lokális és az egész berendezésre kiterjedő, kvalitatív vagy kvantitatív vizsgálatról. Csoportosíthatjuk őket érzékenységük szerint, vagy a vizsgáló közeg alapján is. Áramlási irány szerint megkülönböztethető, hogy a gázáramlás a vizsgálati tárgyba vagy a vizsgálati tárgyból történik.

A gázzal történő (pneumatikus) tömörségvizsgálatok közé tartoznak a következők:

- buborékos tömörségi vizsgálat,
- halogénes tömörségi vizsgálat
- héliumos tömörségi vizsgálat
- éghető gázzal történő vizsgálat,
- ammóniás tömörségvizsgálat.



A buborékos tömörségi vizsgálat egyik eljárására (vákuumos vizsgálat) mutat példát az 153. ábra. Itt a nyomáskülönbséget a felület két oldalán a vizsgálati felület lokális vákuumozásával oldották meg.



153. ábra. Vákuumos tömörségi vizsgálat.

A hidraulikus tömörségi vizsgálat víz (üzemi közeg) alkalmazásával történik. Atmoszférikus berendezések esetén a detektálás a folyadékfelszín magasságváltozásának a mérésével, vagy a betöltött folyadék köbözésével és a látható felületek ellenőrzésével valósítható meg. Nyomástartó berendezések esetében a vizsgálatot a berendezés (első sorban a hegesztett, valamint az oldható kötések környezete) szemrevételezése jelenti. A felületen történő szivárgásellenőrzés érzékenységét fluoreszkáló anyag vízbe keverésével lehet jelentősen növelni.

Tömörségi vizsgálat végezhető a folyadékbehatolásos vizsgálat hagyományos eszközeivel is. Megfelelő felületelőkészítés után az egyik oldalra a behatoló folyadék kerül felhordásra, másik oldalra pedig az előhívó. A szükséges idő után a szivárgás helyén megjelenik az indikáló szer, és annak tulajdonságától függően megtörténhet az értékelés.

4.5 AZ IDŐSZAKOS ELLENŐRZÉS HATÉKONYSÁGA

Az előzőekben tárgyalt roncsolásmentes vizsgálatok kulcsfontosságúak az atomerőmű időszakos ellenőrzési programjában. Az üzemközbeni időszakos ellenőrzés (In-Service Inspection, ISI) periodikusan ismétlődő roncsolásmentes vizsgálatokból és nyomáspróbából áll. A vizsgálatok a berendezésekben található folytonossági hiányok jelenlétéről, elhelyezkedéséről, méreteiről és más jellegzetességeiről szolgáltatnak információt az adott berendezés szerkezeti integritásának az elemzéséhez.

Az időszakos ellenőrzés módszere az 1970-es években történt világméretű bevezetése óta jelentős fejlődésen ment át. Az első két évtizedben a részletekre kiterjedő előírások és szabványok képezték az ellenőrzés alapját. A későbbiekben az ellenőrzési filozófia olyan irányba mozdult el, ahol a hangsúly a potenciális károsodásnak kitett területeken van, továbbá megkövetelték a roncsolásmentes vizsgáló rendszerek (vizsgálati technológia, vizsgálóeszköz és vizsgáló személyzet) teljesítőképességének az igazolását. Ebből a gondolkodásmódból fejlődött ki a roncsolásmentes vizsgáló rendszerek minősítése. Ezen túlmenően, kiterjesztették a valószínűségi biztonságelemzést (*Probabilistic Safety Analysis, PSA*) a passzív berendezésekre, ami megindította a kockázat szempontjait figyelembe vevő időszakos ellen-



őrzés elterjedését (*Risk Informed In-Service Inspection, RI–ISI*). Ez a folyamat hozzájárult az időszakos ellenőrzés hatékonyságának a növekedéséhez. Hatékony időszakos ellenőrzés alatt azt értjük, amikor a biztonság és az ellenőrzési költségek optimális egyensúlyban vannak.

Napjainkban az atomerőművek többségében a napi gyakorlat részévé váltak a hatékony időszakos ellenőrzés elemei. Az evolúciós folyamatot a *154. ábra* mutatja.



154. ábra. Időszakos ellenőrzés hatékonyságának áttekintése [23]

4.5.1.Roncsolásmentes vizsgáló rendszerek minősítése

Ahogy azt bemutattuk, a hatékony időszakos ellenőrzés egyik összetevője a vizsgáló rendszerek teljesítőképességének igazolása. Ennek a tevékenységnek az alapjait a '80-as években, Európában és az USA-ban közel egy időben rakták le (Európában: *inspection validation, majd inspection qualification;* az USA-ban: *performance demonstration*). A hazai gyakorlat az európai módszertant követi. A vizsgálatminősítés célja az elnevezéstől függetlenül mindenütt ugyanaz: szisztematikus elemzéssel bizonyítani, hogy a roncsolásmentes vizsgáló rendszer képes elvárt megbízhatósággal elvégezni az adott vizsgálati feladatot, a várható üzemi körülmények között.

Az azonos célkitűzés ellenére eltérések tapasztalhatók a megvalósításban. Az amerikai módszer lényegében egy általános minősítés, mert nem erőmű-, illetve nem folytonosságihiány-specifikus. Részleteit az ASME kód XI kötetének egy kötelező érvényű függeléke rendeli el. A bizonyítás ellenőrző darabokon végzett mérésekkel történik, és a darabokban elhelyezett folytonossági hiányok korlátozott száma következtében az eredmény statisztikus érvényessége korlátozott. Nem követeli meg az USA szabályozása a szerkezeti integritás szempontjából kritikus, továbbá a legnehezebben vizsgálható hiány (ún. *worst case defect)* bevonását a minősítési folyamatba.



Ennek következtében nem zárható ki, hogy a minősítés eredménye a valóságosnál optimistább lesz.

Az európai megközelítés ezzel szemben specifikus minősítésként jellemezhető [24]. A minősítés folyamata itt azzal kezdődik, hogy az atomerőmű üzemeltetője meghatározza a vizsgálat célját, azaz a detektálandó folytonossági hiányt és a vizsgálat elvárt teljesítőképességét. Az utóbbi az adott folytonossági hiány detektálásának a valószínűségét és a hiány méretének és pozíciójának a bizonytalanságát jelenti. Magát a minősítést erre az esetre tervezik meg és végzik el. Az európai vizsgálatminősítés legfontosabb eleme a műszaki bizonyítás. Ez egy dokumentum, ami összefoglalja azokat az információkat, amelyek bizonyítják az adott vizsgáló rendszer alkalmazhatóságát az adott berendezésre. A műszaki bizonyítás kiterjed egyebek mellett az roncsolásmentes vizsgáló eljárás fizikai megalapozására, korábbi tapasztalatok elemzésére, körvizsgálatok eredményeinek felhasználására és matematikai modellek bemutatására. Ezen túlmenően itt is sor kerülhet a minősítés tárgyát képező berendezést reprezentáló ellenőrző darabokon végzett gyakorlati vizsgákra.

Az európai módszer sajátossága, hogy általában elválik egymástól az eljárás és berendezés, valamint a vizsgáló személyzet minősítése. A vizsgáló eljárás és berendezés alkalmasságát ún. nyílt gyakorlati vizsgán (az ellenőrző darabokban elhelyezett folytonossági hiányok ismertek a vizsgáló előtt), míg a vizsgáló személy alkalmasságát ún. zárt gyakorlati vizsgán (a hiányok nem ismertek a vizsgáló személy előtt) végzik.

A vizsgálatminősítés napi gyakorlattá vált a világ atomerőműveinek a többségében, és beépült a hatósági követelményekbe is. Elvégzését a magyar nukleáris hatósági is megköveteli. Újabban, logikus módon, megkövetelik az időszakos ellenőrzés referenciaszintjét jelentő, az első üzembehelyezést megelőző vizsgálatok (*Pre-Service Inspection, PSI*) esetében is. Ezt az eljárást követi a Paks II Atomerőmű esetében a hatóság.

4.5.2 Kockázati szempontokat figyelembe vevő időszakos ellenőrzés

A roncsolásmentes vizsgálatok tekintetében a kockázatot a meghibásodás bekövetkezése valószínűségének és a berendezés meghibásodása következményének a szorzatával szokták kifejezni.

A kockázat grafikus ábrázolásának szemléletes módja a kockázati térkép (kockázati mátrix), ami fél-kvantitatív módon ábrázolja, illetve rangsorolja az eseteket kvalitatív skálák (pl. kicsi–közepes–nagy, illetve csekély–közepes–súlyos) vagy az azokkal összhangba hozható tágabb valószínűségi kategóriák (pl. 10-4–10-5) használatával. Egy ilyen kockázati mátrixot mutat a *155. ábra.*

Mivel a kockázatot a tengelyekre írt változók szorzataként definiálják, a kettős logaritmikus léptékű ábrázolásban a 45°-os egyenesek jelentik az állandó kockázat vonalait, amelyek elválasztják egymástól a különböző kockázatú területeket. Ha csökkenteni kívánjuk a kockázatot, amire elsősorban a meghibásodás bekövetkezése valószínűségének a csökkentése útján van esély, a vizsgálatok ugyanis erre vannak hatással, akkor a vizsgálandó rendszer vagy berendezés azon tartományaira kell koncentrálnunk, ahol a meghibásodást kiváltó károsodási folyamatok a legnagyobb valószínűséggel fordulnak elő. A megkövetelt kockázat elérése érdekében a rendelkezésre álló vizsgálati ráfordítások átcsoportosíthatók vagy – szükség esetén – pótlólagos vizsgálatok is alkalmazhatók.







A kockázati szempontok figyelembevétele az ellenőrzés hatékonysága növelésének lényeges eleme. Célja az atomerőmű biztonságának növelése (vagy legalább a szinten tartása) oly módon, hogy az időszakos ellenőrzésre fordítható erőforrásokat a legnagyobb kockázatú, azaz a biztonságra legnagyobb hatással lévő berendezésekre koncentrálják, és a vizsgált berendezéseket kockázati sorrendbe állítsák. Az időszakos ellenőrzés a kockázat két eleme közül kizárólag a meghibásodás bekövetkezésének a valószínűségét befolyásolja, a következmények tekintetében irreleváns. A kockázati szempontokat figyelembe vevő időszakos ellenőrzést (elsősorban a csővezetékek területén) egyre több atomerőmű-üzemeltető alkalmazza, felismerve annak a biztonság növelésére gyakorolt egyértelmű hatását, továbbá a vizsgálatok egy hányadának az elhagyásából származó gazdasági előnyt.

4.6 ÜZEMBE HELYEZÉST MEGELŐZŐ ELLENŐRZÉSI PROGRAM

Az atomerőmű első üzembe helyezését megelőző ellenőrzési program (PSI) különös jelentőséggel bír: egyrészt igazolnia kell a nyomástartó berendezések üzemeltetésre való alkalmasságát, azaz az ellenőrzés terjedelmébe eső berendezéseknek meg kell felelniük az időszakos ellenőrzési szabályzat/ kód követelményeinek; másrészt ennek eredménye képezi a későbbi időszakos ellenőrzés (ISI) referenciáját. Ebből eredően a PSI-vel szemben támasztott követelmények jelentős mértékben közösek az ISI-vel szemben támasztott követelményekkel, de vannak speciális PSI-követelmények.

