

Forenzičko inženjerstvo

Osnove fizičkih procesa i njihova primena u forenzičkom inženjerstvu



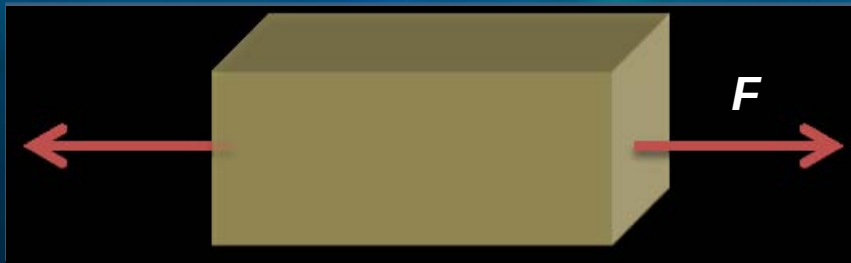
ČVRSTOĆA I NAPREZANJE

Čvrstoća je veličina maksimalne kohezivne sile među molekulima ili kristalima materijala u čvrstom agregatnom stanju.

Naprezanje (napon, opterećenje) je stanje materije koja je izložena delovanju spoljnje sile, a zavisno o načinu delovanja naprezanje može biti:

- Naprezanje na istezanje,*
- Naprezanje na pritisak,*
- Naprezanje na savijanje,*
- Naprezanje na smicanje,*
- Torziono naprezanje,*
- *Naprezanje na izvijanje.*

ČVRSTOĆA I NAPREZANJE



$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Dijagram loma usled napona na istezanje:

Δl – deformacije materijala,

σ – naprezanje,

σ_{dozv} – dozvoljeno naprezanje,

σ_l – čvrstoća loma materijala,

1 – stvarna granica elastičnih deformacija,

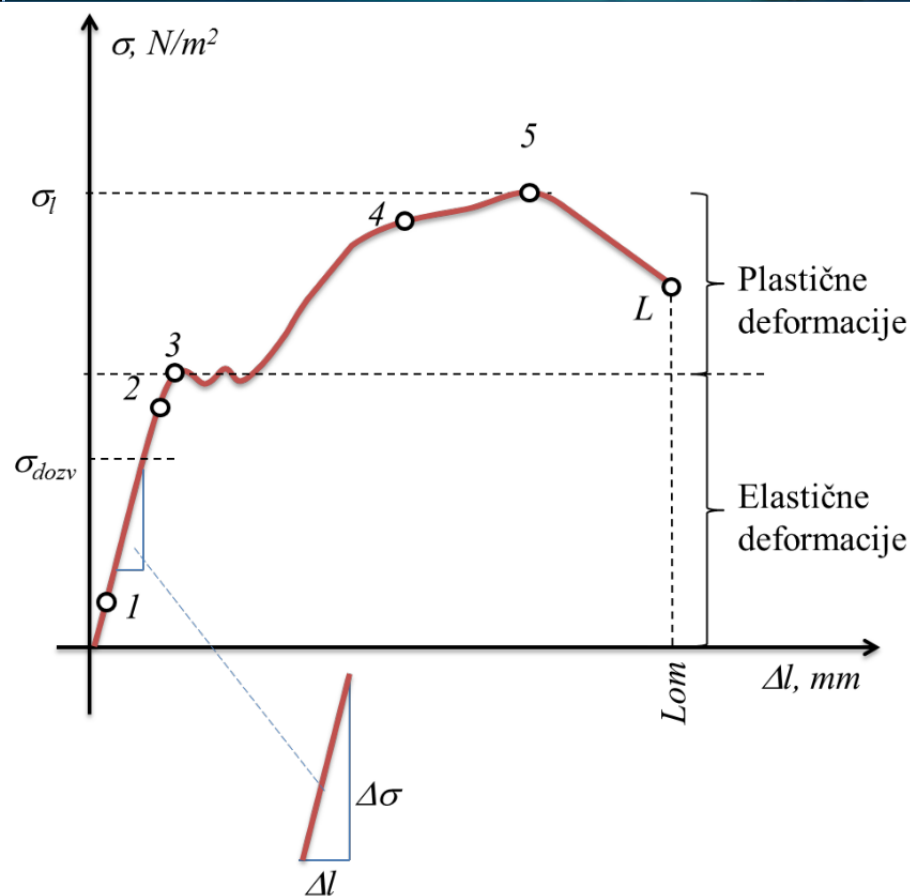
2 – granica proporcionalnosti odnosa naprezanje-deformacija,

3 – granica elastičnosti,

4 – granica razvlačenja (obično napon pri kome nastaje povećanje dužine od 0,2% u odnosu na prvobitnu dužinu),

5 – Tačka maksimalnog naprezanja u uzorku,

L – tačka loma uzorka



Ukupna deformacija je suma elastičnih i plastičnih deformacija: $\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$

LOM

Lom je makroskopsko razdvajanje materijala koje dovodi do gubitka čvrstoće. Javlja se kao konačna faza razvoja pukotine i predstavlja jedan od najčešće interpretiranih elemenata u forenzičkim istragama. Mesto nastanka, oblik i forma loma, izgled površina razdvojenih lomom i drugi niz pokazatelja mogu ukazati na verovatne uzročnike lomova.

Zavisno od žilavosti materijala lom može biti:

- *Žilavi lom kod koga se na mestu loma uočavaju deformacije,*
- *Krti lom kod koga materijal puca bez deformacije na površini.*

Kod materijala koji imaju zrnastu ili kristalnu strukturu lom može biti:

- *Interzrnasti ili interkristalni pri kome se lome kristali ili zrna, odnosno površina loma razdvaja kristale ili zrna i*
- *Transzrnasti ili transkristalni lom pri kome ne dolazi do cepanja zrna, već se lom odvija na površinama oko njih.*

Interkristalni lom je uvek krti lom, a napreduje duž granica zrna. Lom usled zamora materijala je takođe obično krti.

