

Универзитет у Крагујевцу
Машински факултет у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Поузданост машинских конструкција

Број индекса: 32/2008

Бојан Љ. Ашанин

Физичко-хемијске основе појава отказа

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Добривоје Ћатић- ментор

Датум одбране: _____

2. _____

Оцена: _____

3. _____

У завршном раду треба да буду обрађене следеће теме:

- Замор материјала
- Трење материјала
- Процес корозије материјала

Препоручена литература:

[1] Јовичић, С., Основи поузданости машинских конструкција, Научна књига, Београд, 1990.

[2] Ивковић, Б., Рац, А., Трибологија, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1995.

[3] Јовановић, М., Адамовић, Д., Машински материјали, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.

[4] Танасијевић, С., Трибологија машинских елемената, Машински факултет у Крагујевцу, Београд, 1989.

Крагујевац, 2011.

Ментор:

Др Добривоје Ћатић, ред. проф.

Резиме:

Рад покрива тематику замора, трења и корозије материјала у конструкцијама, тачније њихово деловање које доводи до појаве отказа у системима. У оквира рада, кроз ова три поглавља описана је подела и својства физичко-хемијских процеса. При томе се описује процеси замора, трења и корозије, њихови процеси настајања и негативног деловања на металне конструкције. Укратко су описане разне поделе замора, трења и корозије према врсти и месту настајања. Графички су приказана оштећења услед дејстава горе наведених физичко-хемијских процеса. Описана су понашања материјала услед дејства замора, трења и корозије.

Кључне речи: замор, трење, корозија

Abstract

This thesis covers theme about fatigue, friction and material corrosion in structures, more precisely there treatment which leads to phenomena failure in system. Within this thesis through three mentioned chapter is described division and performance of physico-chemical process. At the same, we described process of fatigue, friction and material corrosion, there development and there negative action's on metals or materials. In the brief are described various division of fatigue, friction and material corrosion according to there purpose and place of development.

Deformation are display by graphics because of action above listed physico-chemical process. Conduct of materials are described due to effects of physico-chemical process.

Key words: fatigue, friction and material corrosion.

Садржај:

1. УВОД	1
2. ЗАМОР МАТЕРИЈАЛА	3
2.1 Механизам заморног разарања	4
2.2 Модел статистичке заморне издржљивости	9
2.3 Врсте замора материјала	10
2.4 Високоциклични напон	10
2.5 Нискоциклични напон	12
2.6 Циклична крива напон-деформација	13
2.7 Замор при променљивој амплитуди оптерећења	15
3. ПРОЦЕС РАЗАРАЊА УСЛЕД ТРЕЊА	16
3.1 Трење клизања	18
3.2 Адхезивна теорија трења	20
3.3 Модификована адхезивна теорија трења	22
3.4 Молекуларна теорија трења	23
3.5 Молекуларно-механичка теорија трења	24
3.6 Енергетска теорија трења	26
3.7 Трење котрљања	28
3.8 Трење код елемената машинског система	31
3.8.1 Клизна лежишта	31
3.8.2 Котрљајни лежаји	31
3.8.3 Трење зупчастих преносника	32
4. ПРОЦЕС РАЗАРАЊА УСЛЕД КОРОЗИЈЕ	33
4.1 Механизам корозионог настајања	33
4.2 Електрохемијска корозија	34
4.3 Питинг корозија	38
4.4 Тачкаста корозија	39
4.5 Микроскопски облици корозије	40
4.5.1 Међукристална корозија	40
4.5.2 Селективна корозија	41
4.5.3 Напонска корозија	41
4.5.4 Галванска корозија	42
4.5.5 Бактеријска корозија	43
4.6 Хемијска корозија	43
4.7 Корозија у зазорима	45
4.8 Ерозиона корозија	46
4.9 Кавитациона корозија	47
4.10 Корозија при трењу- фритинг	47
4.11 Заморна корозија	48
5. ЗАКЉУЧАК	49
6. ЛИТЕРАТУРА	51

1. УВОД

При проучавању машинских конструкција потребно је познавање узрока који доводе до појаве отказа. У току експлоатације на машинску конструкцију делују како унутрашњи тако и спољашњи утицаји који су последица деловања различитих врста енергија као што су механичка, топлотна, хемијска, електромагнетна итд. Под утицајем ових енергија у конструкцији настају различита оптерећења и напрезања. Ово доводи до непожељних деформација, ломова, хабања, корозије и сл. Ови процеси су везани са физичко-хемијским утицајима који доводе до промене параметара функционисања конструкција [1].

Промене параметара функционисања најчешће настају услед различитих оштећења у виду разарања материјала. Зависно од оштећења, конструкција може бити радно способна или изгубити радну способност.

Процеси разарања према брзини могу се поделити на брзе, процесе средње брзине и лагане.

У брзе процесе спадају они процеси који имају периодичност промене реда дела секунде и који су узроковани нпр. вибрацијама склопова, наглим променама силе трења, наглом изменом радног оптерећења и сл. Брзи процеси разарања настају као резултат сложених физичких узајамних дејстава између делова конструкције.

Процеси разарања средње брзине настају после неколико минута или часова као што су процеси промене температуре у самој конструкцији и у њеној околини, промене влажности средине, хабање резног алата итд.

Лагани процеси разарања делују данима и месецима и узроковани су нпр. прерасподелом унутрашњих напона, замором материјала, пузањем материјала, довођењем чврстих честица на површину трења, корозијом, сезонским променама температуре и сл.

Класификација физичко-хемијских процеса који непосредно или посредно утичу на радну способност и појаву отказа може бити изведена према:

- типу материјала (нивоу на коме настају),
- месту настајања процеса,
- облику енергије која одређује карактер процеса,
- типу експлоатационог деловања,
- карактеру процеса.

Класификација физичко-хемијског процеса према типу материјала везана је с променама својстава материјала. Савремена наука изучава закономерности промене својстава и стање материјала на три нивоа: субмикроскопском, микроскопском и макроскопском.

На субмикроскопском ниву се разматрају везе између атома и кристалних решетки и неравнотежна стања атома у решетки. Ту је у задње време развијена теорија

дислокација која проучава појаву упражњених места у решетки, као и узајамно дејство и кретање тих дислокација, што доводи до разарања на субмикроскопском нивоу.

На микроскопском нивоу се разматра стање и својство материјала у областима чији је простор реда зрна металних материјала. При томе се узимају у обзир особеност реалног настајања материјала и везе између састава, настајања и својстава метала и легура.

На макроскопском нивоу разматрају се промене стања и својство материјала целог машинског дела. На основу физичко-хемијске слике процеса у микрообласти разматра се процес у макроразмерама узимајући у обзир мере, конфигурацију и услове рада машинског дела.

При класификацији процеса према месту настајања, разликују се они који настају у унутрашњости машинских делова и они који настају на површини делова.

Према класификацији, у опште физичко-хемијске процесе промени својстава материјала машинских делова могу се убројати:

- дифузиони процеси у тврдом телу и на његовој површини,
- премештање и накупљање дефеката и дислокација у кристално тврдим телима,
- флукуација разарања међу атомских веза у металима и легурама,
- разарање хемијских веза ланаца макромолекула полимерних материјала,
- структурни преображај у легурама материјала,
- сорбциони (упијајући) и електролитни процеси,
- дејство површинских активних супстанци итд.

Када је у питању разарање машинских делова који најчешће доводе до појаве отказа, процес који доводи до појаве својстава и стања објекта могу се поделити на:

- разарање услед прекорачења статичке чврстоће,
- разарање услед трења и хабања,
- заморно разарање,
- корозионо и ерозионо разарање,
- комбиновани процеси на бази претходно побројаних.

Суштини физичко-хемијских процеса који доводе до отказа и математичком описивању тих појава у функцији времена, посвећен је посебан део науке о поузданости. Познавање физичко-хемијске основе појаве отказа у машинским конструкцијама је важан предуслов за прогнозирање поузданости и мера за повећање поузданости.

2. ЗАМОР МАТЕРИЈАЛА

У условима експлоатације машина и машинских конструкција оптерећења и напони најчешће имају променљив карактер. Дуготрајно деловање променљивих оптерећења и напона, чак и у случају када су максималне вредности тих напона далеко испод статичке чврстоће, могу довести до разарања виталних делова конструкције. Главни узрок овог разарања је тзв. замор материјала, односно метала као најчешћег материјала за одговорне машинске конструкције [3].

Према разним истраживањима, чак 50-90% ломова компоненти машина и конструкција је проузроковано замором. Тако на пример, анализом бројних прелома машинских делова који су дуго били изложени наизменичном променљивом оптерећењу (клипњаче, осовине и сл), установљено је да радни напони нису прелазили напон течења. Пошто ломови нису настали због унутрашњих грешака, претпоставило се да је дошло до замора материјала услед дуготрајног рада. Замором се назива стварање и раст прелина у компонентама конструкција изложеним вишеструком променљивом оптерећењу мањем од статичке чврстоће компонената.

Површина лома услед замора материјала има карактеристичан изглед, на коме се могу уочити две међусобно различите површине, зона замора и зона завршног лома (слика 2.1) [6]. Зона замора има тамну и глатку површину у којој се уочавају линије пораста заморне прскотине, а налазе се на местима повећане концентрације напона услед конструктивних, површинских, технолошких, експлоатационих и других дефеката [3].



Слика 2.1 Површина лома услед затора

Основне одлике заморног лома су:

- да се одиграва при променљивим оптерећењима која су знатно нижа од оптерећења при статичком лому,

- да у највећем броју случајева у зони лома нема видљивих знакова пластичне деформације,
- да на динамичку чврстоћу не утиче само врста материјала већ и концентратори напона (радијуси заобљења, зарези, неметални укључци), храпавост површина условљена машинском обрадом, заостали површински напони и агресивност средине.

Типичан пример лома услед замора је дат на слици 2.2.



Слика 2.2 Заморни лом започет на жлебу за клин (доњи део) и завршни лом (горњи део)

Прво испитивање на замор извршио је немачки инжењер Алберт (W. Albert) 1829. године. Тимошенко (Timoshenko) наводи да је Понселем (Ponselem) 1839. године, први применио израз „замор” за оштећења изазвано променљивим оптерећењем. У периоду између 1852. и 1869. године немачки инжењер железничког машинства Велер (A. Wohler) је извршио прво систематско испитивање на замор мањих епрувета и осовина железничких вагона изложених савијању, аксијалном и торзионом оптерећењу. Велер је објавио прве резултате који показују да заморна чврстоћа зависи од броја циклуса оптерећења. Он је овако формулисао резултат својих радова: “Лом материјала може се постићи и многоструко поновљеним вибрацијама од којих ниједна не достиже напоне на граници статичке јачине материјала. Разлике напона који изазивају ова треперења меродонавне су за наступ лома”.

2.1 Механизам заморног разарања

При прорачуну многих машинских делова мора се првенствено водити рачуна о критеријуму заморне чврстоће. То је случај нпр. код зупчаника, клипњача, опруга, постоља и зидова преса, осовина и вратила, ковачких, грађевинских и транспортних машина, дизалица и кранова. Процес разарања услед замора материјала је нарочито проучаван задњих педесетак година. Дошло се до закључка да заморни процес настаје на такозваним slabим местима у материјалу. Појава slabих места у материјалу проузрокована је локалним променама у кристалним решеткама метала. При добијању метала у процесу кристализације у решеткама метала се јављају дислокације, тј. прекиди у линијама атома у решетки. Основна својства дислокација су њихово лако премештање и постојање сопственог поља напона око дислокација услед кретања. Пресецањем и

сударањем дислокација стварају се шупљине, тј. упражњена места у решетки која се увећавају дејством спољњег оптерећења. Повишена концентрација шупљина доводи до повољних услова за њихову коагулацију и образовање празнина субмикроскопских и микроскопских размера. Већа концентрација такође доводи до њиховог нагомилавања на површини, где већ постоје микропоре и микропукотине настале као резултат површинске обраде метала. Сва ова оштећења која се јављају у металу постају потенцијални извори настајања иницијалних заморних пукотина. Под иницијалном заморном пукотином подразумева се оно оштећење које је по својим димензијама довољно да при одређеним спољним условима променљивих оптерећења почиње да се шири, што доводи до разарања материјала и касније лома машинског дела [1].

Процес замарања одвија се у више фаза. Процес заморног разарања је трајан и зависи од степена хомогености материјала, концентрације напона на критичним местима као и од других фактора. Процес се може временски поделити на следеће фазе:

- настајање иницијалне заморне пукотине,
- ширења заморне пукотине и
- процес коначног завршног разарања.

У почетној фази, под дејством периодично променљивог оптерећења, највише напругнути делови кристалне решетке почињу да се померају дуж одговарајућих клизних равни. Услед тога, поједина ужа подручја металног зрна бивају трајно деформисана. У следећој фази замарања локално деформисана подручја почињу после већег броја промене оптерећења, да ојачавају и то при знатно нижим напонима, него што би био случај код статичког оптерећења. У фази динамичког ојачавања материјала напони се практично не мењају све док цела маса зрна не ојача. Најзад, у трећој фази, напон се повећава до вредности затезне чврстоће, што изазива појаву прве микропрслине на месту најмање отпорности.

Услови за раст прслине су фактор интензитета напона K и жилавост лома K_{1C} .

Фактор интензитета напона (ФИН) зависи од оптерећења и геометрије:

$$K = \sigma Y \sqrt{a}, \quad (2.1)$$

где је:

σ - напон,

Y - бездимензиони фактор зависан од геометрије тела с пукотином, начина оптерећења и дужине пукотине и

a – дужина пукотине.

Жилавост лома K_{1C} представља важну карактеристику материјала која даје оцену отпорности против лома делова који имају пукотину.

Део површине који одговара расту заморне прслине до критичне величине, макроскопски гледано, је веома глатка површина. Микроскопски изглед ове површине карактерише се стријама-браздама које представљају узастопне положаје целе прслине у току раста прслине. Преостали део површине одговара завршном лому.

Заморне прслине настају на месту концентрације напона и високих заосталих напона истезања који смањују заморни век и динамичку издржљивост материјала. С друге стране, вештачким формирањем заосталих напона притиска, може се знатно повећати заморни век.

Са аспекта појаве отказа машинских делова и конструкција значајно је да замор материјала, тј. деловање променљивих оптерећења напона не доводи увек до лома. Да би се процес замора развио, тј. да би се оштећење или пукотина ширила, мора да напони достигну одређени ниво. Што је напон већи изнад тог нивоа, и брзина ширења заморне

пукотине је већа. Познавање карактеристике заморног процеса, назване брзина ширења заморне пукотине, омогућава да се предвиди време настајања отказа. Брзина ширења заморне пукотине зависи у првом реду од дужине пукотине, нивоа напона и карактеристика материјала. На бази ових разматрања као и експерименталних података, дати су многобројни изрази за брзину ширења заморних пукотина. Данас се због своје једноставности највише користи Пависов израз:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^t, \quad (2.2)$$

где је:

a - дужина пукотине,

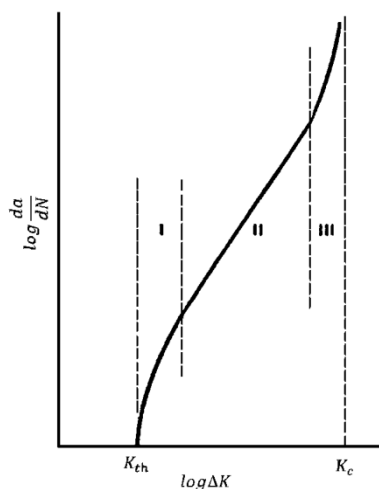
N - број циклуса оптерећења,

C и t - константе зависне од врсте материјала,

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ - распон фактора интензитета напона, тј. разлика највеће вредности ФИН-а на бази максималног напона у циклусу оптерећења и најмање вредности ФИН-а на бази минималног напона циклуса оптерећења.

Као полазиште ове зависности усвојен је став: "Ако две различите прслине имају исти опсег фактора интензитета напона, имаће и исту брзину раста, за исте материјале, микроструктуру и околину.

Експериментални подаци о расту заморне прслине поклапају се са кривом приказаном на слици 2.3 [10]:



Слика 2.3 Зависност брзине раста заморне прслине од опсега ФИН-а

У опсегу I на слици 2.3 долази до наглог пада брзине раста прслине са смањењем ΔK , до достизања најниже вредности брзине при $\Delta K = \Delta K_{th}$, где је ΔK_{th} праг опсега фактора интензитета напона. Када је ΔK мања од ΔK_{th} , не долази до раста прслине. У опсегу II раст прслине се одвија према једначини (2.2), а у опсегу III долази до наглог убрзања раста прслине и коначног лома када максимални фактор интензитета напона $K_{\max}$ достигне критичну вредност фактора интензитета напона K_c [9].