A legfontosabb követelmény a PSI és ISI közötti konzisztencia biztosítása az eredmények összehasonlíthatósága érdekében. Ez úgy érhető el, ha a PSI-hez a lehetőségek határán belül ugyanazokat a vizsgáló eljárásokat, vizsgálati technikát és vizsgáló eszközöket alkalmazzák, amelyeket alkalmazni terveznek a későbbi ISI során. Ez nem zárja ki a berendezés gyártóművében végzett vizsgálatok vagy azok egy részének bevonását. Ha az üzemeltetés időszakában (ISI) továbbfejlesztett vagy új eljárásokat, technikákat, vizsgálati technológiákat vagy készülékeket alkalmaznak, akkor – amennyire lehetséges – meg kell teremteni az összhangot a korábbi eljárásokkal, technikákkal. Ekkor az összehasonlítás



lesz a későbbi vizsgálatok új/módosított nullállapota. Az 156. ábra két egymást követő örvényáramos vizsgálat eredményeinek az összehasonlítását mutatja.





Ahhoz, hogy az egymást követő vizsgálatok eredményei összhangban legyenek, beleértve a PSI és ISI összhangját, ennek figyelembe vételével kell a vizsgáló berendezéseket (szoftver és hardver) megválasztani. Ezt akkor is szem előtt kell tartani, ha az erőmű PSI/ISI szolgáltatót vált, különös tekintettel a vizsgálatminősítés összemérhetőségére, az értékelés módszertanára, a vizsgálatok dokumentálására, beleértve az elektronikus formátumú dokumentumok rendelkezésre állását és olvashatóságát.

4.7 NYOMÁSPRÓBA A GYÁRTÁS ÉS ÜZEMBE HELYEZÉS SZAKASZÁBAN

A nyomáspróba, mint az időszakos ellenőrzés próbája, olyan – időszakosan végzett – próba, amelynek célja annak igazolása, hogy az adott berendezés szerkezeti integritása biztosítja a terv szerinti funkciók ellátását. A nyomáspróbát jellemzően az időszakos roncsolásmentes vizsgálati ciklust követően végzik el, hagyományosan az üzemi nyomást meghaladó értéken. A fűtőelem-átrakásra, karbantartásra és ellenőrzésre általában éves (Paks II esetében 18 hónapos) rendszerességgel történő leállások befejezésekor, a blokk visszaindulása időszakában tömörségi próbát hajtanak végre, amelynek nyomása általában megegyezik az üzemi nyomással. Míg az utóbbi célja a teljes rendszer (pl. reaktor-hűtőkör) tömörségének az ellenőrzése, addig az előbbi a rendszerben található berendezések (csővezetékek, tartályok, hőcserélők) integritásának igazolását szolgálja. Az időszakos nyomáspróbák elvégzéséről az egyes nemzeti előírások eltérően rendelkeznek. Míg például az orosz, a német és a francia nukleáris hatóság előírja elvégzésüket, addig az amerikai kód, ASME BPVC Section XI (és az ezzel megegyező MSZ 27011) csak hegesztéssel történő javítás esetén tartja szükségesnek az üzemközbeni nyomáspróbát, egyébként megelégszik a ciklus zárásakor az üzemi nyomáson elvégzett tömörségi próbával.



Az amerikai álláspont mögött az a felismerés húzódik, hogy a tömörségi próbához képest növelt nyomáson végrehajtott vizsgálat nem járul hozzá érdemi információval a berendezések szerkezeti integritása a megítéléséhez. A gyártóműben és az üzembe helyezéskor elvégzett nyomáspróbák ugyanis létrehozzák a berendezésben a szükséges helyi maradó alakváltozásokat; az időszakos nyomáspróba ezzel szemben hozzájárul az anyagszerkezet halmozódó károsodásához, ami elősegíti a fáradási alapstruktúra kialakulását, és ezzel növeli új repedések keletkezésének a valószínűségét. Tehát az időszakos ellenőrzési program keretében térfogati (ultrahangos) vizsgálatnak alávetett berendezések esetében, amilyenek az első (és többnyire a második) biztonsági osztályba sorolt berendezések, nemcsak szükségtelen, hanem hátrányos is lehet a nyomáspróba. Az álláspontot a nyomáspróbával összefüggő üzemeltetési nehézségek, valamint a próba végrehajtása során fellépő biztonsági kockázat növekedése is támogatja (téves operátori beavatkozás, meghibásodás kockázatának növekedése). Megjegyezzük, hogy a nyomáspróbát a nukleáris ipar az általános ipari gyakorlatnak a roncsolásmentes vizsgálat elterjedését megelőző időszakából örökölte. A hazai hatósági szabályozás szerint az időszakos nyomáspróbát (elterjedt nevén a szilárdsági nyomáspróbát) növelt nyomáson el kell végezni.

4.8 HIVATKOZÁSOK (4. FEJEZET)

[16] Fénymikroszkóp – Wikipédia (wikipedia.org)

- [17] B. Fekete et al. (2015): Low cycle thermomechanical fatigue of reactor steels: Microstructural and fractographic investigations. *Materials Science & Engineering* A. 640. Pp. 357–374
- [18] Prohászka J. (2001): A fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai. Budapest: Műegyetemi Kiadó.
- [19] Szunyogh L. (Szerk) (2007): Hegesztés és rokon technológiák. Budapest: Kézkönyv Gépipari Tudományos Egyesület.
- [20] D. Tabor (1996): Indentation hardness: fifty years on. A personal view, Phil. Mag. A, 74. (5.) Pp. 1207–1212.
- [21] Szabványban előírt paraméter-értékek változásának közvetett mérés-értékelése. KF zárójelentés. Budapest: Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., 2020.
- [22] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, R/D Tech Guideline, R/D Tech inc., Canada, 2004.
- [23] IAEA TECDOC–1853, Improvement of effectiveness of in-service inspection in nuclear power plants, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2018.
- [24] European methodology for qualification of non-destructive testing (third issue), EUR 22906 EN, EC DG JRC, Institute for Energy, 2007.



5. NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK ÉS CSŐVEZETÉKEK

5.1 ÁLTALÁNOS FOGALMAK

Nyomástartó berendezés: edény, csővezeték, biztonsági szerelvény és a nyomással igénybe vett tartozékok összessége.

Edény: nyomással igénybe vett töltet befogadására tervezett és gyártott egység első csatlakozásáig a hozzá tartozó szerkezeti elemekkel.

Csővezeték: a töltet szállítására szolgál, csőszakasz és szerelvényei.

Biztonsági szerelvény: jellemző nyomás túllépése ellen szolgál, közvetlen működésű ill. határoló készülék.

Tartozék: nyomástartó házzal rendelkező üzemeltetési feladattal rendelkező szerelvény.

E fogalmakat sok iparág, többek között az olaj- és gázipar, az energetikai ipar és a vegyipar alkalmazza, az energetikai ipar részeként a nukleáris ipar is használja. A nukleáris ipar jogszabályában (Nukleáris Biztonsági Szabályzatok – NBSZ) előírt fogalom eltér az általános ipari gyakorlatban alkalmazottól.

NBSZ 10. kötet 127. Nyomástartó berendezés és csővezeték fogalom: Mindazok a nyomástartó edények, tartályok, csővezetékek, biztonsági szerelvények és nyomással igénybe vett tartozékok, amelyek valamelyik biztonsági osztályba tartoznak. A nyomástartó berendezéshez tartoznak a nyomással igénybe vett részekhez közvetlenül kapcsolódó elemek, így különösen a karimák, a csonkok, a csatlakozó elemek, az alátámasztások, az emelőfülek.

Az atomerőmű gyakorlatában a nyomástartóberendezés-fogalom részletes meghatározása az alábbi:

- a) <u>Edény:</u> hidrosztatikus és túlnyomással igénybe vett, töltet befogadására tervezett, és arra gyártott szerkezeti egység az edényen található csonkok első tompavarratáig, karimás kötésű csonkoknál a csonk karimáig, valamint a hozzá tartozó szerkezeti elemek. Ide tartoznak a túlnyomás, illetve vákuum alatti edények, a tárolótartályok, a hőcserélők és a szűrők. Egy edény több, nyomással igénybe vett térből is állhat.
- b) <u>Biztonsági szerelvény:</u> a nyomástartó berendezést jellemző határérték túllépése elleni védelemre tervezett aktív biztonsági funkciót betöltő készülék. Ilyen:
 - a közvetlen nyomáshatároló készülék (pl. biztonsági szelep, hasadó tárcsa, törő- vagy nyíróelem és vezérelt túlnyomásvédelmi berendezés),
 - a határoló készülék, amely működésbe hoz eszközöket, vagy rendelkezik a lezárásról vagy a lezárásról és a reteszelésről (pl. nyomás-, hőmérséklet- vagy szintkapcsoló, valamint bizton-sági, mérő és szabályozó készülék) az alapszelepig.
- c) <u>Nyomástartó elem (tartozék)</u>: üzemeltetési feladattal és nyomástartó házzal rendelkező szerelvény (pl. armatúra, szabályzó szelep, mérőperem).
- d) <u>Csővezeték:</u> töltet szállítására szolgál. Csővezeték alatt cső, csőrendszer, csőidom, szerelvény, csőkompenzátor, vagy egyéb nyomástartó elem, illetve annak tartozéka (pl. csőtartó, rezgéscsillapító, elmozdulás határoló) értendő.

Nyomástartó rendszer: A nyomástartó rendszer az összeszerelt több nyomástartó rendszerelem, amely összefüggő működési egységet alkot.



A nukleáris ipar nyomástartó berendezéseinek a fejlődésére – hasonlóan más iparághoz – jellemző a létesítmények folyamatos teljesítménynöveléshez kapcsolódó változás. A nukleáris iparban az alap a nem nukleáris ipar szabályozása volt, tehát az első atomerőművi létesítési (tervezési) szabályozások lényegében nyomástartóberendezés-szabályzatok voltak.

5.2 NYOMÁSTARTÓ EDÉNYEK ÉS CSŐVEZETÉKEK TERVEZÉSI ELŐÍRÁSAI – NEMZETKÖZI KÓDOK

Azok az országok, amelyek jelentős fejlesztési kapacitással rendelkeznek és képesek atomerőmű építésére, kiadtak a nyomástartó berendezések és csővezetékek tervezésére teljes tervezési előírásrendszert. Az USA, Franciaország, Japán, Korea, Kanada és Oroszország szakértői megegyeztek abban, hogy a NEA MDEP (*Nuclear Energy Agency – Multinational Design Evaluation Programme*) keretén belül elkészítenek egy szabályzatokat összehasonlító dokumentumot e tárgykörön belül. A vizsgált szabályzatok (továbbiakban kódok) a következők voltak: AFCEN (RCC-M), ASME (Section III), CSA (N-285), JSME (S NC1), KEA (KEPIC-MN) és NIKIET (PNAE-G7). Ezek közül a CSA-előírásokat figyelmen kívül hagyjuk, mert a CANDU-blokkok tervezési előírásai eltérő elvi alapokat is jelentenek. A dokumentum a Class1 biztonsági osztályba sorolt rendszerek berendezések, csővezetékek, szivattyúk és szelepek előírásait tekinti át. A kiadott dokumentum azonosítója: *STP-NU-051-1 CODE COMPARISON REPORT for Class 1 Nuclear Power Plant.*

Lényeges, hogy mindegyik kód következetes szabályok összessége, így az adott terület követelményei függhetnek, és gyakran függenek is a többi szakasz követelményeitől. A tételes összehasonlítás a különbségek alapján nem minden esetben vezet a teljes kód helyes megítéléséhez. A kódok megfelelőségét a gyakorlat igazolja.

5.2.1 A francia kód

Az AFCEN által kiadott RCC-M-kód sok hasonlóságot mutat az ASME BPVC-kóddal. A szerkezet jelentősen eltér, hiszen az RCC-M olyan területeket is szabályoz, amit az amerikai előírásban más kötetetek (például anyagok, hegesztés, anyagvizsgálat) szabályoznak.

