Dinamičko ispitivanje metalnih materijala

Draganović, Alen

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:781182

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF METALLURGY
SISAK

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
STRUČNI STUDIJ LJEVARSTVO

Alen Draganović

DINAMIČKO ISPITIVANJE METALNIH MATERIJALA

ZAVRŠNI RAD

Sisak, siječanj 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
STRUČNI STUDIJ LJEVARSTVO

Alen Draganović

DINAMIČKO ISPITIVANJE METALNIH MATERIJALA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: Doc. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović

Članovi ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Stoja Rešković - predsjednik

Red. prof. dr. sc. Ladislav Lazić - član

Doc. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović - član

Izv. prof. dr. sc. Zoran Glavaš - zamjenski član

Sisak, siječanj 2015.

SAŽETAK

DINAMIČKO ISPITIVANJE METALNIH MATERIJALA

U današnje vrijeme sam značaj mehaničkog ispitivanja materijala u svrhu unaprjeđenja postojeće tehnologije, proizvodnog ili obradnog sustava izvanredno je velik, pogotovo na mjestima upotrebe metalnih konstrukcija odnosno strojnih dijelova. Veliki broj strojnih dijelova i metalnih konstrukcija izložen je u toku rada opterećenjima promjenjivim po veličini, a često i po smjeru. Uslijed dugotrajnog djelovanja periodično promjenljivih opterećenja može nastati postupno razaranje materijala tzv. zamor materijala.

U ovom završnom radu dan je pregled metoda dinamičkih ispitivanja metalnih materijala. Većina konstrukcija i strojnih dijelova izrađena je od metalnih materijala i izložena je dinamičkim opterećenjima tijekom eksploatacije. Svrha ovog preglednog rada je bolje razumijevanje dosadašnjih spoznaja o ponašanju materijala pri dinamičkim ispitivanjima koja će doprinijeti boljoj kvaliteti konstrukcija.

Kroz ovaj pregledni rad dan je povijesni pregled dinamičkih ispitivanja. Zatim su opisana kratkotrajna dinamička ispitivanja, gdje je objašnjeno značenje žilavosti materijala te je detaljno objašnjena metoda ispitivanja udarnog rada loma po Charpyu. Kao osnova za racionalnije dimenzioniranje metalnih dijelova izloženih dugotrajnim promjenjivim opterećenjima opisan je postupak pronalaženja trajne dinamičke čvrstoće tj najveće naprezanje koje materijal može izdržati bez loma i pri neograničenom broju promjena opterećenja, što je pregledno prikazano Wöhlerovim i Smithovim dijagramima.

Također je prikazan i pregled rezultata ispitivanja obuhvaćenih proučavanom literaturom. Na kraju preglednog rada pokazani su i noviteti kako statički vlačni pokus uz termografsko praćenje procesa razvlačenja može zamijeniti rezultat dugotrajnih dinamičkih ispitivanja.

Ključne riječi: metalni materijali, dinamička ispitivanja, udarna radnja loma, dinamička izdržljivost

ABSTRACT

DYNAMIC TESTING OF METALLIC MATERIALS

Nowadays, the importance of mechanical testing of materials for the purpose of improving of existing technologies, production or machining systems is extraordinarily high, especially in places that use metal components or machine parts. A large number of machine parts and metal components are exposed in exploitation period with loads variable in size and often by direction. Due to the long-acting periodically varying loads, gradually destruction of material so-called fatigue of materials can occur.

In this final paper, a review of methods of dynamic testing of metallic materials from which are made most components and machine parts exposed to dynamic loads during their exploitation is given. The purpose of this study is an extension of previous knowledge about behavior of materials during dynamical testing that will contribute to a better quality of structures.

Through this review study historical overview of the dynamical testing is presented. Then short-term dynamical testing is described, where is explained in detail the meaning of material toughness and impact energy with Charpy impact testing. As a basis for the rational dimensioning of metal parts exposed to long-term variable loads, the process of finding of a permanent dynamic strength is described, i.e. the greatest stress which a material can withstand without breaking and in any number of load cycles, as is clearly shown in Wöhler's and Smith's diagrams.

Review of test results included in the studied literature is also shown and at the end of review papers are shown and novelties which describe how tension test with thermographic monitoring yield process can replace the result of long-term dynamic tests.

Key words**:** metallic material, dynamical testing, impact testing, fatigue limit

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Povijesni pregled dinamičkih ispitivanja 2

2. ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA 6

3. ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA 9

3.1. Ispitivanje udarne radnje loma Charpyjevim batom 9
3.2. Svojstva i mjerljive veličine za ocjenu žilavosti 12
3.3. Utjecajni faktori na žilavost 13

4. ISPITIVANJE ZAMARANJEM 14

4.1. Wöhlerova krivulja 17
4.2. Smithov dijagram 21
4.3. Prijelom usred zamora 25
4.4. Određivanje životnog vijeka konstrukcije dinamičkim ispitivanjima 28
4.5. Faktori koji utječu na vrijednost dinamičke čvrstoće 29

5. UTJECAJ MIKROSTRUKTURE NODULARNOG LIJEVA NA DINAMIČKA ISPITIVANJA 32

6. NOVITETI U ISTRAŽIVANJIMA DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI 34

7. ZAKLJUČAK 37

8. LITERATURA 38

1. UVOD

Sistematizacija materijala prema sastavu, mikrostrukturi (građi) i načinu dobivanja dijeli materijale na: metalne, nemetalne i kompozitne. U metalne materijale, koji su predmet ovog rada, ubrajamo materijale na bazi željeza (željezni lijevovi, konstrukcijski čelici, alatni čelici) te lake i obojene metale i legure (Al-legure, Cu-lagure, Ni-legure, Ti- legure, Mg-legure itd.)

Čelični lijevovi, bijeli tvrdi lijev, sivi lijev, nodularni (žilavi) lijev, temper (kovkasti) lijev spadaju u skupinu željeznih lijevova, dok pod konstrukcijske čelike svrstavamo opće konstrukcijske čelike, čelike povišene čvrstoće, ultračvrste čelike, čelike za cementiranje, čelike za poboljšavanje, čelike za opruge, korozijski postojane čelike, vatrootporne čelike [1].

Vrlo je velika primjena navedenih materijala u funkcionalnim konstrukcijama, kao što su brodovi, automobili, vlakovi, tramvaji, vjetroagregati i sl. (slika 1). Gotovo ne možemo ni zamisliti konstrukciju čiji sastavni materijali nisu metalni materijali. A sve ove slikom prikazane konstrukcije i mnoge druge ne prikazane izložene su vremenski promjenjivim razinama opterećenja tj. naprezanja. Na primjer, brodovi su izloženi vremenski promjenjivim razinama opterećenja uslijed: valnih opterećenja, sila inercije izazvanih ubrzanjem broda te dinamičkih opterećenja prenesenih putem porivnih strojeva. Iz tog razloga ovaj rad daje pregled dinamičkih ispitivanja koja je nužno poznavati kako bi se proveo i zadovoljio uvjet čvrstoće mehaničkih proračuna.

Slika 1. Primjeri primjene metalnih materijala [2-4]

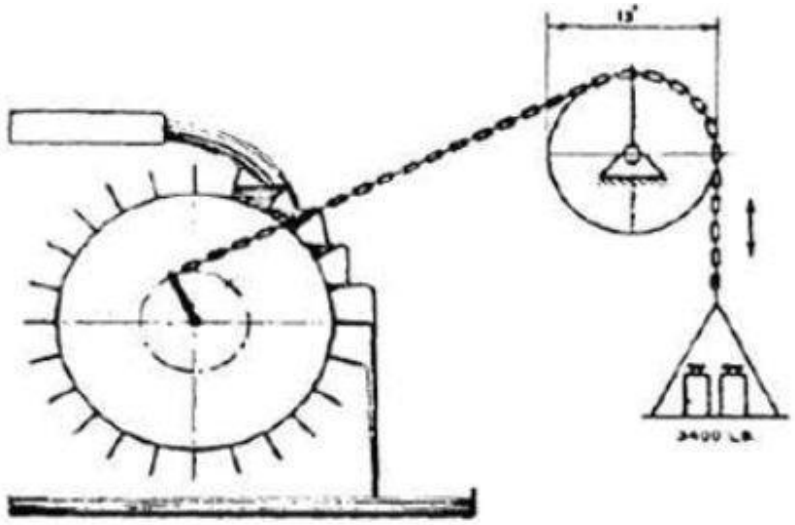
Velika primjena metala kao konstrukcijskog materijala pripisuje se prvenstveno vrlo povoljnim mehaničkim svojstvima koja se određuju putem određenih mehaničkih ispitivanja, koja su sistematizirana u ovom radu.

Tijekom eksploatacije konstrukcije dešavaju se i nepoželjni lomovi konstrukcija. Do loma konstrukcije dolazi onda kada je materijal konstrukcije izložen opterećenjima koje ne može izdržati. Veličina tih opterećenja ovisi o vrsti naprezanja te o tipu i stupnju promjenljivost naprezanja. U praksi su češći lomovi nastali uslijed promjenljivih opterećenja u odnosu na statičke lomove. Opterećenja koja izazivaju dinamički lom znatno su manja od granice razvlačenja. Lom koji nastaje promjenljivim tj dinamičkim opterećenjima posljedica je pojave koja se naziva zamor materijala [5, 6].

1.1. Povijesni pregled dinamičkih ispitivanja

Razlozi otkazivanja nosivosti materijalnog medija (osnovnog materijala ili zavara) uslijed učestalog promjenjivog opterećenja privlače pažnju konstruktora i metalurga već više od 150 godina.

Povijest zamorne čvrstoće započinje s ispitivanjima lanaca transportera koji su pukli u rudnicima Clausthala u Njemačkoj (slika 2). Stroj za ispitivanje izradio je njemački državni službenik za rudnike Wilhelm A.J. Albert, koji je 1837. godine objavio prve poznate rezultate testiranja zamorne čvrstoće i uspostavio povezanost između primijenjenih opterećenja i izdržljivosti [7].



Slika 2. Skica ispitivanja na zamor rudarskih lanaca, W. Albert [8]

Francuski fizičar Arthur Morin 1853. godine objavljuje knjigu *Otpornost materijala* u kojoj raspravlja o obaveznoj zamjeni poštanskih kočija koje su vukli konji nakon određenog broja prevaljenih kilometara. Knjiga također donosi naputke o razmacima obaveznih temeljnih nadzora i postupcima popravaka eventualno uočenih pukotina [7].

Izraz zamor na engleskom (engl. *fatigue*) prvi put spominje engleski inženjer John Braithwaite 1854. godine u svom radu *O zamoru metala i posljedičnom popuštanju* gdje opisuje lomove uslijed zamora na opremi u pivarskim pogonima, vodenim pumpama, osovinama propelera, koljenastim vratilima, željezničkim osovinama, polugama, dizalicama,

itd. Također je razmatrao dozvoljeno naprezanje za komponente povrgnute zamornom opterećenju [7]. Drugi literaturni izvor [9] govori da je izraz skovao Poncelet još 1839. godine.

Veliki napredak u razumijevanju fenomena zamora postigao je njemački inženjer August Wöhler. On je u razdoblju 1858. do 1870. godine provodio prva sustavna ispitivanja lomova uslijed promjenjivog opterećenja vezano uz probleme učestalih lomova željezničkih osovina pomoću instrumenata za mjerenje otklona koje je sam izradio. Prvi je uočio slučajeve loma konstrukcije kod kojih je naprezanje bilo niže od granice popuštanja. Njegovi zaključci o produljenju radnog vijeka s opadanjem amplitude opterećenja (Wöhlerova ili S–N krivulja) i postojanju donje vrijednosti amplitude naprezanja ispod koje lom neće nastupiti ni kod beskonačnog ponavljanja opterećenja (dinamička izdržljivost ili trajna dinamička čvrstoća) temeljne su postavke i današnjeg izučavanja zamora materijala. Wöhler je također uočio da je za zamor materijala važniji raspon naprezanja od samog maksimalnog naprezanja te da je rast pukotine u pogonu ovisan o udjelu ugljika u materijalu. Rezultate svojih ispitivanja dao je u formi tablica koje je 1874. godine njegov nasljednik Ludwig Spangenberg prebacio u oblik krivulja [7, 10]. Za konačan izgled krivulja zaslužan je američki fizičar Olin Hanson Basquin, koji ih 1910. godine prikazuje u logaritamskom mjerilu, te ih opisuje uz pomoć jednostavne formule $\sigma_a = C \cdot R^n$ koja se koristi i danas [7, 8]. Wöhler se od svojih prethodnika i većine nasljednika razlikuje u tome jer je uvijek na umu imao osnovne probleme zamora koje inženjer mora poznavati prilikom konstruiranja:

- radna (pogonska) opterećenja i naprezanja te
- izdržljivost, iz koje proizlazi dopušteno naprezanje.

Tijekom razdoblja od 1870. do 1890.-tih godina niz istraživača nastavilo je Wöhlerov klasični rad. Krajem 19. stoljeća W. Gerber i J. Goodman istraživali su utjecaj srednjeg naprezanja i predložili pojednostavljenu teoriju srednjeg naprezanja, a njemački inženjer Johann Bauschinger je otkrio različito ponašanje materijala kod dinamičkog u odnosu na statičko ispitivanje. Pokusima je pokazao da se granica popuštanja, vlačna ili tlačna, reducira nakon suprotnog opterećenja koje izaziva i plastične deformacije (Bauschingerov efekt) [11].

Krajem 19. i početkom 20. stoljeća upotrijebljen je i optički mikroskop za nastavak istraživanja mehanizma zamora materijala. Uočene su lokalne linije klizanja koje dovode do formiranja mikropukotina. Sir James Alfred Ewing i John Charles Willis Humfrey 1903. godine proučavaju linije klizanja na površini uzoraka podvrgnutih opterećenju na savijanje što je bio prvi metalurški opis zamornog procesa [7]. Ewing je pokazao da su mikroskopske pukotine podrijetlo zamornog loma i demantirao je teoriju rekristalizacije. 1920. godine Alan Arnold Griffith objavljuje rezultate teoretskih proračuna i rezultate pokusa krhkog loma stakla. On je postavio kriterij za idealno krhki lom idealno krhkog materijala i otkrio da čvrstoća stakla zavisi o veličini mikroskopske pukotine, postavivši odnos $\sigma \cdot \sqrt{a} = \text{const}$ [9]. Ova teorija temelji se na energetskoj hipotezi loma. Između ostalog Griffith je otkrio da je stvarna čvrstoća materijala znatno niža od teorijske (očekivane), što objašnjava činjenicom da materijal uvijek sadržava pukotine. Ovim pionirskim radom 1924. godine Griffith postaje utemeljiteljem mehanike loma .

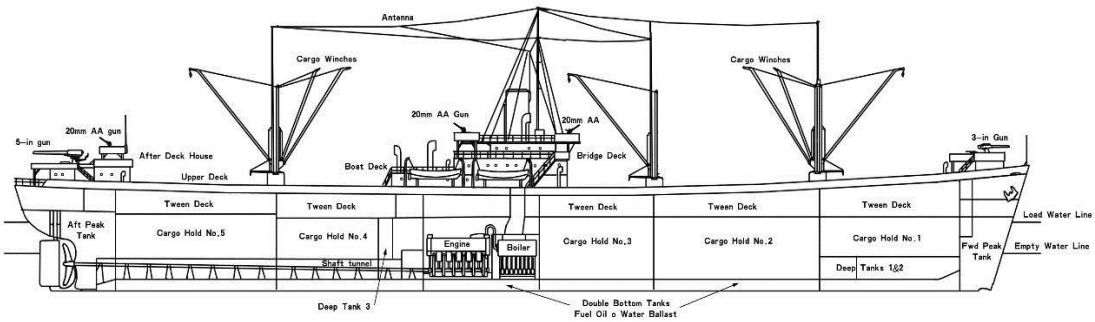
Herbert John Gough je razmatrao utjecaj površinske obrade na granicu zamora, faktor koncentracije naprezanja za V-oblik zareza na osnovu fotoelastičnih mjerenja i značajno pridonio razumijevanju mehanizma zamora materijala, te 1924. godine izdaje prvu knjigu o

zamoru metala. H. F. Moore i J. B. Kommers izdaju prvu opsežnu američku knjigu o zamoru metala 1927. godine.

1937-1938. H. Müller-Stock objavljuje zamorna ispitivanja s velikim brojem uzoraka te njihovu statističku evaluaciju, koristeći Gaussovu normalnu razdiobu koja nije zadovoljavala podatke dok nije uveo logaritamsku skalu. Zaključuje da nema jedinstvene linije oštećenja te da čak i mali broj ciklusa iznad granica zamorne čvrstoće može napraviti štetu.

U periodu od 1922. do 1956. godine na Tehničkom univerzitetu u Darmstadtu u Njemačkoj profesor metalurgije August Thum i njegovi suradnici provodili su pokuse iz područja zamorne čvrstoće i izvodili zaključke na osnovu radova drugih autora. Ustvrdili su da je za zamornu čvrstoću materijala puno važniji oblik konstrukcijskog detalja od materijala iz kojeg je element izrađen, što je razvilo svijest o potrebi pokusa na stvarnim komponentama umjesto na neoštećenim epruvetama. Thum je uveo faktor koncentracije zamornog naprezanja K_f [7].

Kada su Sjedinjene Američke države ušle u II. Svjetski rat, pojavio se problem opskrbe saveznika, koji nisu bili dovoljno pripremljeni za rat i nedostajalo im je svega, prvenstveno naoružanja. Trebalo je prvenstveno izgraditi flotu, koja će obaviti ovaj zadatak. Sveukupno je proizvedeno 2700 istih brodova, poznatih pod imenom "Liberty". No ovi brodovi nisu imali sreću! Iako su plovili u velikim konvojima i imali pratnju (uglavnom) britanskih brodova, bili su laka i masovna meta njemačkih podmornica. Oko 400 brodova proizvedenih 1941. g. samo njih 20-tak dočekalo je kraj rata. Ali nisu svi stradali od njemačkih podmornica: Od svih proizvedenih brodova približno 400 ih je doživjelo lom zbog zamora materijala, od čega 90 katastrofalan lom [12]. U deset slučajeva brodovi su se prelomili na dva dijela. Krhki lomovi zavarenih konstrukcija brodova serije "Liberty" (slika 3) pokrenuli su razmišljanja vezana uz postojeća oštećenja konstrukcije kao i utjecaj koncentracije naprezanja. Mnogi od lomova započeli su na mjestima znatne koncentracije naprezanja, tj. na rubovima grotala, kvadratnim izrezima i zavarima, dok su rješenja uključivala zaobljivanje i jačanje kutova otvora te stavljanje naglaska na svojstva materijala [7].