LOM

Usled pogrešnih proračunskih pretpostavki ili pogrešne primene materijala, prema genezi lomove možemo podeliti na:

- *Duktilni (žilavi) lom usled prekomerne (plastične) deformacije;*
- *Krti lom nastao usled grešaka ili koncentracije naprezanja;*
- *Zamorni lom usled cikličnog opterećenja, ciklične deformacije, termičkog zamora, korozionog zamora ili kontaktnog zamora;*
- *Visokotemperaturni lom nastao usled puzanja, oksidacije, topljenja, izvijanja;*
- *Vremenski odloženi lom usled krtosti, prisustva kiselina i baza i slično;*
- *Lom usled koncentracije napona kao posledica grešaka pri projektovanju, održavanju ili rukovanju, neodgovarajuće analize naponskog stanja ili nemogućnost proračunskog predviđanja svih uticajnih faktora;*
- *Lom usled neadekvatnog materijala, odnosno neodgovarajuće osnovne pretpostavke o materijalu;*
- *Reološki lom kao posledica reoloških naprezanja koji se javljaju po prestanku opterećenja.*

LOM

U inženjersko-forenzičkom postupku opšti redosled osnovnih koraka koje je potrebno preduzeti i dokumentovati :

- 1. Opisati mesto loma definišući mogući scenario, uslove koji su vladali pre i u toku loma, istoriju loma. Dokumentovati i prikupiti raspoložive dokaze koji mogu doprineti razumevanju loma. Evidentirati sve vrste informacija koje se direktno ili indirektno odnose na lom, a posebno inženjerske proračune i uslove koji su vladali u vreme loma. Opisati kako su elementi konstrukcije upotrebljeni, prikupiti ostale informacije.*
- 2. Izvršiti vizuelni pregled. Pregledati i dokumentovati utvrđene činjenice. Fotografisati iz različitih uglova sve bitne elemente vodeći računa o interpretaciji snimaka u daljem toku istrage.*
- 3. Proračunska analiza (analiza napona): Kada se radi o mehaničkom proračunu kao glavnom proračunu komponenti, analiza napona mora biti izvedena.*
- 4. Analiza hemijskog sastava: Ovaj korak upućuje na ispitivanje pogodnosti materijala sa stanovišta korozijske zaštite.*
- 5. Fraktografija: Ispitivanje prelomnih površina korišćenjem svetlosnog i elektronskog mikroskopa.*
- 6. Metalografski pregled: Ispitivanje mikrostrukturnih osobina materijala, u cilju povezivanja sa mehaničkim karakteristikama.*
- 7. Mehaničke karakteristike: Treba utvrditi mehanička svojstva potrebna za proračun. Ovo nije uvek moguće jer test za utvrđivanje osobina može uništiti uzorak. U kategorijama mehaničkih svojstava tvrdoća je naročito važna.*
- 8. Simulacija loma: Vrlo koristan pristup je simulacija uslova za koje je uzorak proračunat i postavljanje identičnog uzorka u takve uslove. Ovo može biti suviše skupo i nedovoljno ponovljivo.*

LOM

Zamor Materijala

Ako je materijal izložen duže vreme opterećenju koje se periodično smenjuje, kao što je slučaj sa pulsirajućim opterećenjima, dolazi do postepenog gubitka čvrstoće materijala koja se naziva „zamor materijala“.

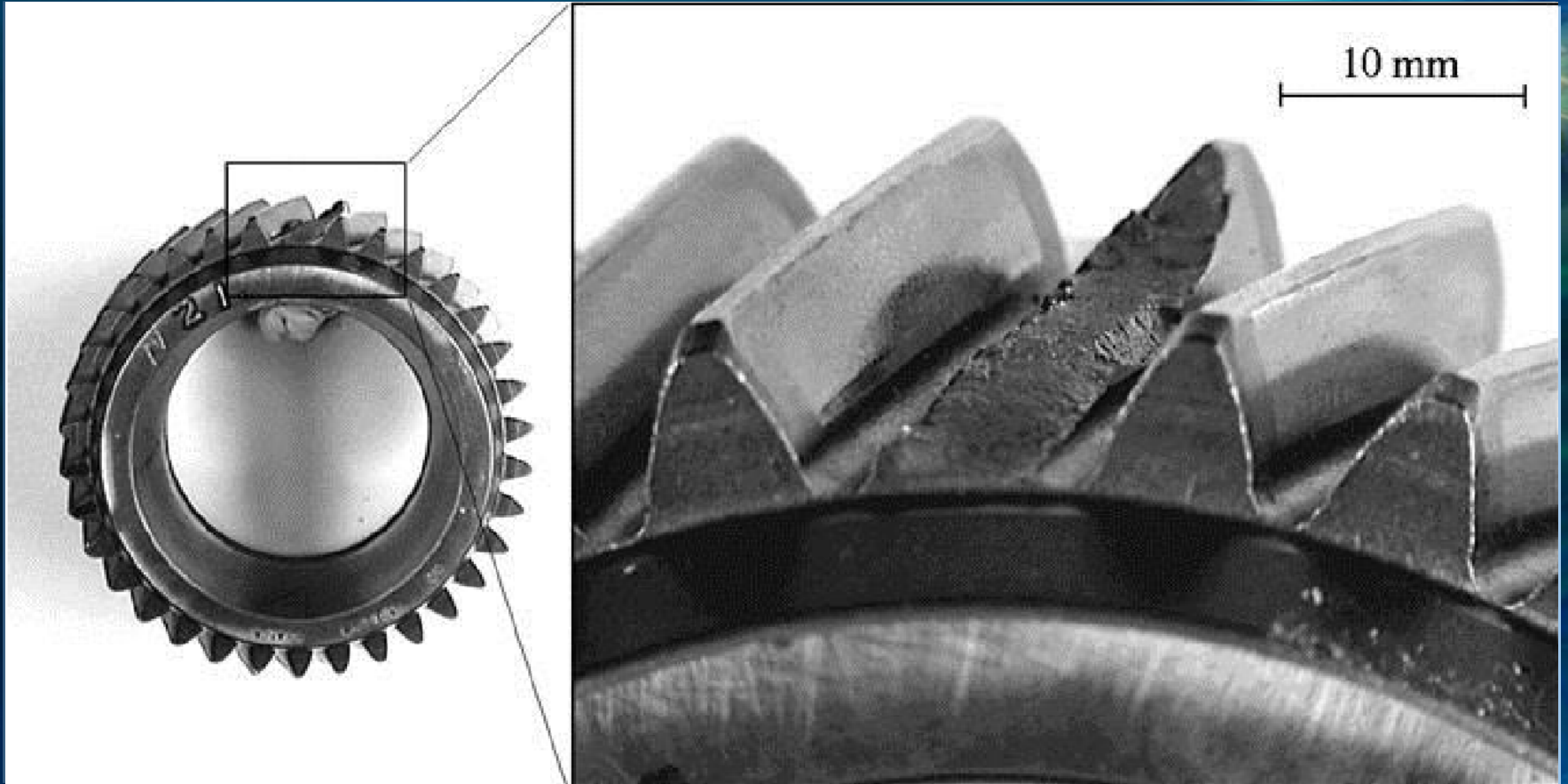
Zamor materijala je najčešći uzrok loma.

