

LOMOVI METALNIH DIJELOVA

FRACTURES OF METALLIC PARTS

*Mirsada Oruč¹,
Raza Sunulahpašić²,
Mustafa Hadžalić³*

^{1,2}Metalurško-tehnološki
fakultet, Univerzitet u
Zenici

³Institut“ Kemal
Kapetanović“,
Univerzitet u Zenici

Cljučne riječi: lomovi,
vrste lomova, uzroci i
ispitivanje lomova

Key words: fractures,
types of fractures, causes
and fracture testing

Paper received:
10.09.2019.

Paper accepted:
14.11.2019.

1. UVOD

Lomovi su se počeli intenzivno istraživati nakon katastrofa i lomova nekih velikih konstrukcija u prvoj polovini XX vijeka. Rezultati tih istraživanja omogućili su izradu i korištenje prilično sigurnih konstrukcija i prevoznih sredstava.

Lom u stvari nastaje kada opterećenje nadvlada kohezivne sile čestica materije. Na mjestima lomova nastaju nove slobodne površine s razdvojenim vezama između čestica. Uzroci povećanja naprezanja do prekida veza mogu biti različiti.

Fizički uzrok loma je djelovanje naprezanja koje zajedno s uticajem sredine razara atomsku i/ili

Pregledni rad

REZIME

Lom nekog dijela ili elementa konstrukcije se može definirati i kao makroskopsko razdvajanje materijala koje dovodi do gubitka nosivosti čvrstog tijela. Lom je krajnji rezultat plastične deformacije i nastaje kada se iscrpi sva mogućnost materijala u pogledu elastične i plastične deformacije. To je najgori slučaj inženjerske prakse, jer može imati velike posljedice za ljude i okolinu.

Istraživanje lomova i njihovih uzroka počelo je s mnogobrojnim katastrofalnim lomovima koji su prouzrokovali osim materijalnih šteta i gubitak ljudskih života. Ta istraživanja traju već godinama ali i pored velikih saznanja mnogi uzroci lomova nisu ni do danas u potpunosti utvrđeni. Radi toga istraživanja su dovela do razvoja novih metoda i novih postupaka ispitivanja u uslovima sličnim uslovima eksploatacije a u cilju svodenja lomova na najmanju mjeru, pogotovo onih iznenadnih i neočekivanih. U ovome radu daće se kratki pregled vrsta lomova, ispitivanja lomova i mogućih uzroka lomova metalnih dijelova u toku eksploatacije.

Subject review

SUMMARY

The fracture of a part or element of a construction can also be defined as a macroscopic separation of the material that leads to the loss of a solid body load. The fracture is the end result of plastic deformation and occurs when all the potential of the material in terms of elastic and plastic deformation is exhausted. This is the worst case of engineering practices, as it can have great consequences for people and the environment.

The study of fractures and their causes began with numerous disastrous failures that caused apart from material damage and loss of human lives. These studies have been going on for years, but despite great knowledge, many of the causes of fractures have not been fully established till now. For this reason, research has led to the development of new methods and new testing procedures in conditions similar to exploitation conditions in order to minimize fracture, especially those sudden and unexpected. In this paper, a brief overview of the types of fractures, fracture testing and possible causes of fractures of metal parts during exploitation will be presented.

1. INTRODUCTION

Fractures began to be intensively explored after disasters and fractures of some large structures in the first half of the 20th century. The results of this research enabled the development and use of fairly safe structures and means of transport.

Fracture actually occurs when the load overcome cohesive forces of particles of matter. Fractures result with new free area that separates connections between particles. The causes of increasing stress to break the connection may be different.

The physical cause of the fracture is the stress, which together with the influence of the environment destroys the atomic and / or

molekularnu vezu, te na taj način formira slobodnu površinu. Lomovima materijala bavi se i posebna grana nauke, Mehanika loma.

Velika primjena metala kao konstrukcionog materijala pripisuje se prvenstveno vrlo povoljnim mehaničkim svojstvima koja se određuju putem određenih mehaničkih ispitivanja. Tokom eksploatacije konstrukcije dešavaju se nepoželjni lomovi konstrukcija. Do loma konstrukcije dolazi onda kada je materijal konstrukcije izložen opterećenjima koje ne može izdržati. Veličina tih opterećenja zavisi od vrste napreznja te o tipu i stepenu promjenljivosti napreznja. U praksi su češći lomovi nastali uslijed promjenljivih opterećenja u odnosu na statičke lomove. Opterećenja koja izazivaju dinamički lom znatno su manja od napona tečenja. Lom koji nastaje promjenljivim, tj. dinamičkim opterećenjima posljedica je pojave koja se naziva zamor ili zamaranje materijala. Razlozi otkazivanja nosivosti materijalnog medija (osnovnog materijala ili zavara) uslijed učestalog promjenljivog opterećenja privlače pažnju konstruktora i metalurga već više od 150 godina [1].

Čelični livovi, bijeli tvrdi liv, sivi liv, nodularni (žilavi) liv, temper (kovni) liv spadaju u skupinu željeznih livova, dok pod konstrukcione materijale se svrstavaju opšti konstrukcioni čelici, čelici povišene čvrstoće, ultračvrsti čelici, čelici za cementiranje, čelici za poboljšanje, čelici za opruge, koroziono postojani čelici, vatrootporni čelici [1]. Vrlo je velika primjena navedenih materijala u funkcionalnim konstrukcijama, kao što su brodovi, automobili, vozovi, tramvaji, vjetroagregati i sl. (slika 1.). Gotovo se ne može ni zamisliti konstrukcija čiji sastavni materijali nisu metalni materijali.

molecular bond, thus forming a free surface. The special branch of science deals with the fracture of materials, Fracture Mechanics.

