

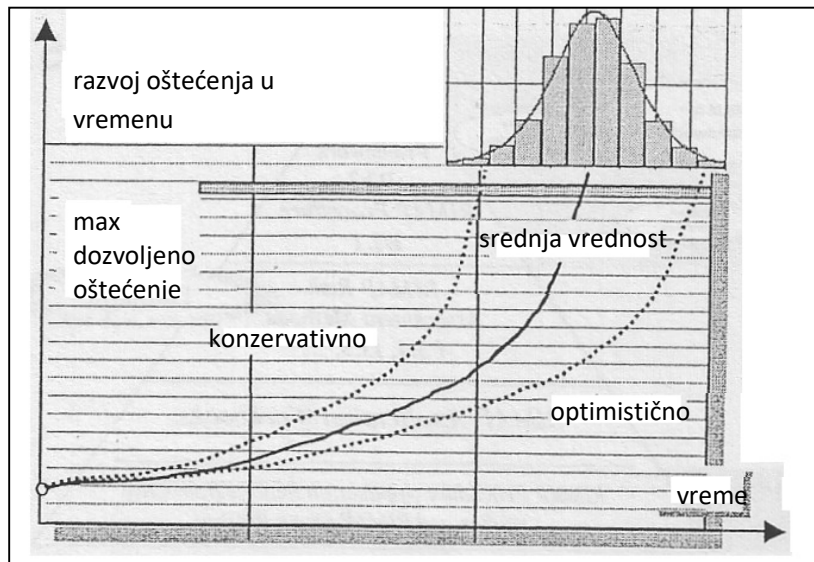
2. Механизми оштећења

2.1. Увод

Механизми оштећења представљају процесе који се одвијају у материјалу током експлоатације компоненте и доводе до пада носивости компоненте а у коначном долома. По свом току развоја оштећења, односно по томе који физички процеси доводе до пада особина за неки механизам деградације, механизми оштећења се деле на:

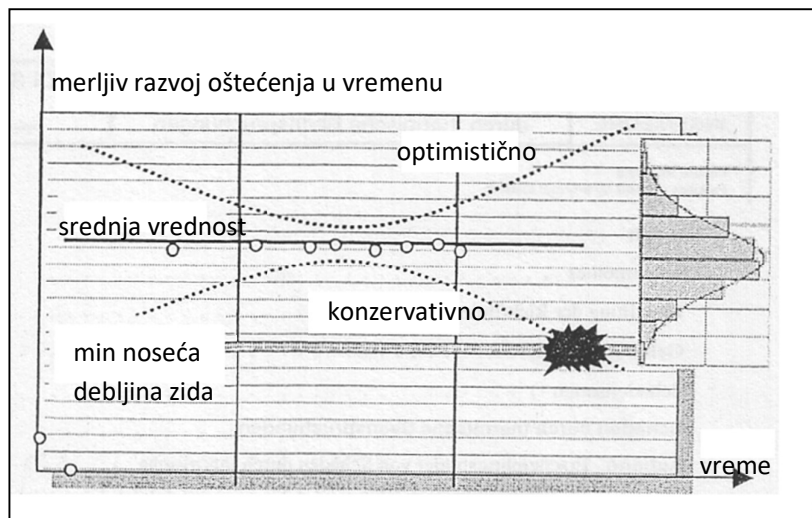
- механизме код којих постоји стабилан тренд одвијања процеса, па је стога процес практично предвидљив у сваком тренутку времена (кинетика процеса деградације је позната, релативно стабилна и одвија се по неком закону), слика 2.1,
- механизме код којих није могуће предвидети процес деградације (кинетика процеса деградације може али и не мора да буде позната, развој оштећења је контролисан великим бројем утицајних параметара, па је законитост процеса врло тешко описива), слика 2.2.

У оба случаја једино мерило развоја оштећења је могућност мерења одређене величине, неком од познатих метода испитивања (конвенционалне методе или специфичне методе које су „доказиве“).



Слика 2.1. Ток процеса деградације материјала механизмима који имају тренд – законитост

Код механизма оштећења са стабилним трендом развоја, крива која описује пад особина материјала за велики број механизма уобичајено се назива „крива старења“, слика 2.3, док се крива брзине старења назива „крива у облику каде“ (батх тубе) којом се описује и поузданост система.