Usled zamora dolazi do postepenog oštećenja materijala zbog dugotrajnih periodičnih promenjivih opterećenja (naprezanja). Uglavnom je rezultati dinamičkih opterećenja konstrukcija. Zamor dovodi do postepenog gubitka čvrstoće, te se uvodi i termin „trajne dinamičke izdržljivosti (čvrstoće) materijala“, kao izdržljivost koja preostaje nakon zamora materijala.

Razvoj oštećenja od zamora materijala odvija se po fazama:

- *Pojava pukotina ili inicijalna faza,*
- *Razvoj pukotine i širenje,*
- *Lom usled zamora materijala.*

LOM

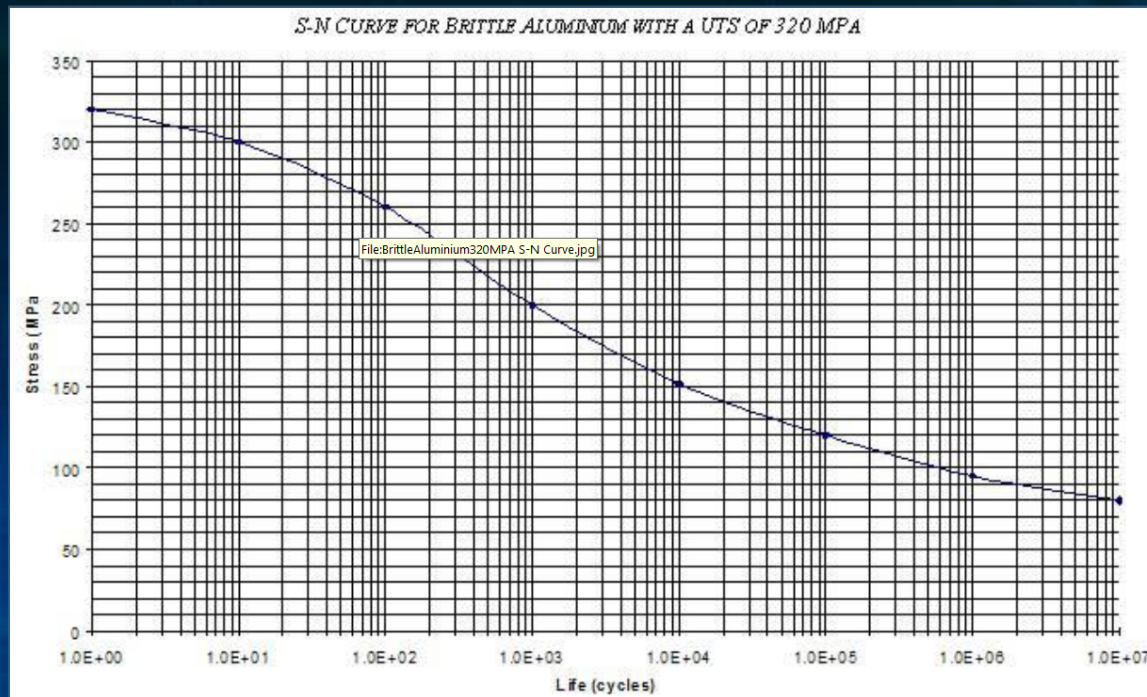


Lom usled zamora materijala

LOM

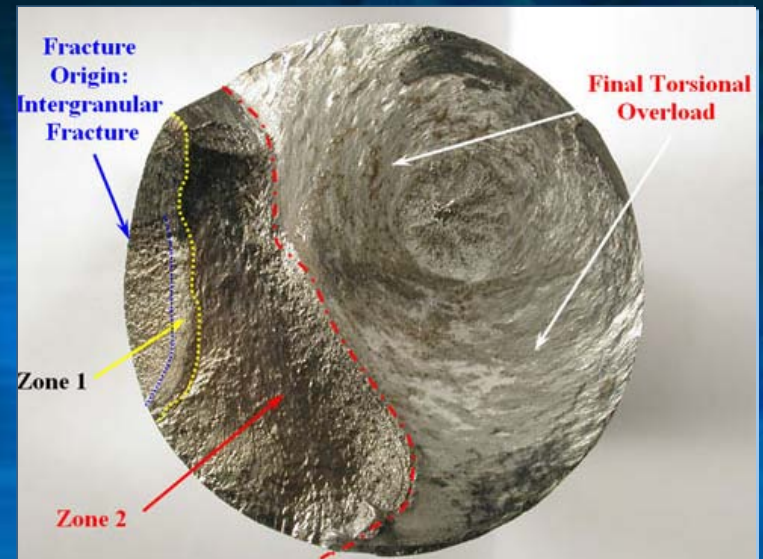
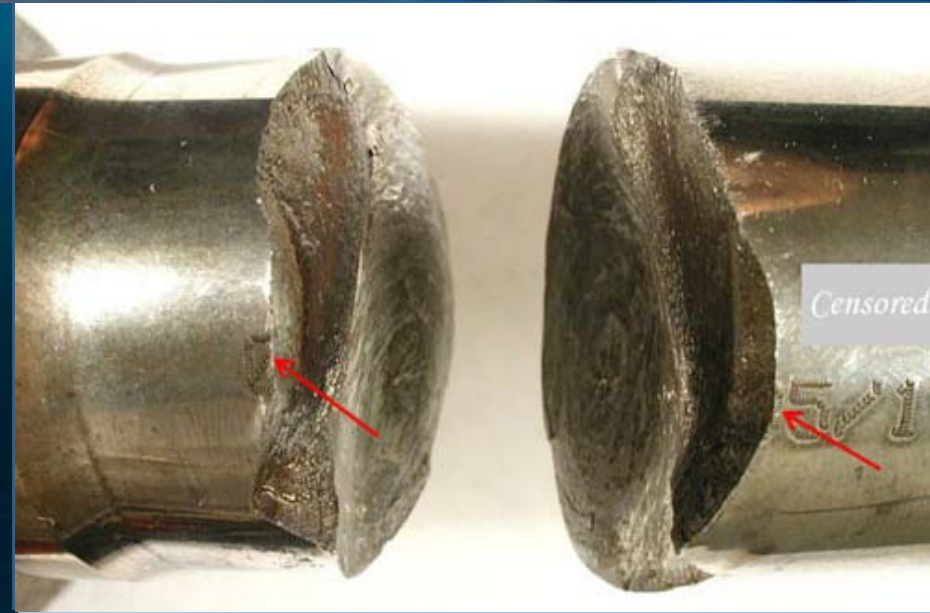
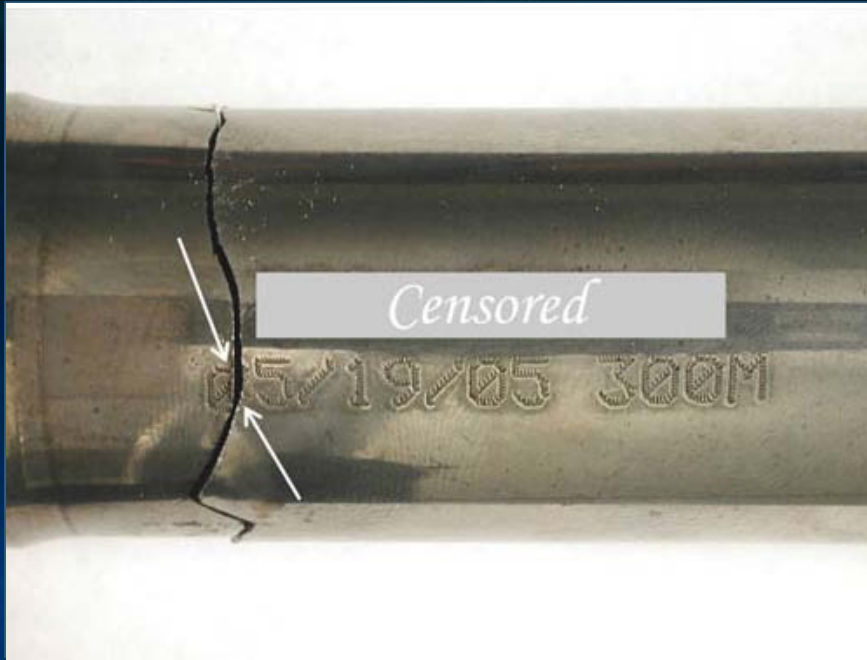
Dinamička izdržljivost ili trajna dinamička čvrstoća prikazuje se Wöhlerovom krivom, gde se čvrstoća (σ) iskazuje u zavisnosti od vremena trajanja ili broja ciklusa (N).

Wöhlerove krive konstituišu se eksperimentalno na uzorcima koji se podvrgavaju promenjivom naprezanju konstantne amplitude do loma, a životni vek, odnosno vek trajanja, određuje se kao broj ciklusa do loma.



LOM

Lom ulaznog vratila menjača



SUDARI

Pod pojmom sudar podrazumeva se mehanički kontakt čvrstih tela u kretanju koja poseduju kinetičku energiju, pri čemu dolazi do promene kretanja i mehaničkih deformacija.