Sajátosságok (általános):

- Amíg az ASME-előírások minőségbiztosítás és tanúsítás témakörben a saját előírásokra (NQA-1), addig a francia előírások nemzetközi szabványokra (pld ISO 9001, IAEA 50 C/SG) hivatkoznak.
- Az ASME-előírások tervezőire vonatkozó "Professional Engineer" rendszert a francia szabályozás nem alkalmazza.
- Az RCC-M-kódban nagyszámú technikai különbség azonosítható, mely a szabályozásból fakadó különbségekre vezethető vissza.
- Eltér a tulajdonos (tervező és/vagy gyártó) felelőssége e különbségek kezelése érdekében.
- Ez utóbbi a szabályozási követelményekből fakadó különbség, mely összefügg a nukleáris ipar országonként eltérő gazdasági fontosságából fakadó kulturális és politikai különbségekkel.



Az RCC-M-kódban a tervezési előírásokat a 3000 jelű fejezet tartalmazza. A francia kód sokkal előadóbb jellegű. Eltérően szabályozza:

- a nyomástartó edények búvónyílás tervezését,
- a végeselem-analízis alkalmazását,
- kismértékben eltérnek a megengedhető feszültségek,
- a törési elemzés módszereit (RCC-M appendix ZG míg az ASME App G a ferrites anyagokra, addig az RCC-M ZG ausztenites anyagokkal is foglalkozik).

Azonosan alkalmazza az általánosfeszültség-filozófiát, a képlékeny–rugalmas számítási módszereket, a folyási kritériumot, a kritikus feszültségintenzitási tényezőt, (KIC), a terhelési kategóriákat és a termikus öregedést. Lényegében megegyeznek a menetes kötések számítási módszerei, a szivattyúk, szelepek előírásai. A tervezési jelentést mindkét kód alkalmazza arra a célra, hogy a tervezési követelményeknek való megfelelést igazolják.

Az előírásrendszerek közötti legmarkánsabb különbséget a nyomáspróba előírásoknál találjuk.

$$k = \max(1,43; 1,25 \times S_{MHT}/S_{MD})$$

A tényező függ a komponens nyomáspróba hőmérsékleten és a tervezési hőmérsékleten mért anyagjellemzőitől. E tényező az Európai Unió nyomástartó direktíva (97/23/CE) elveinek és szabványainak (EN 13445) a beemelését jelenti a francia nukleáris szabályzatba (RCC-M Appendix A paragraph 7.4). A francia kód ebben nem követi az ASME gyakorlatát, a szilárdsági nyomáspróbák értékének a csökkentését.

Megjegyzés: A jelen értékelés a Class1 osztályú atomerőművi nyomástartó berendezések és csővezetékek előírásaira terjed ki. Az EU-direktíva és a kapcsolódó EN-szabványok ilyen módon való beemelése a francia nukleáris kódban az alacsonyabb biztonsági osztályban (Class2 és Class3) még nagyobb jelentőséggel bír, hiszen e módszerrel a nem-nukleáris iparági szereplők (tervezők–gyártók–vizsgálók) könnyebben bevonhatók a tevékenységi körbe.

5.2.2 A japán kód

A Japán Tervezési Kódot (JSME Nuclear Code -JSME S-NC-1 2008: Rules on Design and Construction for NPPs, Division 1, LWRs) jelenleg a hazai atomerőművi tervezések mellett egy törökországi létesítménynél alkalmazzák.

Sajátosságok (általános):

- A japán kódban a minőségbiztosítás és tanúsítás előírásai eltérnek;
- A kód hegesztőanyagokat nem határoz meg;
- A kód több más kódban alapvető fogalmat nem definiál, például a névleges vastagságot, a nyomástartó anyagot;
- A minőségbiztosítás a japán ipari szabványok (JIS) alkalmazására épül.



A tervezési előírások sajátosságai a japán kódban:

- Az analízis elvei hasonlóak. A különbség az, hogy amíg például az ASME az elsődleges, illetve az elsődleges + másodlagos feszültséganalízis elveit írja le, addig a japán kód igen részletesen leírja a módszertant is. Az alkalmazott tényezők sok esetben eltérnek (ha kis mértékben is), ami a nemzeti kutatási programok eredményeinek a visszacsatolását jelenti. Több olyan fejezet is azonosítható a kódban, amelyek más országok szabályzatiban nem találhatóak, például a gőzfejlesztők U csöveinek rezgésével foglalkozó előírás vagy a hőfáradással foglalkozó. A szabályozások mögött a legtöbb esetben kutatási eredmények, üzemelési tapasztalatok állnak.
- Különlegessége, hogy a tervezésnél korróziós vagy eróziós pótlékot nem határoznak meg, ez egy későbbi fázis feladata, a nemzeti szabványok (JIS) alapján.
- A megengedhető feszültségek eltérnek, illetve az A és B terhelési állapotban nem határoznak meg értéket.
- A földrengés, mint terhelési eset kezelése és megengedhető értékei eltérnek.
- Csővezetékek, szivattyúk, szelepek esetében kisebb eltérések, pontosítások jelennek meg.

5.2.3 A koreai kód

A koreai nukleáris kód (KEPIC) egy folyamatosan fejlesztett dokumentum, amióta az első atomerőmű üzemelése megkezdődött Koreában 1978-ban (Kori NPP). A koreai jogszabályok alakulása eltér más országokétól, mert építettek francia, kanadai és amerikai blokkokat és minden esetben átvették a szállítók szabályzatát a blokképítéssel együtt.

A koreai szabályozás igen nagymértékben megegyezik az ASME-előírásokkal, de több ponton nemzeti kiegészítéseket használnak. Érdekesség például a kódszimbólumok rendszere, ami elveiben hasonló az ASME-hoz vagy a roncsolásmentes vizsgáló személyzet tanúsítása, ami kismértékben eltér.

5.2.4 Az EN-direktíva (kód)

Több ország szabályozásában a nukleáris biztonsági osztályba sorolt nyomástartó edények és csővezetékek tervezésénél – bizonyos korlátozásokkal és kiegészítésekkel – az Európai Nukleáris Kódot alkalmazzák. A Kód (ténylegesen egy direktíva, melynek a jele 97/23/CE) mögött harmonizált szabványrendszer található. E rendszerből emeljük ki a nyomástartó edények tervezése (EN 13445-3) és a csővezetékek tervezése (EN 13480-3) szabványokat.

A nyomástartó edények műszaki biztonsági követelményei szerinti besorolás és megfelelőség értékelés modul rendszerű (pl. töltetgáz, nyomás alatt oldott gáz, gőz és olyan folyadék, amelynek gőznyomása a megengedhető legnagyobb hőmérsékleten nagyobb, mint 0,5 bar túlnyomás, 1. csoportú anyag).

A nyomástartó edények és csővezetékek tervezési elveit a 157. ábra mutatja.






A szabvány atomerőművi felhasználása sok vitára ad okot, hiszen a p x V (nyomás x térfogat) és a kapcsolt közeg figyelembevételének a módja nem tükrözi a nukleáris létesítmény biztonsági szintjét, a valós kockázatot. A nukleáris berendezések sajátosságai: radioaktív közeg, sajátos igénybevételi módok, földrengés figyelembevétele, feszültséganalízis szükségessége, élettartam ellenőrzése fáradásra, roncsolásmentes vizsgálatok minősítése, külön biztonsági szabályzat érvényes, az osztályba sorolás (ABOS 1, 2, 3,) a meghatározó.

A tervezési alapelvek azonosak a nukleáris szabályzatokban előírtakkal:

- Mohr-szerinti redukált feszültség: $\sigma_{eq} = \max \{ |\sigma_1 \sigma_2|, |\sigma_2 \sigma_3|, |\sigma_3 \sigma_1| \}$
- maximális alakváltozási energia elve szerint (von Mises):
 - $\sigma_{\rm eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \sigma_1 \cdot \sigma_2 \sigma_2 \cdot \sigma_3 \sigma_3 \cdot \sigma_1}$
- redukált feszültségamplitúdó: Mohr

 $\Delta \sigma_{\text{eq}} = \max \left\{ \left| (\Delta \sigma)_1 - (\Delta \sigma)_2 \right|, \left| (\Delta \sigma)_2 - (\Delta \sigma)_3 \right|, \left| (\Delta \sigma)_3 - (\Delta \sigma)_1 \right| \right\} \right\}$

 $\Delta \sigma_{\text{eq}} = \sqrt{(\Delta \sigma)_1^2 + (\Delta \sigma)_2^2 + (\Delta \sigma)_3^2 - \Delta \sigma_1 \cdot \Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_2 \cdot \Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_3 \cdot \Delta \sigma_1}$

von Mises

 nagy szerkezeti folytonossági hiány: feszültség-vagy alakváltozáscsúcs forrása, a szerkezet nagy részére van hatással, pl. csatlakozási zóna, falvastagság-változás, kivágások, csonkok környezete.

A részleteket elemezve sok eltérés azonosítható, például:

- a nyomáspróba-értékek 1,43 x üzemi nyomásérték is lehet;
- a korrózióspótlék-rendszer eltér;
- a roncsolásmentes vizsgálatok terjedelme és vizsgálati eljárásai eltérnek;



- a terhelési esetek eltérnek;
- sajátos műszaki megoldások megengedettek (pl lazakarima alkalmazása);
- az alapanyagok az EN 13445-2 szabványból vehetők, nem szabványos anyagoknál a bizonylatok elfogadhatók a számításoknál.

A nyomástartó edények tervezési előírásának a sajátossága továbbá, hogy:

- a szabályok alkalmazhatók képletek alapján történő tervezésre (DBF Design by Formulas);
- a feszültséganalízis alapján történő tervezésre (DBA Design by Analysis);
- a tervezési tapasztalatok alapján történő tervezésre (DBE Design by Experience).

A csővezeték-tervezési szabványa az EN 13480-3. A szabvány rendkívül részletes (360 oldal), sok műszaki megoldást mutat be. Példa erre a tömítőrendszerek fejezet, ahol a gumigyűrűs tömítéstől az expandált grafittömítésig szinte minden kombináció szerepel, bár ismert, hogy a csővezetéki rendszereknél a ringjoint-tömítés alkalmazása a leggyakoribb.

Olyan megoldások is megjelennek, amiket a nukleáris biztonsági rendszereknél nem fogadnak el, példa erre a roncsolásmentes vizsgálatok nélküli (kizárólag szemrevételezés) állapot, illetve ennek tervezési tényezője.

A hagyományos erőművi alap és hegesztőanyagok igen széles kört ölelnek fel, lényegesen szélesebbet, mint a nukleáris ipar nyomástartó berendezései. Sok sajátos szabály szükséges a széles tartomány gyártásának, hőkezelésének, hegesztésének az előírásaihoz, hiszen a normalizált, termomechanikusan kezelt, nemesített acélok mellett az alacsony Cr, vagy Cr-Mo ötvözésű szerkezeti anyag a jellemző. Ugyanakkor az üzemi hőmérsékletek magasabbak is lehetnek, mint a nukleáris ipar nyomástartó berendezéseinél.

Az EN-rendszernek van egy olyan értelmezése atomerőművi tervezés esetén, hogy ha a rendszerben lévő közeg nem rendelkezik aktivitással, akkor szabad az alkalmazható megoldásokat, számítási módszereket e szabványokból venni. Ugyanakkor az MSZ 13445-1 lapja tartalmazza, hogy a szabvány akkor alkalmazható kifejezetten nukleáris létesítménybe tervezett berendezésekre, ha a veszélyelemzésből, a szabályokból adódó többlet vagy kiegészítő előírások teljesülnek. A szabályok itt az NBSZ-t jelentik.

5.3 AZ OROSZ SZABÁLYOZÁS

5.3.1 Az orosz szabályozás fejlődése

A nyomástartó berendezésekre és csővezetéki rendszerekre vonatkozó azon szabályozást tekintjük át elsősorban, amelyek a Paks II-létesítmény tervezéséhez és a nyomástartó berendezések és csővezetékek gyártásához kapcsolódnak.