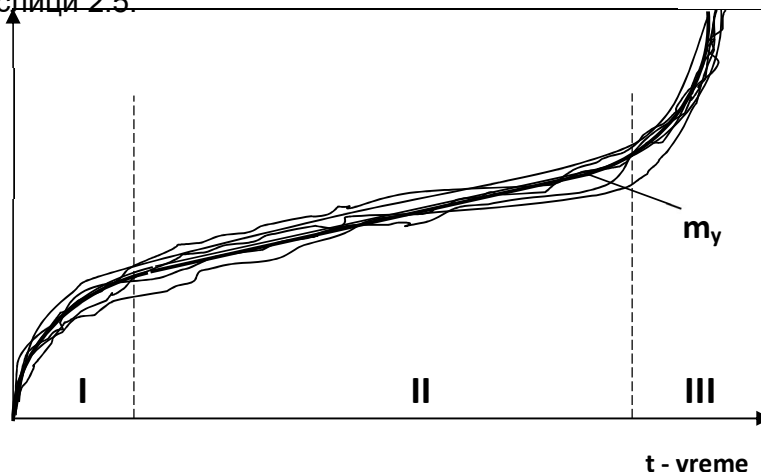


Слика 2.2. Ток процеса деградације материјала механизмима који немају законитост

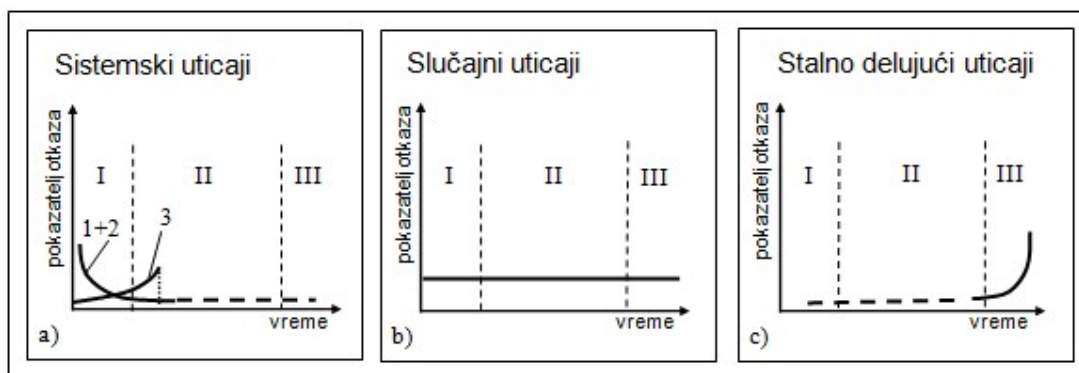
И "крива старења" и "крива у облику каде" када се примене на рад неког дела, деле његову експлоатацију према развоју механизма оштећења на три фазе са следећим одликама, слика 2.4:

- област уходавања, где је могућ отказ искључиво због унетих грешака током израде, монтаже или прекорачења у радним оптерећењима,
- у другој фази брзина одвијања деградације постаје релативно константна величина, и
- у трећу фазу експлоатације материјал улази када се приближи крају свог радног века.