Wide application of metals as structural materials is attributed primarily to the very favorable mechanical properties which are determined by specific mechanical tests. During the exploitation of the construction, undesirable fracture may occur. Fracture of the structure occurs when the material is exposed to loads that it cannot withstand. The size of these loads depends on the type of stress and the type and degree of variability of stress. In practice, there are higher number of fractures resulting from dynamic loads compared to fractures resulting from static loads. Loads that cause dynamic fracture are considerably less than the yield stress. Fracture resulting from changeable, ie dynamic loads is a consequence of a phenomenon called fatigue or material fatigue. The reasons for the failure of the construction material (basic material or welding) due to the dynamic load attract the attention of the constructors and the metallurgists for more than 150 years [1].

Steel castings, white cast iron, gray cast iron, ductile cast iron, malleable cast iron belong to a group of iron based castings, while general construction steels, high strength steels, ultra strength steels, case hardening steels, steels for quenching and tempering, spring steel, stainless steels, heat resistant steels are classified as construction materials [1]. There is a very large scale of application of above mentioned materials in the different constructions, such as boats, cars, trains, trams, turbines, etc. (Figure 1).



Slika 1. Primjeri primjene metalnih materijala [1]
Figure 1. Examples of the application of metallic materials [1]

A sve ove slikom prikazane konstrukcije i mnoge druge ne prikazane izložene su vremenski promjenljivim nivoima opterećenja, tj. napreznja. Na primjer, brodovi su izloženi vremenski promjenljivim nivoima opterećenja uslijed: talasnih opterećenja, sila inercije

It is almost impossible to imagine constructions whose integral materials are not metallic materials. And all of these metallic structures are exposed to time-varying loads, i.e. stresses. For example, ships are exposed to time-varying loads due to: wave loads, inertia force induced

izazvanih ubrzanjem broda te dinamičkih opterećenja. Ispitivanja materijala se vrše i u svim slučajevima otkazivanja materijala u eksploataciji radi utvrđivanja njegovog uzroka. Zamjena havarisanog dijela mašine ili konstrukcije mora se bazirati na upotrebi dobro ispitanog materijala, respektujući pri izboru novog materijala, po mogućnosti, eventualno utvrđeni razlog otkazivanja. Pri zamjeni treba isključiti svako naknadno tretiranje materijala poslije ispitivanja, kao npr. savijanje, smanjivanje debljine, navarivanje, mjestimično zagrijavanje i sl. u cilju podešavanja dijela za primjenu (to se često dešava upravo u održavanju). Sva ova tretiranja mogu da cijelom komadu ili na njegovim pojedinim mjestima dovedu do promjene svojstava, odnosno najčešće do njihovih pogoršanja, što stvara još veći rizik da zamijenjeni dio neće izdržati ni približno onoliko kao original. Međutim, obimna ispitivanja vrše se pri razvijanju novih materijala ili tehnologija ili u slučaju potreba proširenja mjesta primjene postojećih materijala. Sakupljeni rezultati ispitivanja kroz duži vremenski period služe kao osnova za standardizaciju kvaliteta materijala [2].

2. ISPITIVANJE METALNIH MATERIJALA

Ispitivanje materijala se vrši ne samo radi određivanja svojstava prilikom proizvodnje ili upotrebe 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 materijala. Osnovni zadaci ispitivanja materijala su slijedeći [3]:

- određivanje pogodnih veličina za karakterizaciju svojstava materijala i njihovo kvantitativno izražavanje u obliku upotrebljivih karakteristika,
- kontinuirana 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 mašinskih dijelova u eksploataciji,
- razvoj novih materijala.

Na osnovu nekih mehaničkih i tehnoloških svojstava materijala utvrđuju se tehnološki parametri u proizvodnji. Uz ova svojstva dodaju

by movement and acceleration of the ship and dynamic loads. Material testing is carried out in all cases of failure of materials in service to determine its cause. Replacement of a failure part of the machine or construction must be based on the use of well-tested material, and if possible taking into account the cause of failure in new material selection. When replacing metallic parts, any subsequent treatment of the material after the test should be avoided, such as, for example, warping, reduction of thickness, weld-ons, spot heating etc. in order to adjust the part for application (this often happens during maintenance). All these treatments can lead to a change in properties, or most often to their deterioration, throughout the whole piece or in its particular places, which creates even greater risk that the replaced part will not withstand as much as the original. However, extensive tests are carried out in developing new materials or technology or in case of expansion of the application of existing materials. Test results collected over a longer period of time serve as the basis for standardization of quality of the materials [2].

2. TESTING OF METALLIC MATERIALS

Material testing is done not only to determine the properties during the production or use, but also to improve the properties in order to get materials for new products and new application areas. Everyday technological development follows the introduction of new and improvement of existing methods and procedures of materials testing. The main tasks of the materials testing are as follows [3]:

- Determination of suitable size for characterizing material properties and their quantitative expression as a useful feature,
- Continuous and wide automated control of material property changes that occur in the production, processing and treatment of materials by detecting possible defects in material,
- Periodic control of the material after a certain period of exploitation,
- Research of various examples of damage and causes of fractures of machine parts in exploitation,
- Development of new materials.

Based on some mechanical and technological properties of materials specific parameters in production are determined. Besides mechanical and technological properties, also exploitation, i.e. service properties, then the physical and

se još i eksploataciona, tj upotrebna svojstva, zatim fizička i hemijska svojstva, koja uglavnom određuju područje primjene.

U osnovna svojstva i za potrebe inženjera najvažnija su *mehanička svojstva* materijala: čvrstoća, napon tečenja, modul elastičnosti, izduženje, žilavost, tvrdoća, dinamička izdržljivost. Mehanička karakteristika ili svojstvo materijala predstavlja mjerljivu veličinu materijala, koja se može brojčano odrediti pomoću standardizovanih metoda ispitivanja, npr. zatezna čvrstoća nekog čelika i sl.

Tehnološka svojstva materijala pokazuju njegovu sposobnost za obradu različitim postupcima kao što je: livkost, deformabilnost u vrućem ili hladnom stanju, zavarivost, sabijanje, savijanje, duboko izvlačenje itd. uz obavezno opisno ocjenjivanje-zadovoljava ili ne zadovoljava.

Hemijska svojstva su hemijski sastav materijala i otpornost na koroziju, dok *fizička svojstva* predstavljaju cijelu grupu svojstava kao što su električna, magnetna, toplotna, optička itd.