Elastični sudari su međusobni udari dva tela kod kojih je suma kinetičkih energija (energija kretanja) pre i pose sudara jednaka, odnosno kod kojih ne dolazi do transformacije kinetičke energije u druge energetske oblike.

$$E_{k1} + E_{k2} = \text{const}$$

Odnosno

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \text{const}$$

Posle sudara

$$v_1' = \frac{v_1(m_1 - m_2) + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

$$v_2' = \frac{v_2(m_2 - m_1) + 2m_1 v_1}{m_1 + m_2}$$

SUDARI

KOEFICIJENT RESTITUCIJE

Koeficijent restitucije dva objekta nakon sudara je pozitivan broj od 0 do 1 koji predstavlja odnos razlika brzina pre i posle sudara, pri čemu je:

- Za slučaj elastičnih sudara $K_r=1$
- Za slučaj plastičnih sudara $K_r<1$

Izračunava se kao odnos relativnih brzina pre i nakon sudara, a za slučaj udara tela u nepomično telo ili telo znatno veće mase, pri čemu se pre i posle udara kreće samo jedno telo (npr. odbijanje od zid), može se izračunati:

$$K_r = \frac{v}{v'}$$

(v - brzina tela pre sudara, v' - brzina tela nakon sudara)

Ukoliko u sudaru učestvuju dva predmeta u pokretu, koeficijent restitucije se može izračunati kao:

$$K_r = \frac{v_2 - v_1}{v'_2 - v'_1}$$

SUDARI

Za razliku od elastičnih sudara, kod plastičnih sudara kinetička energija predmeta sudara pre i posle sudara nije ista, odnosno deo kinetičke energije se transformiše u deformacije.