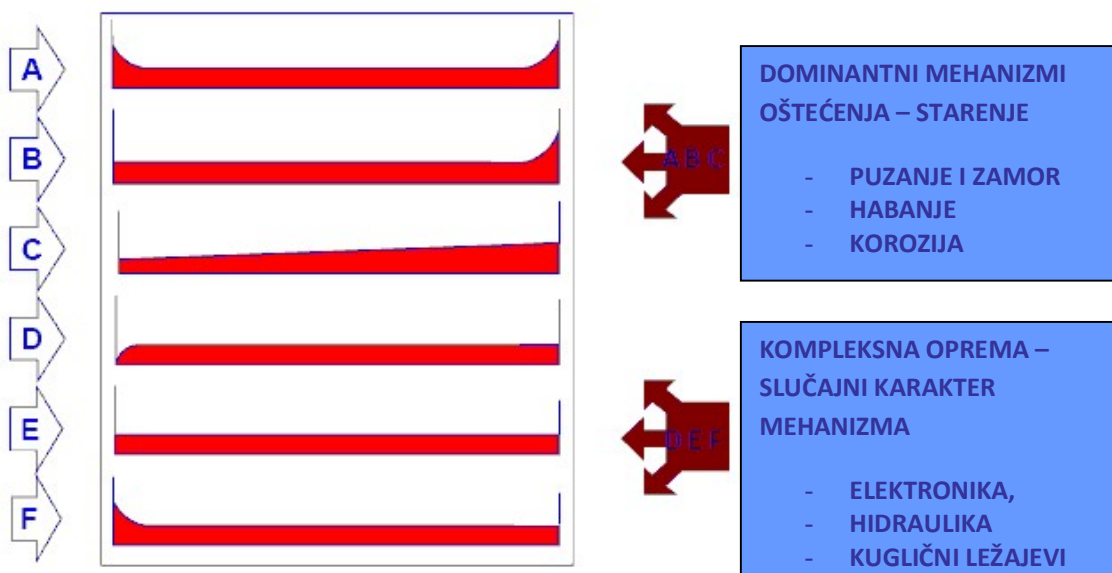
Неки примери карактеристичног изгледа развоја оштећења са стабилним трендом су дати на слици 2.5.



Слика 2.3. Ток процеса деградације материјала током експлоатације:
 $m_y(t)$ – математичко очекивање предвиђеног ресурса,
 I – област уходавања (тзв. "дечјих болести") постројења,
 II – област нормалног периода експлоатације,
 III – област интензивног старења;



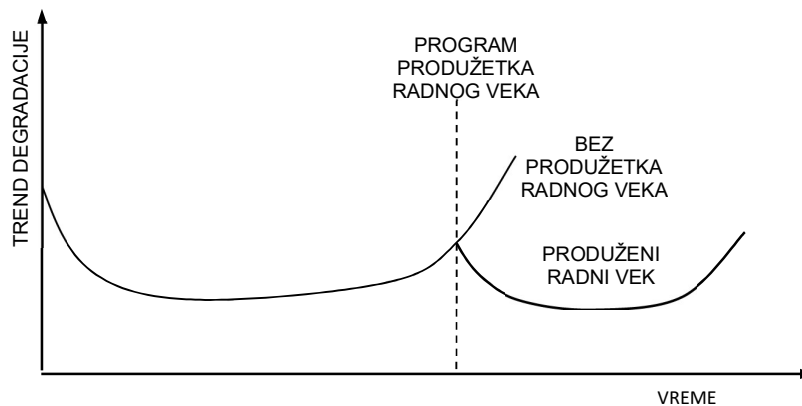
Слика 2.4. Разложена крива у облику каде са назнаком узрочника отказа



Слика 2.5. Примери стабилног тренда одвијања механизма оштећења

2.2. Продужетак радног века

Уобичајено је да машински делови/компоненте имају реални ресурс за рад који је већи од оног који је декларисан у пројекту. Разлог за овакву залиху лежи у чињеници да су у реалноми условима рада параметри рада нижи од пројектних, као и чињеница да се за прорачун делова користе минималне вредности особина материјала. Уколико се тачно дефинише механизам оштећења код неких машинских делова је могуће да се утиче на параметре који доводе до деградације и продужити радни век компоненте, слика 2.6. Овај исти принцип може да се примени и код сложених система састављених од више машинских делова. Одлука о томе да ли ће се то учинити или не, се доноси на основу техно – економске анализе која треба да покаже да ли је економски исплативије задржати стари део и продужити му радни век или уместо њега уградити нови део.



Слика 2.6. Шематски приказ продужетка радног века

2.3. Подела механизма оштећења

Подела механизма оштећења није једнозначна и у највећем броју случајева одговара појединим системима и условима рада који су карактеристични за тај систем, тако да код неких система, оштећења изазвана различитим механизмима корозије могу да се посматрају као јединствена врста оштећења, док се код неких других система, одређене врсте корозије у некој специфичној средини могу да се посматрају као посебне врсте механизма оштећења због њиховог значаја.