Az Orosz Föderáció nukleáris biztonsági szabályzatainak jelentős része a nyomástartó berendezés és csővezetékek tervezését, gyártását tartalmazza, kellően részletes, a legtöbb elemében igen konzervatív elveket követ.

Az orosz szabályozás a normatív dokumentumok rendszere. Az 1972-es kiadású előírások alapján tervezett és épített Paksi Atomerőmű négy blokkjának létesítése utáni időszakban korszerűsítették



a szabályzatokat és a '80-as évek végén PNAE-jelzettel adták ki. A műszaki tartalmat tekintve már a VVER 1000-es blokk képezte az alapot és a létesítések nagy száma csak a csernobili balesetet követően csökkent le. Hosszú szünet után, a Szovjetunió felbomlását követően a nukleáris szabályzatokat új azonosítóval (NP) adták ki, lásd a *158. ábrát.* A rendszer alapstruktúrája változatlan maradt. Nagyszámú, kizárólag atomerőművi létesítményekre kiadott szabályzat (ma közel 100 db NP-jelű szabályzat hatályos) igen részletes előírást ad a létesítés minden fázisához, a telephely kiválasztástól a leszerelésig. Alkalmazásuk (hasonlóan a nemzeti szabványokhoz) kötelező. Az Orosz Föderáció nemzeti szabványai közül a korábbiak GOSZT, a ma kiadottak GOSZT-R jelzettel kerülnek kiadásra. A GOSZT-R olyan, a Szovjetunió felbomlása után kidolgozott szabványrendszer, mely kötelező az utódállamokban is. A fejlődésnek van több új iránya is. A korábbi nukleáris szabályzatok közül több a GOSZT-R rendszerbe került át, példa erre a minőségtanúsítási és anyagvizsgálati szabványok (GOSZT-R ISO 9001–2015 *Quality Management Systems. Requirements*). Sajátosság az Orosz Föderáció szabványrendszerében, hogy a villamos/irányítástechnika meghatározó szabványainak a fejlesztése leállt, a Nemzetközi Elektrotech-

158. ábra. A nyomástartó berendezések és csővezetékek tervezésére és üzemeltetésére vonatkozó orosz hatósági előírások korszerűsítésének állomásai.

nikai Bizottság (IEC) illetve az ISO szabványait veszik át és adják ki GOST R IEC/GOST R ISO/IEC

szabványként (orosz átírásban ГОСТ Р МЭК, ГОСТ Р ИСО/МЭК).



A hatályos rendszerben a korábbi tervezési szabályzat még a mai napig érvényes, 159. ábra. Ez igen nagy nehézséget jelent a létesítési fázisban lévő atomerőművek esetében, hiszen egy több mint 30 éves tervezési előírást kell alkalmazni, összehangolni jóval későbbi kiadású (korszerűbb) szabályzatokkal. Tovább nehezíti a helyzetet, hogy a tervezési előírás (PNAE G-7-002) három további szabályzatra épül, melyek helyett már új előírások hatályosak. Ezek a következők:

- PNAE GI7I008I89. Atomerőművek berendezések és csővezetékek biztonságos üzemeltetésének a szabályai.
- PNAE GI7I009I89. Berendezések és csővezetékek atomerőművi létesítményekben. Hegesztés és felrakóhegesztés. Alapvető szabályok.
- PNAE GI7I010I89. Berendezések és csővezetékek atomerőművi létesítményekben. Hegesztett kötések és felrakóhegesztések. Az ellenőrzés szabályai.







További kérdés, hogy a szakértői elemzések alapján az új szabályzatok összhangban vannak-e a NAÜ érvényes előírásaival (*IAEA Safety Standard SSR-2/1 Rev.1 Structure*). Az NP-rendszer nem hierarchikus, de úgy értelmezhető, hogy az NP-001-15 az irányító dokumentum, tehát az egész NP-sorozat alkalmazását meghatározó. E rendszert szembe állítva a NAÜ-előírásokkal, a megfelelés (a rendszerek egyenértékűsége) igazolható.

5.4 OSZTÁLYBA SOROLÁSOK AZ OROSZ SZABÁLYZATOKBAN

Az NP-001-015 orosz szabályzat II. fejezetének címe: "Rendszerek és komponensek osztályozása".

5.4.1 Biztonsági osztályok

Az NP-001-015 orosz szabályzat négy biztonsági osztályt különböztet meg, aszerint, hogy egy rendszer meghibásodása milyen következményekkel járhat az üzemanyag elemek károsodására:

- Safety Class 1 (rövidítve: SC 1) Idetartoznak az üzemanyagelemek és azok a rendszerek, amelyek meghibásodása üzemanyag-károsodáshoz vezethet és a biztonsági rendszerek tervezési határértékeit meghaladó hűtőközeg-vesztéssel jár.
- Safety Class 2 (rövidítve: SC 2) Idetartoznak
 - azok a rendszerek, amelyek meghibásodása üzemanyag-károsodáshoz vezethet, de a hűtőközeg-vesztés a biztonsági rendszerek tervezési határértékeit nem haladja meg, figyelembe véve a tervezési alapban meghatározott együttes meghibásodások számát is,
 - azok a biztonságirendszer-komponensek, amelyek egyszeres meghibásodása következtében sérülhetnek a tervezési alapban meghatározott határértékek.



- Safety Class 3 (rövidítve: SC 3) Idetartoznak a magasabb (SC 1, vagy 2-be) nem sorolt, biztonsági funkciót ellátó rendszerek és komponensek.
- Safety Class 4 (rövidítve: SC 4) Idetartoznak azok a rendszerek és komponensek, amelyek normál üzemben nincs hatásuk a biztonságra, de a tervezési alapon túli balesetek kezelésében részt vesznek és nincsenek magasabb osztályba sorolva.

5.4.2 Tervezési csoportok

Az NP-089-15 orosz tervezési szabályzat a berendezésekre és csővezetékekre vonatkozó követelményeket csoportokra bontva határozza meg. A csoportokba sorolás célja, hogy egy meghatározott komponensre vonatkozó tervezési követelményeket differenciáltan határozza meg a biztonság szempontjából betöltött feladataik függvényében. Három csoportot különböztet meg, és ezekhez hozzárendeli az előző pontban vázolt SC biztonsági osztályokat, *160. ábra:*

- Group A: SC 1-be sorolt komponensek;
 - Group B: SC 2-be sorolt komponensek és az SC 3-ba soroltak közül azok
 - a) amelyek meghibásodása aktív zóna hűtőközeg vesztéssel jár, és ennek mértéke meghaladja a normál üzemben megengedettet;
 - b) amelyek meghibásodása biztonsági rendszer működési hibához vezethet;
 - c) amely folyékony fém hűtőközeggel érintkezik, függetlenül annak meghibásodási következményeitől (nem VVER-specifikum).
- Group C: Azok az SC 3 komponensek tartoznak ide, amelyek meghibásodása:
 - a) aktív zóna hűtőközeg vesztéssel jár, de ennek mértéke nem haladja meg a normál üzemben megengedhetőt;
 - b) biztonsági rendszer működtetését teheti szükségessé;
 - c) biztonsági rendszer sorozat egyik sorának meghibásodásához vezethet;
 - d) a beállított értékű, maximálisan megengedhető aktívanyag-kibocsátás túllépésével. jár, vagy munkaterület megengedettet túllépő radioaktív szennyeződését eredményezheti.

160. ábra. Atomerőművi nyomástartó RRE-kre vonatkozó tervezési követelmények differenciálásának rendszere, kapcsolat a tervezési követelmények és a szilárdsági ellenőrző számítások között.





Az NP-089-15 orosz tervezési szabályzat követelményrendszere a tervezés mellett az alábbiakra terjed ki:

- anyagmegválasztás;
- gyártás;
- gépészeti tervezés, kivéve a szilárdsági, ridegtörési elemzéseket;
- szerelés;
 - nyomáspróbák;
 - túlnyomásvédelem;
 - műszaki felülvizsgálatok (üzembe helyezés előtti, utáni és időszakos vizsgálatok);

 - ♦ dokumentációk.

Az NP-089-15 szabályzat hatálya nem terjed ki:

- az üzemanyagra;
- mechanikus vagy villamos irányítástechnikai berendezésekre;
- átrakógépekre;
- átrakó és pihentető medencék belső fém burkolatára;
- nemfém alapanyagú berendezések és csővezetékek házaira;
- turbinaházra, első elzáró szerelvényeire;
- tartószerkezetekre, elmozdulás korlátozókra;
- tömítésekre;
- tartályok túlfolyó rendszereire;
- olyan diagnosztikai, mérő- és mintavevő rendszerekre, melyek 3. osztályú berendezésekhez kapcsolódnak és névleges belső átmérőjük kisebb mint 15 mm;
- karbantartáshoz, javításhoz használt berendezésekre és csővezetékekre.

A tervezők a fenti berendezésekre és csővezetékekre a szabályzat egyedi követelményeit és rendelkezéseit alkalmazhatják.

5.4.3 Földrengés Biztonsági kategóriák

Az NP-031-01 szabályzat az RRE-k földrengéssel szembeni ellenállásának kritériumaival foglalkozik. Földrengés-ellenállásnak (Seismic resistance) nevezi az RRE azon tulajdonságait, hogy mennyire képes fenntartani a biztonság szempontjából fontos funkcióit. Három kategóriát különböztet meg:

- I. Földrengés kategória (Seismic Category I). Idetartoznak a biztonsági rendszerek és általában az 1. és 2. biztonsági osztályba (Safety Class 1 és 2) sorolt RRE-k, melyek MCE alatti meghibásodása aktivitás kibocsátáshoz vezethet.
- II. Földrengés kategória (Seismic Category II). Idetartoznak általában azok az RRE-k melyek DE



Atomerőműi Képzési Bázis

alatti meghibásodása az energiatermelés megszakadásával járhat és általában a 3. Biztonsági osztályba (Safety Class 3) sorolt RRE-k.

 III. Földrengés kategória (Seismic Category III). Idetartoznak az I. vagy a II. kategóriába nem sorolt RRE-k.

5.4.4 A nyomástartó berendezések és csővezetékek és hegesztési kötések besorolási rendszere

Az NP-105 szabályozza a nyomástartó berendezések és csővezetékek ellenőrzésének a szabályait. Tartalmazza a tervezés és a gyártás olyan alapvető kategóriáit, melyek alapján a tervezéskor, a gyártáskor és továbbiakban az üzemelés alatt is az ellenőrzések (roncsolásmentes és roncsolásos vizsgálatok) alkalmazásra kerülnek. Ez alapján a nyomástartó berendezéseket és csővezetékeket egy sajátos rendszer szerint kell besorolni, melynek alapja egy csoportbesorolás (A vagy B) és egy hegesztési kötés kategória (I, II, III, illetve a) b) és c) alcsoport alkalmazása együttesen.

Részleteket tekintve:

- I. kategória az A csoportba tartozó berendezések és csővezetékek hegesztett kötései.
- II. kategória a B csoportba tartozó berendezések és csővezetékek hegesztett kötései, amelyek érintkeznek a radioaktív hűtőfolyadékkal.
- III. kategória a B csoportba tartozó nyomástartó berendezések és csővezetékek hegesztett kötései, amelyek nem érintkeznek a radioaktív hűtőközeggel, valamint a C csoportba tartozó berendezések és csővezetékek hegesztett kötései.

A II. és III. kategóriájú nyomástartó berendezésének és csővezetékének hegesztett kötései, az üzemi nyomástól függően a következő alkategóriákra oszthatók:

- Ila. alkategória nyomástartó hegesztett kötések 5 MPa felett;
- Ilb. alkategória hegesztett kötések, legfeljebb 5 MPa nyomás alatt;
- IIIa. alkategória 5 MPa feletti nyomás alatt működő hegesztett kötések;
- IIIb. alkategória hegesztett kötések, amelyek 1,7 MPa és 5 MPa közötti nyomás alatt üzemelnek;
- IIIc. alkategória hegesztett kötések, amelyek 1,7 MPa nyomás alatt és légköri nyomás alatt működnek (vákuum alatt).