Eksploataciona svojstva pokazuju otpornost materijala pri njegovoj upotrebi (npr. otpornost na trošenje).

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 ϵ - σ krivulje pokazuje koliko je energije potrebno za deformaciju i lom materijala u uslovima statičkog zateznog opterećenja (slika 2.).

3. VRSTE LOMOVA

Podjela lomova može biti različita a najčešća je podjela lomova koja uzima u obzir uslove opterećenja i tada se lomovi dijele na [2]:

- trenutni lom i to: lom sa deformacijom i lom bez deformacije,
- trajni lom i to: lom uslijed puzanja i lom uslijed zamaranja.

Prema prisutnosti odnosno odsutnosti plastične deformacije u neposrednoj blizini loma razlikuju se kruti i duktilni lom (slika 3.a i 3.b), odnosno materijali se dijele na krte i duktilne (žilave).

Između krto i žilavog loma nije moguće povući neku oštru granicu obzirom da u svim vrstama lomova postoji izvjesna plastična deformacija.

chemical properties, which mainly determine the area of application should be taken in consideration.

The basic properties of the materials (mostly used by engineers) are *mechanical properties of materials*: strength, yield strength, modulus of elasticity, elongation, toughness, hardness, and fatigue strength. Mechanical characteristic or property of the material represents the measurable quantity of the material, which can be numerically determined using standardized test method, for example the tensile strength of a steel, etc.

Technological properties of materials exhibit their ability for processing using different methods such as: castability, deformability in the hot or cold state, weldability, compression, bending, deep drawing, etc. with the mandatory descriptive assessment-satisfies or fail.

Chemical properties are chemical composition of materials and corrosion resistance, while *physical properties* represent an entire set of properties such as electrical, magnetic, thermal, optical, etc.

Exploitation properties show the resistance of the material in its use (eg. wear resistance).

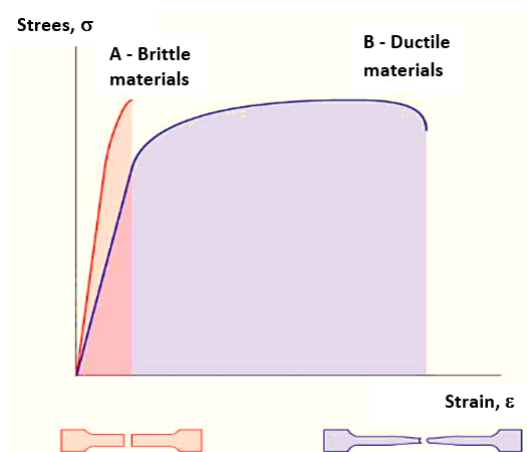
For most mechanically loaded structures it is very important to ensure a combination of sufficient strength and toughness. Namely, practice shows that a large number of fractures arise due to the inability to compensate the stress through plastic deformation. Thus, the phenomena of toughness are closely connected with the phenomena of permanent (plastic) deformation and the appearance of fracture. The area below the ϵ - σ curve shows how much energy is required for deformation and material fracture under static tensile stress conditions (Figure 2).

3. TYPES OF FRACTURES

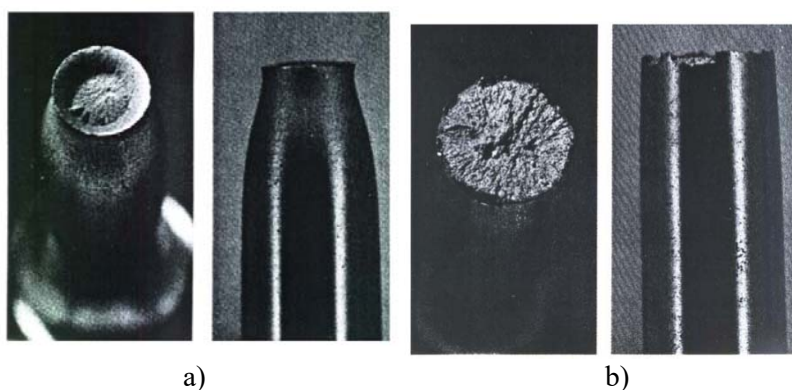
Different types of the material fractures based on load conditions can be classified as follows,[2]:

- the forced fracture: the fracture with or without deformation,
- the permanent fracture: the fracture due to creep and fracture due to fatigue.

According to the presence or absence of plastic deformation in the vicinity of the fracture the fracture can be divided to brittle and ductile (Figure 3a and 3b), or materials are divided to brittle and ductile. Between brittle and ductile fracture is not possible to draw a sharp boundary considering that in all kinds of fractures there is a certain plastic deformation.



Slika 2. Shematski prikaz ispitivanja zatezanjem za krte i žilave materijale [4]
Figure 2. Schematic diagram of tensile tests for brittle and ductile materials [4]



Slika 3. Izgled duktilnog loma poslije ispitivanja zatezanjem (a), izgled krtog loma poslije ispitivanja zatezanjem (b) [5]

Figure 3. Ductile fracture after the tensile test (a), brittle fracture after the tensile test (b) [5]

To ukazuje na činjenicu da praktično nema čisto krtog loma i da bi se lom ovog tipa preciznije mogao nazvati kvazi-krti lom [3]. Žilavi lom se karakteriše intenzivnom plastičnom deformacijom u svim etapama loma i nastaje pri naponu znatno iznad napona tečenja. Za žilavi lom nije potrebno uvijek da nastane i propagira pukotina. Do loma lako dovode procesi plastične deformacije. Žilavi lomovi su transkristalni jer se pukotina kreće kroz kristalna zrna.