Иако не постоји јединствена подела механизма оштећења, све постојеће поделе обухватају исте механизме. Још један од разлога за непостојање јединствене поделе механизма оштећења је мултидисциплинарност у истраживању механизма, тако да различити профили стручњака са аспекта своје области сагледава оштећење и врши груписање и поделе (нпр. са аспекта материјала, аспекта машинске конструције, електрохемијског,...).

Једна од класификација оштећења је извршена према условима рада који доминантно утичу на појаву и развој неког оштећења, табела 2.1.

Табела 2.1. Табеларни приказ једне од класификација оштећења

ВРСТЕ ОШТЕЋЕЊА У ЕКСПЛОАТАЦИЈИ						
Термичко оптерећење		Механичко оптерећење		Радна средина		Радија- ција
				Електрохемијска корозија		
Прегревањ е	Термомехан ичка	Статички лом Трајна деформац ија Замор Абразија Кавитација Ерозија...	Корозионо механичка	Општа корозија	Високо температурна Оксидација Дифузија (Ц, С, Н, О, Х) Миграција елемената	Окртња- вање
Термичко старење				Интеркристалн а		
Металуршке нестабилнос ти (графитизациј а,...)				Локална корозија		
Локално топљење..				Корозија у зазору		
				Селективна ...		

На нивоу техничких норми, прве поделе механизма оштећења су дате у документима ВДИ3822 (ВДИ-Стандард: ФАЙЛУРЕ АНАЛУСИС - ФУНДАМЕНТАЛС АНД ПЕРФОРМАНЦЕ ОФ ФАЙЛУРЕ АНАЛУСИС), ЦWA 15740:2008 (Риск-басед инспекцион анд маинтенанце процедурес фор Еуропеан индустриу - РИМАП), и АПИ стандардима (Америцан Петролеум Институте) и ЕПРИ препорукама (Тхе Елестриц Повер Ресеарч Институте) у САД.

Подела механизма оштећења дата у ЦWA 15740:2008 (РИМАП) је наведена у табели 2.2., док је у табели 2.3 на крају поглавља дат приказ најчешће коришћених метода којима се откривају ова оштећења и у табели 2.4. које критеријуме треба користити током анализе услед различитих механизма оштећења.

Још једна интересантна подела сличног карактера је дата у стандарду АПИ 571 РП „Дамаге Механисмс Аффецтинг Фикед Еквипмент ин тхе Рефининг Индустриу“. У овом стандарду су механизми оштећења груписани на следећи начин:

- Механички и металуршки механизми оштећења
- Униформни или локални губитак у дебљини зида
- Високотемпературска корозија
- Прслине настале у радној средини

Ова подела је прихватљива за петрохемијску индустрију, рафинерије, хемијску индустрију, постројења за производњу хартије, итд.

Генерално када год се помиње ризик неопходно је за сваки од механизма оштећења процени и колика је »тежина« отказа, односно које су последице отказа одређене компоненте услед посматраног механизма оштећења, тако да се отказои најчешће деле и вреднују на следећи начин:

- нема последица,
- мале последице отказа,
- средња тежина отказа,
- тежак отказ,
- врло тежак отказ – хаварија.