Slika 3. Brodovi serije "Liberty" [8]

1958. godine George Rankin Irwin iskoristio je stare ideje Griffitha i ustanovio da je faktor koncentracije naprezanja $K=S\cdot\sqrt{\pi\cdot a}$ odlučujući čimbenik za statičku čvrstoću u napuknutom stanju, te zaključio da ukoliko K dosegne neku kritičnu vrijednost nastupa trenutni lom čime je dao temelje za linearno-elastičnu mehaniku loma i previđanje vremena rasta zamorne pukotine. P. C. Paris i F. Erdogan 1963. godine pokazuju da se brzina rasta zamorne pukotine da/dN najbolje može opisati preko raspona faktora intenziteta naprezanja ΔK (Paris–Erdoganov zakon): $\frac{da}{dN} = C\cdot(\Delta K)^m$ gdje je a duljina pukotine, N broj ciklusa, a C i

m su konstante materijala. Ovaj zakon je i danas najviše upotrebljavani način proračuna rasta pukotine i procjene preostalog životnog vijeka dijela s pukotinom iako ne sadrži utjecaj srednjeg naprezanja na rast pukotine. Značajan doprinos poboljšanom računanju rasta pukotine dao je W. Elber 1968. godine otkrivši da se nakon visokog tlačnog opterećenja pukotina zatvara prije nego opterećenje dosegne nulu, te je eksperimentalno dokazao smanjenje amplitude naprezanja nakon visokog opterećenja. Zbog učestalih zrakoplovnih nesreća 1974. g. Vojno zrakoplovstvo SAD-a donijelo je nove strukturne zahtjeve za toleranciju oštećenja kod kojih se pretpostavlja postojanje pukotinskih oštećenja uslijed proizvodnje na svim kritičnim točkama strukture. Te pogreške mogu biti uzrokovane strojnom obradom tijekom proizvodnje ili pogonskim opterećenjem, te proizvođač zrakoplova mora računski i ispitivanjem dokazati da u napuknutom stanju postoji dostatna izdržljivost i statička čvrstoća (tolerancija oštećenja) [8].

Bitno obilježje razvoja pogonske čvrstoće od 1960-ih godina naovamo bilo je uvođenje servo-hidrauličnih umaralica za ispitivanje zamora koji je po prvi puta dozvolio primjenu proizvoljnih vremenskih promjena pri dovoljno visokim frekvencijama. Strogo govoreći, samo u tom trenutku bilo je moguće provjeriti niz hipoteza. Servohidraulički strojevi za ispitivanje su se u početku pokazali nepouzdanima uglavnom zbog svojih kontrolnih sustava s bušenim trakama, ali uvođenjem digitalnih računala 1970-ih godina eliminirani su ti nedostaci iako je i danas nužan program osiguranja kvalitete na visokoj razini da bi uvjerio korisnika da stroj zbilja radi onako kako bi trebao.

Standardizacija vremenski promjenljivih naprezanja za zamorna ispitivanja varijabilnih amplituda ponovo je postala značajna da bi se problemi zamora od općeg interesa mogli zajednički rješavati u mnogim laboratorijima različitih zemalja, smanjujući troškove i poboljšavajući međunarodnu suradnju. Povećao se broj konferencija i autora koji se bave problemima zamorne čvrstoće, a tako i broj knjiga i ostale literature iz ovog područja. Također se ustanovilo i dosta standarda i specifikacija za područje zamora poput Eurocode 3 za zavarene spojeve. Knjige koje sadrže podatke zamorne čvrstoće u obliku tablica pojavljuju se u većem broju i njihova je korist u uštedi vremena i troškova tražeći različite *S-N* krivulje razbacane po raznim publikacijama, pa je stoga značajna i njihova vrijednost za praktične radove iz područja zamora [8].

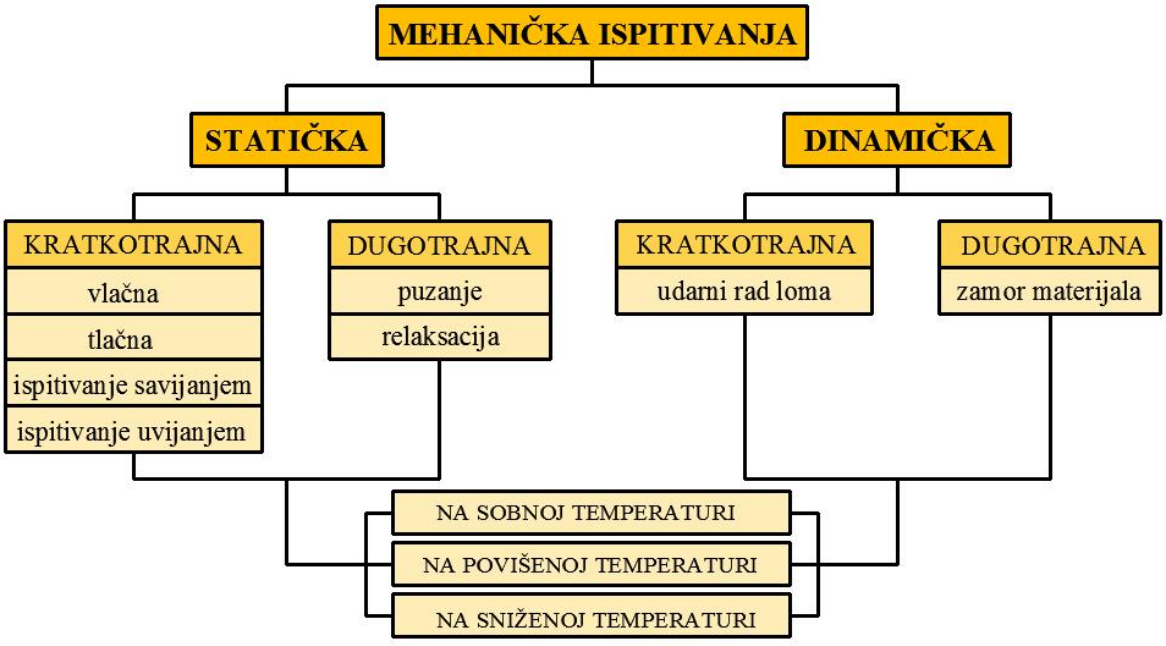
Uvijek nove nesreće uzrokovane zamorom materijala te nepostojanjem jednostavne i lako primjenjive, a s druge strane, dovoljno pouzdane projektne metode procjene zamornog vijeka tjeraju znanstvenike diljem svijeta na daljnja istraživanja u posljednjih tridesetak godina.

2. ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA

Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala bitno je zbog činjenice da se na osnovi njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. S pomoću mehaničkih svojstava može se objektivno ocijeniti kvaliteta materijala u kontroli poluproizvoda i proizvoda. Mehanička svojstva materijala osnovni su kriterij za ocjenu uporabnih karakteristika pojedinih materijala. Kao i sva ostala svojstva mehanička svojstva materijala su posljedica strukturnog stanja materijala, koja se dobivaju obradom materijala određenog sastava određenim tehnološkim postupkom. Na osnovu nekih mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala utvrđuju se tehnološki parametri u proizvodnji. Prema mehaničkim svojstvima materijale možemo podijeliti na plastične, na lomljive (tvrde, krte) te na žilave. Iako mnogi materijali sadrže na neki način sva tri svojstva, ovisno o tome koje ponašanje prevladava, svrstavamo ih u jednu od navedenih kategorija [5].

Opća sistematizacija mehaničkih ispitivanja prikazana je na slici 4 [5, 13-15]. Mehanička ispitivanja možemo podijeliti prema [15]:

a) načinu djelovanja opterećenja,
b) brzini djelovanja opterećenja,
c) temperaturi ispitivanja te
d) trajanju djelovanja opterećenja.



Slika 4. Shema mehaničkih ispitivanja materijala prema

Ispitivanje materijala se vrši ne samo radi određivanja svojstava prilikom proizvodnje ili uporabe već i u cilju poboljšavanja svojstava kako bi se dobili materijali za nove proizvode, odnosno nova područja primjene. Svakodnevni tehnološki razvoj prati uvođenje novih i usavršavanje postojećih metoda i postupaka ispitivanja.

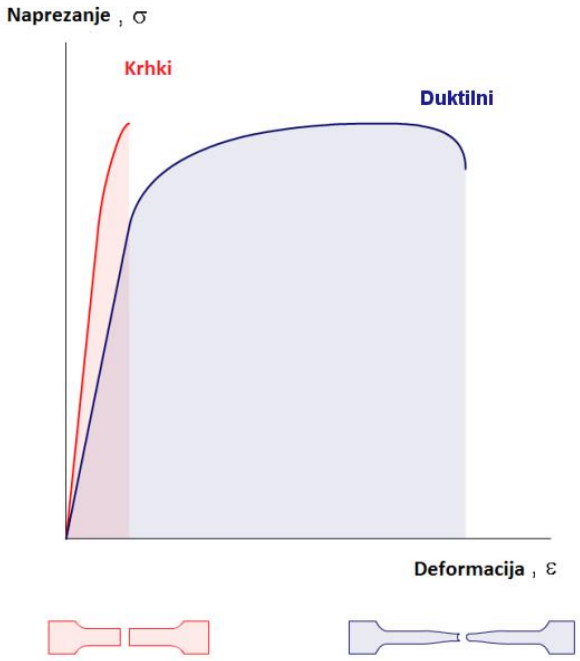
Temeljni zadaci ispitivanja materijala su sljedeći [16]:

- određivanje pogodnih veličina za karakterizaciju svojstava materijala i njihovo kvantitativno izdržavanje u obliku upotrebljivih karakteristika,

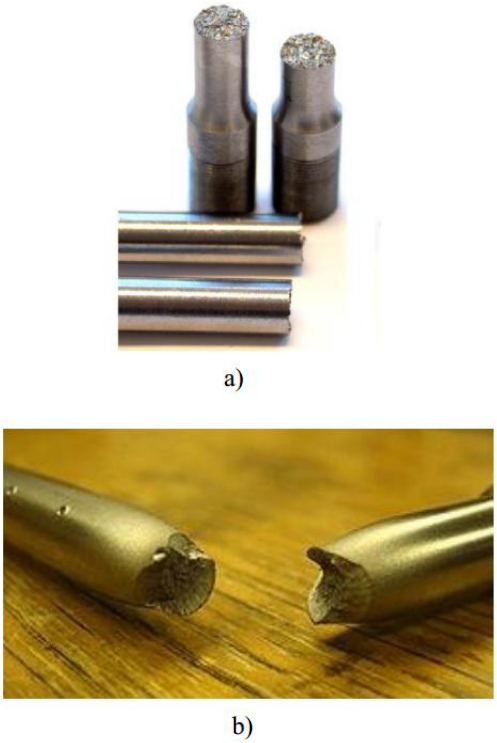
- kontrolirana i široka automatizirana kontrola promjena svojstava materijala koje nastaju kod proizvodnje, prerade i obrade materijala s otkrivanjem mogućih grešaka materijala,
- periodična kontrola stanja materijala nakon određenog vremena eksploatacije,
- istraživanje slučajeva raznih oštećenja i uzroka lomova strojnih dijelova u eksploataciji te
- razvoj novih materijala

Temeljna mehanička svojstva materijala su: čvrstoća, naprezanje tečenja, modul elastičnosti, produljenje, žilavost, tvrdoća, dinamička izdržljivost. Karakteristika materijala predstavlja mjerljivu veličinu materijala, koja se može brojčano odrediti pomoću standardiziranih metoda ispitivanja, npr. čvrstoća nekog čelika. Tehnološka svojstva materijala pokazuju njegovu sposobnost za obradu različitim postupcima. Kemijska svojstva su kemijski sastav materijala i otpornost na koroziju. Eksploatacijska svojstva pokazuju otpornost materijala pri njegovoj uporabi.

Za većinu mehanički opterećenih konstrukcija vrlo je važno osigurati kombinaciju dovoljne čvrstoće i žilavosti. Naime, praksa pokazuje da veliki broj lomova nastaje zbog nemogućnosti razgradnje naprezanja putem plastične deformacije. Dakle, pojam žilavosti je usko povezan s pojmom trajne (plastične) deformacije i pojavom loma. Površina ispod $\sigma-\varepsilon$ krivulje pokazuje koliko je energije potrebno za deformaciju i lom materijala u uvjetima statičkog vlačnog opterećenja (slika 5). Prema prisutnosti odnosno odsutnosti plastične deformacije u neposrednoj blizini loma razlikuju se krhki i duktilni lom (slika 6), odnosno materijali se dijele na krhke i duktilne (rastezljive).



Slika 5. Shematski prikaz rezultata statičkog vlačnog pokusa u $\sigma-\varepsilon$ dijagramu za krhki i duktilni (rastezljivi) materijal [16]



Slika 6. Prikaz (a) krhkog i (b) duktilnog loma [16]

Zbog potrebe za usporedbom izmjerenih svojstava i performansi materijala korisnici i proizvođači materijala razvili su normirane metode ispitivanja, kao što su primjerice one Američkog društva za ispitivanje materijala (ASTM – *American Society for Testing and Materials*) i međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO – *International Organization for Standardization*).

Statistička analiza lomova strojnih dijelova pokazuje da preko 80% svih lomova nastaje kao posljedica zamora materijala. Pokretni dijelovi strojeva redovito su izloženi promjenjivim naprezanjima bez obzira na karakter vanjskog opterećenja. Stoga predmet detaljnijeg opisa ovog završnog rada su dinamička ispitivanja. Time će u daljnjim poglavljima detaljnije biti objašnjeno ispitivanje udarne radnje loma prema Charpy-ju i ispitivanje zamaranjem.

3. ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA

Žilavost materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti materijala apsorbiranju mehaničke energije, uzrokovane vanjskim, uglavnom udarnim opterećenjem, na način da se materijal plastično deformira prije loma. Količina apsorbirane energije koja se utroši na plastičnu deformaciju i lom predstavlja mjeru žilavosti materijala. Udarni rad loma određuje otpornost materijala krhkom lomu i mjera je za žilavost materijala [17, 18]. Drugim riječima, žilavost se može definirati kao sposobnost materijala da se plastičnom deformacijom razgradi naprezanje i na taj način povisi otpornost materijala prema lomu [19]. Pored čvrstoće i žilavost govori o uporabnim svojstvima materijala.

Izmijerena karakteristika žilavosti ne primjenjuje se direktno u proračunima konstrukcija, već samo kao usporedbene veličine. Utvrđivanje otpornosti na nastajanje loma provodi se na dva načina [18, 19]:

- Ispitivanjem u uvjetima udarnog opterećenja
- Određivanjem veličina iz mehanike loma

Pri tome se ispitivanja provode na standardiziranim epruvetama koje mogu biti s ili bez zareza. Ispitivanja žilavosti u uvjetima udarnog opterećenja na epruvetama sa zarezom znatno su više zastupljena u praksi. Kod krhkih materijala (npr. sivi lijev) ili materijala koji su skloni trenutnom lomu, žilavost se utvrđuje na epruvetama bez zareza.

Ispitivanja žilavosti željeznih ljevova najčešće se provode u uvjetima udarnog opterećenja. Pri tome se određuje udarna radnja loma i prijelazna temperatura ϑ_p ukoliko se materijal primjenjuje pri niskim temperaturama. Određivanje udarne radnje loma provodi se najčešće Charpyjevim batom.

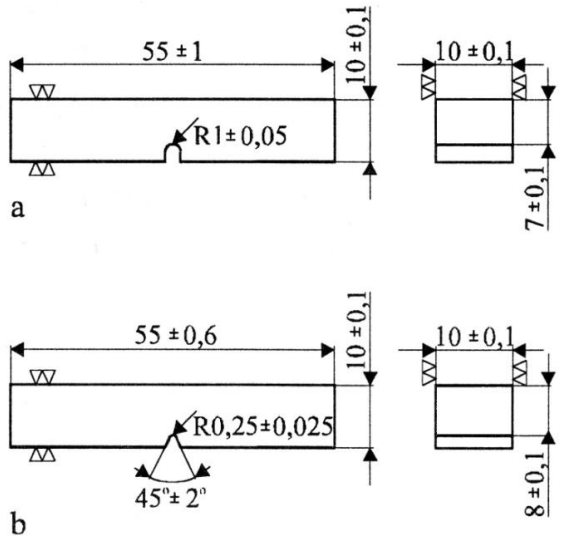
Pored ispitivanja po Charpyju koriste se u nekim državama i druge metode, a to su [16]:

- Pelindijeva metoda
- Metoda po Izodu
- Bruggerova metoda

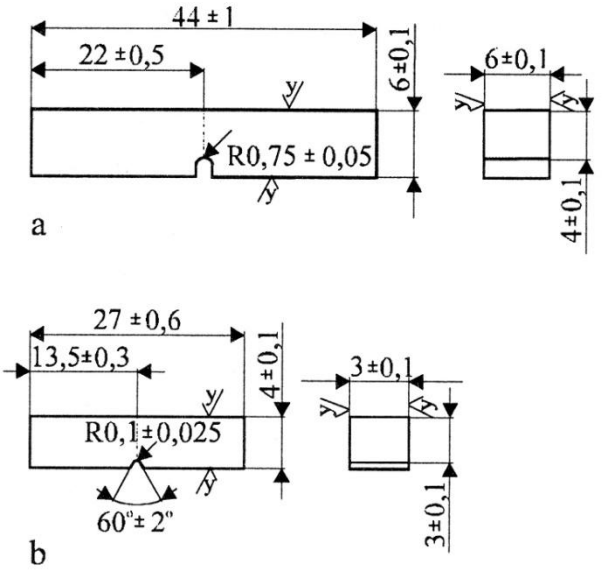
3.1. Ispitivanje udarne radnje loma Charpyjevim batom

Ispitivanje udarne radnje loma Charpyjevim batom provodi se prema HRN EN 10045 - 1 („Metalni materijali – Ispitivanje žilavosti prema Charpyju – Prvi dio: Metoda ispitivanja“) [20]. Dimenzije i oblik epruveta za ispitivanja udarne radnje loma definirane su navedenim standardom. Na slici 7a i b prikazana su dva oblika i dimenzije epruveta koje se najčešće primjenjuju za ispitivanje udarne radnje loma. Epruveta sa „U“ utorom dubine 3mm naziva se DVM epruvetom (slika 7a), a epruveta sa „V“ utorom dubine 2mm (slika 7b) poznata je pod imenom ISO-V epruveta [5, 21]. U slučaju nedovoljne raspoloživosti materijala primjenjuju se epruvete manjih dimenzija, koje su prikazane na slici 8.