Pojava krtog loma vezana je kako za strukturnu građu metala, tako i za eksploatacione uslove, prvenstveno radnu temperaturu, brzinu nanošenja opterećenja i postojanja ili odsustvo zareza. Osnovna razlika između žilavog i krtog loma je što kod žilavog loma pri rasprostiranju centralne pukotine mora postojati znatna plastična deformacija dok kod krtog loma prostiranje pukotine nije uslovljeno plastičnom deformacijom. Krti lom se javlja, po pravilu, u unutrašnjosti kristala, a širi se duž proste kristalografske ravni pojedinih zrna polikristala

That means that there is practically no clear brittle fracture and that the fracture of this type could be more precisely called quasi-brittle fracture [3]. Ductile fracture is characterized by severe plastic deformation in all stages of the fracture and it occurs at a stress significantly above the yield stress. Initiation and crack propagation is not always necessary for ductile fracture. Ductile fracture can easily start due to plastic deformation processes. Ductile fractures are transgranular because crack moves through the crystal grains.

The occurrence of brittle fracture is linked to the structure of metallic metal materials, and the exploitation conditions such as the operating temperature, the rate of application of the load and the existence or the absence of a notch. The main difference between ductile and brittle fracture is that ductile fracture crack propagation is followed by significant plastic deformation while the crack propagation of a brittle fracture is not followed by plastic deformation. Brittle

koja se naziva ravan loma. Snižanjem radne temperature krti lom, kao vrlo složen proces, uglavnom nastaje po granicama metalnog zrna, kada se govori o interkristalnom lomu, iako zavisno od strukturnih karakteristika može nastati lom po samim kristalima kada se govori o transkristalnom lomu. Sličan efekat, kao sniženje temperature, ima i povećanje brzine deformacije, tako se pri nekoj kritičnoj brzini deformacije javlja samo krti lom. Prikaz interkristalnog i transkristalnog krtog loma pri posmatranju na transmissionom elektronskom mikroskopu dat je na slici 4.



X 1700

a)



X 4900

b)

Slika 4. Interkristalni krti lom, čelik 4340 (a) i transkristalni krti lom, legura Alnico (b), TEM-replike [5]

Figure 4. Intergranular Fracture, Steel 4340 (a) and Transgranular Fracture, Alnico (b) alloy, TEM-Replica [5]

Poznato je da u praksi od 80% do 90 % lomova nastaje uslijed *zamaranja*. U eksploataciji mašina i uređaja je ustanovljeno da se izvjesni dijelovi, iako su statički pravilno proračunati, lome poslije izvjesnog vremena, ranije ili kasnije, zavisno od veličine dinamičkih naprežanja. Prema izgledu površine loma uslijed zamaranja, odnosno prema odnosu površine zone loma uslijed zamaranja i zone nasilnog loma (prema njihovom obliku i mjestu), mogu se pretpostaviti vrste i veličine naprežanja koje su izazvale lom.

Shematski prikaz loma usljed zamaranja dat je na slici 5. Sa slike se vidi da lom počinje uglavnom na defektima na ili blizu površine (uključci, pukotine i sl.) i prostire se stepenasto linijama odmaranja dok ne zauzme više od polovine površine kada se završava nasilnim

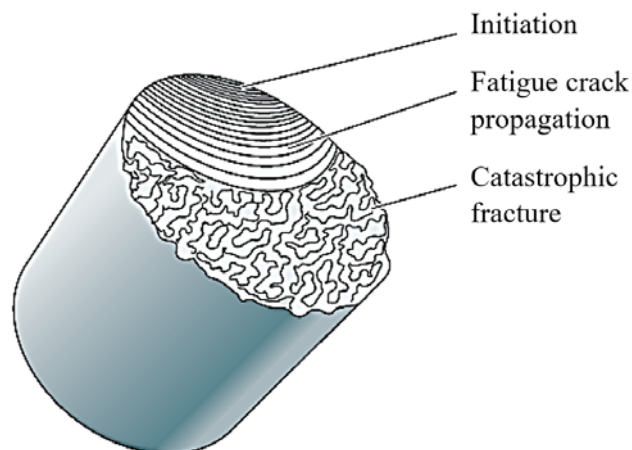
fracture occurs, as a rule, in the interior of the crystal and extends along the crystallographic free level of individual grains of polycrystal called the plane of fracture. By lowering the operating temperature brittle fracture, as a very complex process, generally follows grain boundaries, which is referring to as an intercrystalline fracture, although depending on the structural properties it can be formed by a single crystal fracture which is then referred to as a transgranular fracture. A similar effect, as a decrease in temperature, has an increase of deformation rate, so at some critical strain rate only a brittle fracture occurs. Figure 4. presents the intergranular and transgranular brittle fracture (transmission electron microscope).

It is known that in practice from 80% to 90% of fractures occur due to fatigue. In the exploitation of machines and devices it has been found that certain parts, even though they are statically correctly calculated, break after a certain time, earlier or later, depending on the amount of dynamic stresses. According to the appearance of the fracture surface due to fatigue, that is, according to the ratio of the fatigue fracture surface and the forced fracture surface (according to their shape and location), the types and quantities of stresses that caused the fracture can be assumed.

The schematic representation of fracture due to fatigue is given in Figure 5. The figure shows that the fracture begins mainly on defects on or near the surface (inclusions, cracks, etc.) and extends stepwise with the resting lines until it

lomom. Taj proces se odvija brzo i iznenada a zavisi od veličine i vrste promjenljivog opterećenja kojem je dio izložen te od vrste materijala, okoline i temperature. Površine zamornog loma su glatke a nasilni lom je uglavnom krti ili kombinacija oba tipa loma.

occupies more than half the surface when it ends with forced fracture. This process takes place quickly and suddenly and depends on the size and type of the variable load to which the part is exposed and the type of material, environment and temperature. The fatigue fracture surfaces are smooth and forced fracture is mainly a brittle fracture or a combination of both brittle and ductile fractures.