A IIIc. alkategóriát kell alkalmazni az üzemanyagtároló, -pihentető és -átrakó medencék hegesztett kötéseinél.

Elvi kérdés, hogy milyen kapcsolat azonosítható egy rendszer nyomása és a biztonsági funkció között? Korszerű-e a nyomáskategóriák (alkategóriák) alkalmazása a mai funkcióelemzési megközelítést figyelembe véve? Mik a tapasztalatok? Milyen kategóriába kell sorolni egy biztonsági hűtővíz, vagy egy pihentető medence 1 MPa alatti üzemi nyomású csővezetékeit? E megközelítés nincs összhangban az NBSZ előírásaival, hiszen a hazai szabályozásban az atomerőmű rendszereit és rendszerelemeit biztonsági hatásuk és meghibásodásuk következményei alapján kell biztonsági osztályokba és nem biztonsági osztályba sorolni.



A létesítés egyik feltétele, hogy meg kell felelni a hazai biztonsági szabályozásnak, tehát amenynyiben a rendszereket és a berendezéseket besorolják a létesítési engedélykérelem (LEK) dokumentumban az ABOS-rendszerbe, további feladatok generálódnak. E besorolás ugyanis egy elvi szint, és amennyiben az Orosz Föderáció NP-jelű szabályzatait használják a nyomástartó edények és csővezetékek gyártására, vizsgálatára, akkor a további kapcsolatokat pontosító, kiegészítő dokumentumokra van szükség. Az NP szabályzatok alkalmazásához az orosz és a magyar kategóriák egyértelmű összerendezése szükséges, hiszen ez az elvi alap megjelenik minden gyártási engedélykérelemben. Az orosz nyomástartó berendezések és csővezetékek hegesztési előírásait az NP-104 szabályzat tartalmazza.

A hegesztési előírások jellemzői:

- konzervatívak, sok konstrukciós és üzemelési tapasztalat áll a varratok kialakítása mögött;
- teljes beolvadású tompavarratokat alkalmaznak;
- hosszvarratokat nem alkalmaznak a reaktortartályon;
- olyan kovácsolási (sajtolási) technológiákat fejlesztettek ki, amelyek a hegesztett kötések számát csökkentették; az alkalmazható varratkonstrukciót egyszerűsítették (reaktortartály csonkzóna – főkeringtető vezeték kapcsolat);
- nagy falvastagságú nyomástartó edények és nagyátmérőjű vezetékek belső felülete plattírozott;
- heterogén hegesztett kötéseket csak kisátmérőjű csővezetéki kapcsolatoknál alkalmaznak;
- tipizált csonkhegesztési megoldásokat alkalmaznak;
- a hegesztéstechnológia jóváhagyása vezető tudományos intézetekben történik;
- az alkalmazott hegesztőanyagok mögött sok felhasználási tapasztalat van;

A hegesztéstechnológia jóváhagyása időigényes a tudományos intézeti közreműködés miatt, de a szakmai megfelelőség garantált. Ugyanakkor a gyártó felelőssége csökken és egy technológiai probléma megjelenésekor a hibák kijavítása, a problémák okainak feltárása igen hosszadalmas. A hegesztő személyzet alkalmasságát tanúsító minősítési rendszer hatálya a nukleáris létesítményre terjed ki, emiatt a technológiák köre korlátozott. E megoldás egyben nehezíti a hegesztő személyzet bevonását a nem nukleáris ipari (vagy nem biztonsági) osztályú berendezéseken dolgozó szervezetektől.

Az orosz szabályzat alkalmazásának a hátránya, hogy az jelentősen korlátozza a technológiai lehetőségeket, ami megnehezíti a korszerű eljárások, új hegesztőanyagok alkalmazását (lézer, elektronsugaras). A hegesztőanyagok beszerzése az Orosz Föderációban a hagyományos tervutasításos módszerrel történik. E feltételnek megfelelően alternatív megoldást is szerepeltetnek sok hegesztőanyag esetében. Például, egy adott fedettívű huzal- és fedőpor-kombináció esetében alternatív huzal, fedőpor kombinációt is megjelölnek. Ez más országok gyakorlatában ismeretlen, hiszen az adott kombinációra kell érvényes technológiavizsgálattal rendelkeznie a gyártónak.

E megfontolásokkal összhangban a jelenleg kiadott létesítési engedélyek az Orosz Föderációban 30 évre kerültek (kerülnek) kiadásra. Bár az orosz szakértők nagyszámú előadást tartanak – elsősorban azokban az országokban, ahol orosz atomerőmű létesül –, de a belső szabályozás ellentmondásainak a kezeléséről nem adnak információt. Így tényként közlik azt, hogy a PNAE-G-7-002 alapelveihez és a gyakorlati alkalmazásához a már említett PNAE-G-7-008, -009 és -010 tartozik és ezen szabályzatok ma hatályon kívül vannak, illetve ezen szabályzatok új megfelelői (NP-089-15, NP-104-18 és NP-105-18) érvényesek. Nem ismert az sem, hogy az új szabályzatok például NP-068-05 (*Piping Valves for NPP General Safety Requirements*), NP-084-15 (*Rules for inservice inspection of Base metal Welding joints and cladded surface of equipment piping or other componensts of NPP*), NP-096-15 (*Requirement for*



NPP of Equipment and Piping Life Management. General provission) hogy működnek együtt az NP-001-15 (General Regulation on Safety of NPP) szabályzattal, illetve az NP-006-03 (Requirement of Safety Analysis Report of NPP with VVER Reactors) alkalmazása milyen feltételek mellett történik. A PNAE G-7-002 hiányosságait több módon próbálják kezelni, például új fejlesztésű szabályzat – NP-031–01 (Földrengés), alacsonyabb szintű előírás – OTT 1.5.2.01.999.0157-2013 (tartószerkezetek), vagy útmutató szintű előírás (RD EO 1.1.2.99.0920-2014 (ridegtöréssel szembeni ellenállás igazolása) alkalmazásával. Ezek megalapozó dokumentumai, a beillesztésére, vagy az adott előírás megalapozására, sem az alkalmazhatóságára vonatkozó háttérinformációk nem ismertek.

5.4.5 Az orosz osztályozási rendszer és a NAÜ-előírások összehasonlítása

Az orosz osztályozási rendszer nem teljesen azonos a nemzetközi gyakorlatban elterjedt osztályozással, 161. ábra.



161. ábra. Az orosz és a NAÜ-osztályozások rendszerszintű eltérései

Fontos megjegyezni, hogy lényeges különbség van az orosz szabályozásban és a nemzetközi gyakorlatban általánosan alkalmazott, azonos megnevezésű fogalmak műszaki tartalma között is.

5.5 AZ OROSZ NYOMÁSTARTÓ EDÉNYEK ÉS CSŐVEZETÉKEK TERVEZÉSÉNEK SZABÁLYOZÁSA

5.5.1 Általános előírások

Az orosz nyomástartó edények és csővezetékek tervezésének két szintje azonosítható. Az első szint az NP-089-15 jelű tervezési szabályzat, mely általános elveket és előírásokat tartalmaz és követelményrendszere a tervezés mellett az alábbiakra terjed ki:



- anyagmegválasztás;
- gyártás;
- gépészeti tervezés, kivéve a szilárdsági, ridegtörési elemzéseket;
- szerelés;
- nyomáspróbák;
- túlnyomásvédelem;
- műszaki felülvizsgálatok (üzembe helyezés előtti, utáni és időszakos vizsgálatok);
- üzemeltetés;
- javítások;
- dokumentációk.

A nyomástartó edények és csővezetékek tervezésének az előírása a PNAE G-7-002 szabályzat: A PNAE G-7-002-86 szabályzat a nyomásnak (beleértve a hidrosztatikus nyomást is) és vákuumnak kitett edények (beleértve a reaktortartályt, a biztonsághoz kapcsolódó edényeit, gőzfejlesztőket és hőcserélőket) tervezésére alkalmazható, a szivattyúk és szelepek házaira, valamint az atomerőművi csővezetékekre, melyek az A, B és C tervezési csoportba tartoznak. A PNAE G-7-002-86 csak a nukleáris biztonság szempontjából nyomástartó funkciót ellátó komponensekre alkalmazható. Tehát a PNAE G-7-002-86 előírása alapján végzett analízis bármely nyomástartó edényre és csővezetékre alkalmazható a hazai szabályozás szerinti ABOS1, ABOS2 és ABOS3 biztonsági osztályban.

A PNAE G-7-002-86 közvetlenül nem alkalmazható az alábbi berendezések és csővezetékek tervezésére:

- üzemanyag;
- mechanikus vagy villamos irányítástechnikai berendezések;
- átrakógépek;
- átrakó és pihentető medencék belső fém burkolata;
- nemfém alapanyagú berendezések és csővezetékek házai;
- turbinaház, első elzáró szerelvények;
- tartószerkezetek, elmozdulás korlátozók;
- tömítések;
- tartályok túlfolyó rendszerek;
- olyan diagnosztikai, mérő- és mintavevő rendszerek, melyek 3. osztályú berendezésekhez kapcsolódnak és névleges belső átmérőjük kisebb, mint 15 mm;
- karbantartáshoz, javításhoz használt berendezések és csővezetékek.

5.5.2 Anyagmegválasztás

Az orosz szabályozás egy – a nemzetközi gyakorlatban szokatlan – eljárást alkalmaz a tervezők számára, az anyagmegválasztás terén alternatívákat ad. Megengedett szabványokból (GOSZT vagy OSZT), gyártóművek által kidolgozott előírásokból (TU) lehetséges az anyagjellemzők megválasztása, amelyek kismértékben eltérők is lehetnek. A PNAE G-7-002 3.7. pontja szerint, ha nincs releváns adat, kötelező a tervezési szabályzat A1.1 vagy A1.4 táblázatait alkalmazni.



A főberendezések alapanyag szabványait a 24–27. táblázatok tartalmazzák.

Reactor Vessel and Cover		Steam Generator		
15Kh2NMFA 15Kh2NMFA-A	TU 0893-013-00212179-2003	10GN2MFA 10GN2MFA-Sh	TU 0893-014-00212179-2004	
15Kh2NMFA class 1 08Kh18N10T	OST 108.109.01-92 TU 14-3P-197-2001 GOST 9941-81 GOST 7350-77 GOST 5582-75 GOST 5949-75	08Kh18N10T 38KhN3MFA	OST 108.109.01-92 TU 14-3P-197-2001 GOST 9941-81 GOST 7350-77 GOST 5582-75 GOST 5949-75 GOST 23304-78	
Pressurizer		ECCS Dining Drossurizer Dining		
10GN2MFA	TU 0893-014-00212179-2004			
38KhN3MFA	GOST 23304-78	08Kh18N101	10 14-3P-197-2001	
		Pressure Relief Tank (Bubbler)		
Reactor Coolant Pump		08Kh18N10T	OST 108.109.01-92	
06Kh12N3D	TU 108.1425-86	COMBINICACIÓN	TU 14-3P-197-2001	
14Kh17N2	TU 108-11-665-82		GOST 9941-81	
08Kh18N10T, 12Kh18N10T	OST 108.109.01-92		GOST 5582-75	
10GN2MFA	TU 0893-014-00212179-2004		GOST 5949-75	
Primary Coolant Piping		ECCS Accumulator		
10GN2MFA + cladding	TU 108.1197-83	22K + cladding	TU 0900-005-05764417-99	
10GN2MFA-VD	TU 0893-014-00212179-2004	38KhN3MFA	GOST 23304-78	
08Kh18N10T	OST 108.109.01-92	22K	TU 302.02.092-90	

24-27. táblázat: Oroz alapanyag-szabványok

Általános tapasztalat, hogy a tervdokumentációk készítői a TU-k előírásait választják. A hivatkozott A *1.1 táblázat*ban a mechanikai tulajdonságok (szakítószilárdság, folyáshatár, nyúlás, kontrakció) 20 és 350°C közötti adatai szerepelnek 50°C-onkénti köztes értékekkel.