Nakon sudara brzine tela će iznositi:

$$v_1' = \frac{K_r m_2(v_2 - v_1) + m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$
$$v_2' = \frac{K_r m_1(v_1 - v_2) + m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Impuls sile je proizvod sile i vremena delovanja sile: $I = Fdt$

Ubrzanje je prvi izvod brzine po vremenu: $a = dv/dt$

Moment količine kretanja je vektorska veličina i računa se kao proizvod mase i brzine kretanja predmeta: $K = mdv$

Sila se može izraziti i kao: $F = mdv/dt = K/dt$

Kinetička energija pre sudara: $E_k = mv^2/2$

gde je E_k - kinetička energija (J); m – masa (kg); v – brzina (ms)

SUDARI

Rad sudara je jednak kinetičkoj energiji pre sudara i može se izračunati kao proizvod sile i pređenog puta objekata nakon sudara:

$$A_x = F_x s = mv^2/2$$

gde je A_x - rad sudara (J); F_x - sila sudara (N); s - pređeni put nakon sudara (m);
 v - brzina kretanja pre sudara (m/s)

Brzinu kretanja predmeta pre sudara možemo odrediti iz prethodnog izraza:

$$v = \sqrt{2F_x s/m} = \sqrt{2F_x s/g} / G$$

gde je G - težina predmeta (N); g - gravitaciono ubrzanje (ms^2)

Veza između kretanja pre i nakon usporenja ili sudara može se uspostaviti integraljenjem funkcije:

$$v dv = a ds$$

gde je a - ubrzanje nakon sudara (ms^2)

SUDARI

Ako pretpostavimo da je ubrzanje ili usporenje konstantno ($a = \text{const.}$), a integrirajući prethodni izraz dobija se brzina kretanja predmeta nakon sudara:

$$v_x = \sqrt{v^2 + 2as}$$

gde je v_x - brzina nakon ubrzanja/usporavanja ili zaustavljanja (ms)

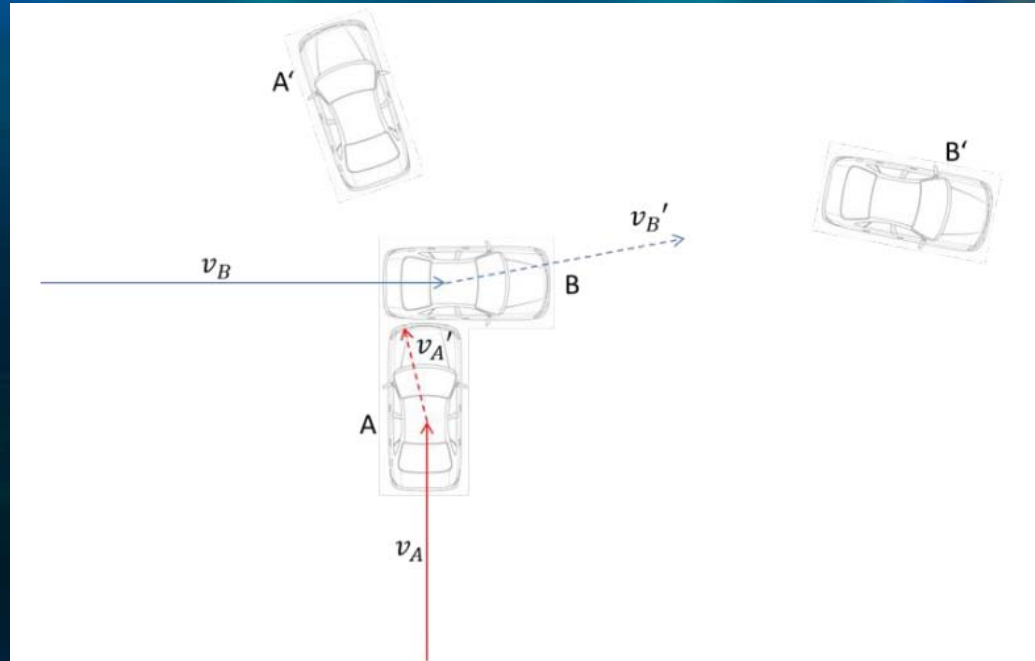
Analogno sabiranju vektora brzine kretanja vozila pre i nakon sudara, možemo grafički predstaviti i vektore količine kretanja. Ukoliko su oba vozila iste mase vektori količine kretanja su slični vektorima brzine. Zbir momenata količine kretanja pre i nakon sudara iznosi:

$$\begin{aligned} K &= m_1 v_1 + m_2 v_2 \\ K' &= m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \end{aligned}$$

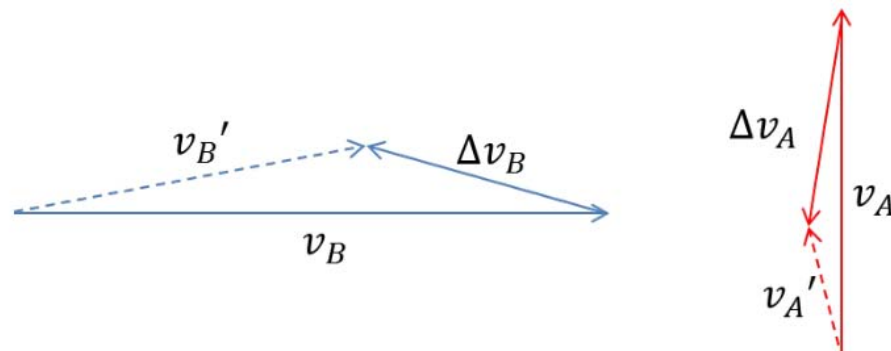
Suma momenata pre i nakon sudara, po zakonu o održanju energije, je jednaka i iznosi:

$$K_x = K = K' = m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

SUDARI



Skica kretanja pre i nakon sudara

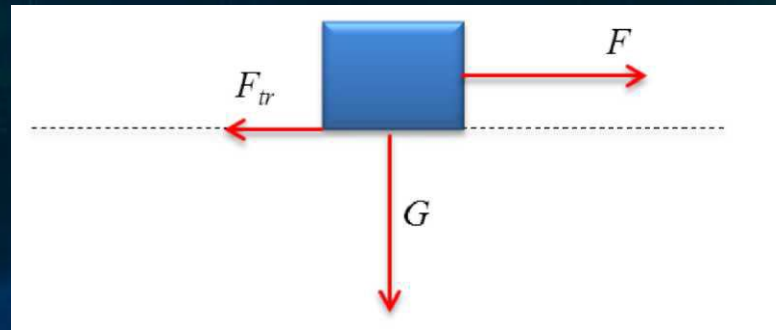


Vektori brzina kretanja vozila pre i nakon sudara

TRENJE I KLIZANJE

Trenje je sila koja se suprotstavlja međusobnom klizanju tela koja se dodiruju, a deluje u području dodira. Sila trenja deluje u suprotnom smeru od smera klizanja.

Trenje pretvara kinetičku energiju u toplotu. Sila trenja ne zavisi od veličine dodirne površine, nego samo o karakteristikama materijala, odnosno koeficijentu trenja.



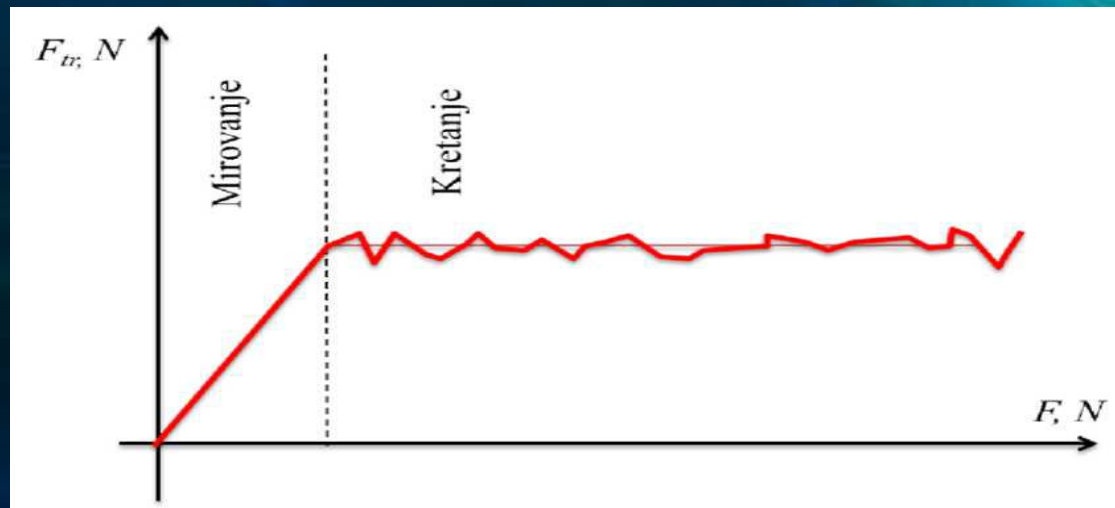
Odnos težine tela i sile trenja je konstantna vrednost i zavisi od međusobnih osobina kontaktnih površina klizanja i uslovima klizanja. Odnos između sile trenja i težine naziva se koeficijent trenja:

$$\mu = \frac{G}{F_{tr}}$$

(μ - koeficijent trenja, G - težina, F_{tr} - sila trenja)

TRENJE I KLIZANJE

Statičko trenje ili trenje mirovanja sprečava klizanje između predmeta u mirovanju koji se dodiruju. Da bi nastupilo kretanje sila koja pokreće (gura predmet) mora biti veća od sile trenja. U protivnom predmet se neće pomeriti.



Kada je sila kretanja veća od sile trenja, može doći do neželjenog pokreta ili neželjenog pravca i intenziteta kretanja - proklizavanje

TRAG TOČKA



TRAG KOČENJA

Koeficijent trenja između pneumatika i tla (koeficijent prijanjanja) može se odrediti i eksperimentalnim putem tzv. Testom vuče (“drag test”).



Koeficijenti trenja – prijanjanja:

Beton (suv/mokar) – 0,8-0,9 / 0,75-0,9

Asfalt (suv/mokar) – 0,7-0,8 / 0,4-0,6

Šljunak – 0,4-0,8

Pesak (suv/mokar) – 0,3-0,4 / 0,4-0,6

Sneg (utaban) – 0,2-0,4

Ukoliko točak proklizava prilikom kočenja, na površini ostaje trag kočenja.



TRAG KOČENJA

Na osnovu dužine traga kočenja, pri čemu se kinetička energija vozila troši na rad sile trenja sve do njegovog zaustavljanja, može se izračunati minimalna brzina kretanja vozila neposredno pre započetog (intenzivnog) kočenja. (usvaja se efikasnost kočenja od 100%)

$$\frac{1}{2}mv^2 = F \cdot D$$

$$v = \sqrt{\frac{2FD}{m}} = \sqrt{2\mu gD} = \sqrt{19.6D\mu} \quad [ms^{-1}]$$

$$v = \sqrt{254D\mu} \quad [kmh^{-1}]$$

Gde je:

m – masa vozila u kg;