Узимајући у обзир и степен променљивости напона у циклусу оптерећења, $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = K_{\min} / K_{\max}$, добијен је измењен израз за брзину ширења заморне пукотине који се назива Форманов (Forman) ш:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{(\Delta K)^t}{(1-R)K_{IC} - \Delta K}, \quad (2.3)$$

где је:

K_{IC} - жилавост лома,

ΔK - распон ФИН-а.

Овај израз је показивао врло добро слагање са подацима експеримената.

Откривању пукотина и контроли развоја заморних пукотина посвећена је посебна пажња. Разрађене су многе методе, као што су методе непосредног опажања који користе оптичку и електронску микроскопију, технику премаза и боја и фрактографију; затим физичке методе које користе електроотпорне мерне траке, рентгенографију, ултразвук и методе акустике; и методе засноване на измени својстава материјала и то електроотпорности, електро-потенцијала и механичке еластичности. Адекватним откривањем и контролом заморних пукотина могуће је остварити благовремену интервенцију и спречити хаварију одговорних јако оптерећених конструкција. Ово је нарочито актуелно у вези с применом високо отпорних материјала, тенденцијом технике ка олакшању машина, избором оптималних технолошких процеса израде и ојачања машинских делова а такође и са указивањем на оптималне рокове у експлоатацији. Процес заморног разарања се знатно усложњава при деловању фактора спољне средине као што је нпр. корозија, повишена температура или при деловању концентрације напона изазване променом облика машинског дела и контактом суседних делова. Овај процес се нарочито усложњава када истовремено делују променљива оптерећења која изазивају трење.

За одређивање раста заморне пукотине користе се стандардни поступци. Овде је у краћим цртама описана процедура испитавања силом променљиве вредности. У циљу одређивања осетљивости метала на замор изводе се испитивања силом променљиве вредности, при чему се одређују најмањи променљиви напон при коме појава замора неће настати.

При испитивању силом променљиве вредности, епрувете или машински делови се излажу деловању сила које изазивају напоне према закону:

$$\sigma = \sigma_{SR} + \sigma_a \cdot f(t), \quad (2.4)$$

где је:

σ_{SR} - средњи напон,

σ_a - амплитуда напона, половина алгебарске разлике горњег и доњег напона.

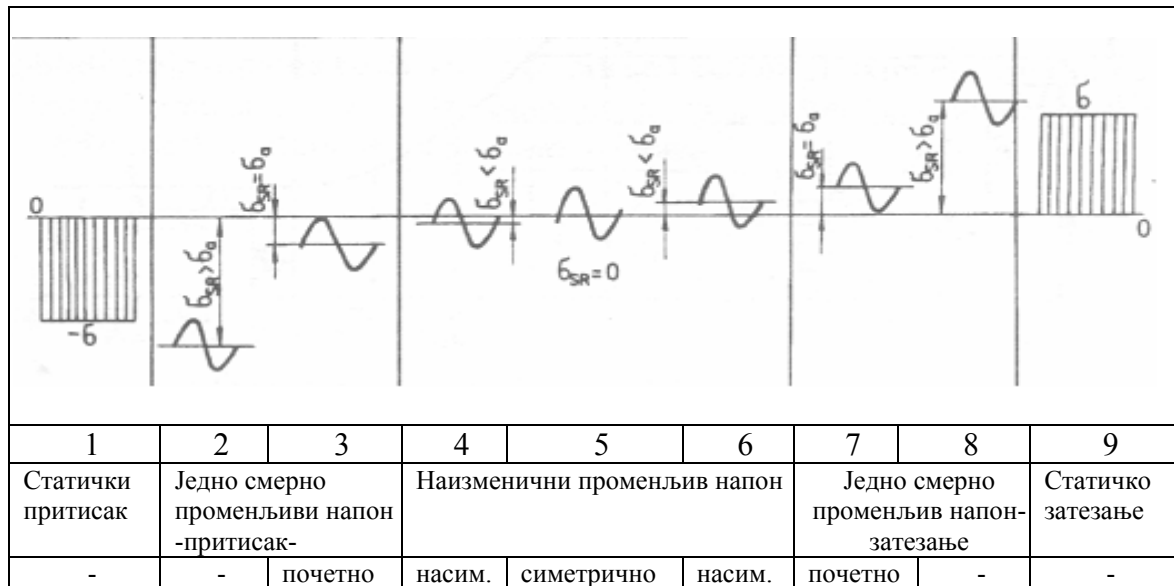
Функција $f(t)$ обично се апроксимира синусоидном функцијом, али $f(t)$ нема утицаја на вредност динамичке чврстоће.

На основу различитих вредности средњег и амплитудног напона практично се могу остварити одређени напони (слика 2.4) [6].

При испитивању силом променљиве вредности остварују се:

- једносмерни променљиви напони, на притисак (2 и 3) и затезање (7 и 8),
- наизменично променљиви напони, симетрични (5) и несиметрични (4 и 6).

У испитивању се најчешће користи симетрично променљив напон (5), међутим ради добијање потпуне слике о понашању метала при замору користе се и једносмерно променљиви напони (2 и 8) као и једносмерни напони (3 и 7).

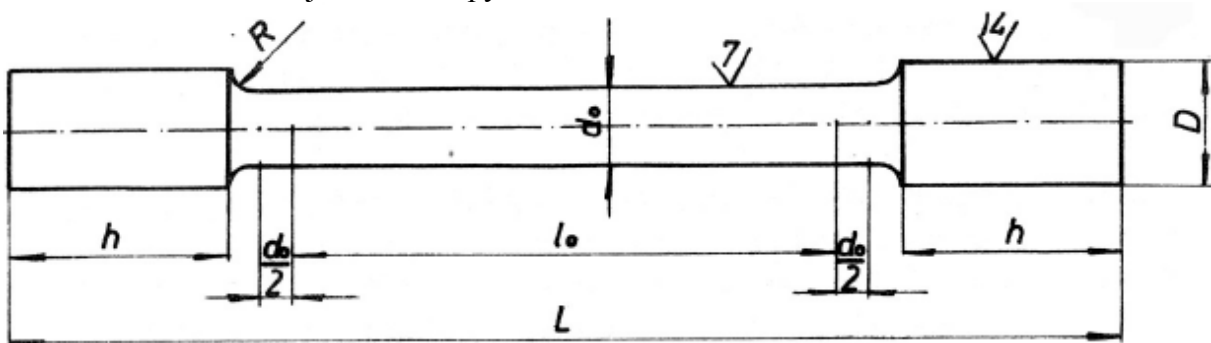


Слика 2.4 Врсте променљивог оптерећења

За испитивање замарањем потребно је имати:

- узорак “епрувету” за испитивање,
- машину-пулзатор,
- прибор за мерење (помично мерило, микрометар) и
- познавати технику испитивања.

На слици 2.5 дат је изглед епрувете за испитивање.



Слика 2.5 Епрувета за динамичко испитивање материјала

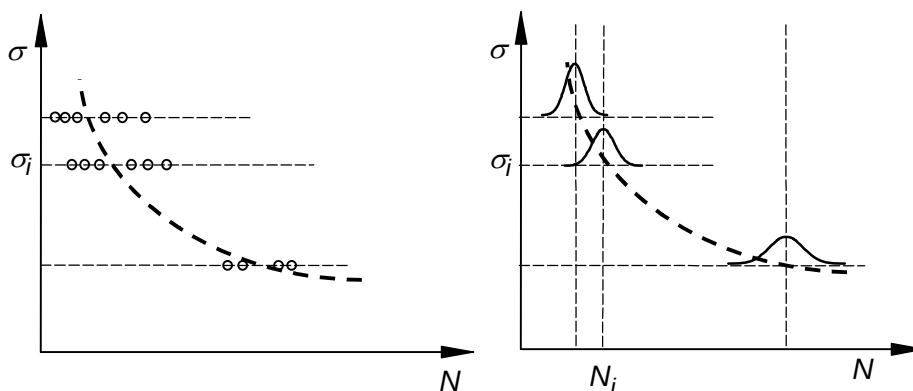
На слици 2.6 дат је изглед машине за динамичко испитивање материјала.



Слика 2.6 Хидраулични пулзатор

2.2 Модел статистичке заморне издржљивости

Заморна издржљивост материјала се, као што је познато, одређује на основу експерименталног испитивања епрувета и конструисања тзв. Велерове криве издржљивости. Епрувете се подвргавају различитим нивоима напона, а добијени подаци се подвргавају статистичкој обради [1].



Слика 2.7 Велерова крива издржљивости

На сваком нивоу напона σ_i испитује се већи број епрувета, а крива издржљивости се конструише на основу средњих вредности $\bar{N}_i$ добијених бројева циклуса оптерећења до отказа N_i . Откази епрувета настају сагласно некој расподели у односу на криву издржљивости, што је приказано на слици 2.7. Као што је на слици приказано растурање података је веће при нижим нивоима напона.

Најпотпунију представу о времену рада испитиване епрувете даје закон расподеле броја циклуса оптерећења до отказа за сваку вредност напона σ_i . Ако тај закон може бити изражен аналитичким математичким моделом, онда је од нарочитог значаја да се

установи облик закона расподеле и зависност параметара тог закона од нивоа напона. У великом броју случајева ова расподела се може приближно представити нормалном расподелом. Време рада до отказа односно број циклуса оптерећења до отказа има тада густину нормалне расподеле изражену према:

$$f(N_i) = \frac{1}{s_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(N_i - \bar{N}_i)^2}{2s_i^2}}, \quad (2.5)$$

где су:

$\bar{N}_i$ и s_i - параметри расподеле.

$$\bar{N}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2.6)$$

$$s_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} (N_i - \bar{N})^2, \quad (2.7)$$

где је n_i – број испитивања на и-том нивоу напона.

Поузданост је у потпуности одређена када су познате зависности параметара $\bar{N}$ и s од напрезања $\bar{N}(\sigma)$ и $s(\sigma)$. У реалним условима параметри $\bar{N}(\sigma)$ и $s(\sigma)$ зависе од многих фактора, као што облици објеката испитивања, физичко-хемијска својства средине итд. Фактори који утичу на динамичку чврстоћу легирајућих елемената, присутне нечистоће и неметални укључци, термичка обрада, стање површинског слоја, начини прераде челика, концентracија напона, заостали унутрашњи напони, напонско стање, агресивност средине, ојачање површинског слоја, површинско каљење и др.

2.3 Врсте замора материјала

Постоје две врсте замора материјала, и то су:

-Високоциклични замор.

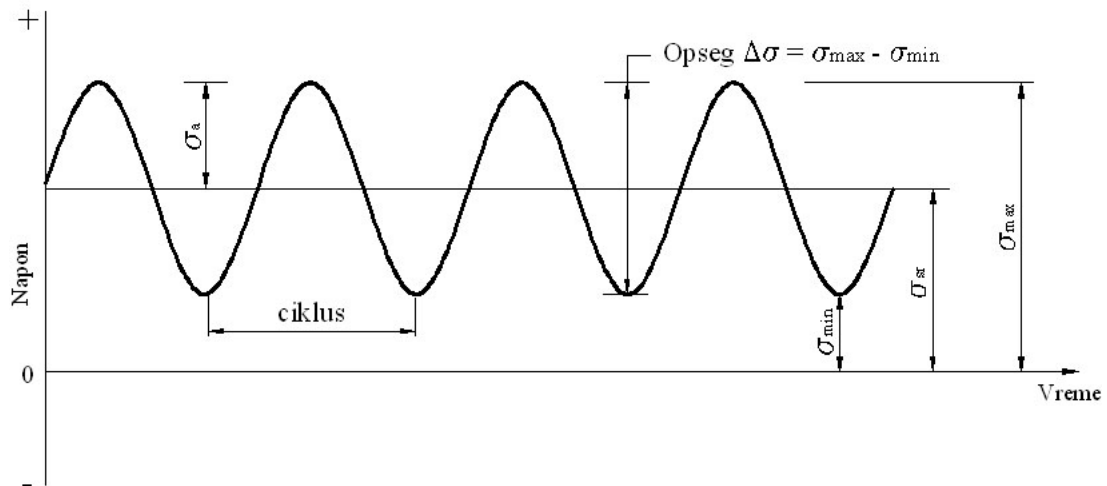
Код ове врсте замора деформације су у току сваког циклуса оптерећења доминантно еластичне. Карактеристике за ову област су мања оптерећења и дужи век трајања тј. велики број циклуса до лома. Број циклуса до лома је већи од $10^4 - 10^5$.

-Нискоциклични замор

Код ове врсте замора деформације су пластичне у току сваког циклуса оптерећења. Манифестује се великим оптерећењима и малим заморним веком тј. малим бројем циклуса до заморног лома. Број циклуса до лома не прелази $10^4 - 10^5$ [3].

2.4 Високоциклични замор

Експерименти за одређивање динамичке чврстоће (динамичка издржљивост) материјала састоје се од излагања група идентичних епрувета синусоидном променљивом оптерећењу константне амплитуде (слика 2.8).



Слика 2.8. Карактеристичне величине за циклично оптерећење константе амплитуде

Величине које су дате на слици 2.8 имају следеће значење:

σ_{max} - максимални напон у циклусу,

σ_{min} - минимални напон у циклусу,

σ_a - амплитуда напона,

σ_{sr} - средњи напон и

R – коефицијент асиметрије циклуса.

Везе између предходно наведених величина дате су изразима:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad (2.8)$$

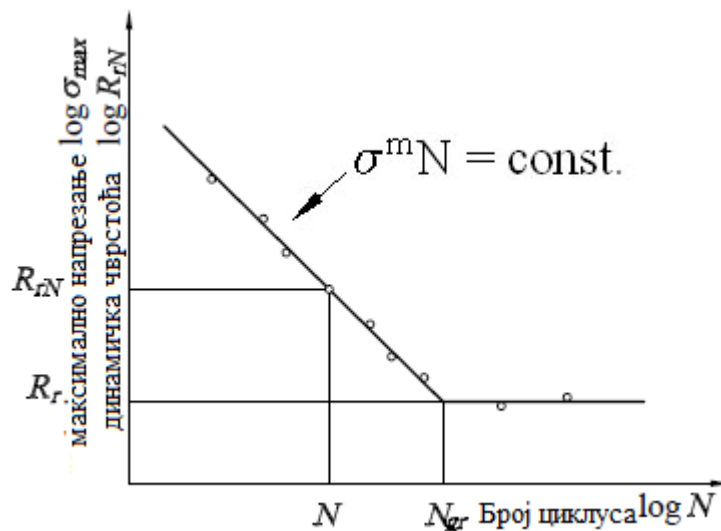
$$\sigma_{sr} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (2.9)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad (2.10)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{sr} + \sigma_a, \quad (2.11)$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{sr} - \sigma_a. \quad (2.12)$$

Ниво оптерећења варира од групе до групе епрувета и за сваку се одређује број циклуса до лома. Резултати оваквих испитивања одређују $\sigma - N$ дијаграм (Велеров дијаграм чврстоће који је дат на слици 2.9) .



Слика 2.9 $\sigma - N$ дијаграм (Велеров дијаграм замарања)

Велерова крива се асимптотски приближава правцу $\sigma = R_r$, при чему се R_r назива трајном динамичком чврстоћом материјала изложеног циклично променљивим напоном. Очито, трајна динамичка чврстоћа материјала је оној максимални напон циклуса асиметрије R при којем епрувета доживи бесконачно много циклуса, тј. неограничену трајност. Велерова крива се обично црта у логаритамским координатама.

Величине које су дате на слици 2.9 имају следеће значење:

R_{rN} - временска ограничена динамичка чврстоћа,

N - број циклуса до лема при максималном напрезању циклуса R_{rN} ,

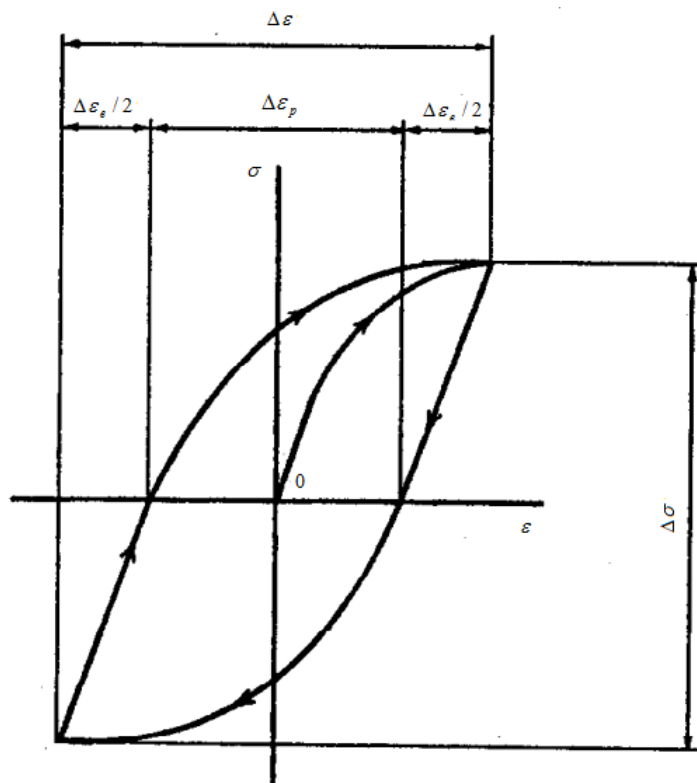
N_{gr} - број циклуса на прелазу између временски ограничене и трајне динамичке чврстоће. За челике обично око 10^7 циклуса, за обојене метале око 10^8 циклуса, а варира са асиметријом циклуса и врстом напрезања.