5.5.3 Megengedhető feszültségek és Biztonsági tényezők

A PNAE G-7-002 3.4. 3.5 és 3.6 pontjai tartalmazzák a megengedhető feszültségeket és a biztonsági tényezőket, melyek az alábbiak:

A berendezések és a csővezetékek nyomással terhelt alkatrészeinek megengedhető névleges feszültsége:

$$[\sigma] = min\{R_m^{T}/n_m; R_{p0.2}^{T}/n_{0.2}; R_m^{T}/n_m\}.$$

Belső nyomás terhelés esetén,

$$n_m = 2.6; n_{0.2} = 1.5; n_{mt} = 1.5.$$

A belső nyomást meghaladó külső nyomás esetén,

$$n_m = 2.6; n_{0.2} = 2; n_{mt} = 2.$$

A nyomás és a meghúzási erők által okozott megengedhető névleges feszültségek a csavarokban:

$$[\sigma]_w = R^T_{p0.2}/n_{0.2}$$

ahol $n_{0.2} = 2$.



Atomerőműi Képzési Bázis

Kiegészítésképpen azoknál a csavaroknál, ahol a hőmérséklet meghaladja a Tt hőmérsékletet, a névleges feszültségeket a nyomásból kell számítani az alábbiak szerint:

$$[\sigma]_{wt} = R^T_{mt} / n^T_{mt'}$$

ahol $n_{mt} = 3$.

A köpenyek és a konténment esetében a megengedhető névleges feszültségek az alábbiak szerint

$$[\sigma]_{c} = min\{R_{m}^{T}/n_{m}; R_{p0.2}^{T}/n_{0.2}\},\$$

ahol n_m = 1.85; $n_{0.2}$ = 1.07.

5.5.4 Névleges megengedhető feszültségek

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R_m^T}{2.6}; \frac{R_{p0,2}^T}{1.5}\right)$$

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R_m^T}{2.6}; \frac{R_{p0,2}^T}{2.0}\right)$$

$$[\sigma]_w = \min\left(\frac{R_m^T}{2.6}; \frac{R_{p0,2}^T}{2.0}\right)$$

$$[\sigma]_w = \min\left(\frac{R_m^T}{1.85}; \frac{R_{p0,2}^T}{1.07}\right)$$

$$BELSŐ NYOMÁS (TERHELÉS) ESETÉN KÜLSŐ NYOMÁS (TERHELÉS) ESETÉN KÜLSŐ NYOMÁS (TERHELÉS) ESETÉN ESETÉN KÜLSŐ NYOMÁS (TERHELÉS) ESETÉN ESET$$

5.5.5 Falvastagság-pótlékok

A komponensek falvastagságának pótlékolását a PNAE G-7-002 4. pontja szerint kell meghatározni:

$$c = c1 + c2,$$

ahol *c*1 = *c*11 + *c*12.

A c11 pótlékot a tervdokumentáció határozza meg, és feltételezhető, hogy egyenlő a falvastagság negatív tűrésével.

A c12 pótlék a gyártási folyamat miatti pótlék, amely a félkész termék vastagságának várható gyártás közbeni méretcsökkenésének kompenzálására szolgál. A c12 pótlékot a tervező állapítja meg a gyártóval egyeztetve, és azt fel kell tüntetni a Tervezési Dokumentációban.

A c2 vastagsági pótlék a közeg korróziós hatásának a szerkezeti anyagra gyakorolt hatása az üzemelés során (a közeggel való kétoldalú érintkezés esetén feltételezzük, hogy a c2 érték megegyezik a teljes értékkel).



A méretezés során a korrózióálló plattírozás vastagságát nem szabad figyelembe venni. A névleges vastagságnak tehát meg kell felelni az alábbi egyenletnek:

 $s \geq s_R + c$,

ahol s_R a tervezési vastagság.

Material and its welded joints	Medium properties	c ₂ (mm) for 30 years	
Austenitic stainless steels	Water and steam-water mixture, saturated steam with temperature of up to 350 °C	0.1	
	Water, 40 - 160 °C	0.3	
	Water, 160 - 270 °C	1.2	
Pearlitic steels	Water, up to 350 °C, pH = 8 – 10	1.0	
	Saturated steam, up to 300 °C	1.0	
	Superheated steam	0.5	
High-chromium steels	Water and saturated steam, up to 285 °C	0.1	

28. táblázat. A 30 üzemévre megadott falvastagság pótlékok

29. táblázat. Korróziós pótlékok 30-50-60 évre

Material and its welded joints	Medium	Operating temperature	c ₂ (mm)			
			30 years	50 years	60 years	
Primary Circuit Systems						
Austen- itic stainless steels	Primary circuit medium	up to 350°C	0.1	0.1	0.1	
Secondary Circuit Systems						
Pearlitic steels	Secondary circuit medium	up to 40°C	0.3	0.3	0.3	
		41–245°C	0.3	0.4	0.5	
		246-330°C	1.0	1.0	1.0	

A PNAE G-7 002 4.1 pont táblázatának módosított változata a 30–50–60 üzemévre megadott falvastagság pótlékokkal. módosított táblázat nem került beillesztésre. Nem ismert a megalapozó dokumentáció (kutatási jelentés, falvastagság mérési eredménysorozat, stb). Az orosz szakértői jelentésben a Paks II referencia-blokkjaként megjelölt Leningrád II. 1. blokk tervezési adatait jelölik meg forrásként.

A szabályzat felhívja a figyelmet a gyártási eljárások miatti (sajtolás, csőhajlítás stb.) helyi falvastagság-csökkenésre és a korrózióra, jelezve, hogy ezen eseteket a tervezéskor figyelembe kell venni.



5.5.6 Ellenőrző számítások

A szabályzat 5. pontja az ellenőrző számításokat írja le. A fő tervezési terhelések a következők:

- belső vagy külső nyomás;
- önsúly;
- további terhelések (a csatlakoztatott termékek súlya, a csővezeték szigetelése stb.);
- támaszok és a csővezetékek reakciójából eredő erők;
- hőhatások;
- vibrációs terhelések;
- szeizmikus terhelések.

Az üzemelési módok a következők:

- csavarok és anyák meghúzása;
- blokkindítás (névleges üzem);
- üzemzavari védelmi rendszer működtetése;
- reaktorteljesítmény-változás;
- leállítás;
- tömörségi vagy szilárdsági nyomáspróba;
- rendellenes működés;
- üzemzavar.

Az ellenőrzési számítás előírása hangsúlyozza:

- Az alapfém és a hegesztési varratok fizikai és mechanikai tulajdonságait az állami- vagy ipari szabványokból vagy előírásokból kell alkalmazni. Ezek hiányában kell a PNAE G-7-002 1. függelék P1.1 – P1.4 táblázataiból és a 6. függelékben megadott adatokat felhasználni.
- Az előírások nem szabályozzák a számított alkatrészek tervezési terhelésének, belső erőinek, elmozdulásainak, feszültségeinek és alakváltozásainak meghatározására használt módszereket. A kiválasztott módszer vegye figyelembe az összes tervezési esetre vonatkozó terhelést, és lehetőséget nyújtson a feszültségkategóriák összes szükséges számítási csoportjának meghatározására.
- A módszer kiválasztásáért a tervező szervezet felel, amely elvégezte a megfelelő számítást vagy kísérletet.



5.5.7 Feszültségkategóriák

Construction type	Design group of stress categories	Designation of calcula- tion group of stress categories	Designations of components of stress categories included in this calculation group
Bodies of re- actors, steam generators and vessels	Reduced general membrane stresses	(σ) ₁	$\sigma_{_m}$
	Reduced stresses determined by the sums of the components of general or local membrane and general bending stresses	(σ) ₂	$[\sigma_m \text{ or } \sigma_{mL}] + \sigma_b$
	Range of reduced stresses determined by sums of components of general or lo- cal membrane stresses, general and lo- cal bending and general temperature and compensation stresses	(σ) _{RV}	$ \begin{bmatrix} \sigma_m \text{ or }_{omL} \end{bmatrix} + \sigma_b + \sigma_{bL} + \\ \sigma_T + [\sigma_{cm} \text{ or } \sigma_{cmL}] + \sigma_{cb} \\ + \tau_{cs} $
	Amplitude of reduced stresses determined by the sums of the components of general or local membrane stresses, general and local bending stresses, general and local temperature and compensation stresses with due regard to stress concentration	(σ _а ,)	$ \begin{bmatrix} \sigma_m \text{ or } \sigma_{mL} \end{bmatrix} + \sigma_b + \sigma_{bL} \\ + \sigma_T + \sigma_{TL} [\sigma_{cm} \text{ or } \sigma_{cmL}] \\ + \sigma_{cb} + \tau_{cs} \text{ with due} \\ \text{regard to stress concentration} $
Pipelines	Reduced general membrane stresses	(<i>σ</i>) ₁	σ _m
	Reduced stresses determined by the sums of the components of general or local membrane and general bending stresses	(σ) ₂	$[\sigma_m \text{ or } \sigma_{mL}] + \sigma_b$
	Range of the reduced stresses determined by the sums of the components of general or local membrane stresses, general and local bending stress, general tempera- ture related stresses, and compensation stresses of membrane, torsion and bend- ing	(σ) _{rκ}	$ \begin{bmatrix} \sigma_{m} \text{ or } \sigma_{mL} \end{bmatrix} + \sigma_{b} + \sigma_{bL} + \\ \sigma_{T} + [\sigma_{cm} \text{ or } \sigma_{cmL}] + \tau_{cs} \\ + \sigma_{cb} $
	stress, general temperature related stress- es, and compensation stresses of mem- brane, torsion and bending		
	Amplitude of reduced stresses determined by the sums of the components of general or local membrane stresses, general and local bending stresses, general and lo- cal temperature stresses, compensation stresses of membrane, torsion and bend- ing with due regard to stress concentration	(σ _а ,) _к	$ \begin{bmatrix} \sigma_m & \text{or } \sigma_{mL} \end{bmatrix} + \sigma_b + \sigma_{bL} \\ + & \sigma_T + \sigma_{TL} & [\sigma_{cm} & \text{or } \sigma_{cmL}] \\ + & \tau_{cs} + & \sigma_{cb} & \text{with due} \\ \text{regard to stress concentration} $



5.5.8 Hegesztett kötések szilárdságcsökkentő tényezői

A PNAE 5.6.12. pontja a hegesztett kötésekben fellépő fárasztó igénybevétel [GaF]s megengedett feszültség amplitúdóját az alábbiak szerint számítja:

$$[\sigma_{aF}]_{s} = \varphi_{s} [\sigma_{aF}]$$

ahol:

a ciklikus szilárdságcsökkentő tényező

 φ_{s} az alapanyag tervezési kifáradási görbéjéből meghatározott feszültségamplitúdó. $[\sigma_{aE}]$

5.5.9 Ellenőrzés ridegtöréssel szembeni ellenállásra

PNAE G-7-002 szabályzat 5.8 fejezete írja le a ridegtörés ellenállásra történő ellenőrzést. A szabályzatot több, mint 35 éve adták ki és inkább a '70-es évek végének és a '80-as évek elejének műszaki színvonalát jelenti. A kapcsolódó szabályzatok mind korszerűsítésre kerültek és NP-jellel ki is adták őket. Természetesen a PNAE G-7-002 jelű tervezési előírások korszerűsítésén is folyamatosan dolgoztak, de kiadásra nem került új változat. Egy kompromisszumos megoldásként sok helyen - ahol a legnagyobb változások voltak – a meglévő részeket felülírták, új szabványok vagy előírások alkalmazásával. Erre példa az 5.8 fejezete is. Az ellenőrzés ridegtöréssel szembeni ellenállásra témakör lényeges az atomerőmű nukleáris biztonsága szempontjából, mert itt első sorban a redundancia nélküli rektortartály szerkezeti integritását kell igazolni a teljes üzemidőre és valamennyi előforduló terhelési állapotra. E fejezet helyett a tervezésnél az RD EO 1.1.2.99.0920-2014 jelű dokumentumot alkalmazzák (Vízhűtésű-vízmoderátoros energetikai reaktorok tartályainak ellenőrzése ridegtöréssel szembeni ellenállásra. Módszertan). Önmagában is kérdés az, hogy ez a módszertani útmutató hogyan illeszthető be a jelenlegi hatósági előírások rendszerébe.