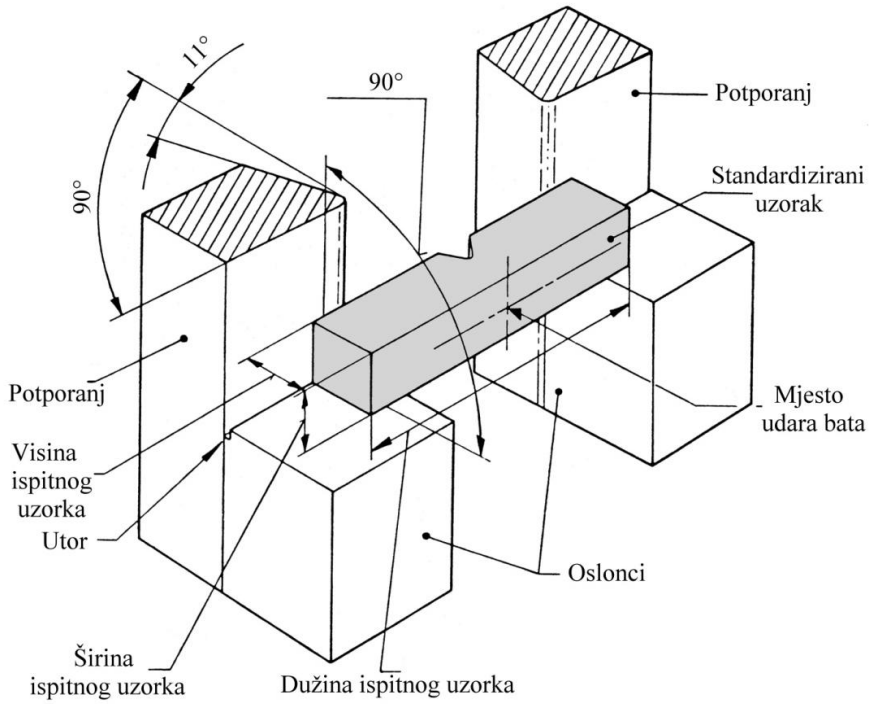
Postupak ispitivanja provodi se na sljedeći način. Standardizirana epruveta postavlja se na dva oslonca (slika 9) na uređaju. Oslonci su međusobno razmaknuti 40mm.



Slika 7. Oblik i dimenzije epruveta za ispitivanje udarne radnje loma: a) epruveta sa „U“ utorom (DVM epruveta), b) epruveta sa „V“ utorom (ISO-V epruveta) [20, 21]

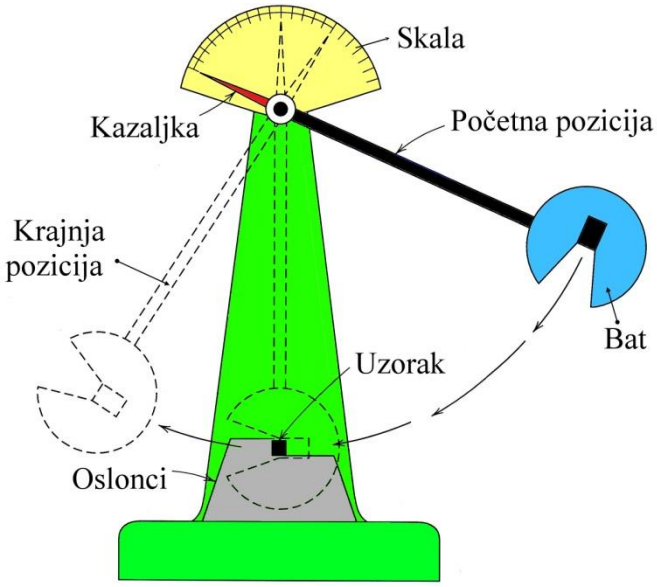


Slika 8. Posebne epruvete za ispitivanje udarne radnje loma: a) DVMK epruveta, b) najmanja epruveta [20, 21]

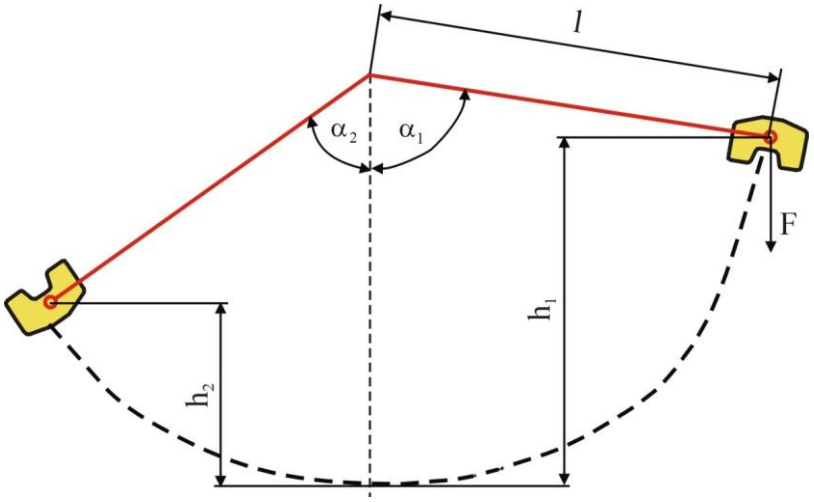


Slika 9. Shematski prikaz položaja epruvete na osloncima [20]

Charpyjev bat postavlja se u početni položaj (slika 10), a potom oslobađa tako da brid bata uslijed slobodnog pada udara u epruvetu pri čemu je epruveta opterećena na savijanje. Početna visina bata označena je s h_1 (slika 11). Brid bata uvijek treba udariti u sredinu duljine epruvete nasuprot utoru (slika 7).



Slika 10. Shematski prikaz rada Charpyjevog bata [22]



Slika 11. Određivanje udarne radnje loma Charpyjevim batom [23]

Zbog udarca, epruveta puca u korijenu utora ili je oštrica bata provlači između oslonaca (savijenu, ali ne slomljenu). Visina koju bat doseže nakon loma ili provlačenja epruvete između oslonaca označena je s h_2 (slika 11). Energija potrebna da brid Charpyjeva bata prelomi epruvetu ili je provuče između oslonaca jednaka je udarnoj radnji loma. Udarna radnja izračunava se iz sljedećeg izraza (prema slici 11) [5, 20, 21]:

$$KV(KU) = F \cdot (h_1 - h_2) \ , \qquad \text{J} \, , \tag{1}$$

odnosno pošto je $h_1 = l - l\cos\alpha_1$, a $h_2 = l - l\cos\alpha_2$:

$$KV(KU) = F \cdot l \cdot (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1) \ , \qquad \text{J} \, , \tag{2}$$

gdje je:

KV (KU) – udarna radnja loma, J
F – sila (opterećenje), N
h_1 – početna visina bata, m
h_2 – visina koju je bat dosegao nakon loma ili provlačenja epruvete, m
l – razmak težišta bata od osi okretanja, m
α_1 – početni kut, °
α_2 – krajnji kut, °.

Udarna radnja loma izražava se u J uz navođenje uvjeta ispitivanja (maksimalna energija loma bata, vrsta epruvete, temperatura ispitivanja). Vrijednosti udarne radnje loma dobivene ispitivanjem epruveta s različitim utorima ne preračunavaju se nego samo kvalitativno uspoređuju.

Postupak određivanja udarne radnje loma olakšan je postojanjem kazaljke i baždarene skale na Charpyjevom batu (slika 10). Prilikom kretanja bat povlači sa sobom kazaljku. Kada bat slomi ispitnu epruvetu ili je provuče između oslonaca i dođe do krajnje lijeve točke, odnosno dosegne visinu h_2 (koja je određena žilavošću ispitnog uzorka) kazaljka se zaustavlja na baždarenoj skali i može se jednostavno očitati udarna radnja loma.

3.2. Svojstva i mjerljive veličine za ocjenu žilavosti

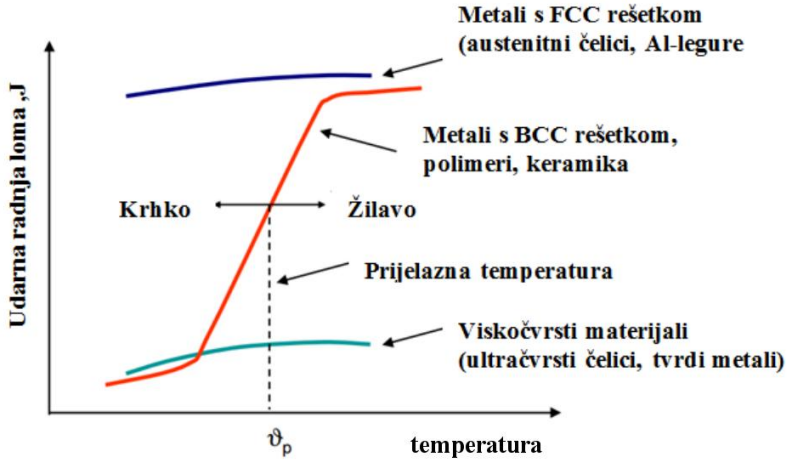
Ispitivanjima pri uvjetima udarnog opterećenja na epruvetama sa zarezom dobivaju se slijedeća svojstva i mjerljive veličine za ocjenu žilavosti [18, 19]:

- udarna radnja loma - *KU* ili *KV*,
- prijelazna temperatura - ϑ_p,
- granična temperatura - $\vartheta_{50\%}$ ili $\vartheta_{85\%}$,
- temperatura duktilnosti – NDT temperatura.

Udarna radnja loma određuje se ispitivanjem na standardiziranim epruvetama kvadratnog presjeka s utorom (sa zarezom) u obliku slova „U“ ili „V“ Charpyjevim batom (slika 7 i 8). Ako se udarna radnja loma utvrđuje na epruveti s utorom u obliku slova „U“ označava se s *KU*, odnosno *KV* ako se određuje na epruveti s utorom u obliku slova „V“. Primjenom utora na epruveti otežava se plastična deformacija materijala, tj. inducira se koncentracija naprezanja i postiže se višeosno stanje naprezanja u korijenu utora. Mjera žilavosti je energija utrošena na lom epruvete. Vrijednost udarne radnje loma pokazuje da li će se materijal ponašati žilavo ili krhko u uvjetima udarnog opterećenja. Ispitivanje se obično provodi na sobnoj temperaturi ili pri sniženim temperaturama.

Prijelazna temperatura ϑ_p u bliskoj je korelaciji s udarnom radnjom loma jer udarna radnja loma za većinu metalnih materijala ovisi o temperaturi. Prijelazna temperatura predstavlja temperaturu na prijelazu od visokih prema niskim vrijednostima udarne radnje loma. Iznad te temperature materijal je žilav, a ispod krhak što je prikazano na slici 12 [13, 15].

Granična temperatura $\vartheta_{50\%}$ ili $\vartheta_{85\%}$ određuje se ispitivanjem na epruveti s utorom na uređaju s padajućim utegom (*eng. Drop Weight Tear Test - DWTT*). Mjera žilavosti su granične temperature $\vartheta_{50\%}$ ili $\vartheta_{85\%}$ pri kojima zagasiti (nekristalni) dio prijelomne površine iznosi 50%, odnosno 80% ukupne površine.



Slika 12. Ovisnost žilavosti o temperaturi [16]

Temperatura duktilnosti (NDT temperatura) određuje se ispitivanjem epruvete s navarom u kojem je urezan utor. Udarno opterećenje ostvaruje se padajućim utegom (*eng. Drop Weight Test*). Najviša temperatura (*eng. NDT - Nil Ductility Transition*) pri kojoj pukotina prodire kroz čitav presjek epruvete predstavlja mjeru žilavosti. Ispod NDT temperature može se očekivati krhko ponašanje materijala, iako je iznos nominalnog naprezanja niži od granice tečenja.

3.3. Utjecajni faktori na žilavost

Na žilavost materijala utječe niz faktora kao što su [15]:

- temperatura ispitivanja,
- mikrostruktura (obično veličina zrna),
- oblik i dimenzije zareza,
- dimenzije epruvete te
- brzina udara.

Temperatura ispitivanja ima najveći utjecaj na žilavost, odnosno na udarnu radnju loma. Žilavost materijala općenito opada sa snižavanjem temperature ispitivanja. Razlog tome je što se snižavanjem temperature snižava i plastičnost, odnosno deformabilnost materijala.

Mirkrostruktura ima također veliki utjecaj na žilavost materijala. Naročito povoljno utječe na žilavost smanjivanjem veličine zrna. Tako smanjivanje veličine zrna za jedan stupanj po ASTM – skali snižava prijelaznu temperaturu za 15°C.

Oblik i dimenzije zareza također znatno utječu na žilavost. Zarezi izazivaju koncentraciju približno trodimenzijskih naprezanja, normalna naprezanja djeluju pri tome na zatezanje dok tangencijalna naprezanja izazivaju klizanje.

Dimenzije epruvete različito utječu na žilavost materijala. Najmanje utječe dužina epruvete, dok širina i debljina utječu slično na smanjivanje žilavosti.

Brzina udara Charpyjevog bata nema znatnijeg utjecaja na žilavost materijala ako je u granicama od 3 do 7 m/s, dok znatno veće brzine 20-50 m/s smanjuju žilavost zbog smanjenog udjela plastične deformacije.

4. ISPITIVANJE ZAMARANJEM

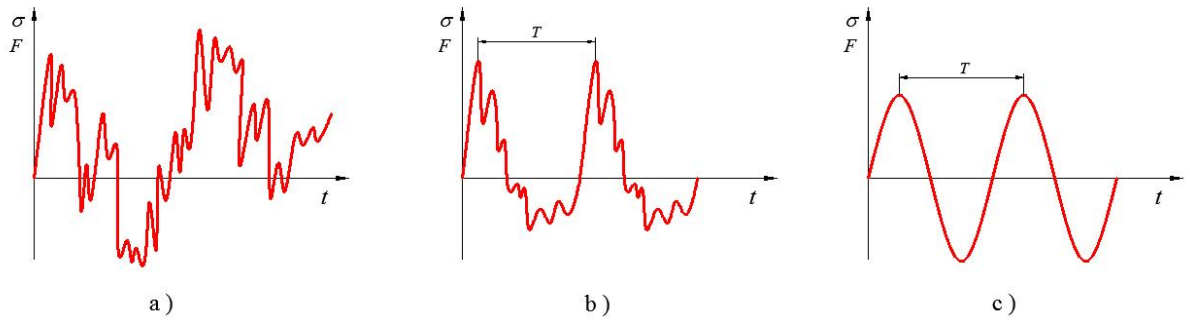
Veliki broj dijelova i konstrukcija izložen je u toku rada opterećenjima promjenljivim po veličini, a često i po smjeru. Uslijed dugotrajnog djelovanja periodično promjenljivih opterećenja može nastati postupno razaranje materijala. Ta pojava naziva se zamaranje (*engl. fatigue*), a tako izazvan prijelom – prijelom uslijed zamora (*engl. fatigue fracture*).

Kao osnovu za racionalnije dimenzioniranje dijelova izloženih promjenljivim opterećenjima potrebno je pronaći dinamičku čvrstoću, tj. najveće naprezanje koje materijal može izdržati bez loma i pri neograničenom broju promjena opterećenja. Ispitivanje zamaranjem pruža mogućnost za njegovo određivanje.

Čvrstoća pri promjenljivom opterećenju ovisi o čitavom nizu utjecajnih veličina: kvaliteta i stanje površine, eventualna korozijska oštećenja, frekvencija opterećenja, temperature, oblika i dimenzija itd. Utjecaj oblika je toliko veliki da se ispitivanja moraju izvesti na samim konstrukcijama pod uvjetom koji su što je moguće više slični uvjetima ekspolatacije.

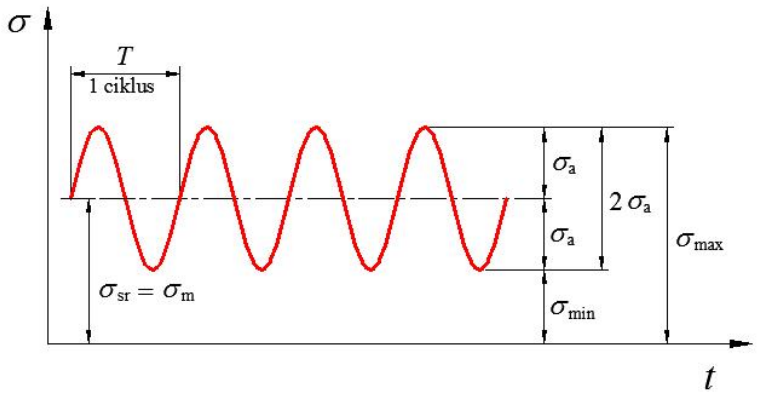
Mehaničko svojstvo koje pokazuje otpornost materijala dinamičkom naprezanju a s time i pojavi zamora materijala naziva se dinamička izdržljivost [5]. Dinamička izdržljivost (*engl. fatigue limit*) je najveće dinamičko (promjenjivo) naprezanje koje ispitna epruveta izdrži bez pojave loma nakon praktički beskonačno mnogo ciklusa. Svrha ispitivanja dinamičke izdržljivosti je utvrđivanje ponašanja strojnog dijela ili konstrukcije u uvjetima dugotrajnog djelovanja dinamičkog (promjenjivog) naprezanja [5].

Dinamička opterećenja su ona opterećenja koja se tijekom vremena mijenjaju po veličini i/ili po smjeru. Promjene veličine opterećenja mogu biti stohastičke, periodičke, harmonijske (slika 13). Postoje također udarna dinamička opterećenja koja se mijenjaju skokovito u vrlo kratkom vremenskom intervalu, tako da imaju karakter kratkotrajnog impulsa.



Slika 13. Vrste dinamičkih opterećenja/naprezanja [24]
a) stohastičko, b) periodičko (*T*-period) i c) harmonijsko

Pri proračunu strojnih dijelova periodička dinamička opterećenja najčešće se aproksimiraju s harmonijskim dinamičkim opterećenjem, a dodatni nepoželjni utjecaji zbog udarnih opterećenja uzimaju se u obzir faktorom sigurnosti [24]. Harmonijsko opterećenje s osnovnim pojmovima tog opterećenja prikazano je na slici 14.



Slika 14. Prikaz karmonijskog naprezanja [14]

gdje je :

σ_{max} ili τ_{max} - maksimalno (gornje) naprezanje ciklusa N/mm^2

σ_{min} ili τ_{min} - minimalno (donje) naprezanje ciklusa N/mm^2

$\sigma_{sr} = \sigma_m$ ili $\tau_{sr} = \tau_m$ - srednje naprezanje ciklusa N/mm^2

σ_a ili τ_a - amplituda ciklusa naprezanja N/mm^2

$2\sigma_a$ ili $2\tau_a$ - raspon naprezanja N/mm^2

r - koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja

N - broj ciklusa

Pri harmonijskom naprezanju veličina naprezanja se mijenja u intervalu između najmanje i najveće vrijednosti, pri čemu je srednje naprezanje određeno izrazom

$$\sigma_{sr} = \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \tag{3}$$

a amplituda ciklusa naprezanja predstavlja apsolutnu vrijednost polovine algebarske razlike gornjeg i donjeg opterećenja

$$\sigma_a = \frac{|\sigma_{max} - \sigma_{min}|}{2}. \tag{4}$$

Najmanji vremenski dio funkcije opterećenja, koji se periodično ponavlja, naziva se ciklus. Broj ciklusa u jedinici vremena predstavlja frekvenciju *f*.