Slika 5. Shematski prikaz površine loma usljed zamaranja
Figure 4. Schematic representation of a fatigue fracture surface

Najrealnija objašnjenja mehanizma procesa zamaranja su ona koja se daju uz posmatranje makropojava i promjena u mikrostrukтури. Pri tome se uvijek polazi od pretpostavke o postojanju *inicijalnih pukotina* u realnim metalima u koje se mogu uvrstiti svi diskontinuiteti mikrostrukture. Pod djelovanjem vanjskog opterećenja nastaju nakon nekoliko hiljada ili stotina hiljada ciklusa linije klizanja, što je znak da se izvršila lokalna plastična deformacija u kristalima koji se nalaze na vrhu inicijalne pukotine odnosno greške u materijalu. Inicijalne pukotine uvijek nastaju na slobodnoj površini i reda su veličine 10 do 100 nm. Žarište budućeg loma može biti bilo kakvo površinsko oštećenje, tvrdi nemetalni uključak ispod površine ili neki drugi diskontinuitet u materijalu. Lom elementa konstrukcije izloženog promjenljivom opterećenju teško je predvidjeti, jer je on posljedica postepenog oštećivanja materijala, a nastaje tek kad naprezanje u preostalom dijelu presjeka postigne vrijednost njegove zatezne čvrstoće [3].

Puzanje predstavlja laganu plastičnu deformaciju metala, koji se tokom dužeg vremena nalazi pod dejstvom konstantnog statičkog opterećenja ili opterećenja koje se sporo mijenja i koje je manje od napona tečenja

The most realistic explanations of the fatigue process mechanism are the one that are provided with observation of macro-phenomena and changes in the microstructure. In doing so, the existence of initial cracks is always assumed in real metals (all discontinuities of the microstructure). Under the influence of an external load, after several thousand or hundreds of thousands of working cycles, slipping lines arise which is a sign of the local plastic deformation in crystals located at the top of the initial cracks or defects in material. Initial cracks always occur on the free surface and are of the order of 10 to 100 nm. The initial point of future fracture can be any surface damage, hard nonmetallic inclusions below the surface or other discontinuities in the material. Fracture of an element exposed to variable load is very hard to predict, because it is a consequence of the gradual damage of the material, and occurs only when the stress in the rest of the section reaches a value of its tensile strength [3].

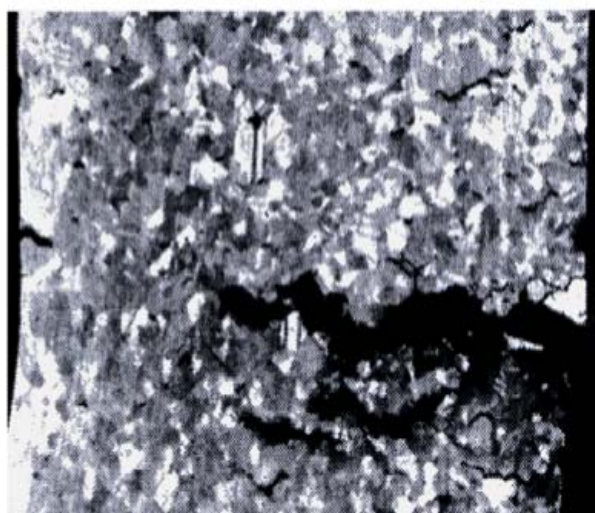
Creep is a slow plastic deformation of metal, which is over time subjected to constant static loads or loads that are slowly changing and which is less than the yield stress, at elevated temperature. For soluble metals, such as lead and tin, creep is a serious problem in

i to pri povišenoj temperturi. Za lakotopive metale, slične olovu i kalaju, puzanje predstavlja ozbiljan problem pri njihovoj eksploataciji čak i pri sobnoj temperaturi; u drugim slučajevima taj proces predstavlja bitan problem tek pri povišenim temperaturama. Temperatura puzanja kod metalnih materijala praktično je jednaka temperaturi rekristalizacije. Pri određivanju pogodnosti metala u uslovima visokih temperatura i većih naprežanja (npr. dijelova gasnih turbina i reaktivnih motora) otpornost metala puzanju je svojstvo prvostepene važnosti. Ono je odlučujuće za ocjenu ponašanja materijala, proračun i za njihov izbor za datu namjenu u uslovima eksploatacije.

Važno je naglasiti da se lom uslijed puzanja pri pritiskom opterećenju ne događa, a brzina puzanja se smanjuje tako brzo da primjetno razvijanje plastične deformacije ubrzo prestaje. Prema tome, puzanje pri sabijanju predstavlja ozbiljan problem samo u tim slučajevima kada je neophodno održati sasvim tačne dimenzije komada. Obrnuto je kod zatezanja jer deformacija pri zatezanju izaziva smanjenje poprečnog presjeka, što slabi efekat ojačavanja. U tom slučaju lom uslijed puzanja predstavlja običnu pojavu i suprotstavljanje puzanju u uslovima zateznog opterećenja često se mora uzeti kao osnovni zadatak pri projektovanju mašina i konstrukcija. Zbog toga su sva razmatranja u vezi puzanja vezana za djelovanje zateznog opterećenja. Izgled oštećenja puzanjem koji završava lomom dat je na slici 6.

exploitation even at room temperature; in other cases, this process is an important problem only at elevated temperatures. Creep temperature in metallic materials is practically equal to the temperature of recrystallization. In determining the suitability of metals under conditions of high temperatures and higher stresses (e.g., components of gas turbines and jet engines) creep resistance is a property of primary importance. It is crucial for the assessment of the behavior of materials for a given purpose in service conditions.

It is important to emphasize that the creep fracture under compressive load does not happen, and the creep rate is reduced so quickly that the noticeable development of plastic deformation soon ceases. Therefore, creep under compression is a serious problem only in those cases when it is necessary to maintain very accurate dimensions of the component. The creep under the tensile stresses is different, because the tension causes a decrease in cross-section, which weakens the effect of reinforcement. In this case, fracture due to creep represents an ordinary occurrence and preventing of creep in case of tensile load often has to be taken as the basic task in the design of machines and structures. Therefore, all considerations regarding creep are linked to the operation of components under the tension load. Appearance of creep damage ending with fracture is shown in Figure 6.