2.5 Нискоциклични замор

У неким случајевима нискоциклични замор има доминантан значај, тако да је за процену радног века појединих конструкција од великог значаја метода прорачуна нискоцикличних замора. Тако су за конструкције као што су ракете и пројектили, код којих радни век обухвата свега неколико стотина или хиљада циклуса, важна испитивања нискоцикличног замора и примена одговарајућих метода прорачуна. Код низа других елемената конструкција, као што су лопатице и ротори авионских гасних турбина, котлови и реактори нуклераних централа, ротори и делови парних турбина, повремено су присутна велика механичка оптерећења, и температурна колебања која доприносе знатној акумулацији оштећења у току малог броја циклуса, тако да методе прорачуна нискоцикличних замора добијају велики значај. Чак и у случајевима када су оптерећења, која делују на машину или конструкцију номинално мала, материјал на врху опасних зареза се може пластично деформисати и бити изложен нискоцикличном замору.

2.6 Циклична крива напон-деформација

Уколико се при оптерећењу и растерећењу материјал пластично деформише, тада се зависност напона од деформације графички приказује помоћу петље хистерезиса (слика 2.10).



Слика 2.10 Петља хистерезиса за циклично оптерећен материјал који се еластично и пластично деформише

Опсег укупне деформације:

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p, \quad (2.13)$$

где је:

$\Delta \varepsilon_e$ - опсег еластичне компоненте деформације,

$\Delta \varepsilon_p$ - опсег пластичне компоненте.

После релативно кратког периода (обично мање од сто циклуса) петља хистерезиса се стабилизује, тако да при даљем оптерећивању са константном амплитудом, деформације и амплитуде напона остају константне.

Постоји више начина за добијање цикличне криве напон-деформације. Један од начина јесте излагање серије идентичних епрувета цикличном оптерећењу разних опсега деформација, све док одговарајуће петље хистерезиса не постану стабилне. Циклична крива напон-деформација се одређује повлачењем криве кроз врхове разних петљи хистерезиса.

Бржа метода за одређивање криве напон-деформације је помоћу једне епрувете подвргнуте серији наизменичних деформација у блоковима са растућом величином амплитуде деформације.

Циклична крива напон-деформација се може описати једначином:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (2.14)$$

где је:

$\Delta \varepsilon$ - опсег укупне деформације,

$\Delta \varepsilon_e$ - опсег еластичне деформације,

$\Delta \varepsilon_p$ - опсег пластичне деформације,

$\Delta \sigma$ - опсег напона,

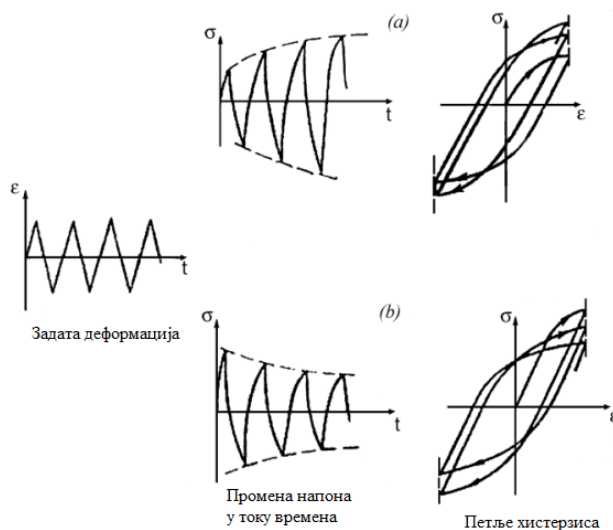
n' - коефицијент цикличног деформационог ојачања,

K' - коефицијент цикличне чврстоће и

E - модул еластичности.

Код већине материјала, при цикличном деформисању у пластичном подручју, зависност напона и деформације се знатно мења. Неки материјали циклично ојачавају, а неки циклично омекшавају. Материјал циклично ојачава када при константној амплитуди деформације расте амплитуда локалног напона, а циклично омекшава када се смањује амплитуда локалног напона (слика 2.11).

Менсон (Manson) је приметио да величина односа затезне чврстоће R_m и напона течења $R_{p0,2}$ зависи од тога да ли ће материјал циклично ојачавати или циклично омекшавати. Када је $R_m / R_{p0,2} \geq 1,4$ материјал циклично ојачава, а када $R_m / R_{p0,2} \leq 1,2$ материјал циклично омекшава. Када је $R_m / R_{p0,2}$ између 1,2 и 1,4 тешко је предвидети циклично понашање материјала. Појава цикличног деформационог ојачавања и омекшавања материјала се објашњава природом и стабилношћу дислокација у материјалу. Код неких материјала, густина дислокације је ниска. При цикличним пластичним деформацијама, густина дислокација нагло расте, доприносећи знатном деформационом ојачавању. У једном тренутку, ново-генерисане дислокације заузимају стабилну конфигурацију за тај материјал и настаје стабилна крива напон-деформација. Код високо-чврстих материјала, цикличне пластичне деформације проузрокују преуређење дислокација у нову конфигурацију која се карактерише мањом отпорношћу према деформисању, тј. материјал деформационо омекшава [9].



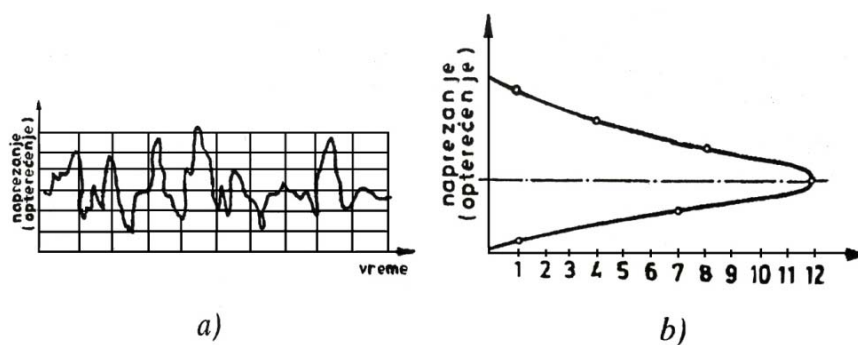
Слика 2.11 а) циклично ојачавање, б) циклично омекшавање

2.7 Замор при променљивој амплитуди оптерећења

У стварности динамичка издржљивост нема синусни карактер, тј. нису правилна ни у времену ни по амплитуди. У том случају треба да постоји неки показатељ тока напона, јер ће од тога да зависи акумулација замора. Један од показатеља је учестаност појединих интензитета напона, тзв. збирна линија учестаности. За њено добијање мора се најпре утврдити време трајања конструкције. После тога, збирна линија учестаности показује колико пута неки одређени напон наступа у том периоду или је прекорачено.

На слици 2.12 а) приказано је једно такво променљиво напрезање. Повлачењем хоризонталних линија различитих нивоа напрезања и бројањем пролаза дијаграма напрезања кроз различите нивое (при чему се броје само пролази у једном смеру, јер је то један период), може се добити податак о броју различитих напрезања. Ако се сада у посебном дијаграму (слика 2.12 б)) нанесе за сваки ниво број пута колико је у одређеном временском периоду био достигнут, добиће се линија учестаности напрезања, или збирна линија учестаности.

Напон који материјал може да издржи под овако стално променљивим оптерећењем назива се радна јачина замора. Важност радне јачине конструктивног дела лежи у томе што изврстан број виших напрезања у току рада конструктивног дела материјал може да поднесе без штете. На тај начин може да се повећа економичност конструкција при жељеној сигурности. Са друге стране, ако тај број напрезања изнад јачине замора пређе извесну меру, то ће представљати скраћење века трајања конструктивног дела или целе конструкције. Треба имати у виду да напрезања која су испод неког нивоа не утичу на замор, а напрезања са знатно вишим напонским амплитудима које врло ретко наступају имају чак повољно дејство. Последњих година се све више користи класични метод прорачуна конструкције са ограниченим веком коришћења.



Слика 2.12 Радни напони при заморном оптерећењу променљиве амплитуде
а) временски ток оптерећења (напона), б) крива учестаности напона

3. ПРОЦЕС РАЗАРАЊА УСЛЕД ТРЕЊА

Под појмом “трење” подразумева се у основи, процес супростављања кретању тела. Ово супростављање кретању тела може да се мери деформацијом средине у којој се тело креће или утрошком рада неопходног за остваривање кретања. Све машине, склопови и механизми састоје се, по правилу, од свега неколико основних покретних машинских елемената: лежаче, зупчаника, вођица, ланчаних преносника итд. У свим тим елементима основна појава је релативно кретање различитих површина у директном или индиректном контакту. Такво кретање може бити:

- клизање једне површине по другој,
- котрљање једног елемента (точак, кугла, ваљак) по равној површини и
- комбиновано кретање.

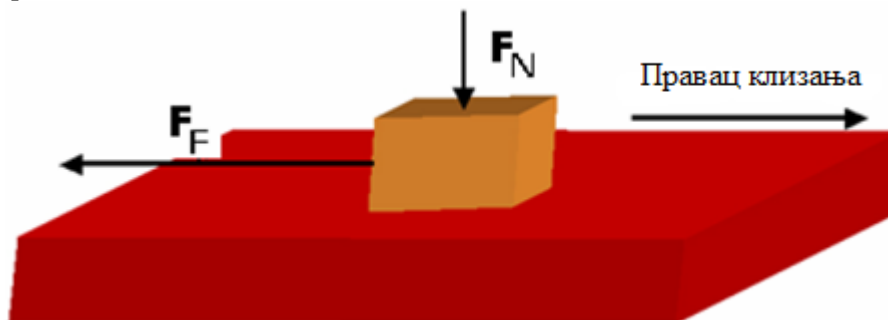
На месту контакта јављају се сложене механичке, термичке, али и хемијске појаве.

Трење, неодвојиво својство површине парова материјала у контакту је непожељно у огромној већини елемената и машинских склопова и других машинских уређаја (сем код кочница и механичких спојница где је користан процес).

Појаве силе трења при клизању и котрљању површина у контакту не доводи само до некорисног утрошка енергије (претварање изгубљене механичке енергије у топлотну), већ услед трошења и разарања површине, до могућности тешких оштећења елемената и склопова и, коначно, до отказивања рада машине и постројења.

Трење које се јавља у зонама контакта елемената система свих врста је спољашње трење. За решавање проблема у индустрији и транспортним системима познавање појаве спољашњег трења је од изузетног значаја.

Под спољашним трењем подразумева се отпор кретању или покушају кретања у тангенцијалном правцу, једног тела по другом уз присуство спољашњег оптерећења (слика 3.1) [10]. Спољашње трење дефинише се и као процес дисипације енергије, који се јавља при релативним кретању два тела у додиру, а остварује се у зонама реалног контакта [11].



Слика 3.1 Кретање једног тела у односу на друго

При обликовању предмета било којом врстом обраде деформисањем, у унутрашњости масе материјала јавља се унутрашње трење као последица релативног кретања између елементарних честица.

Трошење и оштећења површина материјала машинских елемената у посредном или непосредном контакту и међусобном релативном кретању своде на врло ниске вредности. То осигурава у највећем броју случајева врло споре промене геометријског облика површина или толеранција и димензије машинских елемената и мале промене металуршких механичких својстава материјала. Све то повлачи са собом дуг век трајања елемената, промену њихових перформанси у дозвољеним границама, а тиме и повећану сигурност функционисања.

Поред одређеног умереног трошења површина материјала која се данас сматра нормалном појавом, у знатном броју случајева у пракси наилази се и на висока трошења и оштећења површина која у релативном кратком временском периоду доводе до отказивања и лома машинског елемента, а тиме и до отказа рада машине.

У табели 3.1 [11] дат је статистички приказ узрока неисправности који доводе до отказа машинских елемената.

Табела 3.1 Узроци неисправности одређених машинских елемената

Узроци неисправности	Зупчаници	Клизни лежајеви	Котрљајни лежајеви
		%	
Неадекватан прорачун и конструкција	6,9	9,1	13,8
Грешке у материјалу	0,8	3,6	1,9
Грешке у производњи и монтажи	17,6	10,7	14,4
Неадекватна експлоатација и одржавање	36,7	39,1	37,4
Хабање материјала	38,0	30,5	28,5
Остало	-	7,0	4,0

Хабање се у најширем смислу дефинише као непожељно скидање материјала са површине без обзира на узрок. Одређено хабање површина материјала у контакту и међусобном релативном кретању у одређеној средини може се сматрати нормалном појавом.

Може се поставити груба подела трења:

- механичко,
- хемијско трење.

Са кинематског аспекта разликује се:

- трење мировања,
- трење клизања и
- трење котрљања.

Под трењем мировања подразумева се отпор који тело у стању мировања, пружа при преласку у стање кретање.

Под трењем клизање подразумева се отпор релативном кретању у тангенцијалном правцу тела у додиру. При томе су разлике у брзинама кретање оба тела једнаке у свим тачкама додира.

Трење котрљања може бити:

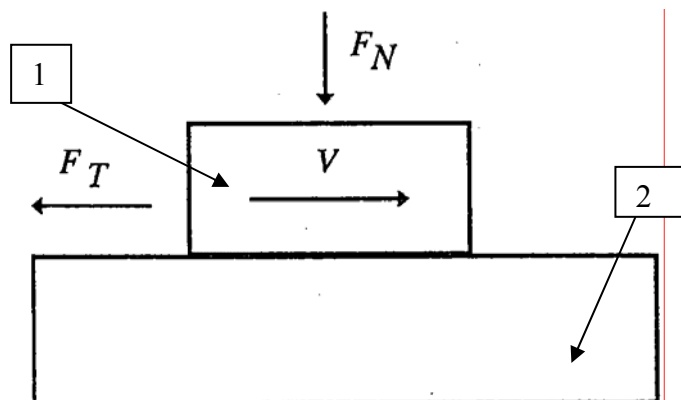
- слободно или чисто котрљање које се може остварити само при котрљању апсолутно тврдих тела и
- котрљање са клизањем које се јавља у релним условима.

У идустијској пракси као и у литератури из ове области наилази се на термине “суво трење” и “гранично трење”. Суво трење јавља се у механичким системима који не садрже мазиво било које врсте, односно у којима се контакт између два тела остварује без присуства трећег елемента тј. мазива.

Када се контакт између два чврста тела остварује у присуству мазива, тако да је дебљина слоја мазива увек мања од максималне висине неравнина на контактним површинама, трење које се у зони контакта јавља назива се “гранично трење”.

3.1 Трење клизања

Трење клизање остварује се у зонама контакта два тела која се релативно крећу једна по другом неком брзином V и уз присуство спољашњег оптерећења F_N (слика 3.2).



Слика 3.2 Трење клизања

Да би тело 1 прешло из стања мировања у стање кретања по телу 2 брзином V неопходно је прво савладати силу трења мировања. Ова сила има исти правац као и вектор брзине али супротан смер, а њена величина већа је од силе трења која се јавља у процесу кретања. На слици 3.3 приказан је облик функције $F_T = f(L)$, где је L пут који тело 1 прелази при кретању по телу 2. Сила трења је основни параметар којим се и мери процес трења. Поред ове величине за одређивање користе се коефицијент трења и коефицијент утрошеног рада на трење [2].

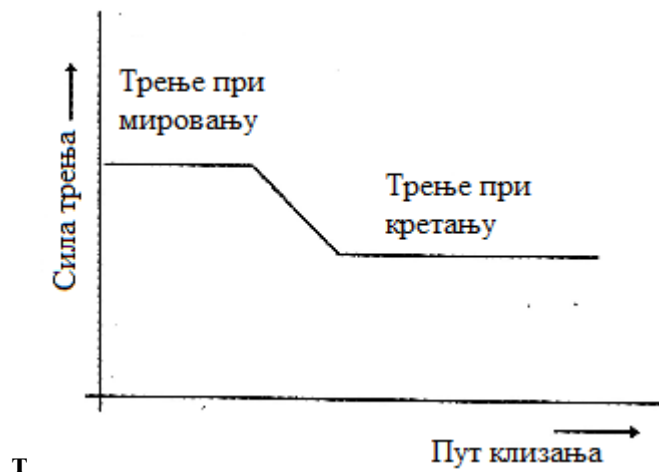
Коефицијент трења представља однос између силе трења и нормалног оптерећења:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}, \quad (3.1)$$

где је:

F_T - сила трења,

F_N - спољашње оптерећење (нормална сила).