Karakter dinamičkih opterećenja uvijek se određuje s obzirom na koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja *r*, koji je definiran kao omjer minimalnog i maksimalnog naprezanja ciklusa te je određen izrazom

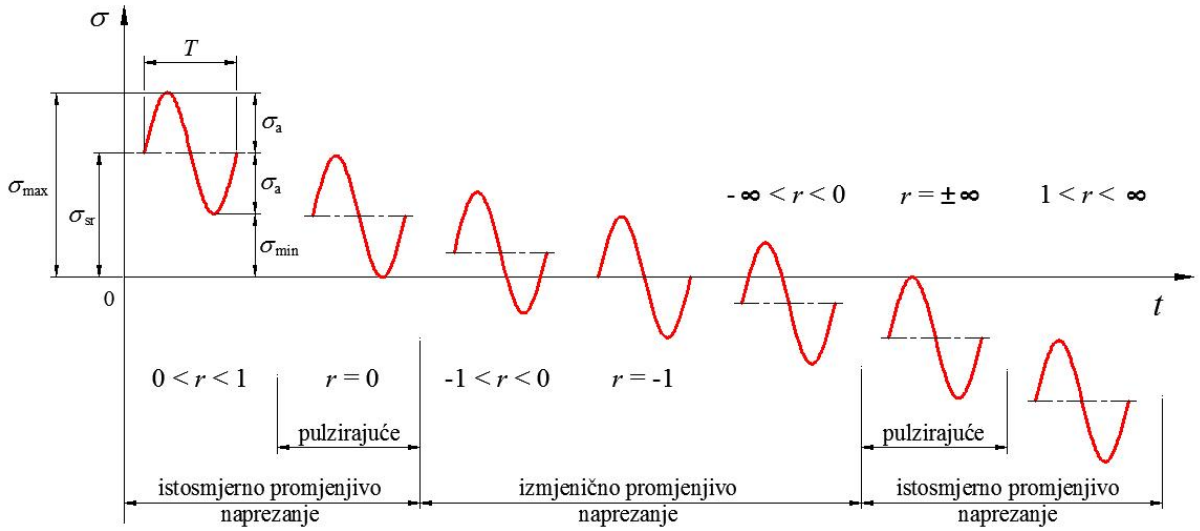
$$r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad \text{ili} \quad r = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}}. \tag{5}$$

Dopunska oznaka ciklusa *A* predstavljena je sljedećim jednadžbama

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_{sr}} \quad \text{ili} \quad A = \frac{\tau_a}{\tau_{sr}}, \tag{6}$$

$$A = \frac{1-r}{1+r}. \tag{7}$$

S obzirom na veličinu koeficijenta asimetrije ciklusa r naprezanja možemo razlikovati sljedeća izmjenjiva naprezanja [13, 15, 24, 25], prikazana slikom 15: istosmjerno vlačno ili tlačno promjenjiva te izmjenično promjenjiva.



Slika 15. Osnovni tipovi promjenjivih naprezanja

Dinamička ispitivanja provode se na uređajima koji omogućuju promjenjivo (titrajno) opterećivanje epruvete ili strojnih dijelova a nazivaju se pulzatori ili umaralice. Umaralice rade hidraulički, servohidraulički ili na principu elektromagnetske rezonancije. S obzirom na frekvenciju promjenjivog (cikličkog, titrajnog) opterećenje možemo razlikovati [26]:

- $f < 5$ Hz → niskofrekventno ispitivanje
- 5 Hz < f <30 Hz → srednjefrekventno ispitivanje
- $f > 30$ Hz → visokofrekventno ispitivanje

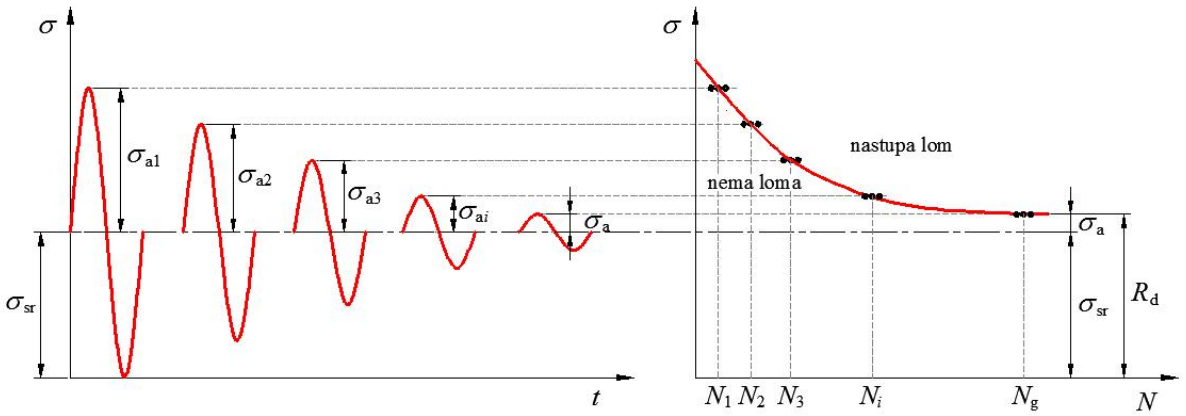
Ispitivanje zamaranjem u cilju određivanja dinamičke čvrstoće može se izvesti vlačno, tlačno, savijanjem ili uvijanjem, ili kombiniranjem ovih naprezanja. Oblik i dimenzije epruveta za normalna ispitivanja propisuju se odgovarajućim standardima u ovisnosti od svrhe i načina ispitivanja zamaranjem. Za posebna ispitivanja i zavarene spojeve koriste se specijalni oblici epruveta koji trebaju biti slični obliku odgovarajućeg konstrukcijskog dijela, ili se ispituju sami konstrukcijski dijelovi.

Postupak obrade epruveta ne smije promijeniti strukturu niti osobine materijala. Naročitu pažnju treba posvetiti kvaliteti hrapavosti površina epruvete. One moraju biti brušene, eventualno i polirane i pogodnim sredstvom zaštićene od korozije. Broj epruveta za jedno ispitivanje može biti vrlo različito, u ovisnosti o broju podataka koji se traže. Učvršćivanje epruvete u čeljusti stroja za ispitivanje zamaranjem treba se pažljivo izvesti, tako da epruvete u toku ispitivanja ne bi bila izložena dopunskim opterećenjima ili vibracijama. Način opterećivanja zavisi od vrste naprezanja i mora biti jednak za sve epruvete u toku jednog ispitivanja. Frekvencija treba biti tako odabrana kako bi se izbjeglo preveliko zagrijavanje epruvete u toku ispitivanja. Ako se zagrijavanje ne može izbjeći, epruvetu treba u toku ispitivanja hladiti pogodnim antikorozivnim sredstvima. Pri posebnim ispitivanjima epruvete ili konstrukcijskog dijela, način opterećenja i frekvencija trebaju što više odgovarati radnim uvjetima.

4.1. Wöhlerova krivulja

Za određivanje trajne dinamičke čvrstoće (dinamičke izdržljivosti, *engl fatigue limit*) prema postupku predloženim od Wöhlera, potrebno je 6 do 10 potpuno jednakih epruveta. Epruvete se jedna za drugom izlažu različitim promjenjivim opterećenjima do pojave vidljive pukotine ili do potpunog loma. Srednje naprezanje σ_{sr}, a u nekim slučajevima i donje naprezanje σ_{min}, za sve epruvete je konstantno, a amplituda naprezanja σ_a smanjuje se stepenasto od jedne epruvete do druge. Za svaku epruvetu zapisuje se broj ciklusa *N* pri kojem je nastala pukotina na epruveti ili je došlo do loma epruvete. Smanjenje amplitude naprezanja vrši se sve do vrijednosti pri kojoj se epruveta ne lomi ni pošto je izdržala vrlo veliki – granični broj ciklusa N_g, kao što je prikazano na slici 16. Pod graničnim brojem ciklusa N_g podrazumijeva se najmanji broj ciklusa nakon kojeg ne nastaje lom ni pri neograničenom broju ciklusa. Pošto se vrijednost graničnog broja ciklusa N_g unaprijed ne zna, pri ispitivanju zamaranjem primjenjuje se uvijek neki veći broj ciklusa koji s dovoljnom sigurnošću prelazi iznad vrijednosti graničnog broja ciklusa.

Rezultati ispitivanja unose se u koordinatni sustav na kojem su kao ordinate nanesene amplitude naprezanja uz naznačavanje srednjeg naprezanja, a kao apscise odgovarajući brojevi ciklusa *N* do loma ili nastanka pukotine na epruveti. Točke nanesene na osnovu rezultata ispitivanja spajaju se kontinuiranom krivuljom koja u prvom dijelu stalno opada, a zatim postupno prelazi u horizontalni pravac. Ovako dobiven dijagram naziva se dijagram zamaranja ili Wöhlerov dijagram. Naprezanje koje odgovara horizontalnom dijelu predstavlja trajnu dinamičku čvrstoću R_d tj dinamičku izdržljivost materijala. Trajnost materijala ovisi o broju titraja opterećenja [27].



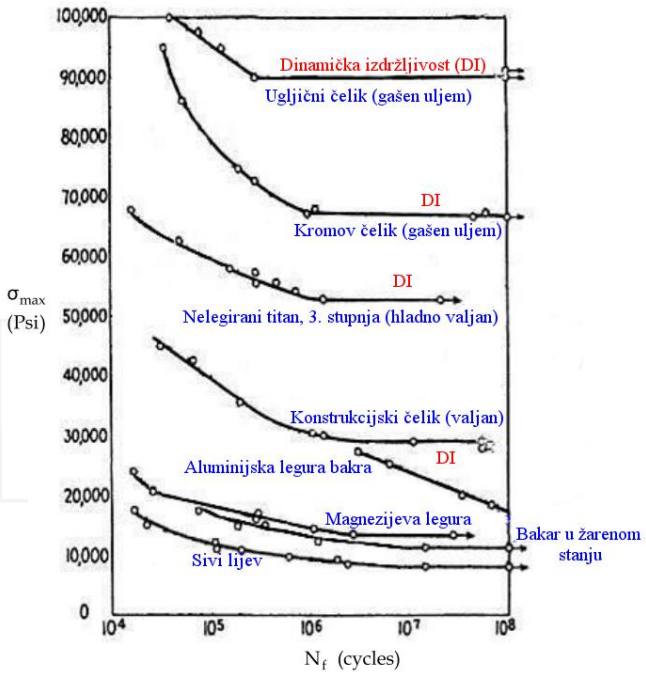
Slika 16. Postupak nastanka Wöhlerovog dijagrama pri $\sigma_{sr} = \text{konst.}$

Prema tome, trajna dinamička čvrstoća (R_d tj. σ_d odnosno τ_d) može se iskazati kao naprezanje sastavljeno od zbroja srednjeg naprezanja σ_{sr} i najveće amplitude naprezanja σ_a koje epruveta može izdržati bez loma i pri neograničenom broju ciklusa ($R_d = \sigma_{sr} + \sigma_a$).

Wöhlerove (σ - *N*) krivulje predstavljaju najuobičajeniji način opisivanja otpornosti konstrukcijskih detalja na zamorno oštećenje. Wöhlerove krivulje daju odnos između primijenjenog raspona naprezanja σ (*eng. Stress-S*) i broja ciklusa N do popuštanja. Određuju se u laboratorijima, provođenjem pokusa zamora uz izvrgavanje uzorka ciklusima opterećenja konstantne amplitude do njihovog popuštanja. Pokusi se provode na identičnim

uzorcima pri različitim razinama raspona naprezanja $\Delta\sigma$ koji predstavljaju najvažniji parametar opterećenja. U pokusima zamora mogu se upotrijebiti različite vrste opterećenja, ali se najčešće provode pri konstantnim omjerima naprezanja između r=0-0,l [26]. Za svaki od nivoa naprezanja bilježi se broj ciklusa naprezanja N, nakon kojeg je došlo do loma epruvete.

Kod velike većine metalnih materijala, Wöhlerova krivulja se asimptotski približava vrijednosti dinamičke izdržljivosti, što se može vidjeti na slici 17. Dok kod nekih obojenih metala $\sigma - N$ krivulje nemaju horizontalnu asimptotu, kao što je to slučaj kod aluminija. (slika 17).



Slika 17. Wöhlerove krivulje za više vrsta metalnih materijala (10 000 Psi = 68,95 MPa) [28]

Uobičajene vrijednosti broja ciklusa za pojedine materijale prikazane su u tablici 1:

Tablica 1. Vrijednosti graničnog broja ciklusa pojedinih materijala [26]

MATERIJAL	N_g **, ciklusa**
Čelik	10^6.....10^7
Bakar i bakrene legure	$5 \cdot 10^7$
Laki metali i njihove legure	$10 \cdot 10^7 = 10^8$

Rezultati ispitivanja unose se u σ - N dijagram a dobivena krivulja odgovara Wöhlerovoj krivulji. Wöhlerova krivulja se asimptotski približava pravcu $\sigma = \sigma_d = R_d$, pri čemu se $\sigma_d = R_d$ naziva trajnom dinamičkom čvrstoćom (*engl. fatigue limit*) materijala izloženog ciklički promjenjivim naprezanjima s koeficijentom asimetrije ciklusa r. Očito, trajna dinamička čvrstoća materijala je ono maksimalno naprezanje ciklusa asimetrije r pri kojem epruveta doživi gotovo beskonačno mnogo ciklusa, tj. neograničenu trajnost. Jednadžba Wöhlerove krivulje može se napisati izrazom (slika 18a) [24]:

$$\sigma_{r,N}^{m} \cdot N = \sigma_{\mathrm{d}}^{m} \cdot N_{\mathrm{g}} = \text{konst.} \tag{8}$$

gdje je:

$\sigma_{r,N}$ – vremenska dinamička čvrstoća za trajnost u ciklusima N

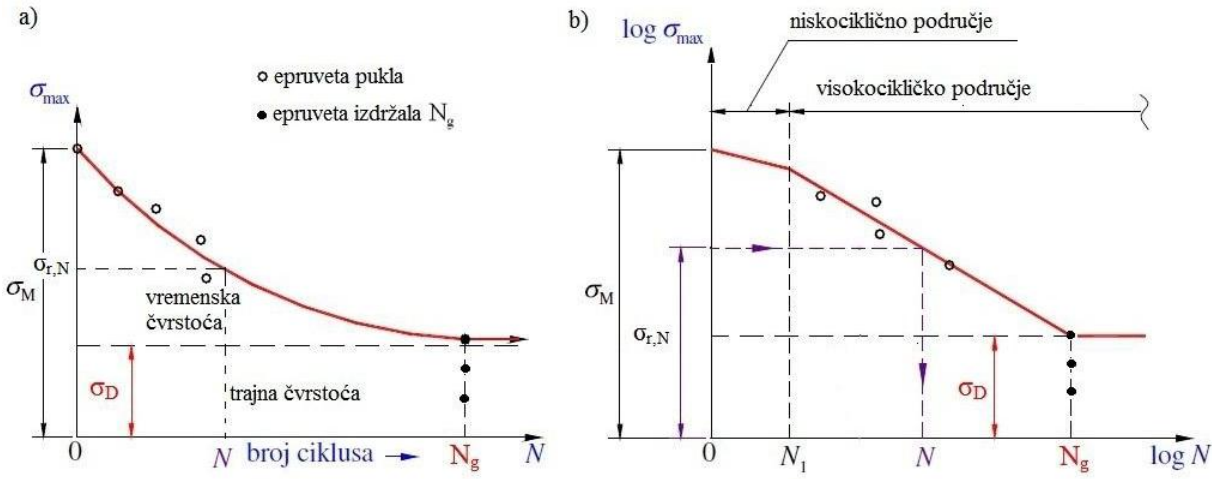
N - broj ciklusa do loma pri maksimalnom naprezanju ciklusa $\sigma_{r,N}$

N_{g} - broj ciklusa na prijelazu između vremenske i trajne čvrstoće.

m - eksponent Wöhlerove krivulje tj. nagib krivulje u logaritamskim koordinatama
m = 3÷13 ovisno o materijalu, obliku strojnog dijela ili vrsti spoja, te vrsti naprezanja

$\sigma_{\mathrm{M}} = R_{\mathrm{m}}$ - vlačna čvrstoća

Wöhlerova krivulja se obično crta u logaritamskim koordinatama, gdje postaje karakteristični pravac s "koljenom" u točki N_{g}, slika 18b [24].



Slika 18. Wöhlerovi dijagrami [29]: a) linearno mjerilo, b) logaritamsko mjerilo

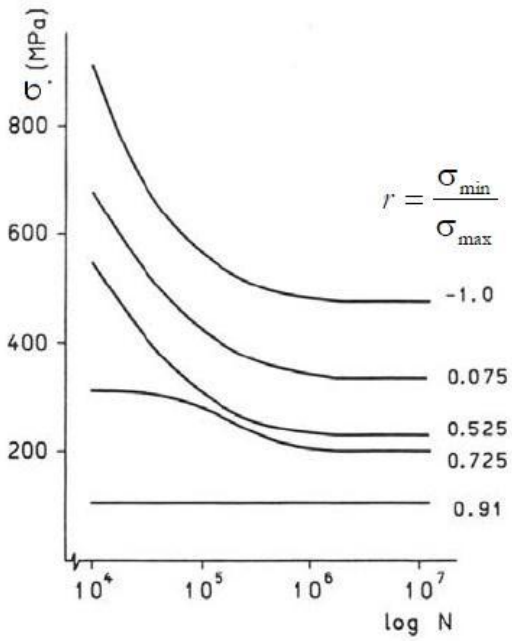
Područja u Wöhlerovom dijagramu (slika 18b) su sljedeća [26]:

I. $N < N_1$: U ovom području lom zamorom dešava se pri elastoplastičnim deformacijama. Ovo je područje niskocikličnog zamora (*engl. low-cycle fatigue*), pri čemu je vrijednost $N_1 \approx 10^3 - 10^4$ ciklusa → statička čvrstoća

II. $N_1 < N < N_{\mathrm{g}}$: Ovo je područje vremenske (relativne) dinamičke čvrstoće. Kod koje se lom zamorom dešava pri elastičnim deformacijama i konačnom broju ciklusa N. Ovakav zamor materijala se naziva visokociklični zamor (*engl. high-cycle fatigue*) → vremenska dinamička čvrstoća

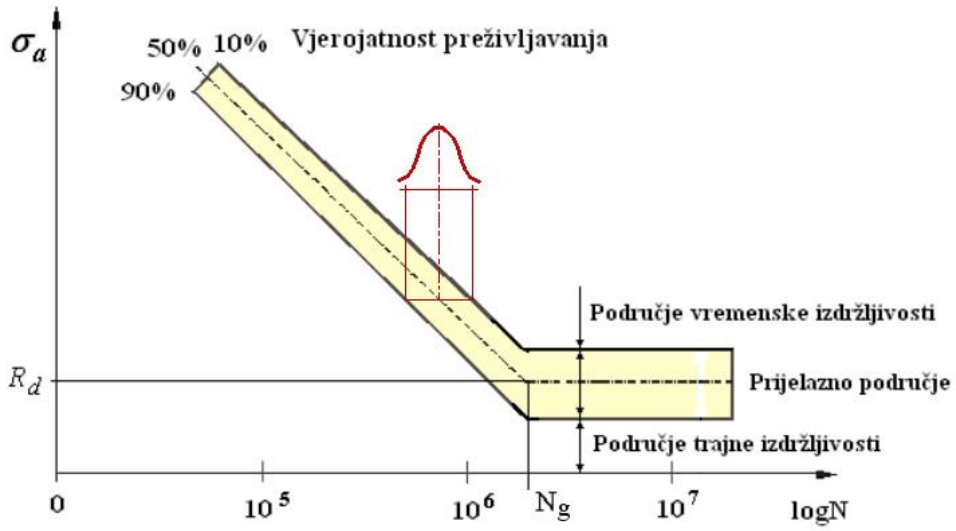
III. $N > N_0$: Ovo je područje trajne dinamičke čvrstoće ili dinamičke izdržljivosti → trajna dinamička čvrstoća

Vrijednosti dinamičke čvrstoće ovise o vrsti naprezanja i o omjeru ciklusa naprezanja što je prikazano na slici 19 iz koje je vidljivo da viši omjeri skraćuju zamorni vijek, što se može objasniti činjenicom da je cijeli ciklus u nepovoljnom vlačnom području, kada uslijed visokih vršnih naprezanja, dolazi do bržeg začetka zamorne pukotine ali i do njenog bržeg rasta [30].