Slika 6. Razvoj oštećenja puzanjem [6]
Figure 6. Development of creep damage [6]

4. UZROCI I ISPITIVANJE LOMOVA

Najčešći uzorci lomova koji se sreću u upotrebi [4] su: pretjerano habanje, erozija, korozija, pretjerana elastična deformacija, pretjerana plastična deformacija ili tečenje, pukotine, udarna i zamorna opterećenja, neodgovarajuća mikrostruktura, nepravilni oblik konstrukcije, neodgovarajuće održavanje, pogrešna primjena itd. Važno je napomenuti da greške u materijalu mogu i najčešće uzrokuju lomove te da se prije izrade dijelova konstrukcija ili postrojenja materijali moraju ispitati da li odgovaraju traženom kvalitetu nekom od metoda bez razaranja (magnetna, radiografska, ultrazvučna itd.).

4.1. Ispitivanje lomova

Koraci koji su neophodni u metodologiji izvođenja analize otkaza, odnosno loma nekog sistema zavise od vrste otkaza. Analiza loma bavi se određivanjem uzroka otkaza, u opštem smislu, odnosno loma dijelova ili komponenti metala, kao najopasnije vrste otkaza. Analiza loma može biti definisana kao ispitivanje polomljenih komponenti i trenutka loma da bi se odredili uzroci loma. Svrha analize loma je definisanje mehanizma i uzroka loma i obično je ovo neophodno radi predupređivanja takvih pojava u sličnim konstrukcijama.

Određivanje krtoḡ ponašanja materijala (kao najopasnijeg) pri lomu vrši se ispitivanjem žilavosti udarnim savijanjem epruveta sa zarezom (BAS EN 10045-1). Vrijednosti udarne žilavosti pri raznim postupcima ispitivanja su različite i one zbog toga ne mogu biti konstante materijala, već samo njegove karakteristike. To također važi i za prelaznu temperaturu, jer za sve postupke ispitivanja nije moguće definisati zajedničku prelaznu temperaturu. Veliki broj katastrofalnih oštećenja i krtih lomova u eksploataciji javljao se na elastičnom nivou napona. Zato je trebalo definisati laboratorijsko ispitivanje sa pojavom loma u elastičnom području i na osnovu njega bliže odrediti sigurnost materijala i konstrukcija te definisati zajedničku prelaznu temperaturu.

Da bi se objasnila oštećenja i lomovi, prouzrokovani krtim lomom postavilo se pitanje, pod kojim uslovima se na dijelu od određenog materijala, koji pri ispitivanju na zatezanje ima povoljne karakteristike plastičnosti, pojavi krti lom. Na osnovu ovog pitanja razvijena je teorija mehanike loma, naročito na osnovu proučavanja iznenadnih i momentalnih lomova konstrukcija izrađenih od materijala za koje se smatralo da su

4. CAUSES AND TESTING OF THE FRACTURES

The most common patterns of fracture encountered in use [4] are: excessive wear, flow, crack, impact and fatigue loading, erosion, corrosion, excessive elastic deformation, excessive plastic deformation or inappropriate microstructure, inadequate design, inadequate maintenance, misapplication, etc. It is noteworthy that defects in material can and usually do cause fractures and that before making structural components materials must be tested if they match the required quality using some methods of non-destructive testing (magnetic, radiographic, ultrasound, etc.).

4.1. Fracture testing

The steps that are necessary in the methodology of performing a failure analysis, or failure of a system, depend on the type of failure. Failure analysis deals with the determination of causes of failure, in general, or fracture of parts or components of metals. The fracture analysis can be defined as the examination of the fractured components and the fracture moment to determine the causes of the fracture. The purpose of the fracture analysis is to define the mechanism and the cause of the fracture, and this is usually necessary to prevent such occurrences in similar structures.

Determination of the brittle behavior of the material (as the most dangerous) in fracture is performed by testing the toughness with bending by a blow of notched test piece (BAS EN 10045-1). The values of impact toughness in different test procedures are different, and therefore they can not be constants of the material, but only its characteristics. This also applies to the transient temperature, since it is not possible to define a common transient temperature for all test procedures. A large number of catastrophic damage and brittle fracture in exploitation appeared in the region of the elastic stresses. Therefore, it was necessary to define a laboratory examination with fracture in the elastic region and based on it more closely determine the safety of materials and structures and define the common transient temperature.

In order to explain the damage and breakage, caused by brittle fracture the main question was, under what conditions brittle fracture will appear on the parts of certain materials, which have favorable characteristics of plasticity when tested in tension. On the basis of this issue the theory of fracture mechanics was developed,

se slomile pri opterećenju koje je bilo suviše nisko da prouzrokuje plastičnu deformaciju.

Mehanika loma predstavlja primjenu zakona mehanike na rast pukotine. Polazna tačka je činjenica da nema idealnih materijala bez grešaka, tj. pretpostavlja se da u svakom materijalu postoji pukotina i vrše se teoretske i praktične analize uslova za njeno širenje kroz materijal. Osnovno je odrediti naprezanje pri kojem pukotina postaje nestabilna i počinje se širiti.

Mehanika loma je na prijelazu od čistog krtog loma ka kvazi-krtom (žilavo-krtom) lomu morala da proučava ne samo fenomen loma, već i deformaciju koja prethodi lomu. U slučaju čisto krtog loma deformacija je samo elastična, energija se troši na razvoj pukotine do njene kritične dužine, dok se lom odvija bez dodatnog utroška energije. U slučaju žilavo-krtog i žilavog loma znatna energija se troši za razvoj plastične deformacije, koja prethodi lomu i koja se razvija u procesu loma. Istraživanja su pokazala da su kod komponenti prisutne greške tipa pukotine i značajna koncentracija naprezanja, a u nekim slučajevima i unutrašnja naprezanja, zaostala od zavarivanja. Mehanika loma pruža mogućnost da se pokaže koliko je neracionalno i neopravdano konstruisanje na konvencionalan način, na osnovu zatezne čvrstoće, napona tečenja i napona izvijanja, uz primjenu stepena sigurnosti. Konvencionalni način konstruisanja se može primijeniti kod mnogih konstrukcija, ali postaje neupotrebljiv ako se posmatra konstrukcija kod koje može postojati pukotina [7].