Az RD EO-módszertan eltér a korábbi (PNAE G-7-002) elvektől, tükrözi a fejlődést. Részletekre nem kitérve, a dokumentum a terheléseket figyelembe véve és a reaktortartály kiválasztott tartományait, a következő esetekre, illetve tartományokra kell elvégezni a számításokat:

- a K, feszültségintenzitási tényező várható értéke a legnagyobb, vagy
- a K_c törési szívósság várható értéke a legkisebb, vagy
- a K_c/K_i hányados a legkisebb.

Lényeges az eltérés a posztulált repedés méretében és a feltételrendszerében. Az elemzéshez síkszerű, felületre nyitott és plattírozás alatti, axiális és kerületirányú, félelliptikus hibákat (repedéseket) kell feltételezni. A repedések kis- és nagytengely aránya a0/c0 = 1/3. A repedések minden esetben merőlegesek a tartály belső felületére. A felületre nyitott, illetve a plattírozás alatti repedés alkalmazhatóságát az dönti el, hogy végzik-e a plattírozás időszakos roncsolásmentes vizsgálatát. Amennyiben nem végeznek ilyen vizsgálatot, akkor felületi repedést kell feltételezni az elemzéshez; amennyiben van rendszeres időszakos roncsolásmentes vizsgálat, akkor megengedett a plattírozás alatti repedés posztulálása. A posztulált repedések kiinduló mérete a következő:

$$a_0 = S_{pl} + 0.07 \cdot S,$$

ahol: S a falvastagság, S_{pl} a plattírozás vastagsága (plattírozás alatti repedés esetén ez értelemszerűen nulla).



Ha $0,07 \cdot S > 15$ mm, akkor $a_0 = S_{pl} + 15$ mm. Az adatok ismeretében a számításokban a 15 mm értéket fogják alkalmazni.

A dokumentum lehetőséget ad alternatív megoldások alkalmazására is, például a ridegtöréssel szembeni ellenállás egyszerűsített elemzésére is. Az egyszerűsített elemzés szerint a reaktortartály szilárdsági megfelelősége akkor biztosított, ha a vizsgált üzemállapot lefolyásának minden τ időpillanatában teljesül az $n \cdot K_j \leq K_c$ egyenlőtlenség (kivéve azokat az időpillanatokat, amikor a váltakozó terhelés hatásának figyelembevételére egyéb korlátozó feltétel van), valamint a plattírozásba eső repedés front minden pontjára teljesülnek a hivatkozott feltételek.

5.5.10 Ellenőrzés hosszú idejű statikus szilárdságra

A PNAE G-7-002 szabályzat 5.9 alfejezete az ellenőrzés hosszú idejű statikus szilárdságra címet viseli. A statikus szilárdságra történő ellenőrző számítást az üzemelési körülményre kell alkalmazni, ha a hőmérséklet meghaladja az ún. T_t hőmérsékletet, ami ötvözetlen és ötvözött acélra 350 °C. Ennek megfelelően a hosszú idejű szilárdságra jellemző tulajdonsággal, azaz a kúszással szembeni ellenállással a VVER-blokkoknál nem kell számolni.

5.5.11 Méretezés szeizmikus hatásokra

Az 5.11-es alpont a szeizmikus hatásokra történő méretezést tartalmazza. Ezt, hasonlóan az 5.8 ponthoz egy másik előírással váltják ki, melynek azonosítója NP-031-01 (Atomerőművi reaktortartályok szeizmikus hatásokra történő méretezése). Az előírás az Orosz Föderáció területén alkalmazható. Más területen történő alkalmazás esetén alkalmazható, mint módszertan, de ebben az esetben a telephelyi jellemzőkkel és a nemzeti szabályzatokban előírt feltételekkel ki kell egészíteni.

5.5.12 A PNAE G-7-002 függelékei

1. Függelék. Alkalmazása kötelező.

Szerkezeti anyagok fizikai és mechanikai tulajdonságai

A Paksi Atomerőmű 1-4 blokki ABOS1-berendezésekkel kapcsolatos számítások tapasztalatai alapján a függelékében megadott szilárdsági jellemzők konzervatívak.

2. Függelék. Alkalmazása kötelező.

Szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározására alkalmazott módszerek Terjedelem:

- Szakító vizsgálatok (GOSZT 1497-84, GOSZT 9651-84, GOSZT 11150-84)
- Kúszás vizsgálatok (GOSZT 3248-81)
- Tartamszilárdság vizsgálatok (GOSZT 10145-81)
- Kritikus ridegtörési hőmérséklet (átmeneti hőmérséklet) vizsgálatok. Ütőmunka: GOSZT 9454-78
- Ridegtörés átmeneti hőmérsékelt-eltolódás termikus öregedés hatására
- Ridegtörés átmeneti hőmérsékelt-eltolódás fáradásos öregedés hatására
- Ridegtörés átmeneti hőmérsékelt-eltolódás besugárzás hatására
- Kifáradási görbék felvétele (GOSZT 23207-78, GOSZT 25.502-79)
- Hegesztett kötések mechanikai tulajdonságainak vizsgálata (GOSZT 6996-66).



Atomerőműi Képzési Bázis

3. Függelék. Ajánlott.

Tervezési és kísérleti módszerek feszültségek, alakváltozások, elmozdulások és erők meghatározására

Terjedelem:

- Feszültségek, elmozdulások és erők számítása tengelyszimmetrikus szerkezetekben
- Helyi feszültégek számítása komponensekben és szerkezetekben
- Feszültségek és elmozdulások kísérleti meghatározása

4. Függelék. Ajánlott.

Komponensek és szerkezetek progresszív alakváltozás számítása

5. Függelék. Ajánlott.

Tipikus alkatrészekből összeállított szerkezetek számítása Terjedelem:

- Csővezetékek
- Tartályok oldható kötései

6. Függelék. Szerkezeti anyagok tartamszilárdsága, szívóssága és kúszása

7. Függelék.

Kifáradási tartamszilárdság számítása (a 6. és 7. függ. nem releváns a VVER-blokkok tervezésénél)

8. Függelék. Ajánlott.

Szabványos komponensek rezgés szilárdsági felülvizsgálatának tervezési és kísérleti módszerei Terjedelem:

- Csővezetékek
- Lemezek és lapos héjak

9. Függelék. Ajánlott.

Földrengés-terhelések számítása (nem alkalmazható NP-031-01)

10. Függelék. Ajánlott.

Karimák, nyomógyűrűk és kötőelemek fő méret kiválasztása

Terjedelem: Tartályok

11. Függelék.

Ajánlások csőívek falvastagság-növelési eljárásaira

Terjedelem: Csővezeték

12. Függelék.

Egyszerűsített kifáradás-számítás

Terjedelem: B és C minőségű tartályok és csővezeték



Az orosz nyomástartó berendezések és csővezetékek tervezési előírásai több ponton jelentősen eltérnek más országok gyakorlatától. Egy fontos elem, hogy a tervezési specifikáció hiányzik az orosz szabályzatokból. Az NBSZ alapként tekint e dokumentumra. A fogalom az NBSZ 10. kötetben a következő:

158a.1. Tervezési specifikáció a rendszerek és rendszerelemek tervezésével szemben támasztott követelményeket összefoglaló dokumentum, mely tartalmazza a műszaki jellemzőket, normatív dokumentumokat, valamint az általános műszaki követelményeket.

5.6 NYOMÁSTARTÓ BERENDEZÉSEK SZERKEZETI INTEGRITÁSA

A nyomástartó berendezések és csővezetékek konstrukciós megoldásai mögött több mint egy évszázados tapasztalat áll. Az első kazánrobbanások (1905) után alakították meg a Kazánok és Nyomástartó edények szervezetét, az ASME-t. Az integritásfogalom jelentése itt a rendszer nyomásának egy adott szinten való állapotát jelentette, melyet nyomáshatároló szerelvényekkel védtek. A nyomásnak egy adott érték fölé növekedésekor a közeget a szabadba kiengedve a berendezés épségét óvták. A közeg környezetbe való kijutása megakadályozta az adott szerkezet jelentős károsodását (felrobbanását) és így a lakosság, környezet védelmét is.

Az általános ipari gyakorlatban a mai napig az adott rendszernyomásnak a megengedett értéken való tartása a meghatározó, a biztonsági kockázatot a nyomás, vagy a nyomás x térfogat együttes értékével kezelik és csak ezután veszik figyelembe a rendszerben lévő közeg tulajdonságát, a kijutás lehetséges hatását (lásd EU direktíva).

Az atomerőművi gyakorlatban a szerkezetiintegritás-fogalom ma más jelenéssel bír. Az integritás maga egy fizikai gát épségének a biztosítása továbbra is. Az atomerőműben a fizikai korlátok legfontosabb eleme a nyomástartó berendezések és csővezetékek rendszere. A nyomástartó berendezések és csővezetékek szerkezeti integritása szavatolja azt, hogy radioaktív közeg nem kerül ellenőrizetlenül a technológiai rendszeren kívülre, és nem veszélyezteti az erőmű dolgozóit, a lakosságot vagy az épített, illetve természetes környezetet. A nyomástartó berendezések és csővezetékek szerkezeti integritásának biztosítása elsődleges fontosságú az erőmű teljes üzemideje alatt. A szerkezeti integritás a biztonság mellett gazdaságossági kérdés is, hiszen egy atomerőmű leállítása, illetve egy adott esetben az üzemidő hosszabbítása nemzetgazdasági kérdés.

Az atomerőművekben a reaktortartály a kritikus szerkezeti elem, mely szerkezeti integritásának elemzése a tartályfal szilárdságának, illetve töréssel szembeni ellenállásának az elemzését jelenti. A reaktortartályokat alapvetően úgy tervezik, gyártják és üzemeltetik, hogy üzemidejük alatt ne sérüljenek meg. Az üzemeltetés feltételeit úgy választják meg, hogy a tartályfal szerkezeti anyaga ne kerüljön az eredetileg szívós állapotból rideg állapotba. Tehát a tervezés és üzemeltetés során lényeges a tartályfal anyagának azon tulajdonsága, miszerint egy szívós törés létrejöttének energiaszükséglete lényegesen nagyobb, mint amennyi energiát a tartályfal esetleges ridegtöréssel szembeni ellenállás. A reaktortartály szerkezeti integritásának elemzése alapvető eleme a ridegtöréssel szembeni ellenállás. A reaktortartály anyagának minden esetben szívós állapotban kell maradni, amelynek megítélésére a szívós-rideg átmeneti hőmérséklet (*Ductile-Brittle Transition Temperature, DBTT*) – vagy T_k kritikus átmeneti hőmérséklet – és a tartályfal aktuális T hőmérsékletének az összehasonlítása szolgál. Lényeges, hogy az alapanyag és a hegesztési kötés törési szívóssága ne csökkenjen le olyan mértékben, hogy egy meglévő repedés a terhelési körülmények eredményezte feszültségintenzitás hatására instabil terjedésnek induljon.