Слика 3.3 Промена силе трења на путу L

Коефицијент утрошеног рада на трење претставља однос између рада утрошеног на савлађивање силе трења и укупног утрошеног рада на остваривање кретање:

$$\mu = \frac{W_T}{W_U}, \quad (3.2)$$

где је:

W_T - рад који се троши на савлађивање силе трења у Nm,

W_U - укупан рад који се троши на остваривање кретање у Nm.

На утицај спољашњег оптерећења на силу трења указао је први Леонардо да Винчи 1508. године. Он је сматрао да је сила трења пропорционална спољашњем оптерећењу и да коефицијент пропорционалности износи 0,25 без обзира на услове оставаривања контакта. Теорије трења, које су касније развиле, указале су на неодрживост овог става, односно на постојање утицаја бројних фактора на величину овог коефицијента пропорционалности, који се назива коефицијент трења.

Француски научник Амонтон (Amonton) 1699. године. формирао је три основна закона трења, од којих се прва два и данас могу срести, а које савремене теорије трења модификују у значајној мери. То су:

1. сила трења је независна од величине контактне површине,
2. сила трења је пропорционална величина нормалног оптерећења и
3. коефицијент трења не зависи од врсте материјала тела у контакту и при граничном подмазивању је 0,3.

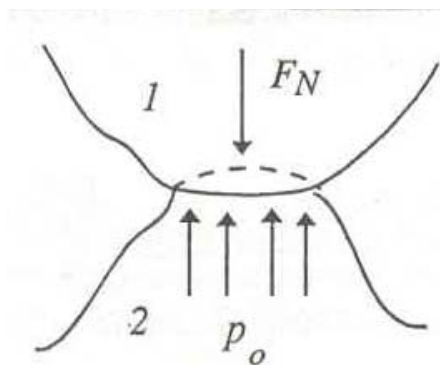
У првој половини XX века развијено је пет основних теорија трења. То су:

- адхезивна теорија трења,
- модификована адхезивна теорија трења,
- молекуларна теорија трења,
- молекуларно-механичка теорија трења и
- енергетска теорија трења.

Наведене основне теорије трења не могу да објасне механизам процеса трења у довољној мери, али доприносе бољем разумевању појава које се одигравају у зонама контакта елемената механичких система.

3.2 Адхезивна теорија трења

Адхезивна теорија трења развијена је у тридесетим годинама XX века у Енглеској и развили су је Бовден и Табор. Како се при остваривању контакта два чврста тела додир остварује по врховима неравнина, то је величина реалне површине контакта врло мала, а реални притисци врло велики и при релативно малим спољашњим оптерећењима. Процес пластичне деформације материјала у зонама додира траје до тренутка појаве реалне површине A_r , која помножена са притиском на граници течења мекшег материјала p_o обезбеђује равнотежу спољашњих и унутрашњих сила. На слици 3.4 приказан је јединични контакт остварен по врховима неравнина два тела.



Слика 3.4 Јединични контакт остварен између два тела

Из услова равнотеже спољашњег оптерећења и унутрашњих сила следи:

$$F_N = p_o A_r, \quad (3.3)$$

где је:

p_o - притисак на граници течења материјала мање тврдоће,

A_r - реална површина контакта.

У зони остваривања контакта јављају се адхезивне силе које доводе до појаве “хладног заваривања” материјала оба тела у додиру, тако да се на местима остваривања јединичних контаката формирају заварени спојеви, који се називају и фрикционе везе. Да би се у зони контакта фрикционе везе раскинуле неопходно је, у равни клизања, деловати тангенцијалном силом ради остваривања смицања. Отпор који у равни смицања фрикционе везе пружају њиховом раскидању представљају први део силе трења. Други део силе трења јавља се као последица појаве отпора кретању врха неравнина тврђег тела кроз контактни слој тела мање тврдоће. Ова појава назива се и микрорезање, јер врх неравнина тврђег тела делује као резни клин у процесу остваривања контакта (деформише материјал испред себе и уклања га са контактне површине тела мање тврдоће). Адхезивна теорија трења полази од основне претпоставке да је сила трења двојаке природе и да се може дефинисати изразом:

$$F_T = A_s \tau + p_C, \quad (3.4)$$

$$A_s = A_r, \quad (3.5)$$

где је:

F_T - сила трења,

τ - чврстоћа на смицање материјала тела мање тврдоће.

p_c - сила потребна за остваривање кретања врха неравнине тврђег тела кроз контактни слој тела мање тврдоће,

A_s - површина смицања,

p_c - деформациона компонента силе трења,

$A_s \tau$ - адхезивна компонента силе трења.

Ако се претпостави да је деформациона компонента силе трења релативно мала у поређењу са величином адхезивне компоненте, што је веома чест случај код трења клизања без подмазивања, могуће је користити израз:

$$F_T = A_s \tau = F_N \frac{\tau}{p_o}, \quad (3.6)$$

где је p_o - притисак на граници течења.

Са променом тврдоће материјала мењају се у истом смеру (повећавају се) и чврстоћа на смицање и притисак на граници течења, тако да њихов однос остаје приближно константан. Код већине металних материјала притисак на граници течења p_o приближно је пет пута већи од чврстоће на смицање, тако да према адхезивној теорији трења, коефицијент трења за ове материјале износи око 0,2. На величину коефицијента трења и силе трења имају утицај и врста материјала елемената у контакту и величина реалне површине контакта, а такође и услови под којима се контакт остварује. У табели 3.2 приказано је неколико података о величини коефицијента трења при клизању [2].

Табела 3.2 Примери вредности коефицијента трења при клизању

Материјали елемената у контакту	Без подмазивања	Са подмазивањем (гранично подмазивање)
Челик по челику	0,8	0,16
Челик по ливеном гвожђу	0,4	0,21
Челик по бронзи	0,3	0,16
Челик по месингу	0,5	0,19
Челик по полиетилену	0,1	
Челик по полипропилену	0,3	
Челик по PTFE	0,05	

Адхезивном теоријом трења занемарена је величина деформационе компоненте силе трења и коефицијент трења, јер се претпоставља да је она релативно мала у односу на адхезивну компоненту. Међутим, истраживања која су вршена последњих година показала су да деформационој компоненти коефицијента трења припада од 30 – 40% од укупне његове вредности.

3.3 Модификована адхезивна теорија трења

Полазна претпоставка за развој ове теорије трења је да раст реалне површине елементарног контакта A_r не зависи само од величине нормалног оптерећења већ и од тангенцијалних сила које се у зони додира појављују при кретању једног тела по другом.

Нормали напон и напон у равни смицања које настају у зони додира (у фрикционој вези) под дејством нормалног оптерећења и тангенцијалних сила, смањују се порастом фрикционе везе, односно реалне површине контакта. Веза између ова два врсте напона може бити написана у облику:

$$p^2 + \alpha \tau^2 = k^2, \quad (3.7)$$

где су:

k и α - константе чије величине зависе од механичких карактеристика материјала елемената у контакту.

Заменом величина p и τ одговарајућим изразима, веза између нормалног и тангенцијалног напона у зони контакта добија облик.

$$\left(\frac{F_N}{A_r}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F_T}{A_r}\right)^2 = k^2. \quad (3.8)$$

Ако тангенцијалних сила у зони контакта нема или су веома мале (први гранични случај), напон на смицање је једнак нули. У овом случају константа k је једнака притиску на граници течења материјала мање тврдоће.

$$p_o^2 = k^2. \quad (3.9)$$

Са порастом реалне површине контакта опада нормални притисак p , јер нормална сила F_N остаје константна.

$$\alpha \tau_o^2 = p_o^2. \quad (3.10)$$

Заменом константне k и p_o у основном изразу који исказује везу између нормалног и тангенцијалног напона долази се до израза:

$$A_r^2 = \left(\frac{F_N}{p_o}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F_T}{p_o}\right)^2. \quad (3.11)$$

Први део овог израза за реалну површину контакта одговара основној адхезивној теорији трења (назива се још и “упрошћена адхезивна теорија трења”), а други део указује на утицај тангенцијалних сила у зони додира на величину реалне површине контакта.

Изведени изрази за коефицијент трења и реалну површину контакта применом основне и модификоване теорије трења односе се на контакт између два чиста метала остварен у вакууму. У пракси међутим, у додиру су преко контактних површина елементи система израђени од металних и других материјала који реагују са средином у којој се налазе. Последица ових реакција је појава спољашњег граничног слоја на свакој контактної површини. Структуру спољашњег граничног слоја на металним површинама чине абсорбовани гасови, вода, уље и сличне материје, које испуњавају средину у којој се контакт између елемената система остварује.

Веза између напона на притисак и напона на смицање има облик:

$$p^2 + \alpha \tau_s^2 = \alpha \tau_o^2. \quad (3.12)$$

Адхезивна теорија трења и у основном и у модификованом облику се заснива на једном броју претпоставки од којих многе нису кроз касније експерименталне програме потврђене.

Основни закључци за основну адхезиону теорију трења могу се свести:

- реална површина контакта одређена је величином пластичне деформације материјала у зонама елементарног додира,
- контакт између елемената система остварује се преко спољашњих граничних слојева на контактним површинама, чије су критичне вредности напона на смицање мање од критичне вредности напона на смицање основног материјала,
- величине силе трења и коефицијента трења зависе од критичне вредности напона на смицање спољашњег граничног слоја и притиска на граници течења основног материјала.

3.4 Молекуларна теорија трења

Прву теорију о молекуларној природи трења поставио је 1929. године Томлинсон (Tomlinson). Полазећи од става да се у зонама додира два тела јављају привлачне и одбојне молекуларне силе, Томлинсон је поставио једначину равнотеже спољашњих и унутрашњих сила:

$$F_N + \sum p_P = \sum p_n, \quad (3.13)$$

где је:

F_N - спољашње оптерећење(нормална сила),

$\sum p_P$ - збир привлачних сила у зони додира,

$\sum p_n$ - збир одбојних сила у зони додира.

Збир привлачних сила је, по правилу, знатно мањи од спољашњег оптерећења у свим контактним ситуацијама тако да се може, без велике грешке, написати:

$$F_N = \sum p_n. \quad (3.14)$$

При клизању једног елемента система по другом долази до кидања молекуларних веза у зонама додира, што захтева утрошак одређене количине рада. Ако сваки пар молекула (атома) може да уравнотежи спољашње оптерећење величине p , онда n парова може да уравнотежи спољашњу нормалну силу F_N тј.:

$$F_N = pn. \quad (3.15)$$

Ако енергија једног пара молекула (једне молекуларне везе) износи W , укупан рад који се троши на раскидање формираних молекуларних веза на путу x при кретању једног елемента система по другом износиће KW .

Ако се силе трења, које у основи представља отпор раскидању формалних фрикционих веза, односно молекуларних веза у зони кретања, дефинише изразом:

$$F_T = \mu F_N = \mu pn, \quad (3.16)$$

онда је укупан рад који се троши на савлађивање трења:

$$W_T = F_T x = \mu pnx. \quad (3.17)$$

Израз за коефицијент трења показује да његова вредност, као и сила трења, зависе од:

- енергије молекуларних веза,
- правца кретања једног елемента по другом у односу на осу кристалне решетке,

- броју остварених молекуларних веза у зони контакта,
- растојања центара молекула (структуре материјала елемената у контакту) и
- спољашњег оптерећења.

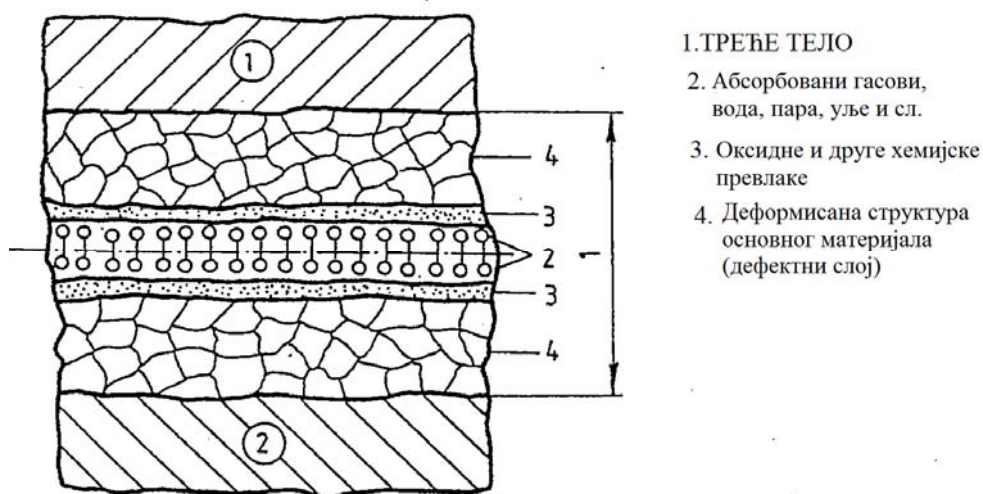
Томлинсонова молекуларна теорија трења не узима у обзир постојање трећег тела елемената система (мазива) као ни утицај спољашњег граничног слоја, који увек постоји на контактним површинама, на процес трења у зонама контакта.

3.5 Молекуларно механичка теорија трења

Молекуларно механичку теорију трења предложио је руски триболог Крагељски 1939. године. Полазећи од основне претпоставке коју је Коломб 1778. године поставио да је сила трења двојачке природе. Сила трења која се јавља у зонама контакта система састоји се из два дела:

$$F_T = F_{Tm} + F_{Td} . \quad (3.18)$$

Молекуларна компонента силе F_{Tm} последица је појаве међумолекуларних сила, односно фрикционих веза у зонама контакта. Деформациона компонента F_{Td} , представља отпор деформисању контактнoг слоја материјала мање тврдоће, до кога долази при кретању једног елемента система по другом. Молекуларном механичком теоријом трења уведен је и појам “треће тело” у коме се, у основи, развијају процеси за време остваривања контакта елемената система било које врсте (слика 3.5).



Слика 3.5 Структура “трећег тела”

Контакт између два чврста тела по својој природи је дискретан и остварује се у одређеном броју тачака по врховима неравнина, које су присутне на контактним површинама у мањој или већој мери. На местима додира формирају се заварени спојеви (фрикционе везе) као последица деловања мођумолекуларних сила између контактних површина. У исто време у зони остваривања контакта јавља се деформација контактнoг слоја материјала мање тврдоће као последица продирања у њега неравнина тела веће тврдоће.

У процесу кретања једног елемента система по другом врхови неравнина елемента веће тврдоће крећу се кроз контактни слој елемента мање тврдоће, при чему долази до

појаве нагомилавања материјала испред врхова неравнина и до појаве жлебова и зареза на контактної површини. У исто време развија се процес формирања и раскидања фрикционих веза и он траје непрекидно док траје кретање.

Промене микрогеометрије контактних површина, до којих долази у процесу остваривања контакта, зависе од природе материјала елемената механичких система, спољашњег оптерећења зона контакта, релативне брзине и др.

Спољашњи гранични слојеви састоје се од абсорбованих гасова, воде и уља и слојева насталих хемијским реакцијама околине са металним површинама.

Унутрашњи гранични слојеви обе контактне површине састоје се од деформисане структуре материјала чврстих елемената система, насталих у процесу њиховог обликовања неком врстом обраде метала.

Укупна сила трења која се јавља у зони контакта елемената система зависи од укупног броја додира остварених на контактним површинама и одређена је изразом:

$$F_T = \int_0^{n_r} F_{Ti} dn_r, \quad (3.19)$$

где је:

F_{Ti} - јединична сила трења,

n_r - број остварених додира у зони контакта.

Величина молекуларне компоненте силе трења која се јавља на једном елементарном додиру зависи од величине елементарне површине контакта A_{ri} и тангенцијалног напона τ_n тј.

$$F_{Tm} = A_r \tau_n, \quad (3.20)$$

Тангенцијални напон зависи од карактеристика τ_o и β “трећег тела” у коме се процес трења развија и величине нормалног напона фрикционе везе σ_n односно стварног притиска p_r :

$$\tau_n = \tau_o + \beta \sigma_n. \quad (3.21)$$

Тангенцијални напон који се јавља у једној фрикционој вези назива се јединичном силом трења.

Фрикционе карактеристике “трећег тела” у коме се процес трења развија, при кретању једног елемента система по другом, зависе од бројних фактора који говоре како о природи материјала контактних слојева, тако и о условима под којима се контакт остварује.

Деформациона компонента силе трења зависи од молекуларних компоненти и стања напона у контактном слоју тела мање тврдоће. Деформације контактних слоја тела мање тврдоће могу бити еластичне, еластично-пластичне или пластичне. Еластичне деформације се јављају код елемената система који су израђени од пластичних материјала и металних материјала са контактним површинама врло мале храпавости ($R_A < 0.05 \mu m$). У зонама контакта металних елемената система на величину деформационе компоненте силе трења еластичне и еластично-пластичне деформације имају релативно мали утицај. Величина деформационе компоненте силе трења зависи од величине пластичне деформације материјала у контактном слоју тела мање тврдоће.