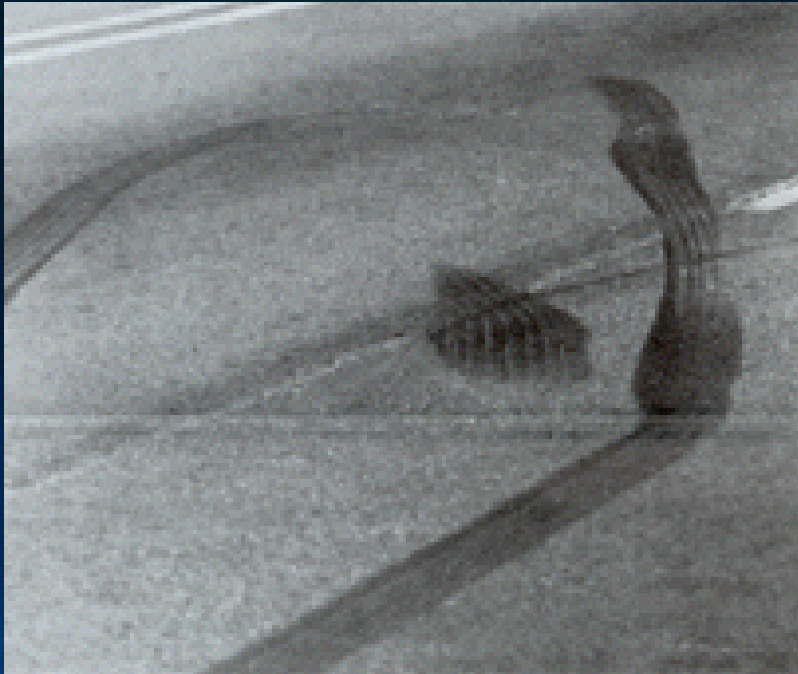
v – početna brzina kočenja;

D – dužina traga kočenja u m;

μ – koeficijent prijanjanja (trenja);

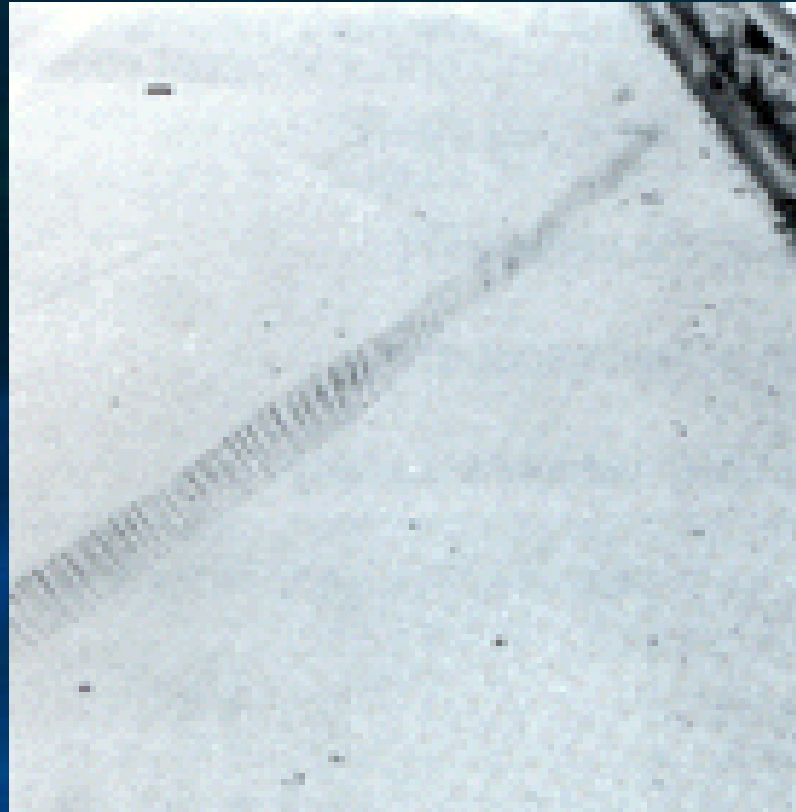
TRAG ZAKRETANJA

Tragovi zakretanja su uvek krivolinijski i nastaju kao posledica klizanja pneumatika prilikom prolaska vozila kroz krivinu većom brzinom nego što se raspoloživim koeficijentom prijanjanja može preneti (bez klizanja). Njihova pojava može ukazivati na iznenadnu promenu pravca kretanja vozila.



TRAG OŠTEĆENJA

Tragovi oštećenja izazvani su oštećenjem ili preopterećenjem pneumatika. Javljaju se tokom ili neposredno posle udesa.



UBRZANJE / USPORENJE VOZILA

Ubrzanje odnosno usporenje kao mera promene brzine tokom vremena t može se izraziti preko početne i krajnje brzine kretanja v i u :

$$a = \frac{v - u}{t}$$

Ukoliko je neophodno uspostaviti vezu između početne i krajnje brzine (v i u), ubrzanja (a) i pređenog puta (s) može se koristiti sledeća relacija:

$$v^2 - u^2 = 2as$$

REKONSTRUKCIJA SAOBRAĆAJNOG UDESA

Rekonstrukcija saobraćajnog udesa predstavlja naučno-inženjerski proces istraživanja, analiziranja i zaključivanja o uzrocima, događajima i posledicama koji su vezani za sudar u saobraćaju.

Uloga forenzičkih istraživača je da identifikuju uzroke sudara uključujući uloge vozača, vozila, ostalih učesnika, uslova puta i okoline.

Navedeni zakoni fizike predstavljaju osnovu za pomenute procese, a sve u svrhu otkrivanja uzroka nastalih negativnih posledica po ljudske živote i materijalna dobra.

Rekonstrukcija saobraćajnog udesa može imati koristi prilikom unapređivanja kako saobraćajne infrastrukture tako i projektovanja samih vozila.