Az elemzés eszköze ennek megfelelően a törésmechanika, a mértékadó anyagjellemző a törési szívósság, amelynek meghatározásához az anyagtudomány szolgáltatja az adatokat. Az összefüggéseket a 162. ábra mutatja. Az ábra rámutat azokra vizsgálatokra és számításokra, amelyek a kiinduló adatokat szolgáltatják a törésmechanikai elemzéshez.



162. ábra. A reaktortartály szerkezetiintegritás-meghatározásának a sémája

Az ipari gyakorlatban a nyomás (nyomástartó) fogalom elsődlegességét mutatja az is, hogy a berendezések üzemi nyomásánál magasabb értéken végrehajtott nyomáspróbákat (illetve a megfelelést) mintegy garanciának vélik a további üzemelés biztonságára. Az üzemelést megelőző túlnyomással végzett próbák végrehajtása során – a feltételektől függően – a feszültségállapot átrendeződésére kerülhet sor, ez kedvezőbb üzemelési feltételeket teremthet.

Az atomerőművi gyakorlatban e fogalom ma már nem elsődleges, hiszen az üzemelő létesítményeknél (elsősorban a reaktortartálynál) az üzemi értéken vagy ahhoz közeli értéken való próbák irányába mutat a fejlődés. A biztonság igazolásának a berendezés állapotfelügyeletét a roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatok végrehajtását, ezek értékelését értik. Természetesen az atomerőmű aktív és passzív biztonsági rendszereinek a működőképessége, az üzemeltetési feltételek és korlátok betartása, a hibás emberi beavatkozások lehetőség szerinti kizárása és sok egyéb tényező megléte jelentheti a biztonságot.

Anyagtulajdonságok változása:

Az atomerőművi berendezések anyagtulajdonságainak a változása alatt azt az időfüggő változást (romlást) értjük, ami normál üzemi és attól eltérő tranziensek okozta igénybevételek hatására következik be. A hatás érvényesülhet a fizikai és kémiai folyamatok (rugalmas és/vagy a képlékeny alakváltozás), környezeti tényezők (hőmérséklet, neutrontér, korrózív közeg, nedvesség) összefüggésében.



A anyagtulajdonságok változása érvényesülhet a berendezések működőképességének leromlásához vezető tényezőkön keresztül, amelyek oka lehet a geometriai instabilitás és a korrózió. A szerkezeti anyagok kimerülését a *163. ábra* mutatja. A szerkezeti anyagok kimerülését öregedésnek, az anyagtulajdonságok változásának a csökkentése érdekében tett intézkedések összességét öregedéskezelésnek nevezik.



163. ábra. A szerkezeti anyagok kimerülését befolyásoló tényezők

A reaktortartály szempontjából szóba jöhető öregedési mechanizmusok a következők: sugárkárosodás, termikus öregedés, fáradás (kisciklusú), korrózió. A tartály szerkezeti integritását legnagyobb mértékben egy esetleges repedés instabilitása veszélyezteti. Az öregedési folyamatok közül a sugárkárosodás a meghatározó. A reaktortartály anyagtulajdonságainak a változását az engedélyesek felügyeleti (*surveillance*) programmal követik, mely a tartályban elhelyezett kapszulákban elhelyezett próbatestek vizsgálatát, az eredmények értékelését jelenti.

Az atomerőművi szerkezetek jelentős része ausztenites alapanyagú, vagy ausztenites plattírozással ellátott, nagy falvastagságú ferrites (perlites) acél. Az általános felhasználás oka, hogy az üzemelési feltételek között igen nagy stabilitás jellemzi. Az anyagtulajdonságok változását e szerkezeti anyagoknál vagy hegesztett kötéseknél, felrakóhegesztésnél is figyelemmel kell kísérni. Példa erre a reaktortartály belső szerkezeti anyagaként alkalmazott ausztenites korrózióálló acélok méretváltozása (duzzadása), mely a belső szerkezetek funkcióellátását korlátozhatja.

Egy lehetséges korróziós hatás a mikrobiológiai korrózió, mely igen sajátos lokális korróziós folyamatként (lyukkorrózió) jelenik meg ausztenites tartályok, illetve csővezetékek belső felületein.



A 164. ábra az ausztenites korrózióálló acél folyáshatár-változását mutatja a hőfok függvényében. A gyártástechnológia (alak, méret, hőkezelés) miatt az értékek eltérnek. A nagy falvastagságú szerkezeteknél a jellemző felhasználás a kovácsolt, hőkezelt (edzett, megeresztett) állapot. Összehasonlításul tartalmazza az ábra az USA-kódban hasonló vegyi összetételű 321 jelű acél jellemzőit.





5.7 TÖRÉSMECHANIKAI ALAPFOGALMAK

A törésmechanika a törésre való méretezéssel foglalkozó tudományág. A hagyományos szilárdsági méretezéssel szemben, feltételezi, hogy az anyag nem tökéletes folytonosságú, hanem abban valamilyen oknál fogva repedések vannak jelen. A törésmechanika feladata annak eldöntése, hogy a repedés milyen feltételek mellett terjed tovább.

Ennek a tudományágnak az alapját képező repedéseknek az anyag makroszkopikus folytonossági hiányait hívjuk. Az anyagot összetartó kémiai kötés a repedés környezetében külső vagy belső feszültségek, esetleg az anyagot körülvevő közeg hatására megszűnik. Ez a folyamat végül az adott alkatrész törésével teljesedik ki.

A törésmechanikai elméletek alapvetően kétféle megközelítéssel élnek, a repedésterjedéshez szükséges energia elméletéből, vagy pedig a repedés csúcsánál a külső/belső névleges feszültségek által létrehozott feszültségi, alakváltozási mező meghatározásából vezetnek le olyan összefüggéseket, melyekből eldönthető, hogy a repedés terjedni fog-e vagy sem. Lineárisan rugalmas anyagokra egyszerű geometriai feltételek esetén komplex feszültségfüggvényekből levezetett analitikus megoldások nyújtanak kielégítő pontosságú törési kritériumokat. A fenti törésmechanikai elméletekből kielégítő pontosságú törési feltételekhez lehet jutni, olyan esetekben, ahol a repedés előtti képlékeny tartomány lényegesen kisebb, mint a repedés mérete.



Azokban az esetekben azonban, mikor a képlékenyen alakváltozott anyagrész mérete már jelentős, a képlékeny törésmechanika megközelítéseivel kell élni. Az egyik ilyen a COD-elmélet (*Crack Opening Displacement*), amely nem a repedéscsúcs feszültségintenzitásával, hanem az elmozdulás, a kritikus repedéskinyílás segítségével állapít meg repedésterjedési kritériumokat. A másik, igen elterjedten használt J–integrál-elmélet, amely a repedéscsúcs körül kialakult rugalmasan alakváltozott mező energiájából, valamint az elmozdulás-, és a feszültség mezőből kiindulva határoz meg törési feltételt.

5.7.1 Lineárisan rugalmas törésmechanika (LRTM)

A lineárisan rugalmas törésmechanika a törési viselkedés kvantitatív leírása, feltételezése, hogy az alakváltozás a törésig lineárisan rugalmas és a repedés csúcsában ébredő feszültségeloszlás, rugalmasságtani elemzés, vagy a repedésterjedési folyamatenergia egyensúlyban van.

a) A feszültségintenzitási elmélet, 165. ábra.

165. ábra. A bemetszés (a) és a repedés (b) csúcsában kialakuló feszültségek összehasonlítása y irányú húzóigénybevétel esetén.



• a repedés egy $\rho \cong 0$ sugarú bemetszés határeseteként tekinthető;

- Neuber-féle feszültségkoncentrációs elmélet;
- a bemetszés csúcsában a feszültség megnövekszik, azaz koncentrálódik:

$$\sigma_{
m max}=lpha_k\sigma_{_N}$$
 , ahol

 $\sigma_{\rm max}$ – a maximális feszültség

 $\sigma_{\!\scriptscriptstyle N}^{}-{\rm a}$ külső terhelésből és terhelt keresztmetszetből számítható névleges feszültség

 $\sigma_{\!_k}$ – a bemetszés és a szerkezeti elem alakjától függő alaktényező

ahol:

a – a nagytengely fele

ho – a bemetszési sugár.

$$\sigma_{\max} = \sigma_N \left[1 + 2 \left(\frac{a}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$



Atomerőműi Képzési Bázis

b) Törési módusok: a repedési felületek lehetséges relatív elmozdulása, 166. ábra.





Fémek esetén gyakorlatban legnagyobb jelentőség, pl.: húzó-, vagy hajlítóigénybevételű szerkezeti elemek, amelyek belső vagy külső repedéseket tartalmaznak, belső nyomás alatt álló, repedéseket tartalmazó szerkezeti elemek

A gyakorlatban a másik két módus mindig jelen van valamilyen mértékben.

A II-es módus, vagy párhuzamos elcsúszás

A III-as módus, vagy keresztirányú elcsúszás

I-es módus esetén a feszültségmező a következőképpen egyszerűsödik:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\left(2\pi r\right)^{1/2}} f_{ij}(\theta)$$

ahol:

K, – feszültségintenzitási tényező

 f_{ii} – dimenziótlan függvények, csak Θ -tól függenek.

c) Az LRTM törési kritériuma

A repedés akkor indul meg, vagy másképpen akkor kezd instabil módon terjedni, ha a feszültségintenzitási tényező egy kritikus értéket elér, a törési módustól függően.

A $K_{lc'}$, $K_{llc'}$, K_{llc} – anyagjellemző – feszültségintenzitási tényező kritikus értéke, vagy más néven törési szívósság, csak kísérleti úton határozható meg.



A feszültségintenzitási tényező nem független a szerkezeti elem, ill. próbatest vastagságától, méretétől.

A síkalakváltozási állapot csak a vastag szerkezeti elemekben vagy próbatestekben alakul ki, 167. ábra.





A két jellemző anyagvastagságra izotróp (fém) anyagok esetén a következő összefüggések adhatók meg:

$$B_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{K_{lc}}{R_e} \right)^2 \qquad , \qquad B_1 = x \left(\frac{K_{lc}}{R_e} \right)^2$$

ahol: x általában 2.5, de az anyagminőségtől is függ *R*_a a folyáshatár

d) A törésmechanika energiaelmélete

A repedésterjedés energiaegyensúlya: Griffith-féle modell. A repedés méretének növekedéséhez meghatározott energiamennyiség szükséges, mely származhat a terhelő erő munkájából, vagy a szer-kezeti elemben tárolt alakváltozási energia felszabadításából, *168. ábra.*







e) A feszültségintenzitási tényező meghatározása



. . .



σ Alak

$$f = \frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}}$$

Ha a terhelés végtelen kiterjedésű lemezegyenes, átmenő repedés, y irányú húzóigénybevétel (Griffith-repedés), a feszültségintenzitási tényező:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$



f) A J–integrál

Az elméleti koncepció a J–integrál Cherepanov és Rice kimutatták, hogy egy energikus kontúr pályaintegrál (úgynevezett J) független volt az út repedés körül. A J–integrál lineárisan rugalmas anyagi viselkedés esetén egyenértékű a repedésterjesztő erővel. Ha az integrálási útvonal által körülzárt tartományon belül nincs szingularitás, akkor a J–integrál értéke nulla, ha viszont van, akkor J≠0.

Előnye: a repedésterjesztő erőt nem közvetlenül külső terhelésből, hanem mezőelméletek segítségével határozhatjuk meg. Kiértékelése történhet analitikusan, vagy numerikusan (végeselem-módszerrel). A legtöbb végeselem-szoftverben beépített parancsként elérhető a J–integrál.