Прорачун деформационе компоненте силе трења F_{Td} и коефицијент трења за случај појаве еластичних деформација у зони контакта, при чему је и број неравнина у додиру мањи од броја неравнина на контурној површини контакта, врши се за материјал

са малим модулом еластичности и величином контурног притиска p_c која задовољава услов:

$$0 < \frac{p_c (1 - \mu_p^2)}{E} < 0,06 \Delta^{0,5}. \quad (3.22)$$

по обрасцу:

$$F_{Td} = \frac{0,25 \alpha_{ef} h_i^2 E}{1 - \mu_p^2}, \quad (3.23)$$

где је:

Δ - комплексни параметар храпавости,

μ_p - Поасонов коефицијент,

α_{ef} - коефицијент хистерезисних губитака,

h_i - дубина продирања неравнина тела веће тврдоће у контактни слој мекшег тела

и

E - модул еластичности мекшег тела у контакту.

Молекуларно механичка теорија трења развијена је на основу проучавања топографије контактних површина и познавања механичких карактеристика (пре свега деформационих карактеристика) материјала елемената механичких система.

3.6 Енергетска теорија трења

Енергетска теорија трења Флишера развијена је шездесетих година и заснива се на следећим претпоставкама:

- трење је одређено радом, који се троши на савлађивање силе трења на путу x (овај рад је бројно једнак количини енергије која се у процесу трења претвара у топлоту).
- на процес трења могуће је применити први закон термодинамике,
- постоји директна веза између количине рада који се утроши на савлађивање трења и количине продуката хабања који при томе настају.

У процесу трења могућа је појава промене физичко-хемијских карактеристика контактних слојева елемената у додиру.

Укупан рад који се троши на савлађивање силе трења на путу x одређен је производом између силе трења и пута клизања:

$$W_R = F_T x. \quad (3.24)$$

На основу првог закона термодинамике, који говори о одржању енергије, могуће је написати:

$$W_R = W_M = W_{term} + W_{hem} + W_{el} + W_{jon} + W_{meh}, \quad (3.25)$$

где су:

W_{hem} - енергија хемијских процеса у зони контакта,

W_{el} - енергија електричних процеса,

W_{jon} - енергија јонизације у зони контакта и

W_{meh} - енергија еластичне осцилације система.

До израза за коефицијент трења и силу трења долази се на основу енергетске теорије трења, коришћењем израза за енергију трења сведену на реалан контакт.

$$W_R = e_{1el}nrV_{Re} + e_{2el}nrV_{Re} + e_BnrV_{Re}, \quad (3.26)$$

где су:

e_{1el} , e_{2el} - средње вредности густине енергетске еластичног контакта на местима додира елемената и контакту,

e_B - средња вредност густине енергије разарања фрикционе везе,

nr - број остварених додира у зони контакта и

V_{Re} - средње вредности јединичне запремине деформисаног материјала.

До средње величине елементарне запремине материјала V_{Re} долази се прорачуном по изразу:

$$V_{Re} = A_{Re}h_{Re}k_{VR}k_{VR}. \quad (3.27)$$

Коефицијент k_{VR} , чија се величина креће од 0,8 до 1, врши се кориговање прорачуна величине елементарне запремине због апроксимације елиптичног облика елементарне површине контакта кружним обликом.

У овом изразу A_{Re} представља елементарну површину контакта полупречника Re , а h_{Re} висину калоте, односно дебљину деформисаног материјала.

Израз за коефицијент трења има облик:

$$\mu = \frac{e_{1el} + e_{2el} + e_B}{p_r} i_{Rel} = \frac{e_{Reel}}{p_r} i_{Rel}, \quad (3.28)$$

где је e_{Reel} резултујућа густина енергије трења.

Интезитет трења при појави еластичних деформација дефинисан је изразом:

$$i_{Rel} = \frac{h_{Re}k_{VR}}{d_e}, \quad (3.29)$$

где је d_e пречник елементарне површине додира.

Ако се у зони контакта јављају пластичне деформације због великог спољашњег оптерећења или особина материјала елемената, у том случају се коефицијент одређује изразом:

$$\mu = \frac{e_{Repl}}{p_r} i_{Rpl}, \quad (3.30)$$

где је:

e_{Repl} - густина енергије трења,

p_r - реални притисак,

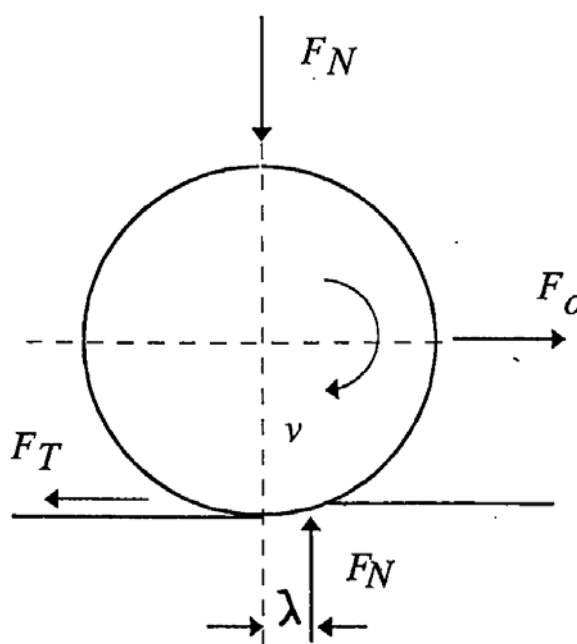
i_{Rpl} - интезитет.

3.7 Трење котрљања

Трење котрљања јавља се су у ситемима различитих врста у којима се један елемент система котрља по другом. У теоријским разматрањима ове врсте контакта разликују се два случаја и то:

- слободно или чисто котрљање и
- котрљање са клизањем.

Слободно (чисто) котрљање остварује се само при котрљању једног тврдог тела по другом. У реалним контактним ситуацијама, односно, у реалним системима оба чврста елемента су у већој или мањој мери деформибилна. Појава еластичних и пластичних деформација у зони контакта при котрљају једног елемента система по другом узрокује и појаву клизања. Појава клизања у процесу котрљања јавља се и као последица присуства тангенцијалних сила (вучних или кочионих) у системима ове врсте. Пример тог котрљања дат је на слици 3.6.



Слика 3.6 Котрљање са клизањем

Вектор релације на спољашње оптерећење F_N јавља се у зони контакта у истом правцу, али помереном за величину λ у односу на осу обртања, са истим интензитетом и супротним смером. Сила F_N и њена реакција чине момент $M = F_N \lambda$, који треба савладати да би се котрљање остварило. Отпор котрљању савлађује се вучном силом односно моментом:

$$M = F_N \lambda = F_o R = F_T R, \quad (3.31)$$

где је:

F_N - вектор реакције на спољашње оптерећење,

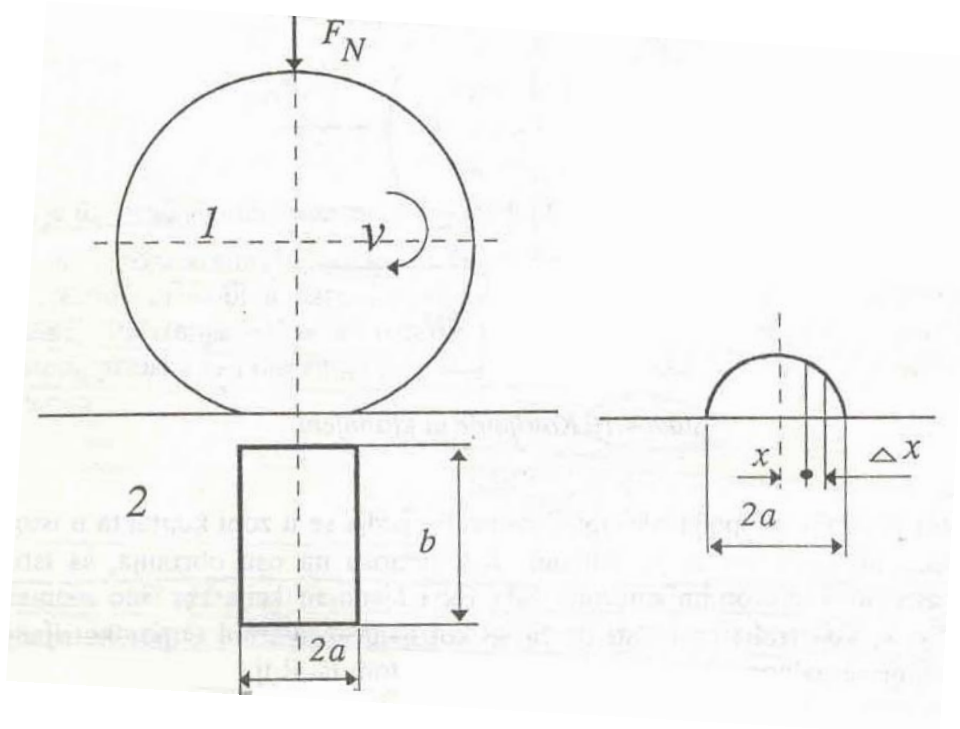
λ - коефицијент отпора при котрљању и има димензије дужине,

F_O - вучна сила.

Трење при котрљању знатно је мање од трења при клизању у истим условима остваривања контакта. У реалним условима, на величину трења при котрљању утичу појаве у зони контакта као што су микроклизање, еластичне и пластичне деформације и др. У основи узрок појаве трења при котрљању је појава еластичног хистерезиса у зони контакта, односно губитак енергије који настаје због појаве еластичних деформација на местима додира

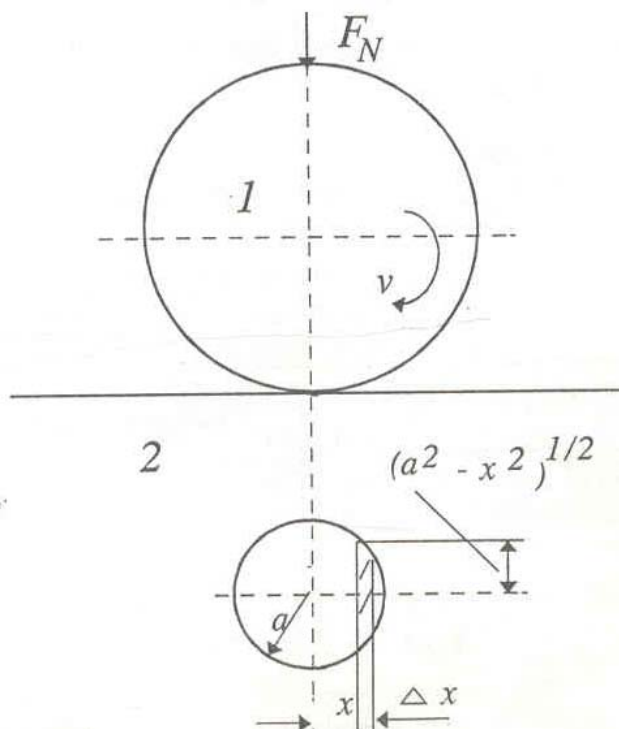
Постоје три облика котрљања при којима се релативно кретање остварује котрљањем.

Први случај односи се на кретање цилиндра по равној плочи (слика 3.7) [2].



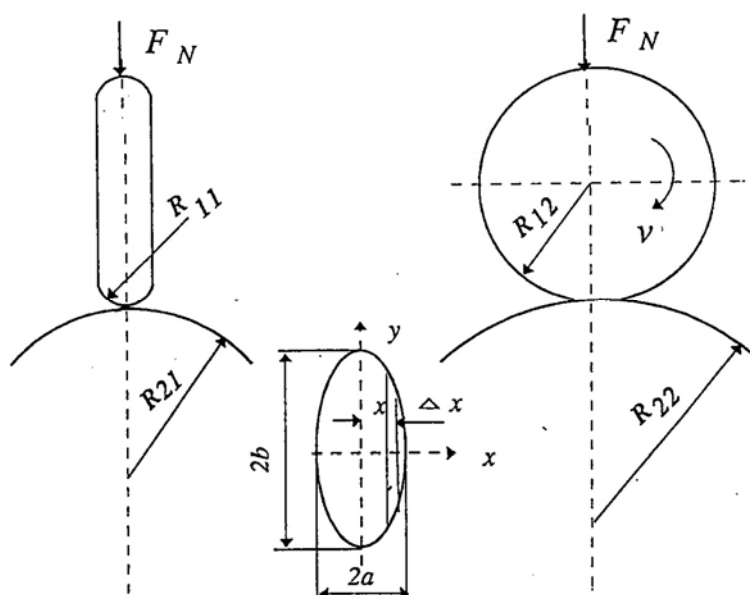
Слика 3.7 Котрљање цилиндра по равној плочи

Други случај котрљања на који се наилази у механичким системима односи се на котрљање кугле по равној плочи (слика 3.8).



Слика 3.8 Котрљање кугле по равној плочи

Трећа врста механичких система у којима се остварује трење котрљања је испупчена кружна плоча која се котрља по кривој површини (слика 3.9).



Слика 3.9 Котрљање испупчене плоче по кривој површи

3.8 Трење код елемената машинских система

У даљем тексту дати су неки од машинских елемената (клизна лежишта, котљајни лежајеви и зупчасти преносници) на које утиче трења.

3.8.1 Клизна лежишта

Трење у клизним лежиштима настаје између рукавца и постелице и по савременим тумачењима има молекуларно-механичку природу. Настала сила трења је двокомпонента и састављена је од силе отпора која је условљена атомско-молекуларним узајамним деловањем на граници раздвајања рукавац-постењца у зони њиховог реалног контакта (молекуларна компонента). Друга компонента је механичке природе и настаје као сила отпора промени топографије површинског слоја.

Сила трења, која настаје између елемената система (клизног лежишта) при релативном клизању, зависи од напонског стања у зони реалне површине контакта, али и од резултата деловања спрегнутих микронеравнина. Важно је напоменути да молекуларна компонента суштински зависи од врсте подмазивања, за разлику од механичке компоненте.

На интезитет силе трења клизних лежишта, а самим тим и на коефицијент трења велики утицај имају механичке карактеристике постелице које могу бити меке (полимери, бели метал...) и чврсте (челична осовина и нанешени слој антифрикционог материјала). Механичке карактеристике утичу на успостављање односа између молекуларне и механичке компоненте, али и на врсту и интезитет насталих деформација.

Клизна лежишта у већини случајева раде у режиму хидродинамичког подмазивања при чему је хабање радних површина постелице и рукавца занемарљиво мало. Али, у периоду пуштања и заустављања лежишта, која у нормалној експлатацији раде у условима хидродинамичког подмазивања, прелазе на рад у условима граничног подмазивања. У другим случајевима оптерећење може бити велико или брзине тако мале да није могуће успоставити хидродинамичко подмазивање под било којим угловима. У оваквим и сличним условима лежишта раде у режимима граничног подмазивања, при чему расте спољашње трење.

Избор и контруисање клизних лежишта као носилаца елементарних функција у машинским конструкцијама захтева добро познавање њихових карактеристика [6].

3.8.2 Котрљајни лежаји

Трење у котрљајним лежајима је релативно мало и у укупном енергетском билансу при конципирању конструкције се може чак и занемарити. Већи значај добија у случајевима када његов топлотни ефекат суштински утиче на радне температуре развијене конструкције. Трење се у лежајима састоји из: трења котрљања са клизањем, трења клизања и трења у мазивом материјалу. Узајамна сложена повезаност отежава детаљну анализу сваке врсте трења понаособ [6].

Трење котрљања са клизањем настаје у процесу кретања котрљајних тела по путањи котрљања и делимично је условљено клизањем у зони контакта елемената, а

делом и појавом еластичног хистерезиса. Еластични хистерезис настаје услед деформација оптерећених елемената (прстен-котрљајно тело) при чему се добијени рад при растерећењу само делимично користи за кретање, а остали део прелази у топлоту.

Трење клизања се јавља у контакту котрљајних тела и држача, међусобном контакту котрљајних тела (лежајеви без држача) као и у контакту чела ваљка и наслона. У нормалним условима експлоатације трење клизања је занемарљиво мало, али знатно нарасте у условима недовољног подмазивања, загађене атмосфере, врло великих броја обртаја и нарушених кинематских односа лежаја.

Трење у мазивом материјалу састоји се из унутрашњих трења насталог као последица релативног кретања између молекула мазива при мешању и спољашњег трења које настаје при премештању и истискивању вишка мазива. Трење и губици услед трења расту са увећањем броја обртаја лежаја, порастом вискозности и вишком мазива у лежају.