Slika 19. *S-N* krivulje kod promjene omjera naprezanja [30]

Rezultati dinamičkih ispitivanja materijala, zbog nehomogenosti materijala, imaju znatno rasipanje. Moguće je da se za jednaku vrstu naprezanja brojevi ciklusa do loma epruvete odnose čak kao 1:10 [30]. Iz tog razloga dinamička ispitivanja provode se na većem broju epruveta i danas je uobičajeno uz rezultate dinamičkih ispitivanja dati i vjerojatnost preživljavanja dijela pri danom opterećenju i broju ciklusa, ucrtavanjem triju Wöhlerovih krivulja s vjerojatnostima preživljavanja 10%, 50% i 90%, slika 20. Tada se govori o Wöhlerovom polju, koje se može podijeliti u tri različita području: području vremenske izdržljivosti u kojem većina epruveta puca, područje trajne izdržljivosti u kojem nema pucanja epruveta i prijelazno područje u kojem neke epruvete pucaju, a neke ne [6].



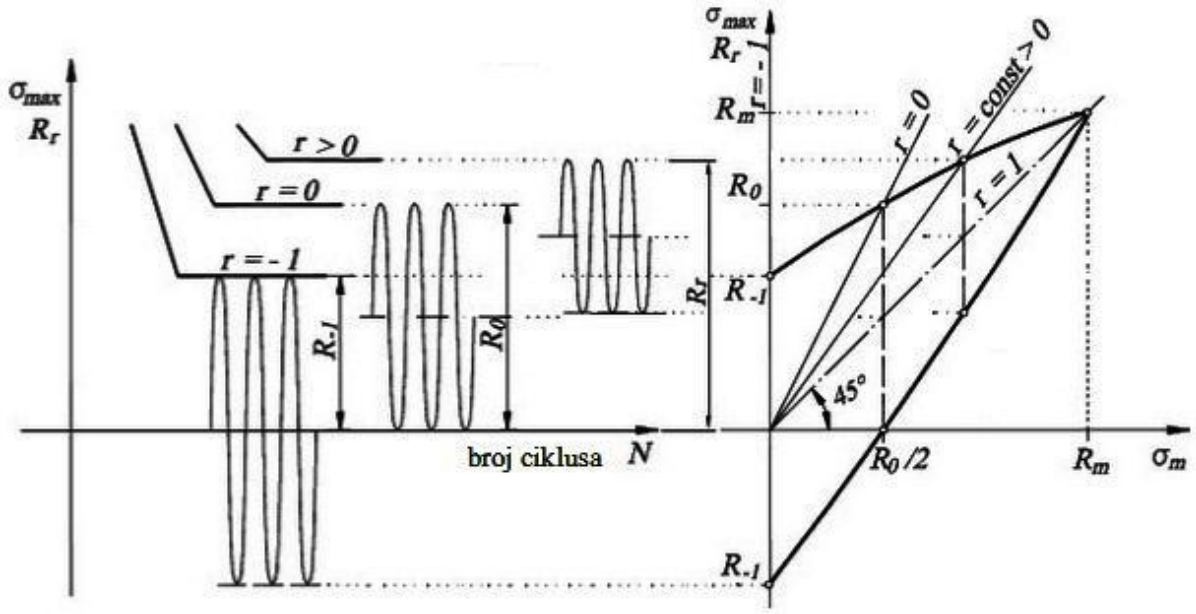
Slika 20. Polje rasipanja kod Wöhlerove krivulje [6]

Wöhlerov dijagram daje podatke o iznosu dinamičke izdržljivosti nekog materijala samo za jedan tip promjenjivog naprezanja. Za konstruktore je često potreban podatak o iznosu dinamičke izdržljivosti nekog materijala za različite tipove promjenjivog naprezanja, a takve podatke nam daje Smithov dijagram.

4.2. Smithov dijagram

Vrijednosti naprezanja iz Wöhlerovog dijagrama zamaranja vrijede samo za jednu vrijednost srednjeg ili donjeg naprezanja, koja je konstantna za cijelu seriju epruveta. Strojni dijelovi u uvjetima eksploatacije izloženi su različitim vrstama promjenjivih opterećenja, izmjeničnih ili istosmjernih, vlačnih ili tlačnih, prikazanih na slici 15.

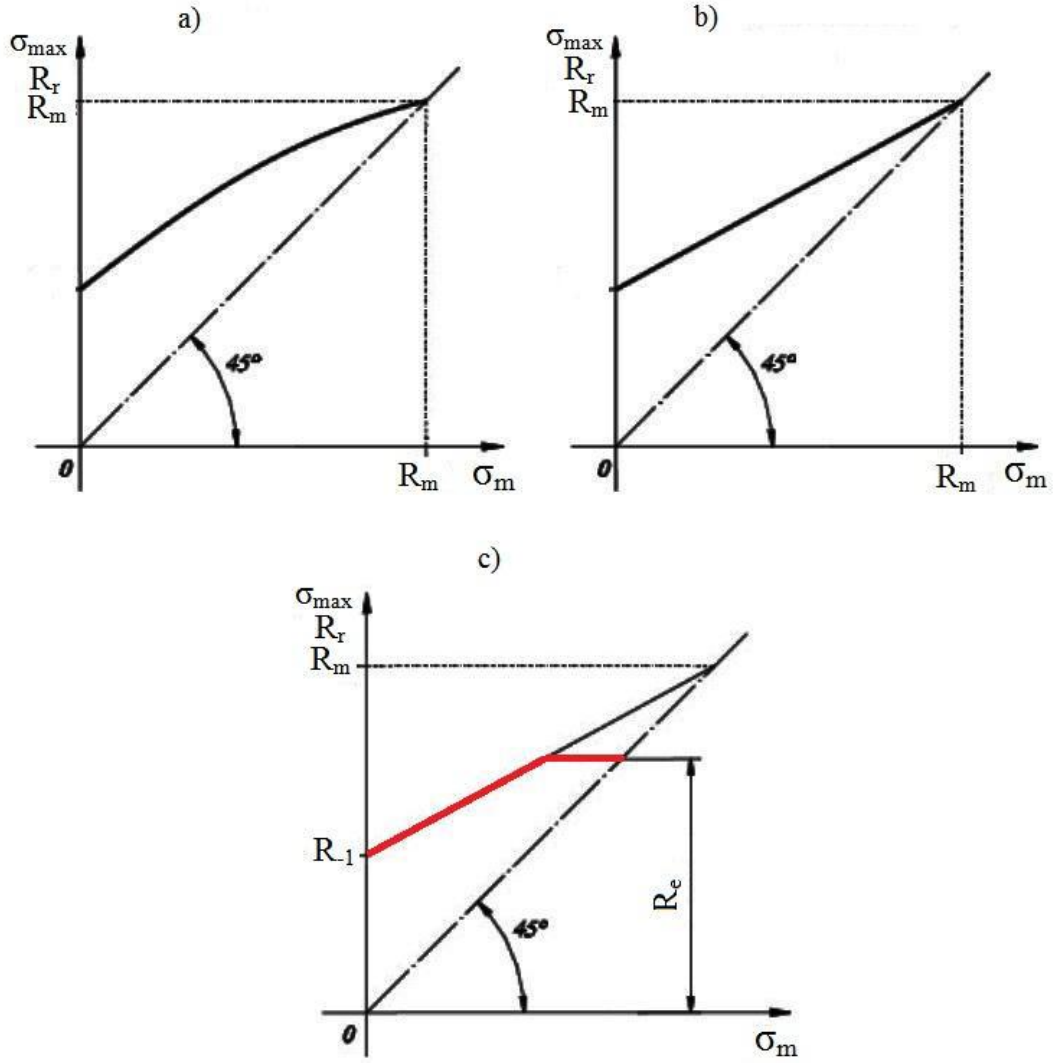
Smithov dijagram daje ovisnost gornjeg i donjeg naprezanja od srednjeg naprezanja. Za njegovo konstruiranje potrebno je najprije odraditi seriju Wöhlerovih ispitivanja zamaranjem za različite vrijednosti srednjeg naprezanja σ_m. Vrijednosti srednjeg naprezanja nanose se na apscisu, a gornjeg i donjeg naprezanja na ordinatu. Obično se zadovoljava s četiri Wöhlerova dijagrama, a moraju se poznavati vrijednosti naprezanja tečenja (R_e ili $R_{p0,2}$) i vlačne čvrstoće (R_m). Svaki Wöhlerov dijagram predstavlja u Smithovom dijagramu samo jednu ordinatu. Smithov dijagram se dobiva unošenjem u njegove koordinate ($\sigma_{max} = R_r$, σ_m) vrijednosti maksimalnog $\sigma_{max} = R_r$ i minimalnog naprezanja σ_{min} na nivou trajne dinamičke čvrstoće za pripadajuću srednju vrijednost naprezanja σ_m, za nekoliko ciklusa različitih asimetrija *r*, slika 21. Simetrala dijagrama ucrtava se pod kutom od 45° i predstavlja pravac, čije su ordinate jednake apscisama tj. srednjim naprezanjima ciklusa. Očito je da konture Smithovog dijagrama omeđuju polje trajne dinamičke čvrstoće. Prijelaz maksimalnog ili minimalnog naprezanja izvan konture dijagrama znači zamorni lom.



Slika 21. Smithov dijagram trajne dinamičke čvrstoće [24]

Gornja krivulja (maksimalnih naprezanja ciklusa) Smithovog dijagrama predstavlja liniju trajne dinamičke čvrstoće pa se najčešće i crta samo ta linija. Na taj način se Smithov dijagram aproksimira kao linija koja povezuje obično samo jednu (najčešće $R_d^{-1} = R_{-1}$) karakteristiku dinamičke čvrstoće i jednu (R_e ili R_m) karakteristiku statičke čvrstoće, (slika 22). Najsličnija aproksimacija Smithovog dijagrama jest u obliku (Gerberove) parabole između točaka ($0, R_{-1}$) i (R_m, R_m), (slika 22a) ali se ona najčešće aproksimira pravcem između tih istih točaka (slika 22b) u tom slučaju se taj pravac naziva Goodmanova linija. Kod rastezljivih materijala ova se linija trajne dinamičke čvrstoće obično ograničava granicom

tečenja R_e (slika 22c), jer plastične deformacije strojnih dijelova najčešće nisu dopuštene [26].



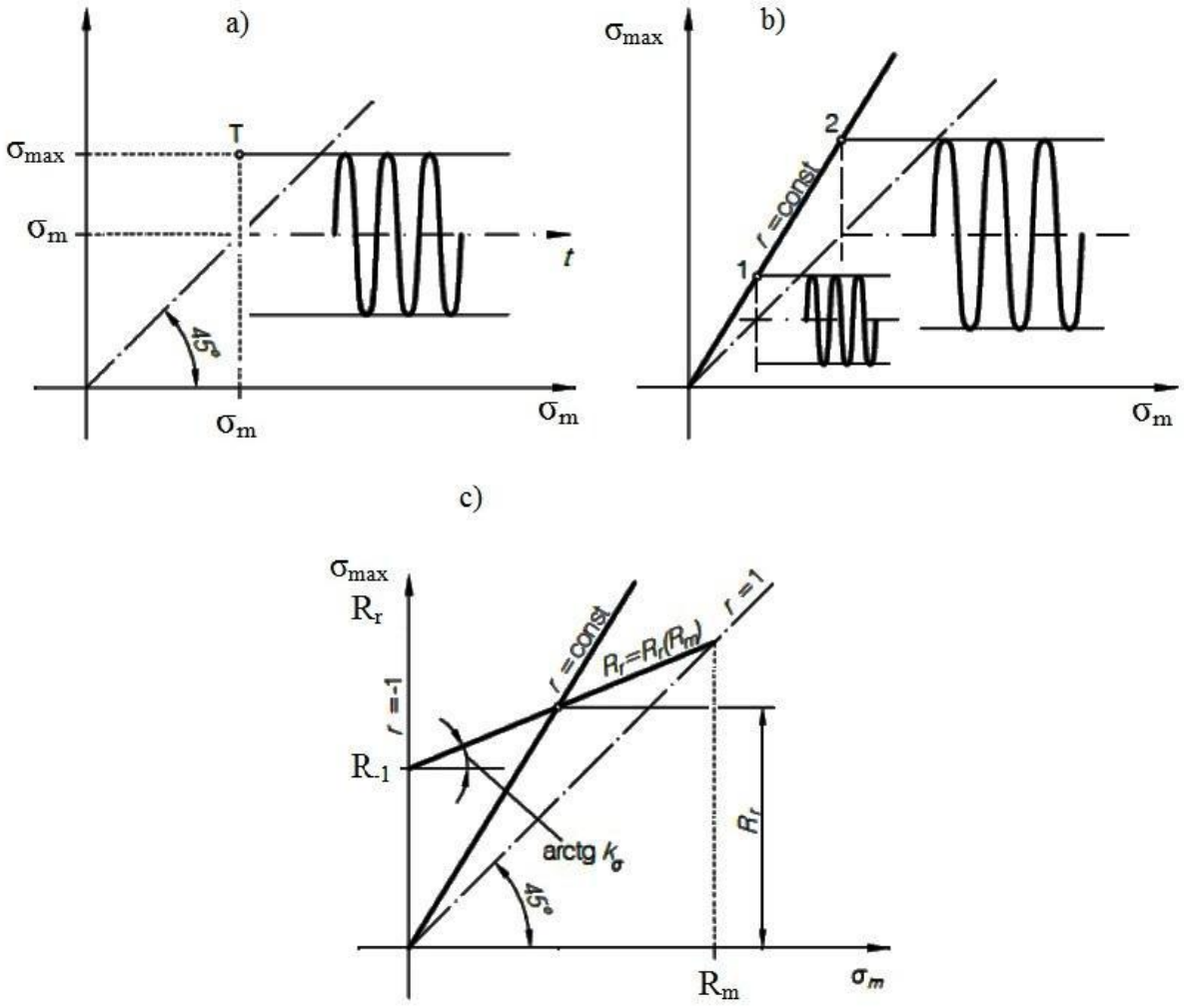
Slika 22. Načini aproksimacije linije trajne dinamičke čvrstoće: a) Gerberova parabola, b) Goodmanova linija, c) Goodmanova linija presječena granicom tečenja [29]

Treba zapaziti da svaka točka T s koordinatama (σ_m, $\sigma_{\max}$) Smithovog dijagrama definira određeno ciklično naprezanje (slika 23). Naime, uz poznato srednje i maksimalno naprezanje, koje definira točka T, poznata je i amplituda naprezanja σ_a, te minimalno naprezanje $\sigma_{\min}$, pa je ciklus potpuno definiran. Također, svaki pravac povučen kroz ishodište je geometrijsko mjesto maksimalnih naprezanja različitih ciklusa jednakog koeficijenta asimetrije *r*. Naime, koeficijent smjera *k* tog pravca je:

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m} = \frac{2\sigma_{\max}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \frac{2}{1+r} \quad . \tag{9}$$

Iz tog proizlazi da svaka točka pravca predstavlja ciklus naprezanja jednakog koeficijenta asimetrije koji se označava s *r*=konst. i naziva se pravcem opterećenja. Granično naprezanje tj. dinamička čvrstoća za taj *r* se nalazi na tom pravcu. Kako se ona nalazi i na gornjoj konturi Smithovog dijagrama, očito je da se trajna dinamička čvrstoća za određeni

koeficijent asimetrije ciklusa naprezanja određuje kao presjecište pravca opterećenja *r*= konst i linije trajne dinamičke čvrstoće $R_r = f(R_m)$, slika 23c. Slikom 23 prikazano je sljedeće: a) jedna točka - jedno cikličko naprezanje, b) pravac kroz ishodište – pravac opterećenja - niz različitih cikličkih naprezanja iste asimetrije ciklusa, c) dinamička čvrstoća za ciklička naprezanja s koeficijentom asimetrije ciklusa *r* jednaka je ordinati presjecišta pravaca opterećenja i linije odgovarajuće dinamičke čvrstoće [24].