Nivo razvoja koji je do danas ostvaren u Mehanici loma omogućava njenu praktičnu primjenu u veoma važnim područjima projektovanja i konstruisanja. Projektant koji želi da realizuje pouzdanu konstrukciju primjenjuje postavke Mehanike loma pri:

- procjeni vijeka konstrukcije prije puštanja u pogon i u toku eksploatacije;
- određivanju zaostalih naprezanja;
- izboru materijala;
- pri optimiziranju konstrukcije.

Konačno, ako je pukotina ostala neotkrivena u narednim kontrolama, ona može lako da dostigne kritičnu veličinu (označenu sa K_{Ic}), pri kojoj pojava loma više nije kontrolisana. U toj tački dolazi do katastrofalnog loma. Trenutak stvaranja mikropukotina pri krtom lomu je veoma teško odrediti, tako da se samo može govoriti o uslovno mogućem njihovom nastajanju. Za stvaranje mikropukotine povoljni

especially on the basis of a study of sudden and instantaneous fracture of structures made of materials that were thought that have failed under load that was too low to cause plastic deformation.

Fracture mechanics is the application of the laws of mechanics to crack propagation. The starting point is the fact that there are no ideal materials without errors, i.e. it is assumed that there are cracks in any material and theoretical and practical analysis of the conditions for its propagation through the material are performed. It is essential to determine the stress at which the crack becomes unstable and begins to spread.

The fracture mechanics had to investigate not only the fracture phenomenon, but also the deformation that preceded the fracture at the transition from a pure fracture to a quasi-brittle (ductile-brittle) fracture. In the case of a purely brittle fracture, the deformation is only elastic; the energy is spent on the development of the crack to its critical length, while the fracture takes place without additional energy consumption. In the case of a ductile-brittle and ductile fracture, considerable energy is consumed to develop a plastic deformation that precedes fracture and develops in the fracture process. Studies have shown that the errors as a crack and a significant stress concentration are present in components and in some cases the internal stress after welding process. Fracture mechanics provides opportunities to show how irrational and unwarranted are the conventional methods of design based on tensile strength, yield strength and straining stresses using the safety level. The conventional way of design can be applied in many structures, but it becomes unusable if considers the structure in which there may be a crack [7].

The level of development that has been achieved so far in the Fracture Mechanic enables its practical application in very important areas of design and construction. The designer who wants to realize a reliable construction will apply Fracture Mechanics parameters in case of:

- the estimation of lifetime of the structure before commissioning and during exploitation;
- determination of residual stresses;
- selection of material;
- structure optimization.

Finally, if the cracks remain undetected in subsequent controls, it can easily reach a critical size (indicated by K_{Ic}), in which the fracture phenomenon is no longer controlled. At this

uslovi su samo u nekim mikrozapreminama, a najčešće su posljedica klizanja, lokalnog pritiska, traka savijanja, granice zrna, dvojnikanog sloja i sl. Stvorena pukotina pod određenim uslovima se razvija sve do njenog prolaza kroz cijeli poprečni presjek, kada nastaje potpun lom.

Mehanika loma je omogućila da se definišu „nova“ ispitivanja, kojim se određuju veličine parametara, potrebnih da se ocjeni sklonost ka razvoju pukotine i kritični uslovi brzog razvoja loma. Međutim, mnogi konstrukcioni dijelovi od materijala niske i srednje čvrstoće, a koji se susreću u velikom broju konstrukcija su nedovoljne debljine da bi se u njima održalo stanje ravne deformacije pri mirnom opterećenju i normalnim temperaturama eksploatacije. U takvim slučajevima analiza korištena za proračun vrijednosti K_{Ic} je neupotrebljiva zbog linearno-elastičnog ponašanja i veće plastične zone oko vrha pukotine. Pri ovim uslovima za analizu takvog stanja se koriste drugačije metode. Neke od tih metoda su [8]:

1. Otvaranje pukotine (COD);
2. Analiza R krive;
3. J – integral;
4. Metode cijepanja (kidanja).

Razvoj konstrukcija i mašina, gdje je potrebna mnogo veća sigurnost (nuklearne instalacije avionska industrija, instalacije za transport fluida i sl.) inicirao je razvoj drugih metoda za definisanje lomne žilavosti. U uslovima specifičnih eksploatacionih situacija provedena su dalja istraživanja u oblasti mehanike loma i na osnovu rezultata tih istraživanja definisana je druga karakteristika materijala, tzv. dinamička lomna žilavost, K_{Id} , odnosno K_{IPC} .

Također, pojava i rast pukotina usljed promjenljivog opterećenja veoma je aktuelna u brodogradnji. Proces zamaranja materijala odvija se u tri faze: nastanak pukotine, rast pukotine, te nestabilan rast pukotine i lom materijala. Kako rast pukotine pri svakom ciklusu opterećenja zavisi o naprezanjima i deformacijama oko vrha pukotine, može se uspostaviti zavisnost između brzine rasta pukotine i raspona faktora intenziteta naprezanja, ΔK . Tako je rast pukotine u drugoj fazi dat Paris- Erdoganovom jednačinom: $da/dN=C \cdot \Delta K^m$, gdje je da/dN brzina rasta pukotine a C i m su parametri rasta.

Ovo je samo kratki pregled i ispitivanje lomova metalnih dijelova, povezan s ispitivanjem materijala s greškama koje mogu biti uzroci iznenadnih lomova pri eksploataciji i koji se

point a catastrophic fracture occurs.

The moment of creation of microcracks in brittle fracture is very difficult to determine, so it can be only discussed about possibilities of their emerging. Favorable conditions for creation of microcracks are only in some micro volumes as a consequence of a slipping, local pressure, tape bending, grain boundaries, twinning condition, etc. Cracks created under certain conditions continue to develop until it passes through the entire cross section completing fracture process. Fracture mechanics has enabled definition of new tests, which determine the values of the parameters necessary for the assessment of the tendency to develop cracks and critical conditions for rapid development of fracture. However, many structural components of materials of low and medium strength are not thick enough to apply the state of plane strain in static load and normal temperature operation. In such cases, the analysis used to calculate the value of K_{Ic} is unusable due to the linear-elastic behavior and the larger plastic zone around the tip of the crack. Under these conditions, different methods are used to analyze this condition. Some of these methods are [8]:

1. Crack opening displacement (COD);
2. R curve analysis;
3. J - integral;
4. Methods of splitting (breaking).

The development of construction and machines, where much greater safety is needed (nuclear installations, aircraft industry, fluid transportation, etc.) initiated the development of other methods for defining the fracture toughness. In terms of specific situations of exploitation further research were carried out and based on the results other characteristic of materials is defined, so-called dynamic fracture toughness, K_{Id} , or K_{IPC} .