3.8.3 Трење зупчастих преносника

Основне последице трења у зупчаницима су расипање енергије, различити степени искоришћења и хабање зупчаника. Параметри којима се најчешће квантифицира трење у зупчаницима су: коефицијент трења и губитци енергије у спреси. Трење које се јавља при раду зупчаника је у принципу збир трења клизања и трења котрљања. Основни параметри који утичу на коефицијент трења, као брзина клизања, мењају величину и правац у периоду спрезања, а други параметри утицаја (оптерећења, одступања и геометрија) усложњавају општу математичку анализу.

Треба напоменути да за сада још увек не постоје развијене теорије трења зупчастих преносника, у којој би се сложени процеси трења третирали са аспекта своје механичко молекуларне природе.

Губици енергије или губици снаге у зупчастом преноснику, а који се исказују преко степена искоришћења преносника, варирају од 0,5% до преко 80%, у зависности од типа зупчаника, оптерећења, подмазивања и др. Како апсолутни степен искоришћења (100 %) не може егзистирати ни у теоријским разматрањима и с обзиром на све већу вредност и значај енергије, задатак је конструктора да учини све како би губитке енергије у преносу минимизирао до границе могућег [4].

4. ПРОЦЕС РАЗАРАЊА УСЛЕД КОРОЗИЈЕ

Корозија представља разарање материјала, које настаје сложеним физичко хемијским дејством околне средине. Назив речи потиче од латинске речи *corrodere* што значи изглодати, изгристи, па се уместо корозије може рећи нагризање или рђање. Корозија материјала је уствари обрнути процес од поступка добијања метала и она представља природну појаву повратка метала у почетно равнотежно стање, при чему систем смањује слободну енергију. Годишњи губитци услед дејства корозије износе око 25 милиона тона материјала. Цена корозије сваку земљу кошта око 6% бруто домаћег производа Сваких 90 секунди рђа поједе 1 тону челика, али се зато истовремено произведе 2 тоне [5].

Према месту настајања корозија може да буде:

- атмосферска корозија која обухвата процесе у влажном ваздуху, на киши и изолацији, аеросолима и хемијским загађивачима ваздуха,
- корозија у течности која обухвата појаву разарања материјала у директној реакцији са околном средином: водом, растворима киселина, база или соли,
- подземна корозија која делује на метале укопане у земљи као што су цевоводи, цистерне, носећи стубови и сл. Када је у питању земља, реч је о електрохемијској корозији, али ако је тло богато водом, може настати и микробиолошка корозија (анаеробне бактерије налазе погодне услове за развој, разарају заштитни слој водоника и изазивају јаку локалну корозију челичних делова).

Највеће штете изазива атмосферска корозија која напада машине и грађевинске конструкције у загађеној атмосфери нарочито у:

- индустријским зонама,
- градским срединама,
- рудницима и
- другим срединама са повећаном влажношћу.

4.1 Механизам корозионог настајања

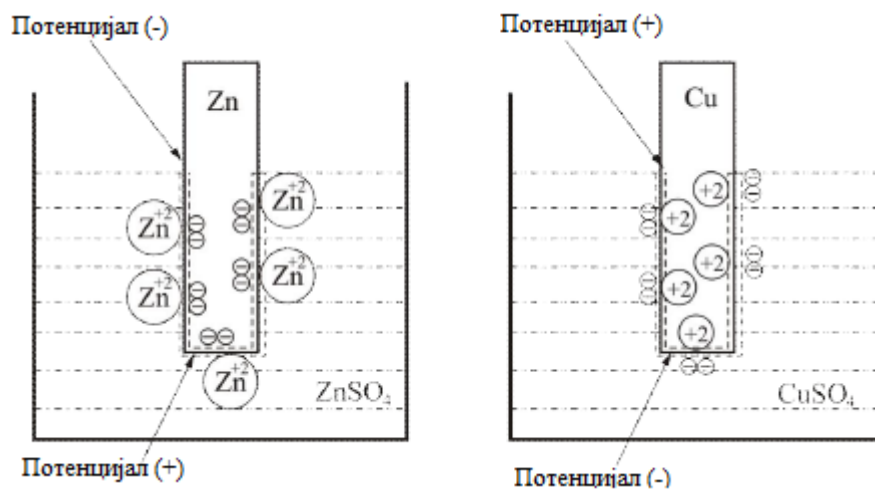
Корозино разарање настаје услед утицаја гасова и течности спољне средине на материјал. Према неким подацима, око 10% производа од црних и обојених метала за годину дана губи своју техничку употребљивост услед корозионог разарања. Међутим, највеће штете услед корозије настају услед смањења поузданости и трајности машинских конструкција, а затим и због повећања трошкова за ремонт и за заштитне мере којима се спречава корозија. Ради дубљег објашњења појаве и деловања корозије, проучени су механизми развоја њеног процеса. Према механизму настајања разликују се у металима два основна типа корозије:

- електрохемијска корозија (корозију у електро проводљивој средини) и
- хемијска корозија (корозија у електро непроводљивим срединама) [1].

4.2 Електрохемијска корозија

Процес електрохемијске корозије искључиво настаје у присуству јонских течности као што је вода, а нарочито водени раствори који са металом или металима у контакту чине галвански пар. Тај пар може се појавити због нечистоћа, микроструктурних разлика, унутрашњих напона, површинских зареза, рупа, грешака на границама зрна. Ствара се галвански елемент (пар) који се образује између аноде и катодe у електропроводној средини. При томе настају две главне реакције једна на аноди, а друга на катоди. Услед корозије на аноди се ствара улегнуће а на катоди задебљање. Разарање које услед тога настаје на површинама метала назива се и електролитска или галванска корозија.

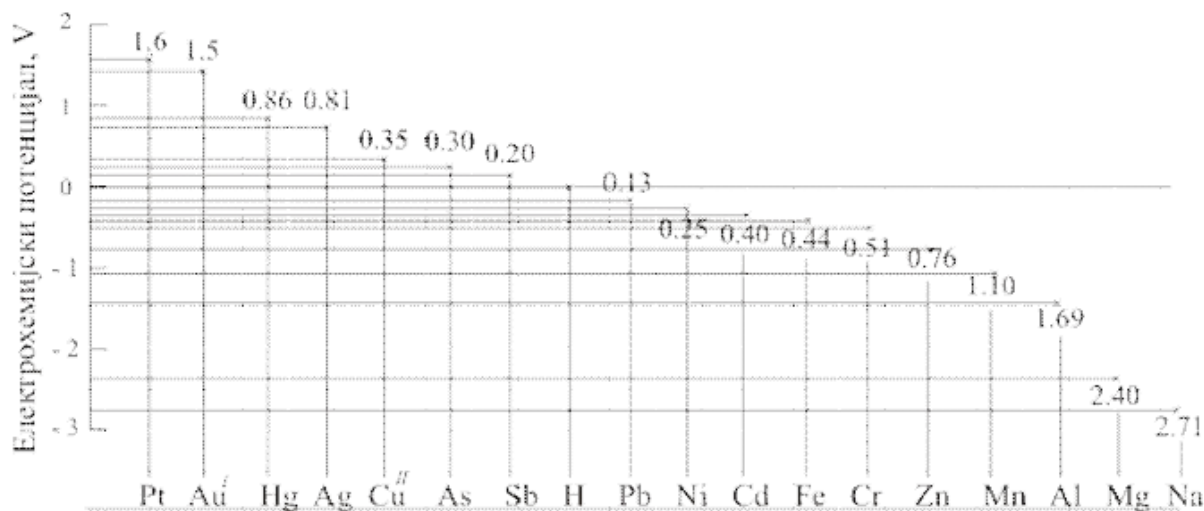
Уколико је метал уроњен у раствор сопствене соли, тј. у раствор који садржи јоне тог метала, у површинским атомима долази до ослобађања валентних електрона. Због емисије електрона стварају се позитивно наелектрисани површински јони који прелазе у раствор и обрнуто, јони из раствора могу прелазити на метал. Уколико је електролитички притисак растварања већи од равнотежног, прелазиће позитивни јони метала у раствор, површина металне плочице наелектрише се негативним потенцијалом – каже се да се метал раствара (слика 4.1 а). У супротном, кад се јони из раствора таложе на плочицу уроњену у електролит, она се наелектрисава позитивним потенцијалом (слика 4.1 б) [5].



Слика 4.1 Појава апсолутног потенцијала после потапања метала у раствор сопствене соли

На граници између метала и електролита ствара се потенцијална разлика, која има одређену вредност за сваки метал и назива се апсолутним електродним потенцијалом. Ова вредност се не може измерити, јер би се самим мерењем нарушила равнотежно стање. Зато се одређује разлика потенцијала између две електроде различитих материјала, тј. релативни потенцијал. Стандардна електрода за поређење (референтна електрода) зове се водоникова електрода (платинска плоча пресвучена прашкастом платином), чији се потенцијал узима да је нула. То омогућава да се за различитим металима одреде тзв. стандардни електродни потенцијал, који се дефинише као релативни потенцијал датог метала потопљеног у раствор своје соли при 25°C , а све

измерено у односу на водоникову электроду. Овде се термин стандардни потенцијал односи на термодинамичке услове, тј. на притисак $p = 1,01325 \text{ bara}$ и температуру $T = 25^\circ \text{C}$. Вредности стандардних потенцијала различитих метала дате су на слици 4.2.



Слика 4.2 Електрохемијски потенцијал разних метала у воденом раствору својих соли

Искључивањем осталих факора који утичу на корозију, може се закључити да су корозијоно мање отпорни метали са негативним потенцијалом стога подложнији нападу електрохемијске корозије (и ако има случајева који одступају од овог правила). Што је негативнији електрохемијски потенцијал датог метала, он је склонији ка оксидацији. На пример, метали на десном крају овог низа магнезијум (Mg) и натријум (Na) толико су реактивни (тј. склони оксидацији) да се могу заштитити од сагоревања само ако се не дозволи сваки њихов контакт са кисеоником. С друге стране, на почетку низа (платина (Pt), злато (Au), сребро (Ag) уопште не реагују са кисеоником, те се због тога зову племенитим металима [11].

Метали који се највише примењују у техници (машинству, грађевинарству, електротехници) као што су гвожђе (Fe), бакар (Cu), никл (Ni) имају средњу реактивност. Али није само електрохемијски потенцијал мера отпорности на корозију. На пример, алуминијум има јако негативан стандардни електродни потенцијал (близак Mg), али ипак се почетна оксидација брзо зауставља јер се формира заштитни површински филм алуминијум оксида који спречава корозију. Такође и титан у почетку лако реагује са кисеоником али се брзо формира титанов оксид који представља баријеру за даљу дифузију кисеоника. Осим тога, горе приказан низ хемијских елемената говори о термодинамичкој могућности и погонској сили оксидације, али не и о самој брзини реакције.

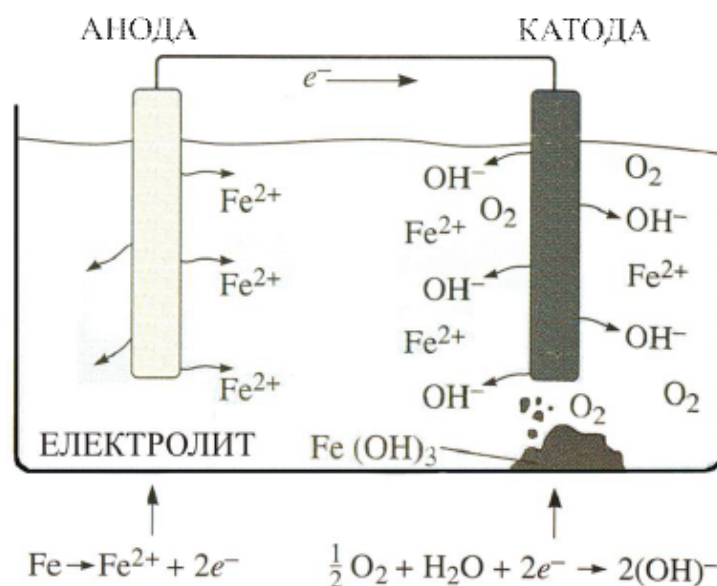
Даље ће се разматрати под којим условима може да почне електрохемијска корозија. То се дешава ако се формира:

- галвански пар између између различитих метала,
- напонска ћелија због локалних разлика у хемијској концентрацији електролита,
- концентрациона ћелија због локалних разлика у хемијском саставу.

Галвански пар, или електрохемијска ћелија, је струјно коло без спољашњег извора електричне струје. То коло образују: анода, катода, метални контакт, електролит (слика 4.3). Анода емитује електроне преко металног контакта ка катоди, а позитивни јони са

катоде одлазе у електролит. У близини катоде позитивни јони прихватају електроне и стога прелазе у неутралне атоме. Процес траје док се не прекине струјно коло или док се анода потпуно не истроши.

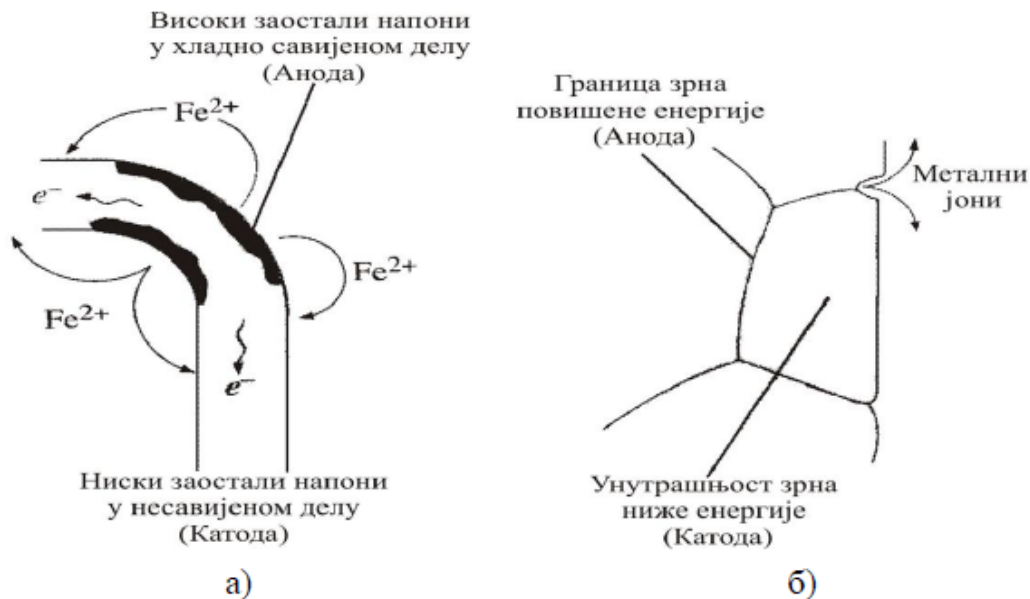
Из описа галванског пара произлази суштина електрохемијске корозије. Код челичних конструкција изложених корозији, позитивни јони гвожђа одлазе у електролит, и тиме се у ствари са површине челика постепено губи метална компонента. Процес се одражава захваљујући струјном колу успостављеном између аноде и катоде преко спољашњег металног контакта с једне стране и кроз електролит са друге.



Слика 4.3 Галвански пар

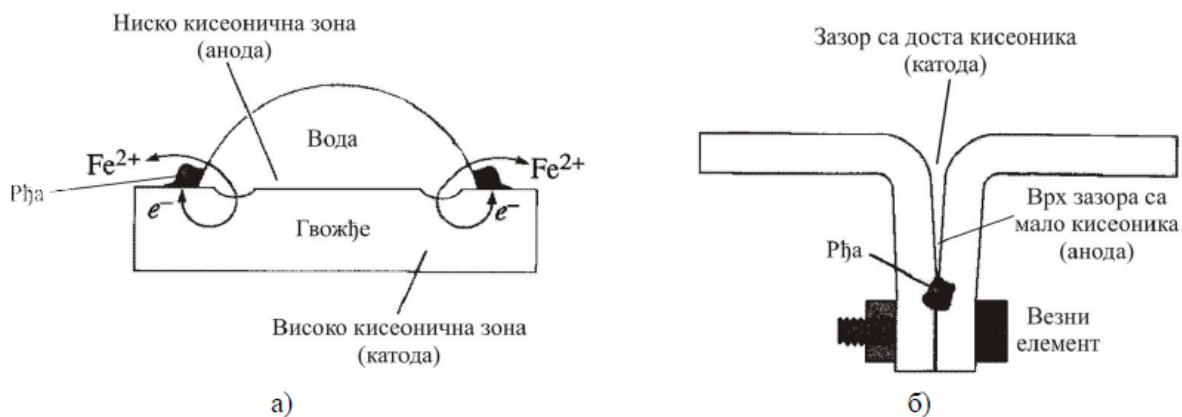
Као што је већ споменуто, метали са негативним стандардним потенцијалом би требали да кородирају интензивније него метали са мање негативним, односно позитивним стандардним потенцијалом. Та претпоставка не одговара увек стварности. Нпр. алуминијум, који има негативнији стандардни потенцијал него гвожђе, кородира мање интензивно, јер се при корозији у оксидационим срединама покрива танком превлаком оксида Al_2O_3 . То је продукт електрохемијске реакције који штити метал од даље корозије – пасивизира га. Потенцијал пасивизираниог метала се помера ка позитивној вредности.