Табела 2.2. Врсте оштећења и њихови специфични механизми према РИМАП

Врста	Врста оштећења или поремећаја	Подгрупа/специфичност
ПРОБЛЕМИ ИЗАЗВАНИ ОШТЕЋЕЊЕМ МЕТАЛА	И Корозија/ерозија - оштећења проузрокована радном средином	
	И А Запремонског губитка материјала на површини – стањивање зида	И.А1 Општа корозија, оксидација, ерозија, хабање,... И.А2 Локална корозија – питинг корозија, корозија у зазору или галванска корозија
	И Б Прслине (углавном на површини)	И.Б1 Напонска корозија (хлоридна, каустична, итд) И.Б2 Оштећења изазвана водоником (појава блистера, вис.температурна водонична оштећења) И.Б3 Корозиони замор
	И Ц Слабљење материјала или окртњавање (промена својстава материјала)	И.Ц1 Термичка деградација (сфероидизација, графитизација, топљење одређених фаза) И.Ц2 Разугљеничење, обогаћивање угљеником, осиромашење на легирајућим елементима И.Ц3 Окртњавање (издвајање секундарних фаза, деформационо старење, отпусна кртост, окртњавање течним металом)
	ИИ Механички или термомеханички напони	
	ИИ А Хабање	ИИ.А1 Хабање клизањем ИИ.А2 Кавитација
	ИИ Б Деформација/промена димензија/нестабилност/колапс	ИИ.Б1 Преоптерећење, пузање ИИ.Б1 Грешке руковања
	ИИ Ц Формирање микропора	ИИ.Ц1 Пузање ИИ.Ц1 Интеракција пузање-замор
	ИИ Д Микропрслине услед динамичких и статичких оптерећења	ИИ.Д1 Замор (нискоциклични, високоциклични), термички замор, корозиони замор ИИ.Д2 Термички шок, пузање, пузање-замор
	ИИ Е Лом	ИИ.Е1 Преоптерећење ИИ.Е2. Крти лом
	ИИИ Други механизми оштећења микроструктуре	
ПОРЕМЕЋАЈИ (нису у корелацији са материјалом)	ИВ Оштећења изазвана падањем наслага/наслаге (без поремећаја струјања)	
	В Поремећај у струјању	
	В.А Високи или ниски проток флуида	
	В.Б Нема флуида	
	В.Ц Други проблеми у струјању	
	ВИ Вибрације	
	ВИИ Неодговарајуће димензионисање	
	ВИИИ Људска грешка	
	ИХ Пожар, експлозија,...	
	Х Оштећења или губитак функције из других разлога	
	Х А Цурење из спољашње средине	
	Х Б Неодговарајући старт или заустављање	
	Х Ц Нагли испади	
	Х Д Прегревање	
	Х Е Друго	

2.4. Специфични механизми оштећења

2.4.1. Промена својстава материјала

2.4.1.1. Отпусна кртост

У процесу отпуштања неких легираних челика при спором хлађењу (у пећи или на мирном ваздуху) у температурском интервалу од 600–430°C јако се смањује жилавост. Ова појава се назива отпусна кртост. Отпусна кртост се појављује код челика који имају нешто већи садржај легирајућих елемената Мн, Цр и Ни, као и малих количина нечистоћа: П, Сб (антимон; од латинског назива стибиум-Сб), Ас (арсен), Зн. Појава отпусне кртости објашњава се сегрегацијом атома легирајућих елемената и нечистоћа (углавном фосфора) на границама металних зрна и обогаћивањем површинских слојева зрна овим елементима без издвајања дисперзних фаза (карбида, фосфида и др.). Развој прслине, код ових челика са смањеном жилавост, простире се дуж граница металног зрна.

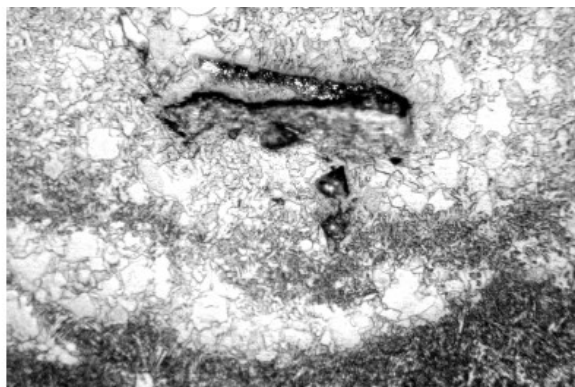
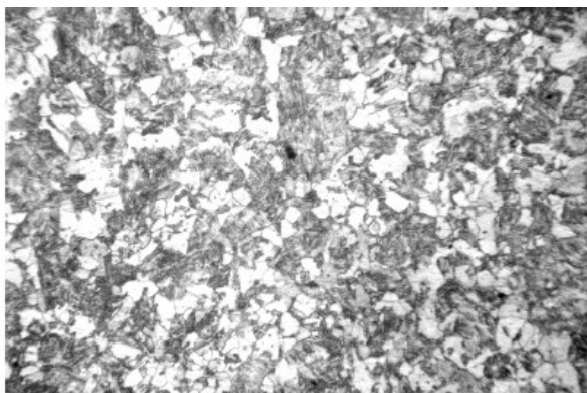
Појава отпусне кртости може се избећи:

- смањивањем садржаја нечистоћа у челику;
- додавањем челику мањих количина молибдена (0,2–0,3%) или волфрама (0,5–0,7%);
- брзим прелажењем температурног интервала од 600–430°C у процесу хлађења.