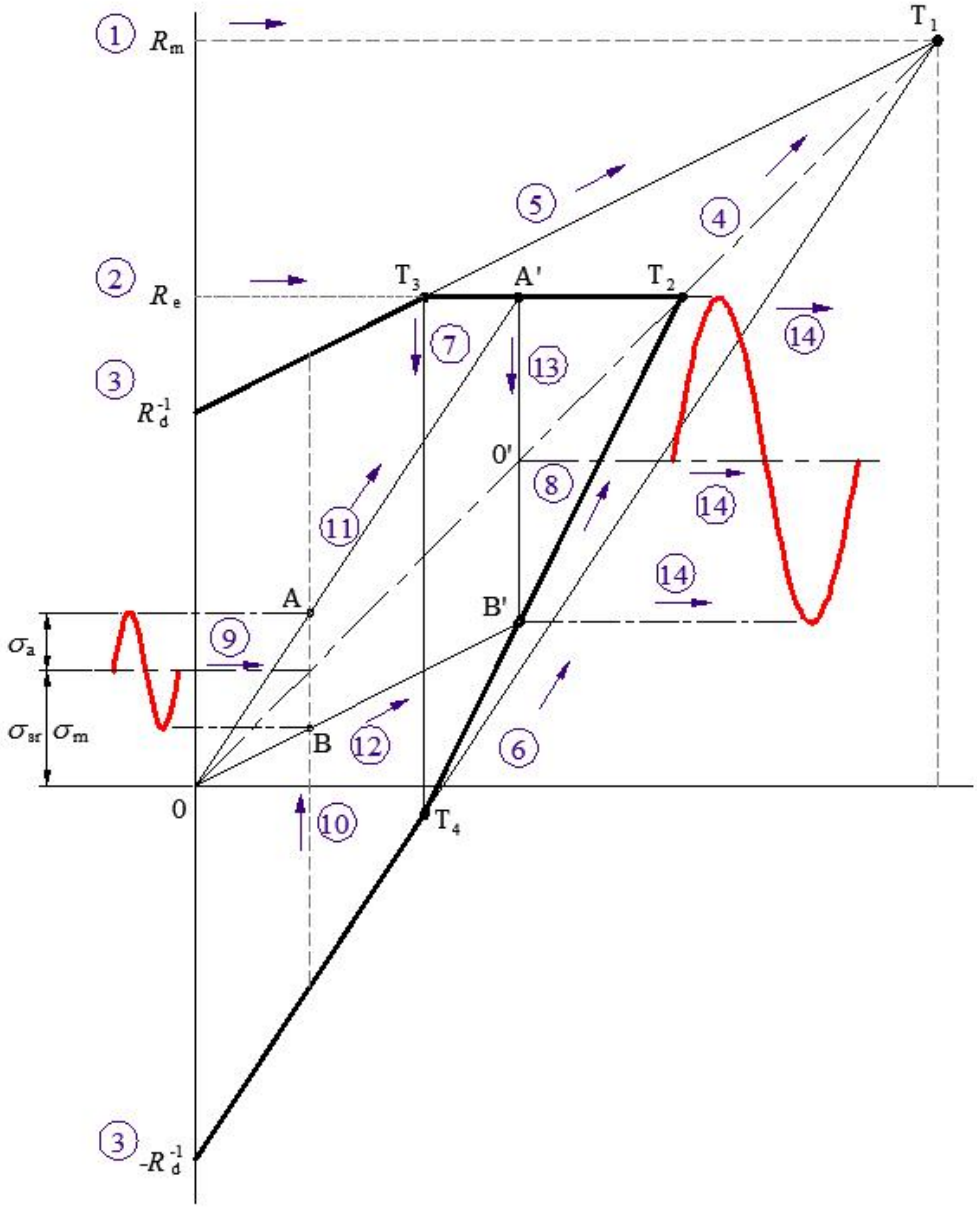


Slika 23. Osnovni principi Smithovog dijagrama [24]

Za potrebe dinamičkih ispitivanja zamaranjem najprije se provode statički vlačni pokusi kako bi se na temelju dobivenih podataka o vlačnoj čvrstoći R_m i granici tečenja R_e mogli odrediti parametri za dinamička ispitivanja. Na osnovu određenih vrijednosti može se pristupiti konstrukciji Smithovog dijagrama kako je prikazano na slici 24 slijedeći sljedeće korake [31]:

1. ucrtati R_m,
2. ucrtati R_e,
3. ucrtati $\sigma_d^{-1} = R_d^{-1}$,
4. spojiti ishodište i točku T_1,
5. spojiti točku $(0, R_d^{-1})$ s točkom T_1,
6. spojiti točku $(0, -R_d^{-1})$ s točkom T_1,

7. iz točke T_3 spustiti okomicu u točku T_4,
8. točku T_4 spojiti s točkom T_2.

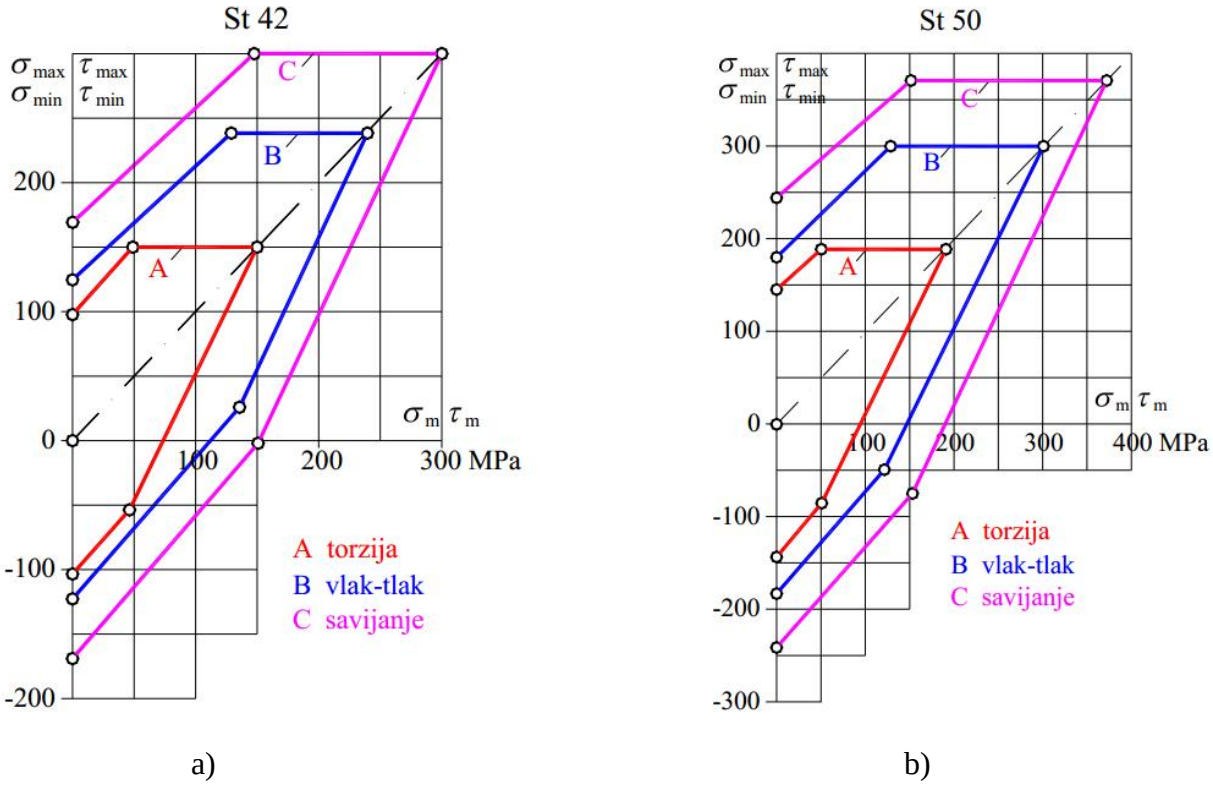


Slika 24. Konstrukcija Smithovog dijagrama [31]

Za unos i očitavanje podataka potrebno je provesti daljnje korake [31]:

9. vrijednost σ_{sr} unijeti tako da se nađe presjecište s pravcem pod kutem 45° u točki O. Unijeti vrijednost za σ_a,
10. kroz točku O povući vertikalu tako da se pronađu presjecišta u točkama A i B s vrijednostima za σ_a,
11. iz ishodišta povući pravac kroz točku A, te na gornjoj krivulji označiti točku A',
12. iz ishodišta povući pravac kroz točku B, te na donjoj krivulji označiti točku B',
13. spojiti točke A' i B' i označiti presjecište s pravcem pod 45° u točki O',
14. iz točaka A', B' i O' povući horizontale koje određuju dinamičku čvrstoću.

Smithovi dijagrami različiti su za različite vrste naprezanja, što je prikazano na slici 25. Iz slike je vidljivo da najveću površinu zauzima Smithov dijagram za savijanje, a najmanju za torziju, što znači da je dinamička čvrstoća najveća kod savijanja a najmanja kod torzije.



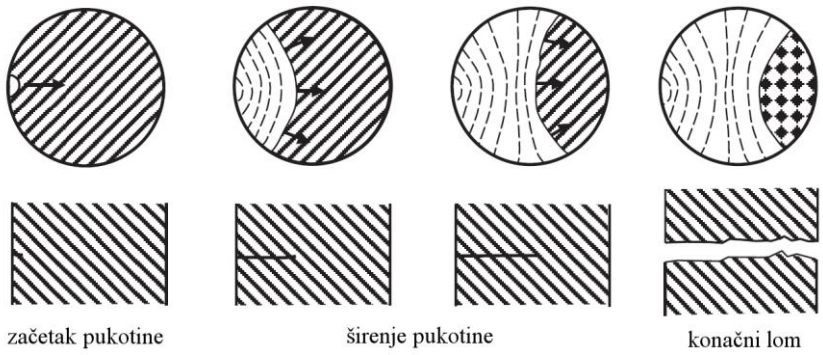
a) b)

Slika 25. Smithovi dijagrami trajne dinamičke čvrstoće za različite vrste opterećenja za dva metalna materijala (a) St 42 i (b) St 52 [26]

4.3. Prijelom uslijed zamora

Strojni dio koji je dulje vremena podvrgnut naprezanjima promjenjivim u vremenu, lomi se pri naprezanjima koja su znatno manja od statičke čvrstoće i granice tečenja. Ovo je posljedica tzv. zamora materijala. Zamor materijala je proces akumuliranja oštećenja, ciklus po ciklus, u materijalu koji uslijed izloženosti opterećenju doživljava promjenljiva vlačna naprezanja niža od granice razvlačenja. Do loma dolazi nakon određenog broja promjena opterećenja, kad akumulirano oštećenje dosegne kritičnu razinu, odnosno kada preostali dio poprečnog presjeka više ne može podnijeti opterećenje. Proces zamora materijala sastoji se od tri faze (slika 26) [32]:

1. začetka (stvaranja) pukotine
2. širenja (napredovanja, propagacije, rasta) pukotine
3. konačnog loma (preostalog dijela poprečnog presjeka).

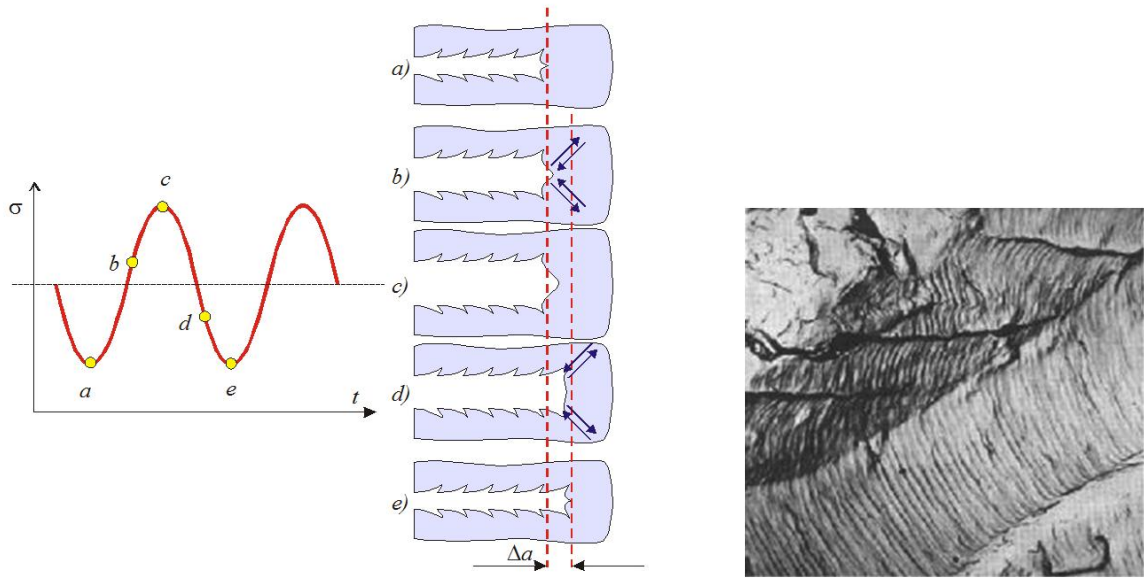


Slika 26. Tri faze procesa zamora materijala prikazane na lomnoj površini [33]

Kod zamora se pukotine mogu izazvati na više načina. Razlog njihovog nastanaka mogu biti nepravilne orijentacije kristala, nehomogenosti svojstava, poroznosti, dislokacija u građi rešetke itd., ali najčešće se dešava da se pukotine počinju formirati na slobodnoj površini, jer na njoj su normalna naprezanja najveća. Ustvari, pukotina se uvijek inicira na mjestu najvećih normalnih naprezanja. Zbog toga je vrlo važno stanje površine pri ispitivanju otpornosti na zamor. Proces zamaranja uvijek počinje začećem inicijalne (mikro) pukotine duljine reda veličine kristalnog zrna (oko 0,05 mm), a proces začeća pukotine započinje cikličkim gomilanjem plastičnih deformacija na mjestima mikrokoncentracije naprezanja. Izvori mikrokoncentracije naprezanja su najčešće na površini napregnutog elementa, i to pri dnu udubina površinskih neravnina, u okolini oksida koji djeluju kao strano tijelo (uključina), te na mjestima svih ostalih nehomogenosti izazvanih okolišem i obradom (npr. gubitak ugljika pri kovanju ili uključine pri lijevanju).

Pojava linija klizanja predstavlja prvi stadij zamora. Uslijed učestalih klizanja materijal očvršćava i otpor deformiranju raste. S porastom broja ciklusa, kad zbog očvršćivanja otpor deformacije dostigne čvrstoću materijala, na najopterećenijem mjestu pojavit će se mikropukotina. Na kraju mikropukotine, zbog djelovanja oštrog zareza, mikronaprezanja se povećavaju, što ima za posljedicu daljnje povećanje mikropukotine. Ona se postupno pretvara u makroskopski vidljivu pukotinu koja će se povećavati sve dok se konačno, zbog neprekidnog slabljenja nosećeg poprečnog presjeka, preostali poprečni presjek odjednom ne prekine.

Druga faza rasta može se istraživati pod uvjetima velike amplitude deformacije materijala jer se plastična deformacija koja nastaje na vršku pukotine može u tim uvjetima izravno promatrati. To je i razlog što se o drugoj fazi rasta zna više pa je mehanizam rasta u toj fazi zadovoljavajuće objašnjen. Jedna od najvažnijih značajki druge faze jest da pukotina napreduje konačnim priraštajima, od kojih svakom priraštaju odgovara jedan ciklus opterećenja. Mehanizam širenja pukotine ilustriran je na slici 27a. Druga važna značajka jest pojava markacija na površini loma, koje se nazivaju brazdama, linijama klizanja ili linijama odmora (slika 27 b). Svakoj brazdi odgovara jedan ciklus opterećenja, tako da brojanje brazdi omogućuje brojanje mikronapredovanja fronte pukotine, a još je važnije i praćenje toka širenja pukotine. Postojanje brazdi na nekoj prijelomnoj površini siguran je dokaz kako se radi o prijelomu uslijed zamora.



(a) (b)

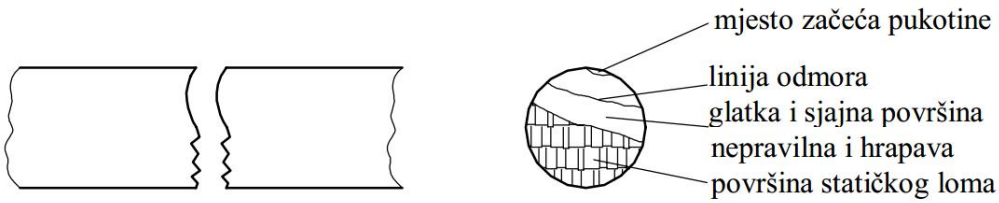
Slika 27. Prikaz: (a) formiranja brazdi u fazi rasta pri cikličkom opterećenju i (b) brazdi [32]

Izmjenično otupljivanje i ponovno zaoštravanje vrška pukotine osnovna je značajka druge faze rasta pukotine. Kod intenzivnih naprezanja i niskofrekventnih cikličnih opterećenja brazde se vide golim okom (slika 27b), dok se prilikom naprezanja male amplitude ili kod visokofrekventnih opterećenja mogu vidjeti tek elektronskim mikroskopom. Na početku ciklusa opterećenja vršak je pukotine oštar (slika 27a), ali za vrijeme povećanja opterećenja (razdoblje otvaranja pukotine) postaje tup i istodobno se plastična zona pred vrškom širi. Koliko će to širenje biti, ovisi o intenzitetu naprezanja. Upravo za vrijeme maksimalnoga vlačnog naprezanja nastupa daljnji lom ligamenata procesom plastičnog loma ili odreza. Za vrijeme sljedeće faze, tj. faze smanjivanja opterećenja, ponovno se oblikuje oštri vršak pukotine. Pri tome se plastično rastegnuti materijal na vršku pukotine komprimira i oblikuje se brazda na površinama pukotine. Ispupčivanje je materijala pri vršku pukotine razumljivo, jer otvor je pukotine jedini slobodni put plastičnom tečenju materijala. Nakon toga proces se nastavlja [32].

Proces širenja pukotine traje sve dok se ostatak presjeka ne smanji toliko da naprezanja u njemu dostignu vrijednost statičke čvrstoće materijala, pa se on odjednom nasilno prelomi tj. dolazi do konačnog popuštanja. Ono se može javiti preko tri osnovna mehanizma: krtog loma, žilavog loma ili plastičnog popuštanja, ovisno o žilavosti materijala, opterećenju i temperaturi.

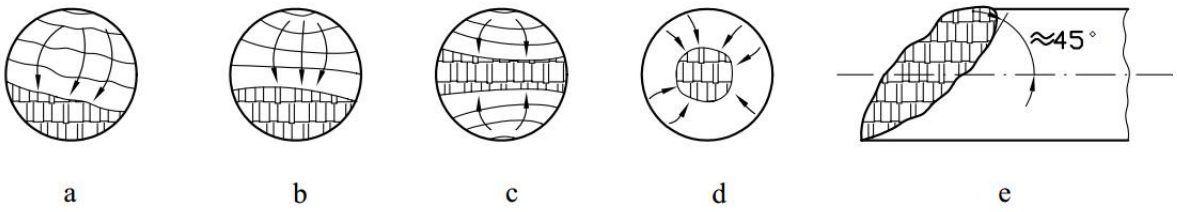
Na lomnoj površini nastaloj uslijed zamora, jasno se razlikuju dvije zone. Zona nastala postupnim propagiranjem pukotine obično je bez sjaja zbog oksidacije i taloženja vanjskih nečistoća za vrijeme procesa zamaranja i uglačana je zbog habanja nasuprotnih površina. Ostatak prijelomne površine ima hrapavu, krupnozrnatu strukturu svjetlucave boje, karakterističnu za nagli prijelom. Tako površina loma uslijed zamora materijala ima dvije jasno izražene zone prikazane na slici 28 [24]:

- zonu širenja pukotine (koja je glatka tj. hrapavost je na nivou kristalnih zrna)
- zona statičkog loma (koja je grube i nepravilne površine)



Slika 28. Opći izgled površine loma uslijed zamora materijala [24]

Shematski izgledi površina zamornog loma za različite vrste opterećenja prikazani su na slici 29.