Напонска ћелија настаје кад метални делови имају заостале напоне различитог нивоа у појединим локацијама. Наиме, више напрегнуте зоне поседују већу слободну енергију па делују као аноде у односу на мање оптерећене области. На примеру челичне траке савијене на хладно (слика 4.4 а), види се да зона савијања делује анодно (већа слободна енергија због савијања) у односу на недеформисану зону, па ће то место да кородира (напонска корозија). Код поликристалних материјала постоји разлика у слободним енергијама границе зрна и унутар зрна. Границе зрна имају виши енергетски ниво него унутрашњост металних зрна, те делују анодно и кородирају у електролиту (слика 4.4 б).



Слика 4.4 Примери корозионих ћелија: (а) савијањем челичне шипке на хладно настају заостали напони у зони савијања која је анодна и кородира, (б) границе зрна поседују вишу енергију те стога кородирају

Концентрациона ћелија (слика 4.5) настаје због локалне разлике у концентрацији електролита на појединим деловима металног комада. Та разлика може се појавити и због ометаног приступа кисеоника ка појединим деловима металног предмета због водене капљице (слика 4.5 а) или спојених металних делова (слика 4.5 б). Корозија настала у овим условима назива се “кисеонични колапс”.



Слика 4.5 Концентрациона ћелија: (а) корозија испод водене капљице на челичној плочи због ниске концентрације кисеоника у води (б) корозија на врху расцела због ограниченог приступа кисеоника

Електрони са површине метала испод капљице, а са границе чврсто-течног стања (слика 4.5 а), одлазе кроз метал на слободну површину метала, да би се ту неутралисали са јонима Fe^{2+} који су доспели са исте локације. На слободној површини металног предмета уз саму капљицу не долази само до неутрализације ($Fe^{2+} + 2e^- = Fe$), већ и до формирања грудвица рђе ($Fe(OH)_2$).

Другим речима, водене капљице или лишће опало са дрвећа на површину метала, спречавају да кисеоник доспе до метала. Због тога граничне кисеоничне зоне делује као анода те кородирају.

Проблем хемијског разарања, рђања, спољних површина машинских елемената и конструкција изложених атмосферским променама, предмет је изучавања посебних дисциплина које се баве антикорозивном заштитом материјала.

Брзина електрохемијске корозије, тј. количина метала која равномерно кородира са аноде у водени раствор у одређеном временском интервалу, одређује се коришћењем Фарадејеве (Faraday) једначине:

$$w = \frac{I \cdot t \cdot M}{n \cdot F}, \quad (4.1)$$

где је:

- w - маса кородираног метала у јединици времена,
- I - јачина струје,
- t - време,
- M - атомска маса метала,
- n - валентност металних јона,
- F - Фарадејева константа.

У процесима корозије уобичајено је рачунање губитка масе са одређене површине у јединици времена.

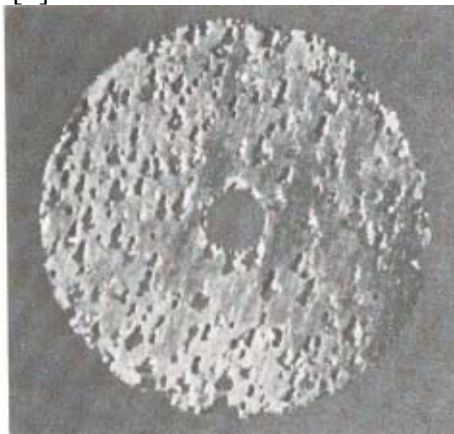
Према начину нападања метала облици електрохемијске корозије могу бити:

- равномерна, која се карактерише готово уједначеним губитком метала по целој површини изложеној корозији,
- неравномерна, кад материјал бива нападан само на одређеним местима.

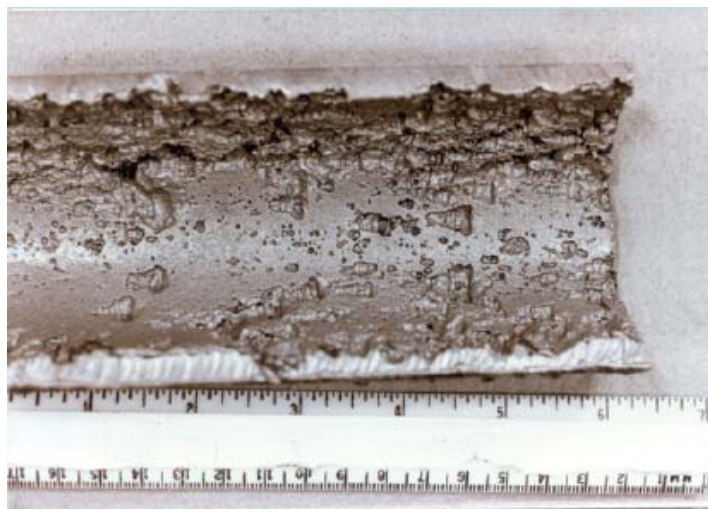
Макроскопски облици неравномерне корозије јесу питинг (pitting) и тачкаста корозија, које су концентрисане само у ограниченим зонама (локалном оштећењу заштитне превлаке, локалном паду отпорности).

4.3 Питинг корозија

Питинг корозија обично настаје код метала који имају заштитну превлаку, ако се превлака оштети настају јамице (енглески pit), којих може бити више на површини изложеној корозији (слика 4.6) [5].



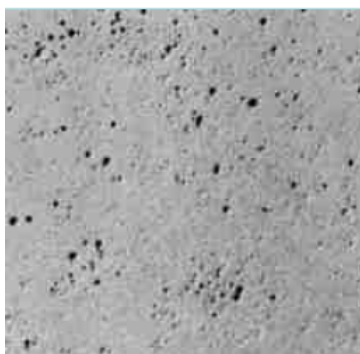
Слика 4.6 Изглед питинг корозије



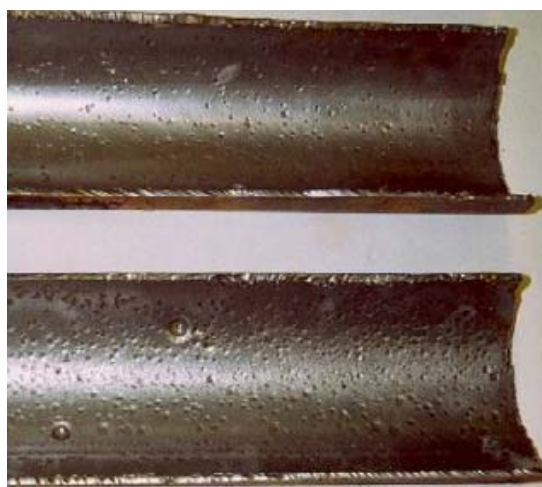
Слика 4.7 Изглед питинг корозије на једном машинском елементу

4.4 Тачкаста корозија

Тачкаста корозија настаје на местима где је дуготрајна корозија (слика 4.8).



Слика 4.8 Изглед тачкасте корозије

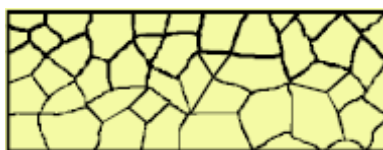


Слика 4.9 Изглед тачкасте корозије на машинском елементу

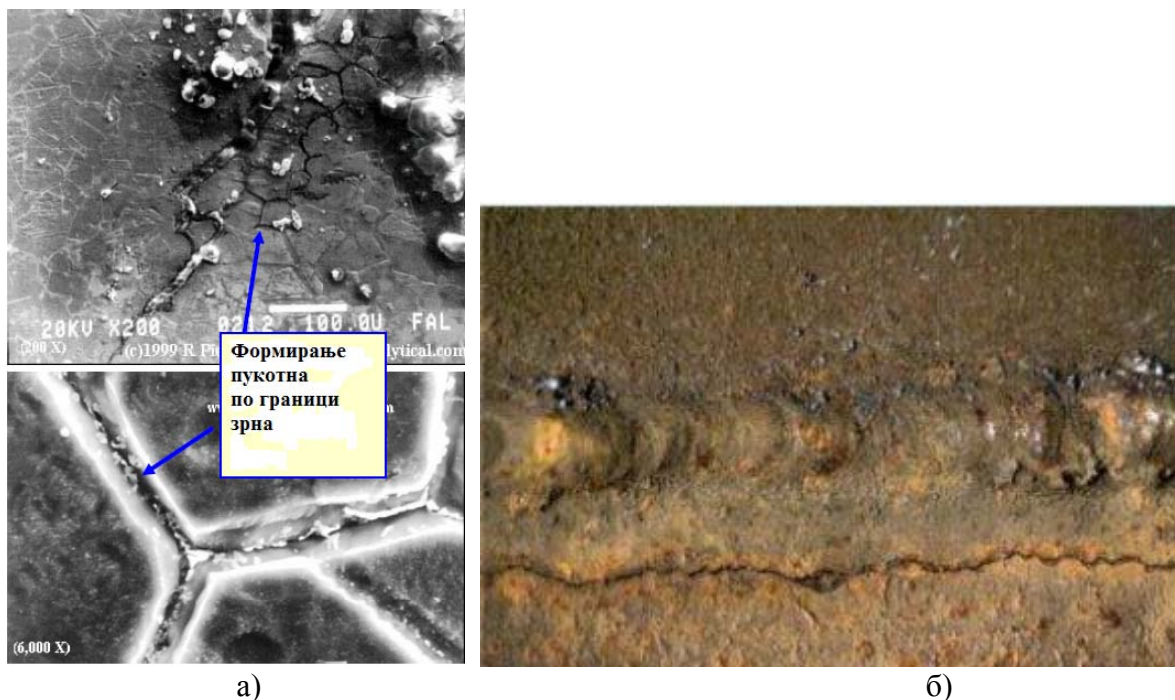
Među veoma štetne, a teško uočljive oblike neravnomerne mikroskopske korozije ubrajaју se:

- међукристалna корозија,
- селективна корозија,
- напонска корозија,
- галванска корозија,
- бактеријска корозија.

Међукристална корозија настаје због различитих осетљивости граница зрна и самих зрна на корозиони медијум. Типичан пример је аустенитни нерђајући челик на чијем се границама зрна, при загревању од 480-760⁰С излучује карбит хрома. Због тога границе зрна постају аноде, тј. растварају се у електролиту. То се најчешће догађа при заваривању нерђајућих челика у зони око шави. На слици 4.10 је дат шематски изглед међукристалне корозије.



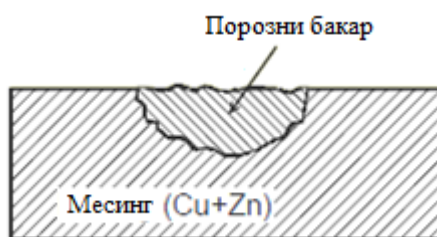
Слика 4.10 Шематски изглед међукристалне корозије



Слика 4.11 а) микроскопски изглед међукристалне корозије, б) изглед зоне око шави где настаје међукристална корозија

4.5.2 Селективна корозија

Селективна корозија напада једну фазу у двофазним легурама, или само један мање племенит метал у једнофазним легурама типа чврстог раствора. Најпознатији пример селективне корозије је губитак цинка у месингу са више од 15% Zn. Племенити метал бакар (Cu) остаје непромењен, корозиони процес се одвија у галванском пару у коме је Cu катода, а легура анода. Пошто цинк одлази у електролит, у легури остаје “сунђераст” бакар знатно лоших механичких особина. Спречавање губитка цинка постиже се додавањем инхибитора: арсена, антимона или фосфора у износу од неколико десетих делова процената. Губитак цинка настаје при заваривању месинга, што се спречава применом оксидујућег ацетиленског пламена (са вишком кисеоника) (слика 4.12).



Слика 4.12 Губитак цинка у месингу

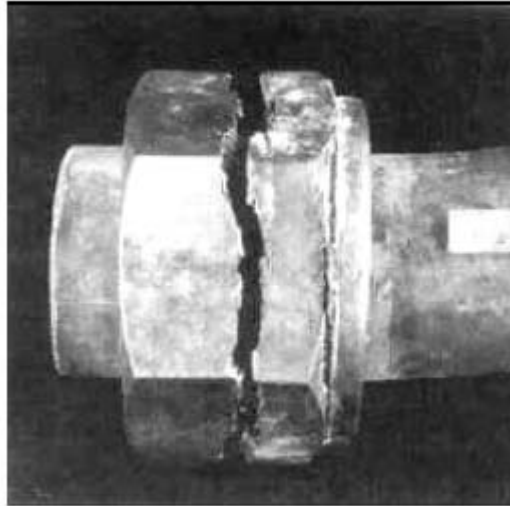
4.5.3 Напонска корозија

Напонска корозија настаје при истовременом деловању затежућег статичког напона (спољашњег или унутрашњег) и локалне корозије. Ова се корозија може успорити ако се у површинским слојевима индукују напони притиска (нпр. бомбардовање челичним куглицама и сл.). Код чистих метала напонска корозија се готово не јавља (изузетак је чист метал у раствору своје соли већ углавном код фазних и двофазних легура).

Понекад је ова врста корозије везана за присуство интерметалних једињења на границама металних зрна, где се могу образовати локални галвански микропарови (слика 4.13).



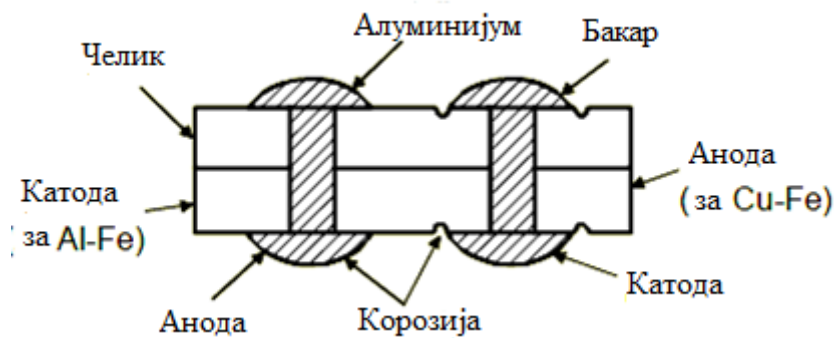
Слика 4.13 Изглед напонске корозије



Слика 4.14 Изглед прелома услед напонске корозије

4.5.4 Галванска корозија

Галванска корозија настаје образовањем одвојених корозионих парова, тј. одређене области се увек понашају као анода, док се друге области понашају као катода (слика 4.15).



Слика 4.15 Неправилна спрега различитих метала



Слика 4.16 Пример галванске корозије

4.5.5 Бактеријска корозија

Микробиолошку корозију изазивају различити микроби, гњиве и бактерије који потпомажу електрохемијску корозију. Посебно у влажној атмосфери, ови организми расту на површини метала, стварајући нагомилане (неконтинуалне) колоније, и споредни производи ослобођени при расту ових организама, доводе до промене околне средине која постаје агресивна.

Тако нпр. неке бактерије редукују сулфате из околне средине при чему се ствара сумпорна киселина која даље напада метал. Бактерије могу бити било анеоробне (успевају у присуству кисеоника) или анаеробне (није им потребан кисеоник за даљи развој). Оне нападају низ метала, укључујући челике, нерђајуће челике, алуминијум и бакар, као и неке керамике и бетон. Често се као пример наводи алуминијумски резервоар за авионско гориво (керозин) кад се гориво запрља нечистоћима, бактерије расту и излучују киселине. Оне делују агресивно на алуминијум, тако да резервоар после извесног времена може процурети.