Кртост изазвана отпуштањем може се уклонити поновним загревањем до температура отпуштања са брзим хлађењем.

2.4.1.2. Разугљеничење

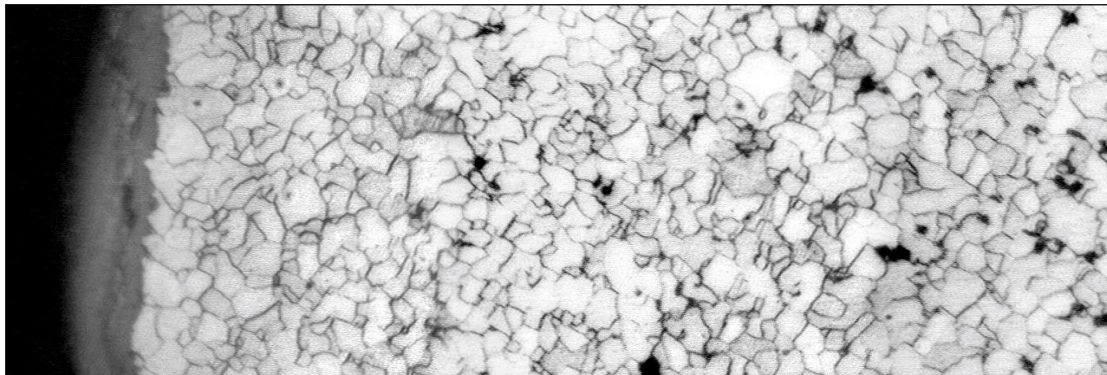
Разугљеничење је једна од промена у квалитету материјала која може да настане како у оксидационој тако и у редукционој атмосфери. Оваква промена изазива смањење механичких особина материјала. Врло често разугљеничење настаје у процесу термо-механичке обраде челика, слика 2.8.



а) x 100

б) x 200

Слика 2.7. Разуѓљеничење: а) микроструктура полазног материјала $\Phi + \Pi$

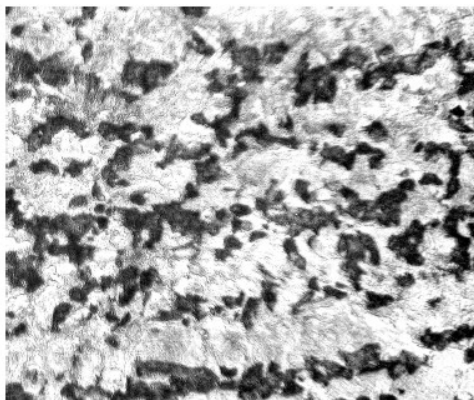


б) појава разуѓљеничења - светла зона

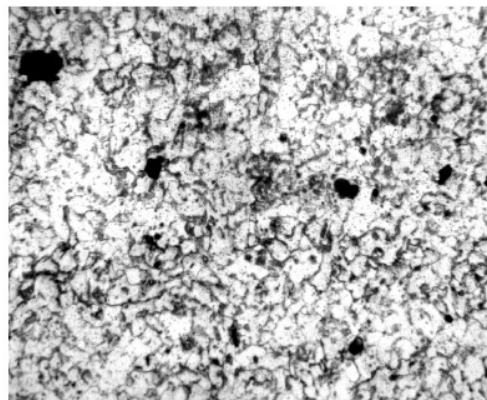
Слика 2.8. Потпуно и делимично разуѓљеничење површинских слојева током фабрикације x 400

2.4.1.3. Графитизација

Графитизација је деградациони процес челика који настаје на повишеним температурама, а прати га издвајање чистог графита из полазне феритно-перлитне структуре челика, сл. 2.9а,б. Издвојени графит је мек, међутим, он доводи до изразитог повећања кртости материјала. На слици 2.9.ц приказан је крти лом настао у ЗУТ завареног споја услед издвајања графитних нодула у тој зони, док је на слици 2.9.д приказан лом изазван графитизацијом због уградње материјала нижег квалитета од захтеваног.