Slika 29. Prikaz lomova uslijed zamora materijala a) aksijalno opterećenje, b) istosmjerno savijanje, c) izmjenično savijanje, d) kružno savijanje, e) torzija [24]

Iz međusobnog odnosa karakterističnih zona prijelomne površine i položaja linija odmora (slika 29) mogu se izvući zaključci o veličini i vrsti naprezanja pri kojem je prijelom nastao. Pri naizmjeničnom vlačno-tlačnom naprezanju ili jednosmjerno vlačno promjenljivom naprezanju, kad je cijeli poprečni presjek ravnomjerno opterećen, brzina propagacije pukotine jednaka je u svim pravcima, pa su linije odmora lučno savijene. Pri naprezanju savijanjem, pukotina propagira paralelno neutralnoj liniji, pa linije odmora, koje su na početku zakrivljene, kasnije postaju skoro ravne. Pri rotirajućem savijanju linije odmora se formiraju u koncentričnim krugovima od periferije, a u sredini se nalazi ostatak prijelomne površine.

Relativno trajanje tri faze napredovanja pukotine ovisi o mnogo faktora kao što su: svojstva materijala, geometrija pukotine, krutost konstrukcije, amplitude naprezanja, korozija, održavanje konstrukcije i dr.. Cilj analize zamora je ostvarenje takve konstrukcije za koju će vrijeme trajanja opisane tri faze uvijek biti veće od predviđenog vijeka trajanja konstrukcije.

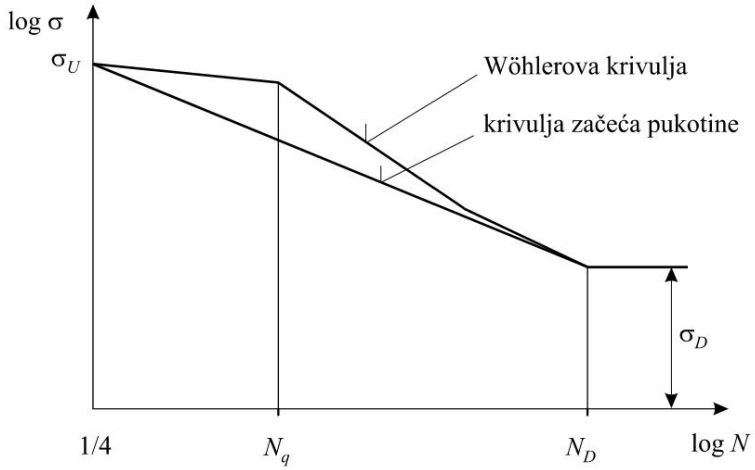
4.4. Određivanje životnog vijeka konstrukcije dinamičkim ispitivanjima

Dakle, u zoni najvećih naprezanja može se začeti nekoliko mikropukotina, ali samo jedna od njih nastavlja se širiti do makro razmjera i do konačnog loma [24]. Da li će se mikropukotina nakon začeća nastaviti širiti ili ne, ovisi o vrijednosti raspona faktora intenziteta naprezanja na začetu duljinu pukotine – o tzv. pragu širenja pukotine. Recimo za dubinu inicijalne (začete) pukotine uzima se dimenzija kristalnog zrna, koja je kod različitih materijala različita, ali red njezine veličine je 0,05 mm [12].

Budući da vrijeme potrebno za začeće pukotine čini veliki dio vremena do zamornog loma, važno ga je znati odrediti, kako u fazi projektiranja, tako i u fazi eksploatacije i

održavanja. Ono se najčešće određuje pomoću prikazane formule Wöhlerovog tipa, čije se konstante za proces začeća određuju testiranjem na umaralici: Epruveta ili strojni dio izlože se cikličkim opterećenjima, pa se nakon određenog broja ciklusa, s posebnom opremom (elektronski mikroskopi, ultrazvuk, snop elektrona, laser) pažljivo promatra da li je začeta pukotina, tj. da li postoji mikropukotina duljine 0,05 mm. Rezultati se unose u σ-N dijagram, a dobivena krivulja, koja se nalazi ispod Wöhlerove krivulje (osim u točki (N_g, R_d)), dijeli sve točke u kojima je začeta pukotina, od onih u kojima nije začeta. Ova krivulja naziva se krivuljom začeća pukotine, a slično kao i Wöhlerova krivulja, služi za formiranje odgovarajuće krivulje začeća za cikluse s proizvoljnom asimetrijom u Smithovom dijagramu [12].

Krivulji začeća (inicijacije) pukotine u σ - N dijagramu s logaritamskim koordinatama, aproksimirana je kao pravac, koji se s krivuljom zamaranja spaja u dvije karakteristične točke u kojima je vrijeme do začeća jednako vremenu do loma: na "koljenu" Wöhlerove krivulje i u točki N = 1/4 (statički lom), što je prikazano na slici 30.



Slika 30. Krivulja začeća pukotine i Wöhlerova krivulja [12]

Ova aproksimacija dobro se slaže s rezultatima ispitivanja i naišla je na zapaženu reakciju u znanstvenim krugovima.

4.5. Faktori koji utječu na vrijednost dinamičke čvrstoće

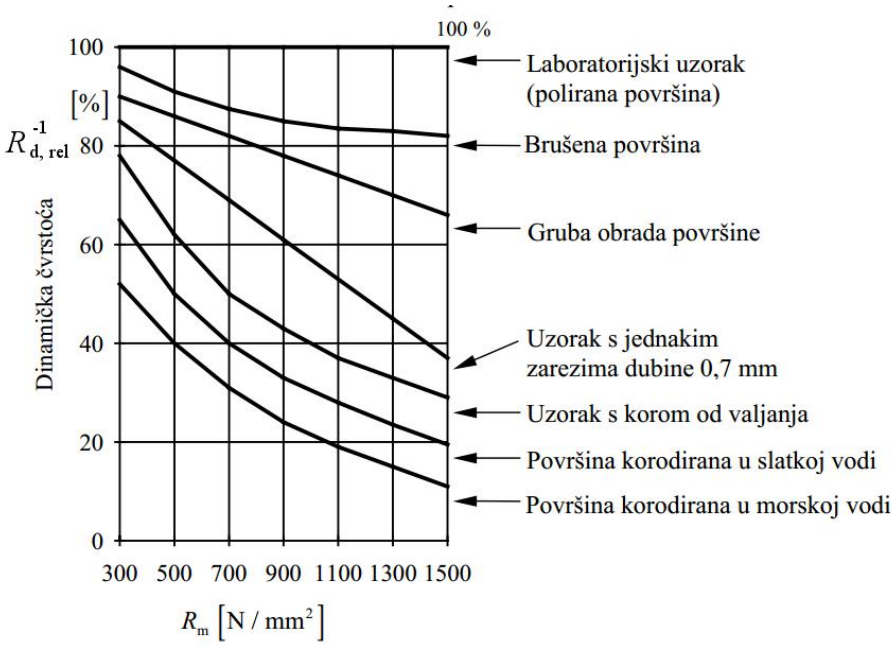
Na vrijednost dinamičke čvrstoće utječu sljedeći faktori:

- uvjeti izrade i prerade,
- dimenzije,
- vrsta naprezanja,
- površina,
- kratkotrajna opterećenja,
- frekvencija,
- temperatura,
- korozija te
- zarezi.

Na dinamičku čvrstoću u velikoj mjeri utječu unutarnje greške u materijalu i njegova struktura, pa se može reći da dinamička čvrstoća zavisi od postupka dobivanja čelika i načinu prerade metala (kovanje, valjanje, toplinska obrada itd.). Na primjer, visok sadržaj nečistoća i gruba struktura smanjuju dinamičku čvrstoću čelika. Kovanjem i valjanjem se grubozrnata struktura usitnjava, čime se povećavaju granica razvlačenja i dinamička čvrstoća. Vrijednosti čvrstoće kod valjanih proizvoda zavisne su od pravca valjanja. U pravcu valjanja dobit će se neznatno veće vrijednosti čvrstoće, nego poprečno na pravac valjanja.

Kad se govori o utjecaju naprezanja na vrijednost dinamičke čvrstoće, misli se prije svega na čestu izloženost strojnih dijelova djelovanju različitih promjenljivih naprezanja pa je potrebno poznavati sve te vrste naprezanja kako bi se moglo procijeniti njihovo ukupno djelovanje na vrijednosti čvrstoće.

Stanje površine od velikog je utjecaja na vrijednost dinamičke čvrstoće. Kod metalnih dijelova polomljenih uslijed zamora, u većini slučajeva prijelom kreće s površine. Greške na površini mogu biti sitni zarezi od strojne obrade, korozija, razugljičenje, hrapavost itd.. S jedne strane, na površini nastaju najveća naprezanja pri naprezanju savijanjem i naprezanju uvijanjem, a s druge strane, površina je oslabljena tragovima strojne obrade koja izaziva koncentraciju naprezanja. Poliranje legiranog čelika visoke čvrstoće može udvostručiti zamornu čvrstoću u odnosu na neobrađenu površinu istog materijala. Na slici 31 prikazan je utjecaj stanja površine na dinamičku čvrstoću, koja je na slici prikazana relativno s obzirom na laboratorijski uzorak.



Slika 31. Ovisnost dinamičke čvrstoće o kvaliteti površine [34]

Općenito vrijedi pravilo: što je materijal čvršći veći je utjecaj stanja površine na zamor, što je i vidljivo sa slike 31. Niska zamorna čvrstoća nepoliranog materijala u stanju kakav se isporučuje posljedica je površinskih slojeva oksida nastalih kovanjem ili valjanjem. Ti su slojevi često neduktilni, lako pucaju pa tako postaju izvorni elementi koncentracije naprezanja. Gubitak ugljika u površinskome sloju, napose izražen kod otkivaka, drugi je česti uzrok smanjenja zamorne čvrstoće. Iako se taj gubitak može donekle izbjeći skidanjem

razugljičenoga sloja (tokarenjem), treba imati na umu da već sam proces skidanja strugotine ima važan utjecaj na smanjenje zamorne čvrstoće. Ponovno pougljeničenje, kao i površinsko valjanje i prskanje metalnim granulatom, može povisiti otpornost materijala na ciklično opterećenje. Proces zamaranja uvijek počinje začećem inicijalne (mikro) pukotine duljine reda veličine kristalnog zrna (oko 0,05 mm), a proces začeća pukotine započinje cikličkim gomilanjem plastičnih deformacija na mjestima mikrokoncentracije naprezanja. Izvori mikrokoncentracije naprezanja su najčešće na površini napregnutog elementa, i to pri dnu udubina površinskih neravnina, u okolini oksida koji djeluju kao strano tijelo (uključina), te na mjestima svih ostalih nehomogenosti izazvanih okolišem i obradom (npr. gubitak ugljika pri kovanju ili uključine pri lijevanju).

Dinamička čvrstoća pri djelovanju korozije osjetno pada i kod materijala u neopterećenom stanju ili pri mirnom opterećenju. Uslijed djelovanja korozije, na površini metala nastaju udubljenja koja djeluju kao oštri zarezi, te su podesna mjesta za početak zamornog loma, uslijed čega se i dinamička čvrstoća smanjuje.

Zarezi izazivaju neravnomjernu raspodjelu naprezanja i smanjenje dinamičke čvrstoće. Najveće naprezanje je u korijenu zareza.

Na vrijednost dinamičke čvrstoće utječu i dimenzije, ali taj utjecaj nije potpuno razjašnjen. Jedna je teorija da lom počinje na mjestu greške u materijalu. Ovakvih grešaka ima i na površini i u unutrašnjosti materijala. S povećanjem dimenzija epruvete povećavaju se i njezina površina i volumen, pa time i vjerojatnost da se na većoj epruveti pojave greške s opasnom koncentracijom naprezanja.

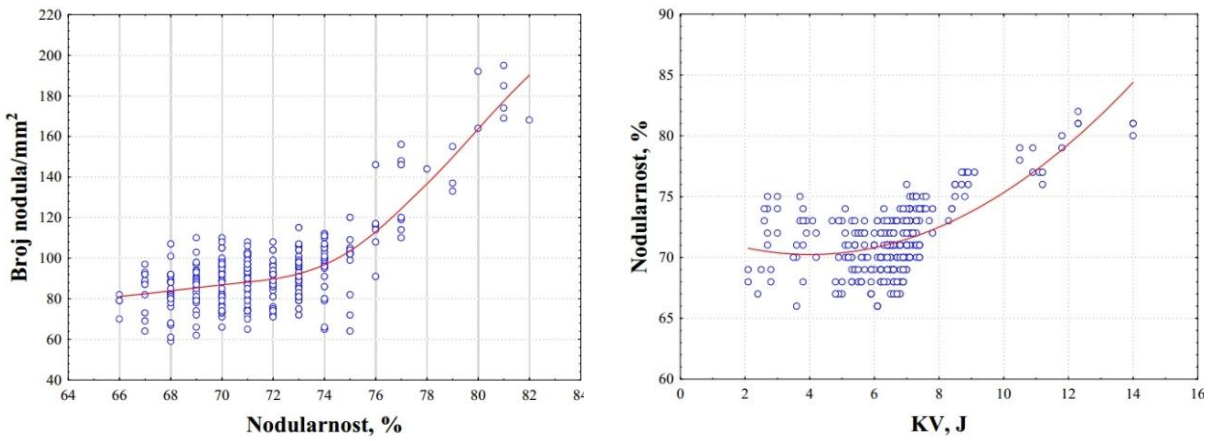
Frekvencija utječe tako što se pri višim frekvencijama temperatura malo poveća, što pomaže očvršćavanju, pa se stoga dinamička čvrstoća nešto malo povećava. Zato je pri uobičajenim frekvencijama potrebno osigurati hlađenje epruveta. Ispitivanja se ne vrše s jako visokim frekvencijama jer temperatura toliko poraste da se epruveta može i užariti.

5. UTJECAJ MIKROSTRUKTURE NODULARNOG LIJEVA NA DINAMIČKA ISPITIVANJA

Nodularni lijev nije pojedinačni materijal već skupina svestranih željeznih ljevova sa širokim spektrom svojstava koja se postižu kontrolom mikrostrukture. Najznačajnija i karakteristična mikrostrukturna značajka svih nodularnih ljevova je prisutnost grafitnih nodula koje djeluju kao „zaustavljači pukotina“ i daju nodularnom lijevu superiornija vlačna svojstva i žilavost u odnosu na ostale željezne ljevove. Navedena svojstva su slična svojstvima mnogih lijevanih i kovanih čelika. Međutim, sivi lijev ima višu toplinsku vodljivost i sposobnost prigušenja vibracija zbog kontinuirane prirode grafitnih listića.

Metalna osnova u kojoj su raspršene grafitne nodule ima značajan utjecaj na mehanička svojstva. Feritni nodularni ljevovi omogućuju istezljivost u području od 18,0 do 30,0 %, s tim da je vlačna čvrstoća ekvivalentna vlačnoj čvrstoći niskougljičnog čelika. Perlitni nodularni ljevovi imaju vlačnu čvrstoću koja premašuje 800 N/mm^2, ali smanjenu žilavost [23].

U ovom završnom radu dat će se pregled rezultata vezanih uz dinamička ispitivanja iz dostupnih literatura. Tako na osnovu rezultat preuzetih iz literaturnog izvora [23] mogu se vidjeti sljedeće ovisnosti ispitivanja žilavosti nodularnog lijeva o mikrostrukturi. Ovisnost broja nodula o nodularnosti prikazana je na slici 32a, dok je ovisnost nodularnosti o udarnoj radnji loma prikazana na slici 32b.



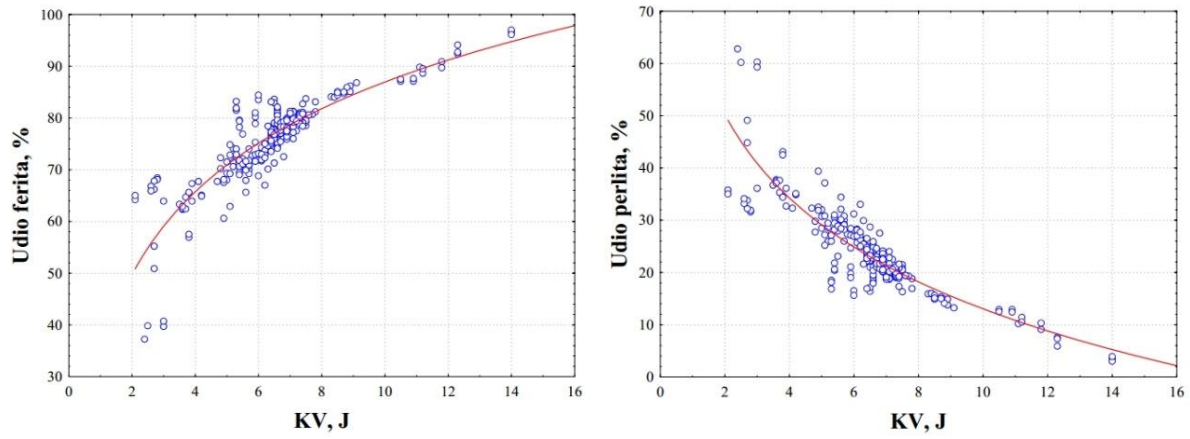
a) b)

Slika 32. Ovisnost (a) broja nodula o nodularnosti, (b) nodularnosti o udarnoj radnji loma [23]

Na slici 32a vidljivo je da broj grafitnih nodula utječe i na nodularnost grafita i to s povećanjem broja nodula smanjuje se njihov promjer, što rezultira većom nodularnosti grafita jer su manje nodule oblikom bliže savršenoj kugli. Dok se na slici 32b može uočiti da nodularnost grafita ima važan utjecaj na udarnu žilavost nodularnog lijeva te da niska nodularnost grafita i prisustvo nepravilnih oblika grafita rezultira padom žilavosti. Može se zaključiti da što je grafitna čestica bliže kugli ona za isti volumen zauzima manju površinu u mikrostrukturi, tj. manje utječe na slabljenje metalne osnove, time je viša udarna žilavost u nodularnom lijevu.