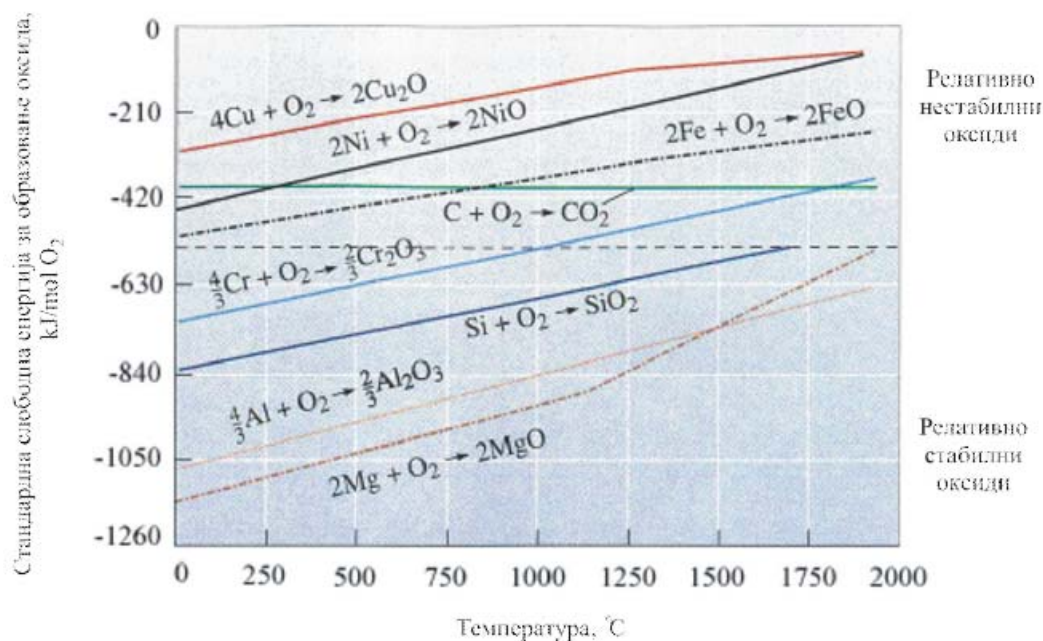
4.6 Хемијска корозија

Хемијска корозија настаје услед хемијског узајамног деловања метала и агресивне спољне средине различитих својстава. Кисеоник, активна компонента ваздуха, реагује необично брзо са свим металима, осим племенитих а и са многим органским и неорганским металима. Кад се каже хемијска корозија углавном се мисли на високотемпературску оксидацију метала и легура. Практично су све површине таквог материјала покривене слојем оксида. До оксидационог процеса долази и када површине на изглед нису у контакту са ваздухом нпр. површине покривене абсорбованим или хидродинамичким слојем мазива, јер се кисеоник налази абсорбован на свим површинама и растворен у свим флуидима, који се у ваздуху налазе или су се налазили у контакту. За техничке метале од посебног је значаја да се установи склоност ка оксидацији, природа формираног оксидног филма и брзина оксидације. Склоност ка оксидацији, тј. зависност слободне енергије оксидације и температуре даје Елингемов (Ellingham) дијаграм (слика 4.17).

Овај дијаграм указује на велику склоност ка оксидацији Mg и Al, и супротно томе на веома малу тенденцију ка оксидацију никла и бакра. Неметали Si и C и метали Fe и Cr налазе се између наведених екстремних примера.

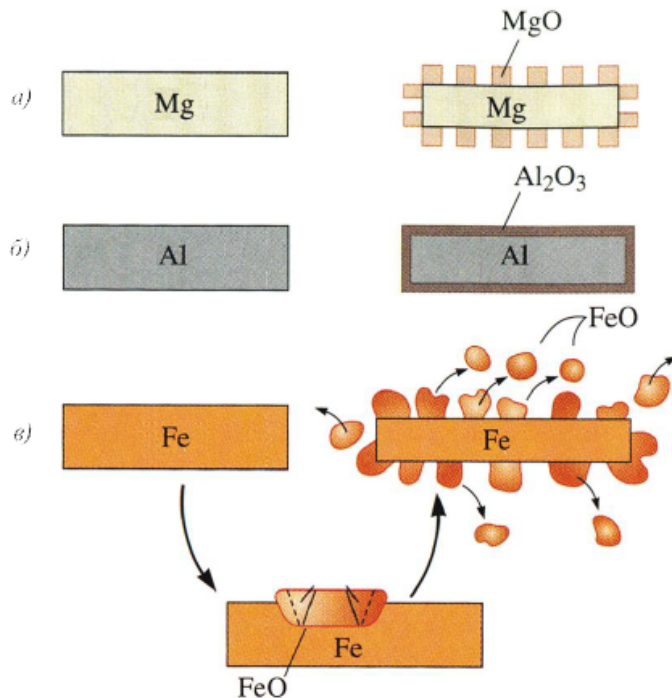
Брзина оксидације зависи од броја атома кисеоника који се хемијски везују за поједине метале:

- линеарна брзина оксидације $y = kt$ настаје код порозних оксида (где је y - дебљина оксидног слоја, $k = \text{const.}$),
- параболични однос $y = \sqrt{kt}$ запажен је код гвожђа, бакра и никла, где дифузују јона или електрона формира већ формиран непорозан оксидни слој,
- логаритамски однос $y = k \ln(ct+1)$ уочен је при порасту танког заштитног оксидног филма код алуминијума и хрома (c је константа за одређену температуру, околину и састав).



Слика 4.17 Стандардна слободна енергија за формирање неких оксида у функцији температуре (виша енергија – већа склоност ка оксидацији)

Три описана типа оксида, који се формирају на великим техничким металима, приказани су на слици 4.18 [5].



Слика 4.18 Врсте оксида зависно од односа специфичне запремине метала и оксида: а) магнезијум даје непрекидни оксидни слој, б) алуминијум формира непорозан оксидни филм и в) гвожђе формира прекидни оксидни слој који не штити од корозије

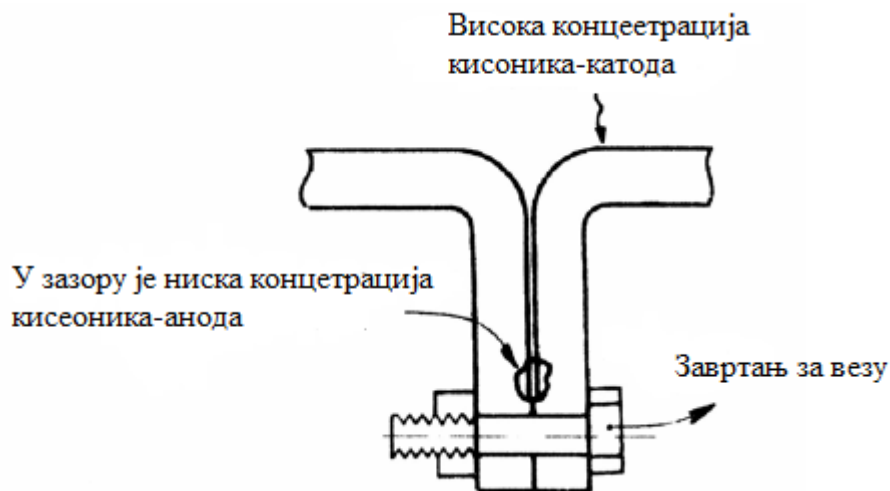
Процес директне оксидације се по правилу брзо зауставља, јер сам слој оксида спречава даљи контакт кисеоника са металом по дубини. Дебљина оксидног слоја зависи од врсте материјала и од порозности створеног оксида, тј. од могућности дифузије кисеоника кроз слој оксида-оксидни слој богат кисеоником на површини док је слој оксида у контакту са металом сиромашан кисеоником. Метали као што су алуминијум, хром, калај и неки други метали дају танке слојеве оксида.

Код легура, афинитет појединих метала који се изграђује, према кисеонику не одговара афинитету тих метала када не формирају легуру. Легирани челици са веома малом количином хрома дају оксидни слој хромног оксида, који заштићује површине челика од корозије на високом температурама.

Директна оксидација метала на нормалним или умереним повишеним температурама и у статичким условима не представља никакву опасност за метале. Дебљина слоја оксида раста на високим температурама, тако да врло тврди и поприлично дебели слојеви оксида нису у стању да прате деформацију у маси метала изазване термичким напрезањем. Оксидни слој пуца тако да ствара пут за даљу оксидацију метала по дубини.

4.7 Корозија у зазорима

Корозија у зазорима напада метал у уским зазорима који постоје код многих склопова различитих метала или неметала (слика 4.19) [5].



Слика 4.19 Пример корозије у зазорима



Слика 4.20 Изгледи машинских делова код којих је настала корозија у зазорима

4.8 Ерозиона корозија

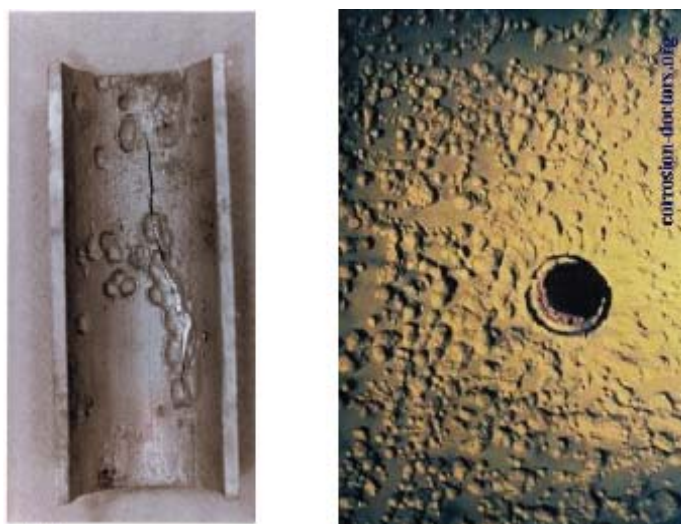
Ерозиона корозија је последица заједничког деловања корозије и ерозије. При ерозивној корозији настаје повишење брзина корозионог напада на метал услед релативног кретања корозионог флуида и површине метала. Ерозиона корозија се карактерише појавом на површини метала жлебова, удубљења, рупица, заобљених јамица и других облика оштећења површине метала који обично настају у смеру протицања корозионог флуида (слика 4.21).



Слика 4.21 Изглед ерозионе корозије на једном машинском елементу

4.9 Кавитациона корозија

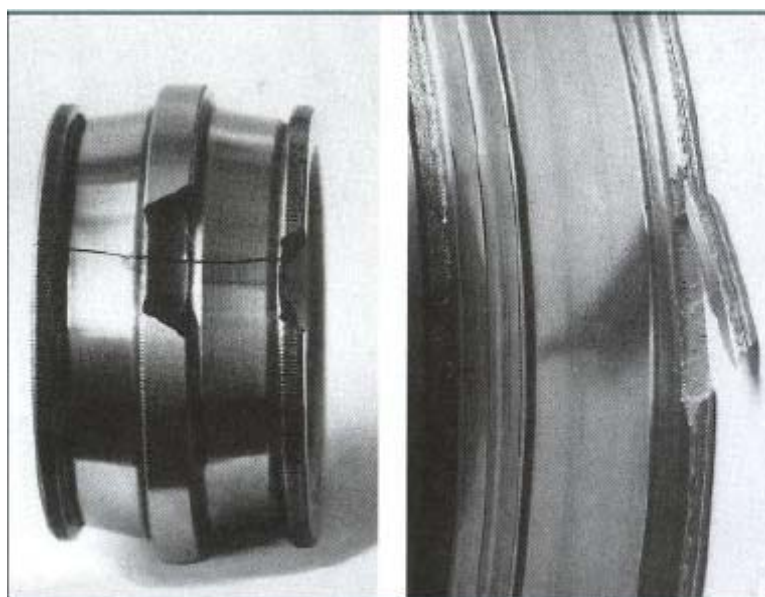
Кавитациона корозија је последица заједничног дејства корозије и кавитације. Она представља издубљивање метала образовањем и пропадањем мехурића или зазора испуњених паром и течношћу и то у близини површине метала. Уклањајући металне филмове и скидајући металне честице са површине метала, кавитационо оштећење може повећати брзину корозије и проузроковати хабање површине (слика 4.22).



Слика 4.22 Изглед кавитацине корозије

4.10 Корозија при трењу фритинг

Корозија при трењу настаје на међу површинама између материјала који су под оптерећењем (слика 4.23) [5].

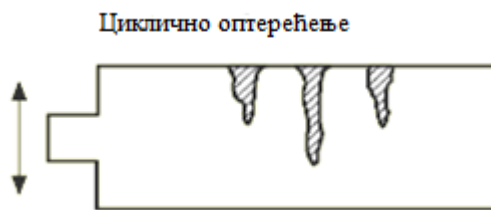


Слика 4.23 Изглед корозије при трењу

4.11 Заморна корозија

Заморна корозија настаје комбинованим дејством корозионог медијума и цикличног напона. Отпорност метала процењује се на основу односа корозионе заморне јачине у сланој води и нормалне заморне јачине. Тај однос је једнак:

- 0,2 за угљеничне челике,
- 0,5 нерђајуће челике,
- 1 за бакар.



Слика 4.24 Изглед заморне корозије

5. ЗАКЉУЧАК

О поузданости машинских конструкција и методама за њено повећање треба водити рачуна још у процесу пројектовања при избору материјала, избору најпогодније варијанте кинематичке и динамичке шеме конструкције, избору основних параметара конструкције, при прописивању начина руковања и одражавања, у процу израде, и на крају у процесу експлоатације конструкције. Предузимање мера у циљу повећања поузданости машинских конструкција су трајни задаци конструктора, технолога и корисника машинске конструкције.

Избор материјала се обично врши на основу искустава која су добијена у примени сличних конструкција и на основу особина које ти материјали поседују.

Избор материјала отпорних на хабање зависи не само од својстава материјала него и од услова тог машинског дела. Овакви материјали треба да гарантују да на површини трења неће настати недопустиви облици хабања и оштећења, а затим да обезбеде минималне вредности брзина хабања при датим условима експлоатације.

Познато је да при трењу материјала исте врсте, у условима несавршеног подмазивања, треба бирати материјале који се разликују по тврдоћи за најмање 10 јединица Бринела да би се избегло тзв. молекуларно везивање материјала. Тако се нпр. за мањи зупчаник бира тврђи материјал него што је материјал спрегнутог већег зупчаника. Материјали на бази пластичних маса се примењују у спрегама, као што су зупчасти и пужни преносници, клизне вођице и лежишта и др.

У последње време су настали многи тзв. самоподмазивани материјали који су погодни због тога што омогућавају да се избегне подмазивање. Ови материјали се најчешће користе у спрези са челиком и обезбеђују подмазивање на рачун своје структуре.

Избор материјала отпорних на корозију зависи од облика механизма развоја корозије. Основни метод за повећање отпорности материјала на корозију јесте легирање па се из тих разлика користе високолегирани корозионоотпорни (нерђајући) челици. Сем њих, значајно је коришћење и високолегираних челика отпорних на корозију при повишеним температурама.

Конструктивне методе за повећање поузданости машинске конструкције је с гледишта повећања поузданости и трајности извршити што рационалније и једноставније компоновање основних склопова конструкције. Конструктивне мере које придонесе повећању отпорности на заморно оптерећење, повећавању отпорности на трење и корозију су једне од најважнијих конструкцијских мера за повећање поузданости.

Конструктивне мере повећање поузданости путем повећање отпорности на заморно оптерећење су:

- ублажавање оштрине прелаза, углова и жлебова чиме се смањује концентracија напона услед облика машинских делова,
- премештање извора концентracије напона у зони малих називних напона и

- удаљавања материјала из мало оптерећење зона и предвиђање тзв. жлебова или отвора за растерећење.

Ако треба конструисати склопове код којих са јавља трење неопходно је одабрати такав облик и мере радних површина који ће омогућити повећану трајност на хабање и избегавање оштећења. Нпр. код клизних лежишта треба остварити такве односе конструктивних мера и облика који ће обезбедити режим нормалног трења при коме су површине потпуно раздвојене слојем уља.

Може се закључити да су главни фактори који утичу на поузданост машинских конструкција: чврстоћа, постојаност на хабање, отпорност на замор и корозију.

Главне технолошке методе повећања поузданости машинске конструкције односе се на ојачања површинског слоја, што за последицу има повећање заморне чврстоће, отпорности на хабање и отпорности на корозију.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Јовичић, С., Основи поузданости машинских конструкција, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] Ивковић, Б., Рац, А., Трибологија, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1995.
- [3] Јовановић, М., Адамовић, Д., Машински материјали, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [4] Танасијевић, С., Трибологија машинских елемената, Машински факултет у Крагујевцу, Београд, 1989.
- [5] Јовановић, М., Лазић, В., Машински материјли, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2009.
- [6] Танасијевић С., Триболошки исправно констрисање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2004.
- [7] Smith, R. W., Hirschberg, M. H., Manson, S. S., Fatigue behavior of materials under strain cycling in low and intermediate life range, NASA TN D-1574, 1963.
- [8] Forman, R. G., Kearney, V. E., Engle, R. M., Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures, J. Basic Engng., Trans. ASME, 1967
- [9] Manson, S. S., Behavior of materials under conditions of thermal stress, NACA TN-2933, 1954
- [10] Јеласка, Д., Основи механике лома, 2 дио: Ширења пукотине, 2011.
<http://www.scribd.com/doc/48505064/Osnove-mehanike-loma>, приступљено 13.10.2011.
- [11] Трибологија,
http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/RO/VII%20semestar/Eksploatacija%20i%20odrzavanje%20gasovodnih%20sistema/Predavanja/EiOGasS_12.pdf, приступљено 14.10.2011.
- [12] Алексић, М., Теорија ризика и одржавање засновано на ризику, Факултет за поморство, Котор, 2008.