а)



б)



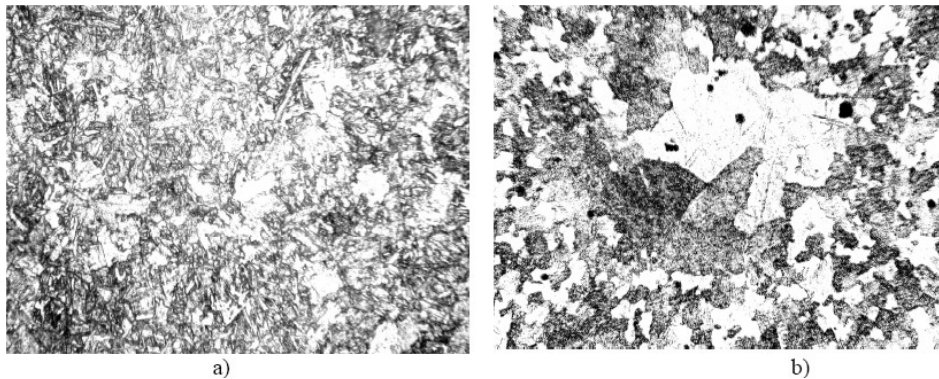
ц) д)

Слика 2.9. Графитизација: а) тракаста феритно-перлитна структура и б) стварање колонија графита (црна поља); ц) крти лом у ЗУТ-у завареног споја изазван графитизацијом; д) дебелозиди лом услед графитизације (материјал нижег квалитета)

2.4.2. Други механизми оштећења микроструктуре

2.4.2.1. Укрупњавање полазног кристалног зрна

Укрупњавање кристалног зрна обично доводи до смањења експлоатационих особина, и то је разлог више за оцену општег стања и квалитета испитиваног материјала. Пар примера промене величине кристалног зрна илустровано је сл. 2.10.



Слика 2.10. Укрупњавање зрна при раду на повишеним температурама

2.4.2.2. Прегревање

Настаје излагањем метала температурама које су више од оних за које је пројектован да ради (слика 2.11 и слика 2.12). Разликујемо:

- дуготрајно прегревање, код кога процес прегревања траје и до неколико месеци и за који је карактеристичан дебелозиди лом са врло малом деформацијом (локална топла места, насlage,...),
- краткотрајно прегревање које може да наступи после свега неколико сати рада и уобичајено настаје када је цев остала без флуида (време до појаве прслине је пре свега у функцији температуре, али и радних напона);



а)



б)

Слика 2.11. Дуготрајно прегревање: а) узрок – директно излагање пламену (локална топла зона)
б) узрок – дебеле насlage на унутрашњој површини



а)



б)

Слика 2.12. Краткотрајно прегревање: а) узрок – недовољан проток флуида
б) узрок – стањен зид цеви