Also, the emergence and growth of cracks due to variable load is very important in the shipbuilding industry. Material fatigue process takes place in three stages: crack initiation, crack growth, and unstable growth of cracks and fracture of the material. As the growth of cracks at each loading cycle depends on the stress and deformation around the crack tip, a relationship between the crack growth rate and the stress intensity factor range, ΔK , can be established. Thus the growth of the crack in the second phase was given to Paris-Erdogan's equation: $da/dN=C \cdot \Delta K^m$, where is da/dN crack growth rate, and C and m are growth parameters.

This is only a brief overview and examination of

moraju provjeravati prije ugradnje ili tokom eksploatacije. Ispitivanja su zahtjevnija i opširnija ukoliko se radi o dijelu ili cijeloj konstrukciji koja ima zahtjevnu namjenu s aspekta sigurnosti i vremenu trajanja.

5. ZAKLJUČCI

Projektovanje i izrada konstrukcija i dijelova postavlja pitanje izbora konstrukcionog materijala, što je kod konstrukcija uglavnom metalni materijal a od njih najširu primjenu ima čelik. U eksploataciji konstrukcija postoje mnogi slučajevi neočekivanih lomova pri naponima nižim od proračunskih a češći su kada se napon približava naponu tečenja.

Prisustvo bilo kakve greške u materijalu, posebno površinske ili one blizu površine, smanjuje komponentu rada koja se troši za nastanak pukotine.

Za mnoge metalne materijale zahtijeva se propisana vrijednost udarne žilavosti na određenoj, uglavnom sniženoj temperaturi (čelici koji pokazuju žilavi lom) što smanjuje vjerovatnoću od loma.

Kada su u pitanju čelici visoke čvrstoće kod kojih se javlja mješoviti ili krti lom, kritični napon se određuje prema lomnoj žilavosti (K_{Ic}) i kritičnoj veličini greške.

Pored toga pred konstruktore se postavlja pitanje i maksimalne ekonomije materijala u svim stadijima proizvodnje i primjene. Povećanjem ekonomije materijala i smanjenje mase konstrukcije upućuje na korištenje metala visoke čvrstoće, za šta se preporučuje upotreba i analiza dijagrama konstrukcione čvrstoće $R_{p0,2}$ - K_{Ic} radi najbolje odluke. Također, treba primjenjivati savremenu opremu za ispitivanje materijala i konstrukcija i to za određivanje parametara mehanike loma, mikrostrukture i izgleda prelomnih površina i samog loma.

fractures of metal parts, connected with testing of materials with errors that can be causes of sudden fractures in the exploitation of which must be checked before installation or during operation. The tests are more demanding and more extensive in case of structures than have demanging application in terms of safety and duration.

5. CONCLUSIONS

Design and manufacture of structures and parts arise the question of the material, which is mainly metallic material and one of them with the widest application is steel. In the exploitation of structures there are many cases of unexpected fractures at stresses lower than calculated and they are more common when the stress approaches the yield stress.

The presences of any defect in the material, in particular at the surface, or those close to the surface, increase possibilities for crack development.

Many metallic materials require a prescribed value of impact strength, substantially at reduced temperature (steels that exhibit ductile fracture) which reduces the likelihood of fracture.

In case of high-strength steels in which mixed or brittle fracture occurs, critical stress is determined by the fracture toughness (K_{Ic}) and critical defect size.

In addition, designers have to consider the question of a cost of material at all stages of production and application. Increasing economy of material and reduction of structure mass indicate to use of high-strength metal, for which is recommended to use and analyze the diagrams of structural strength $R_{p0,2}$ - K_{Ic} for the best decision. Also, modern equipment for materials and constructions testing should be used, for determining the parameters of fracture mechanics, microstructure and appearance of fracture surface and the fracture itself.

6. LITERATURA - REFERENCES

- [1] Dinamičko ispitivanje metalnih materijala / Repozitorij...
<https://repozitorij.simet.unizg.hr/isladora/object/object/simet:26> [accesed on June 2019.]
- [2] Oruč, M.; Sunulahpašić, R.: Lomovi i osnove mehanike loma, Fakultet za metalurgiju i materijale, Univerzitet u Zenici, 2009.

- [3] Vitez, I.; Oruč, M.; Sunulahpašić, R.: Ispitivanje metalnih materijala, Fakultet za metalurgiju i materijale, Univerzitet u Zenici, 2006.
- [4] Perković, M.: Utjecaj uvjeta ispitivanja na udarni rad loma, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
https://repozitorij.fsb.hr/28_11_2013_Diplo_mski_rad_PerkoVIC [accesed on June 2019.]

- [5] Metals Handbook, Ninth Edition, Vol.11, Failure Analysis and Prevention, ASM, 1986.
- [6] Agatanović, P.: Različite strategije određivanja preostale čvrstoće i veka, Integritet i vek konstrukcija, 2/2001, str.81.
- [7] Sedmak, S.: Razvoj i osnovne definicije mehanike loma, Monografija - Uvod u mehaniku loma i konstruisanje sa sigurnošću od loma, GOŠA i TM fakultet, Beograd, 1980.
- [8] Barsom, J.M.; Rolfe, T.: Fracture and fatigue control in structures, Prentice-Hall, New Jersey, 1987.

Corresponding author:**Raza Sunulahpašić****University of Zenica,****Faculty of Metallurgy and Technology****Email: raza.sunulahpasic@mtf.unze.ba**