Mikrostruktura uobičajenih kvaliteta nodularnog lijeva sastoji se od ferita i perlita. Udio ferita i perlita u mikrostrukturi nodularnog lijeva ovisi o kemijskom sastavu, brzini hlađenja kroz područje eutektoidne pretvorbe i volumnom udjelu i broju grafitnih nodula. Utjecaj

udjela perlita u metalnoj osnovi na udarnu žilavost nodularnog lijeva prikazan je na slici 33a i dok je utjecaj udjela ferita u metalnoj osnovi na udarnu žilavost nodularnog lijeva prikazan slikom 33b.



a) b)

Slika 33. Utjecaj (a) ferita i (b) perlita u mikrostrukturi na udarnu radnju loma nodularnog lijeva [23]

Kod nodularnog lijeva postoji čvrsta veza između udarne žilavosti i udjela ferita u mikrostrukturi, što se može vidjeti na slici 33a. Nodularni lijev sa feritnom metalnom osnovom ima nižu vlačnu čvrstoću, ali veću žilavost i izduženje. Poznato je da tvrdoća i vlačna čvrstoća nodularnog lijeva raste s porastom udjela perlita u metalnoj osnovi [23]. Perlit je eutektoidna smjesa ferita i cementita i samim time ima veću čvrstoću i tvrdoću u odnosu na ferit. Znači feritni nodularni lijev ima relativno visoku istezljivost i žilavost te srednju vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću. Perlitni nodularni lijev ima visoku vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću a nisku istezljivost i žilavost (slika 33b).

Analizom dobivenih rezultata utvrđeno je da se više vrijednosti udarne žilavosti nodularnog lijeva dobivaju s porastom udjela ferita u mikrostrukturi, smanjenjem udjela perlita u mikrostrukturi, povećanjem broja nodula/mm^2 i nodularnosti grafita.

Eksperimentalni rezultati u literaturnim izvorima [2, 35] pokazuju da veličina, oblik i raspored grafitnih nodula nemaju značajan utjecaj na cikličko očvršćenje materijala, međutim igraju veliku ulogu u procesima nastanka i rasta pukotina. Pokazano je da veće nodule, nepravilnijeg oblika smanjuju lomnu žilavost i zamornu čvrstoću. Obzirom na broj, veličinu i oblik nodula, kao i na udjel perlitne faze, zaključuje se da veće, nepravilnije nodule bez obzira na udjel perlitne faze nepovoljno utječu na životni vijek komponente s pukotinom. Također, primjećuje se povoljan utjecaj pravilnog oblika nodula. Uzorci s većim brojem manjih, pravilnih nodula, bez obzira na udjel perlitne faze imaju dulji životni vijek u odnosu na uzorke s nodulama relativno većih dimenzija i nepravilnijeg oblika, uz manji udjel perlita. Rezultati pokazuju da udio perlitne faze u mikrostrukturi nodularnog lijeva ne utječe značajno na životni vijek ciklički opterećene komponente ukoliko njegov udio ne prelazi 10%.

Zbog povoljne kombinacije mehaničkih svojstava (relativno visoka vlačna čvrstoća i žilavost), nodularni lijev se upotrebljava u mnogim konstrukcijskim aplikacijama, kao što su cijevi, različiti dijelovi automobila itd. Brojne, uspješne primjene nodularnog lijeva za kritične komponente u svim područjima industrije ističu njegovu svestranost i ukazuju na mnoga dodatna područja primjene.

6. NOVITETI U ISTRAŽIVANJIMA DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI

Fenomen temperaturne promjene koji nastaje kod čvrstih tijela kao posljedica elastične deformacije inducirane promjenom volumena naziva se termoelastičan efekt. Analitički model termoelastičnog efekta, koji je kombinacija termodinamičkih zakona i konstitutivnih jednadžbi teorije elastičnosti, linearan je za većinu metala i njegovih legura [36, 37].

Povećanje volumena pri statičkom vlačnom testu u elastičnom području rezultira smanjenjem temperature, dok se kod tlačnih testova temperatura uzorka u elastičnom području povećava. Temperaturni minimum pri statičkom vlačnom testu dešava se neposredno prije točke tečenja [37].

Tijekom procesa deformiranja materijal ne smije izmijeniti toplinu s okolinom, kako bi promjena bila adiabatska. Tijekom adiabatske elastične deformacije pod pretpostavkom linearnog i izotropnog elastičnog ponašanja materijala, temperaturna promjena pretpostavljena je jednadžbom termoelastičnosti [38]:

$$\Delta T = \frac{-\alpha \cdot T}{\rho \cdot C_p}\left(\sigma_1 + \sigma_2\right), \tag{10}$$

gdje α predstavlja koeficijent temperaturne ekspanzije, T sobnu temperaturu uzorka, ρ gustoću materijala, C_p toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, σ_1 i σ_2 su glavna naprezanja. Suma $\left(\sigma_1 + \sigma_2\right)$ predstavlja prvu invarijantu naprezanja, gdje je treća komponenta prve invarijante (glavno naprezanje σ_3) nula na površini tijela. Treba naglasiti da jednadžba (10) vrijedi samo za adiabatsko stanje (stanje u kojem nema dovođenja ili odvođenja topline) te za elastično područje naprezanja. Za plastično područje ova jednadžba više ne vrijedi [38].

Tijekom daljnjeg procesa deformacije ulaskom u područje trajnih deformacija opterećeni uzorak dosegne stanje pri kojem njegova temperatura počinje rasti. Tada dolazi do loma veza unutar kristalne rešetke pri čemu se veći dio mehaničke energije potroši za plastičnu deformaciju i ta lomom oslobođena energija disipira u obliku topline. Tada je makroskopska plastična deformacija dominantna. Dakle tijekom vlačne deformacije materijala temperatura uzorka prvo se smanjuje, dosegne minimum, a onda se brzo poveća. Temperaturna promjena tijekom elastične deformacije pri vlačnom testu metala i njegovih legura vrlo je mala i obično ne prelazi 1°C [37]. Iako se može činiti da je termoelastičan efekt zanemariv, treba naglasiti da on ima primjenu u eksperimentalnoj mehanici pri izračunavanju naprezanja u elastičnom području iz izmjerenog polja temperature [36]. Novije publikacije uključuju i određivanje granice tečenja temeljem promatranja porasta temperature [37], te određivanje dinamičke čvrstoće za *r*=-1 temeljem mogućnosti snimanja prvog plastičnog zagrijavanja u ovisnosti o vanjskom opterećenju ili naprezanju statičkog vlačnog testa [39] (slika 34).

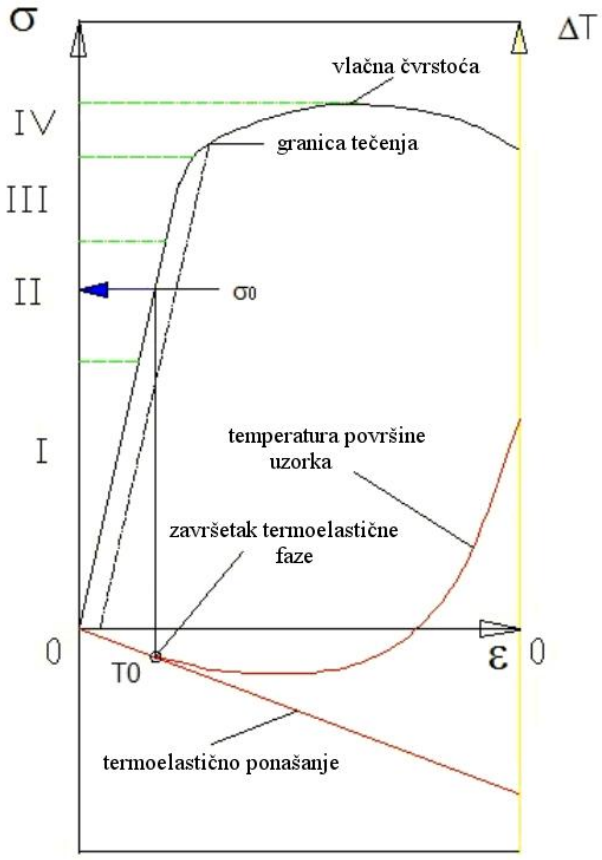
Kad je materijal podvrgnut vanjskom opterećenju svi njegovi kristali ne postižu granicu elastičnosti u isto vrijeme. Razlog tome je niz nepravilnosti kristala (orijentacija, dislokacija i slično). Prema tome elastična deformacija nekih kristala će dovesti do plastične deformacije drugih. Promatrajući opterećeni uzorak metala spregom termografske metode i klasične metode iz dijagrama naprezanje deformacija njegovo ponašanje može se podijeliti na sljedeći način [39]:

I. Opterećenje je toliko nisko da su svi kristali deformirani u elastičnom području. U ovoj fazi odnos deformacije i naprezanja je linearan i na makro i na mikrorazini.

II. Opterećenje je toliko da je većina kristala elastično deformirana, ali u nekim dijelovima postoji i elastična i plastična deformacija zajedno. A kad bi se uzorak rasteretio on bi se vratio u svoj prvobitni oblik. Makroskopski uzorak se ponaša savršeno elastično. U drugoj fazi se ne deformiraju svi kristali u elastičnom području, oni ostali su u plastičnom području. U ovoj fazi u makroskopskim uvjetima klasična krivulja naprezanje-deformacija je još ravna crta.

III. Opterećenje je toliko da se neki kristali deformiraju zajedno elastično i plastično. Pri tom opterećenju rasterećen uzorak ne poprima prvobitan oblik nego se trajno deformira.

IV. Opterećenje je doseglo tu razinu da je većina kristala plastično deformirana. Kako se opterećenje povećava elastična deformacija stalno opada, a kad opterećenje prestane trajna deformacija ostaje sve očitija.



Slika 34. Dijagram naprezanje – deformacija u kombinaciji s dijagramom promjena temperature – deformacija [39]

Risitano u svom radu [39] kaže da je statičkim vlačnim testom pomoću termokamere (infracrvene kamere) moguće pronaći granicu dinamičke izdržljivosti R_d za koeficijent asimetrije r = -1. Postupak je sljedeći: Infracrvenom kamerom promatra se temperatura s površine uzorka tijekom statičkog vlačnog testa. Dobiveni rezultati prikazuju se u ovisnosti $\Delta T - \varepsilon$, kako je shematski prikazano na slici 34. U početnom dijelu ovisnost promjene temperature o deformaciji je linearna (termoelastična faza). Prvo odstupanje od linearnosti

promatrane ovisnosti promjene temperature s površine uzorka i deformacije označeno je na slici 34 s temperaturom T_0 (završetak termoelastične faze). Povezivanjem očitane temperature tj. očitane deformacije s $\sigma - \varepsilon$ dijagramom tog statičkog vlačnog pokusa dolazimo do iznosa naprezanja koje je jednako dinamičkoj izdržljivosti R_d^{-1}. Rezultati u opisanom radu prikazani su u tablici 2. Odstupanje dobivene vrijednosti dinamičke izdržljivosti statičkim vlačnim testom i ispitivanjem zamaranjem je svega 10% [39].

Tablica 2. Objedinjeni rezultati testova [39]

Uzorak	Dinamička izdržljivost, R_d^{-1}, MPa		
	Statički vlačni test	Dinamički test	
1	108	110	
2	117	97	
3	105	102	
Uprosječene vrijednosti	110	99	Greška, %
			10

7. ZAKLJUČAK

U radu su detaljno opisani pregled i provedba dinamičkih ispitivanja metalnih materijala. U okviru kratkotrajnih dinamičkih ispitivanja opisana je udarna radnja loma po Charpy-u, a rezultati dugotrajnih dinamičkih ispitivanja objašnjeni su kroz Wöhlerov i Smithov dijagram. Također je pokazano kako oblik lomne površine određuje vrstu loma.

Razmatran je utjecaj pojedinih faktora na ove dvije vrste dinamičkih ispitivanja. Kod kratkotrajnih dinamičkih ispitivanja najveći utjecaj na žilavost ima temperatura materijala, dok kod dugotrajnih dinamičkih ispitivanja velik utjecaj na vrijednost dinamičke čvrstoće ima stanje površine.

Kao predstavnik metalnih materijala odabran je nodularni lijev za koji je interpretirana analiza utjecaja mikrostrukture na rezultate dinamičkih ispitivanja, iz dostupnih literaturnih izvora. Pokazano je da se više vrijednosti udarne žilavosti nodularnog lijeva dobivaju s porastom udjela ferita u mikrostrukturi, smanjenjem udjela perlita u mikrostrukturi, povećanjem broja nodula/mm^2 i nodularnosti grafita. Pokazano je da veće nodule, nepravilnijeg oblika smanjuju i zamornu čvrstoću. Uzorci s većim brojem manjih, pravilnih nodula, bez obzira na udjel perlitne faze imaju dulji životni vijek u odnosu na uzorke s nodulama relativno većih dimenzija i nepravilnijeg oblika, uz manji udjel perlita.

Analizom literaturnih izvora otkriveno je kako je upotrebom termokamere, koja omogućava praćenje temperature s površine uzorka tijekom njegove deformacije pri statičkom vlačnom pokusu, moguće na granici završetka termoelastičnog efekta odrediti 10% odstupanje iznosa dinamičke izdržljivosti za koeficijent asimetrije r = -1 od dinamičke izdržljivosti dobivene dugotrajnim i opsežnim dinamičkim ispitivanjima.

8. LITERATURA

[1] Glavaš, Z., Unkić, F.: Lijevanje željeznih metala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.

[2] Čanžar, P.: Eksperimentalno i numeričko modeliranje zamornog ponašanja nodularnog lijeva, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

[3] ..... http://www.micportal.net/hr, [cited 17.11. 2014.].

[4] ..... http://netmobil.net.hr/vijesti, [cited 17.11. 2014.].

[5] Franz, M.: Mehanička svojstva materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.

[6] Bauer, B.: Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.

[7] Schütz, W.: A history of fatigue, Engineering Fracture Mechanics, 1996, 54(2), 236-300.

[8] Korun-Curić, K.: Određivanje zamorne čvrstoće materijala pomoću umjetne neuronske mreže, Kvalifikacijski doktorski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje, Split, 2013.

[9] Sharp, M. L., Nordmark, G. E., Menzer, C. C.: Fatigue Design of Aluminium Components and Structures, McGraw-Hill, New York, 1996.

[10] Fuchs, H. O., Stephens, R. I.: Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, 1980.

[11] ..... Tehnička enciklopedija, svezak 12, 1990.

[12] Jelaska, D.: Osnovi mehanike loma, 1. dio: Začeće pukotine, radni materijali, Split, 2013.

[13] Rešković, S.: Ispitivanje materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2011.

[14] Žiha, K., Kodvanj, J., Ljubenkov, B., Bakić, A.: Značaj eksperimentalne mehanike u brodogradnji, XX. simpozij Teorija i praksa brodogradnje, Žiha, K., Editor, 2012, FSB Zagreb, BI Zagreb, Zagreb, Hrvatska.

[15] Vitez, I.: Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2006.

[16] Perković, M.: Utjecaj uvjeta ispitivanja na udarni rad loma, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[17] Roe, G. J.: Notch Toughness of Steels, in Metals Handbook, Properties and Selection: Irons and Steels. Vol. 1, Ninth Edition, ASM International, Metals Park, Ohio, 1978.

[18] Filetin, T.: Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.

[19] Filetin, T., Franz, M., Ivušić, V., Indof, J., Španiček, Đ., and Filetin, Ž.: Svojstva i karakteristike materijala - katalog opisa, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 1994.

[20] ..... HRN EN 10045-1 - Hrvatska norma:Metalni materijali - Ispitivanje žilavosti prema Charpyju - Prvi dio: Metoda ispitivanja.

[21] Franz, M.: Ispitivanje mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala, Inženjerski priručnik IP4. 1998, Školska knjiga, Zagreb.

[22] Callister, W. D.: Fundamentals of Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.

[23] Glavaš, Z.: Optimizacija udarne žilavosti nodularnog lijeva metodama umjetne inteligencije, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški Fakultet, Sisak, 2007.

[24] Jelaska, D.: Elementi strojeva, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje, Split, 2005.
[25] Kranjčević, N.: Proračun spojeva konstrukcija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
[26] Turkalj, G.: Analiza naprezanja dinamički opterećenih konstrukcija, radni materijali, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka.
[27] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1987.
[28] Bhat, S., Patibandla, R.: Metal Fatigue and Basic Theoretical Models: A Review, School of Mechanical and Building Sciences, Vellore Institute of Technology, India, Tamil Nadu, 2010.
[29] Salopek, V.: Dinamička izdržljivost brodograđevinskog čelika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
[30] Almar-Naess, A.: Fatigue Handbook, Tapin Publisher, Trondheim, 1985.
[31] Redžić, N.: Smithov dijagram, Univerzitet u Tuzli, Mašinski fakultet, Tuzla.
[32] Husnjak, M.: Mehanika loma, 2009, skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
[33] Campbell, F. C.: Elements of Metallurgy and Engineering Alloys, Chapter 14: Fatigue, ASM International, Ohio, 2008.
[34] Obsieger, B.: Elementi strojeva I, Svezak 1, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2001.
[35] Čanžar, P., Tonković, Z., Kodvanj, J.: Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron, Materials Science & Engineering A, 2012, 556, 88-99.
[36] Čanađija, M., Munjas, N.: O toplinskim pojavama pri elastičnim i plastičnim deformacijama, Peti susret Hrvatskog društva za mehaniku, 2013, Terme Jezerčica, Donja Stubica.
[37] Oliferuk, W., Maj, M., Litwinko, R., Urbanski, L.: Thermomechanical coupling in the elastic regime and elasto-plastic transition during tension of austenitic steel, titanium and aluminium alloy at strain rates from 10^-4 to 10^-1 s^-1, European Journal of Mechanics - A/Solids, 2012, 35(0), 111-118.
[38] Marendić, P., Veljača, T., Krstulović-Opara, L., Domazet, Ž.: Uvod u termoelastičnu analizu naprezanja, Drugi susret Hrvatskog društva za mehaniku, 2008, Split.
[39] Risitano, G., Risitano, A., Clienti, C.: Determination of the fatigue limit by semi static tests, Convegno Nazionale IGF XXI, 2011, Cassino (FR), Italia, 322-330.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI:

Ime i prezime:	Alen Draganović
Datum i mjesto rođenja:	17. kolovoza 1985., Sisak
Adresa:	Školska 39 a, 4400 Sisak
Telefon:	044/535-310, 098 838 977
E-mail:	alendrose@outlook.com

OBRAZOVANJE:

1992. - 2000. - osnovna škola, Viktorovac, Sisak
2000. – 2003. - srednja škola, Industrijsko-obrtnička, Sisak
2011. - - Metalurški fakultet Sisak, Stručni studij ljevarstvo

ZAPOSLENJE:

2004. - 2005. - Metaling, Sisak
2007. - 2008. - Zm Montag, Zagreb
2008. - 2012. - CMC, Sisak

VJEŠTINE:

Rad na računalu
Strani jezik: Engleski