Табела 2.3. Методе и вероватноћа откривања оштећења

Врста оштећења	Механизам оштећења	Методе утврђивања		Вероватноћа откривања оштећења				
		Највећа ПОД	исплативе методе	метода	ПОД за величину грешке			Напом.
					1 мм	3 мм	90%ПОД	
I Корозија/ерозија - оштећења проузрокована радном средином								
I А - Запремонског губитка материјала на површини – стањивање зида	I.A1 Општа корозија, оксидација, ерозија, хабање,...	ДК, ВТ, ЕТ, УТ	УТ, ДК (ВТ)	УТ	30-70%	50-90%	2mm	-
	I.A2 Локална корозија – питинг корозија, корозија у зазору, галванска корозија,...	УТ, ДК, ЕТ, ВТ	ВТ, УТ	УТ	40-90%	40-90%	2mm	*
I Б - Прслине (углавном на површини)	I.B1 Напонска корозија (хлоридна, каустична, итд)	МТ, ПТ, ЕТ	МТ, ПТ, ЕТ	ЕТ	мах 85%	40-90%	4±2mm	-
	I.B2 Оштећења изазвана водоником (појава блистера, вис.температурна водонична оштећења)	УТ, МФ, ПТ, ЕТ	МТ, ПТ	-	-	-	-	-
	I.B3 Корозиони замор	МТ, ПТ, ЕТ, ВТ, УТ	МТ, ПТ, УТ	УТ	30-70% 30-70%	50-99% 95-99%	3±1mm 0.8±0.4mm	-
I Ц - Слабљење материјала или окртњавање	I.Ц1 Термичка деградација (сфероидизација, графитизација, тољење одређених фаза)	МЕ	МЕ	МЕ	100% за прслине >1mm; 90% за прслине 0.05mm; главни проблем је репрезентативно место узорковања, погрешна припрема за реплике, погрешно тумачење			
	I.Ц2 Разугљеничење, обогаћивање угљеником, осиромашење на легирајућим елементима	МЕ	МЕ	МЕ				
	I.Ц3 Окртњавање (ојачавање, деформационо старење, отпусна кртост, ...)	ИСП	ИСП	ИСП	-			
II Механички или термоелемеханички напони								
II А – Хабање	II.A1 Абразија клизањем	ВТ, ДК, ЕТ,	ВТ, ДК					
	II.A2 Кавитација							
II Б - Деформација /промена димензија	II.B1 Преоптерећење, пузање	ДК	ДК	ДК	захтевана вредност ≤ 0.1 mm или 0.5%			
	II.B1 Грешке руковања							
II Ц - Формирање микропора	II.Ц1 Пузање	МЕ	МЕ (ПД)	-	-	-	-	
	II.Ц1 Интеракција пузање-замор							
II Д - Микропрслине	II.D1 Замор, термички замор, корозиони замор	УТ, МТ/ ПТ, ЕТ, ВТ	МТ/ ПТ, ВМ, ПП	ПТ	мах 90%	20-90%	1.5±6.5mm	-
	II.D2 Термички шок, пузање, пузање-замор			МТ	5-90%	50-90%	2.5-10mm	-
II Е - Лом	II.E1 Преоптерећење	ВТ, ДК	ВТ	-	-	-	-	-
	II.E2. Крти лом							

ПОД – вероватноћа откривања оштећења

ВТ – визуелна контрола (укључујући и ендоскоп); МТ – испитивање магнетима; УТ – испитивање ултразвуком; ЕТ – испитивање лутајућим струјама; АЕ – акустична емисија; ПТ – пенетранти; ДК – димензиона контрола; ВМ- мерење вибрација; ПП – контнуално праћење померања; ПД – контнуално праћење деформације; МЕ – металографија (укључујући и реплике -РЕ); ИСП- испитивање са разарањем – узорковање; * локални питови не морају да буду откривени уопште

Табела 2.4. Анализа критеријума разарања за различите механизме оштећења

Анализа рада компоненте за различите механизме оштећења			
Механизам оштећ.	Напон у зиду компоненте	Карактер. отпорности материјала	Гранични напон
Замор	променљив – расте са настанком оштећења и на микро и на макро нивоу	Услед исцрпљења дуктилности опадају са бројем циклуса	Променљив – мења се са бројем циклуса
Термички замор	променљив - у функцији градијента температуре и генерално му расте ниво, расте са настанком оштећења	Опадају са бројем циклуса и деградацијом материјала	Променљив – мења се са бројем циклуса и условима циклирања
Корозија	изразито зависи од облика оштећења и стањења дебљине зида	Код 1) хемијских и електро-хемијских процеса се не мењају; код 2) корозионог замора 3) напонске корозије и 4) водоничног окрћвавања се мењају	Константан за 1) а променљив за 2) и 3). За 4) променљив али непознат - функција пада пластичности
Високотемператур. оксидација	благо расте услед стањења зида због оксидације	Услед пораста температуре и структурних промена опадају током времена	Променљив - зависи од температуре и мења се са временом
Ерозија	зависи од дебљине зида	Благо ојачавање у површинским слојевима али се практично не мења	Константан
Повишено напонско стање	врло висок ниво напона са изразитом тенденцијом раста са развојем оштећења	Практично се не мењају (изузев код велике брзине деформ.)	Константан
Пузање	благо расте услед настанка трајне деформације	Униформно опадају током времена услед структурних промена	Променљив са временом
Прегревање	мења се само код екстензивне деформације	Особине нагло опадају	Мења се са временом
Губитак дуктилности услед металуршких промена	мења се уколико су промене термички активирани	Ниже од полазног стања	Непознат – функција измењеног стања материјала