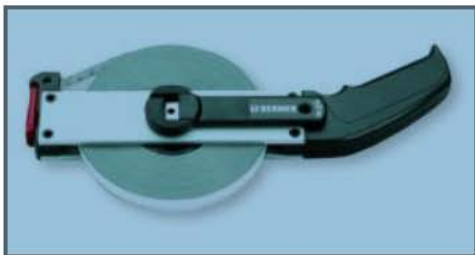
REKONSTRUKCIJA SAOBRAĆAJNOG UDESA

Proces istraživanja udesa podrazumeva:

1. sakupljanje dokaza u vidu fotografija ili snimaka mesta udesa;
2. sprovođenje određenih merenja radi definisanja preciznog položaja svih relevantnih direktnih i indirektnih učesnika udesa;
3. prikupljanja informacija koje su bitne za utvrđivanje: putanje kretanja učesnika u udesu, puta kočenja vozila, korišćenje svetlos.-signalnih uređaja, brzine kretanja i ubrzanja vozila i sl.;
4. uzimanje izjava učesnika i svedoka udesa;
5. prikupljanje fizičkih dokaza o tragovima točkova;
6. utvrđivanje stanja podloge (puta);
7. utvrđivanje atmosferskih prilika.

Analizom podataka dobijenih procesom istraživanja može se dobiti više različitih mogućih hipoteza koje su rezultat sprovedenih proračuna ili softverskih simulacija.

FORENZIČKA OPREMA



Merna traka



Kolica za merenje dužine



Mikrometar



Pomično merilo

FORENZIČKA OPREMA



Laserski daljinomer



Merni lističi



Termometer, kontaktni



Merna letva



GPS uređaj



Termalna kamera

FORENZIČKA OPREMA



Detektor metala



Videoskop



Digitalno foto i video aparat



Inklinometar, uglomjer i libela



Markeri



pH metar

VREME REAKCIJE VOZAČA

Vreme reakcije vozača predstavlja vreme koje protekne od trenutka njegovog podstreknuća do trenutka početka njegove reakcije.

Primer: vreme koje protekne od trenutka kada vozač uoči aktiviranje stop svetala na vozilu ispred do trenutka početka njegovog kočenja predstavlja vreme reakcije.

Tipična vremena reakcije vozača u odnosu na uslove date su tabelom:

Uslovi	Vreme reakcije
Normalni	~ 1 sec
Telefoniranje / slušanje muzike	~1.5 – 2 sec
Vožnja pod dejstvom alkohola i/ili lekova	~ 2 – 5 sec

PRIMERI

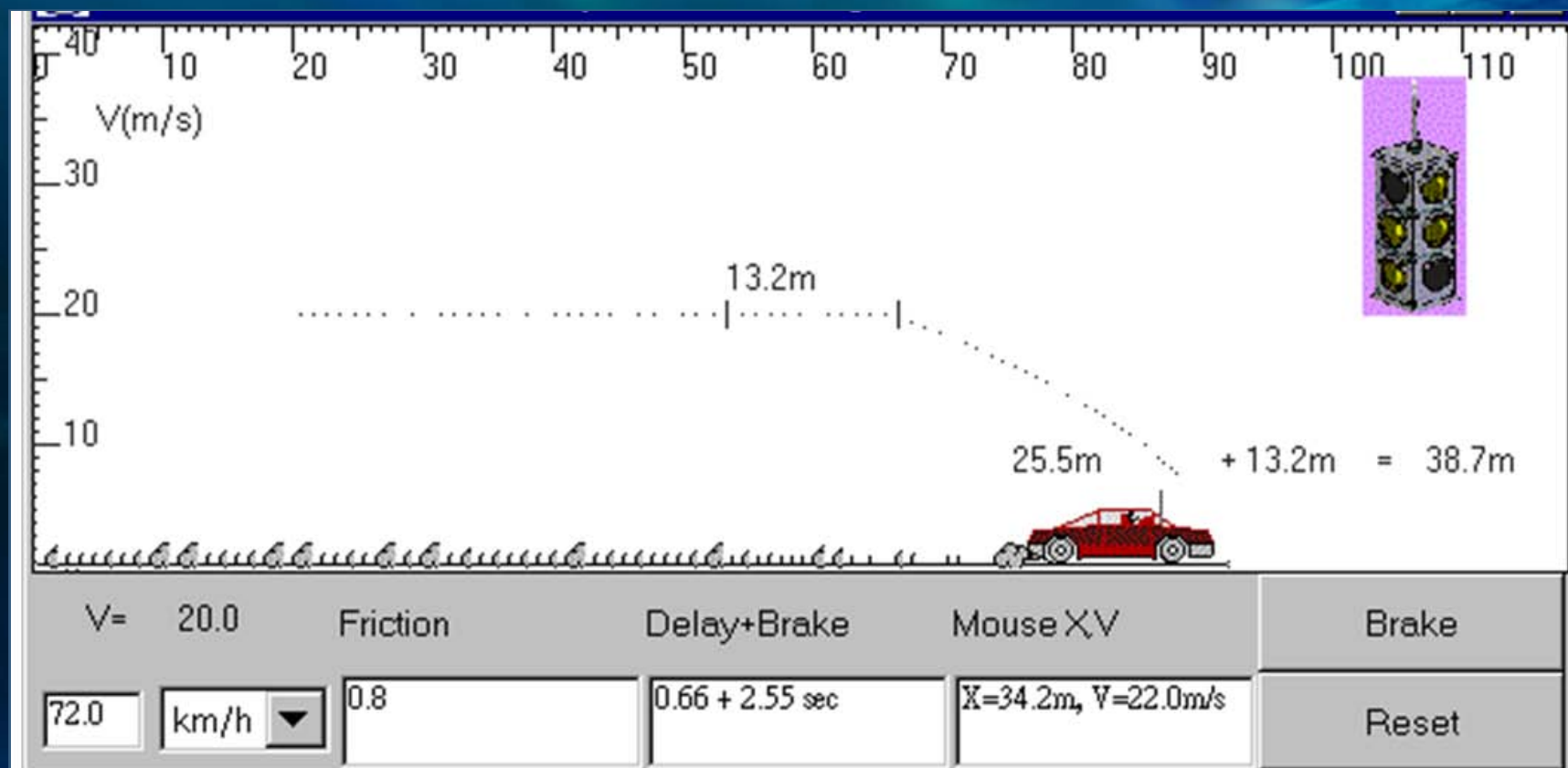


▲勞斯萊斯房車車尾被撞毀

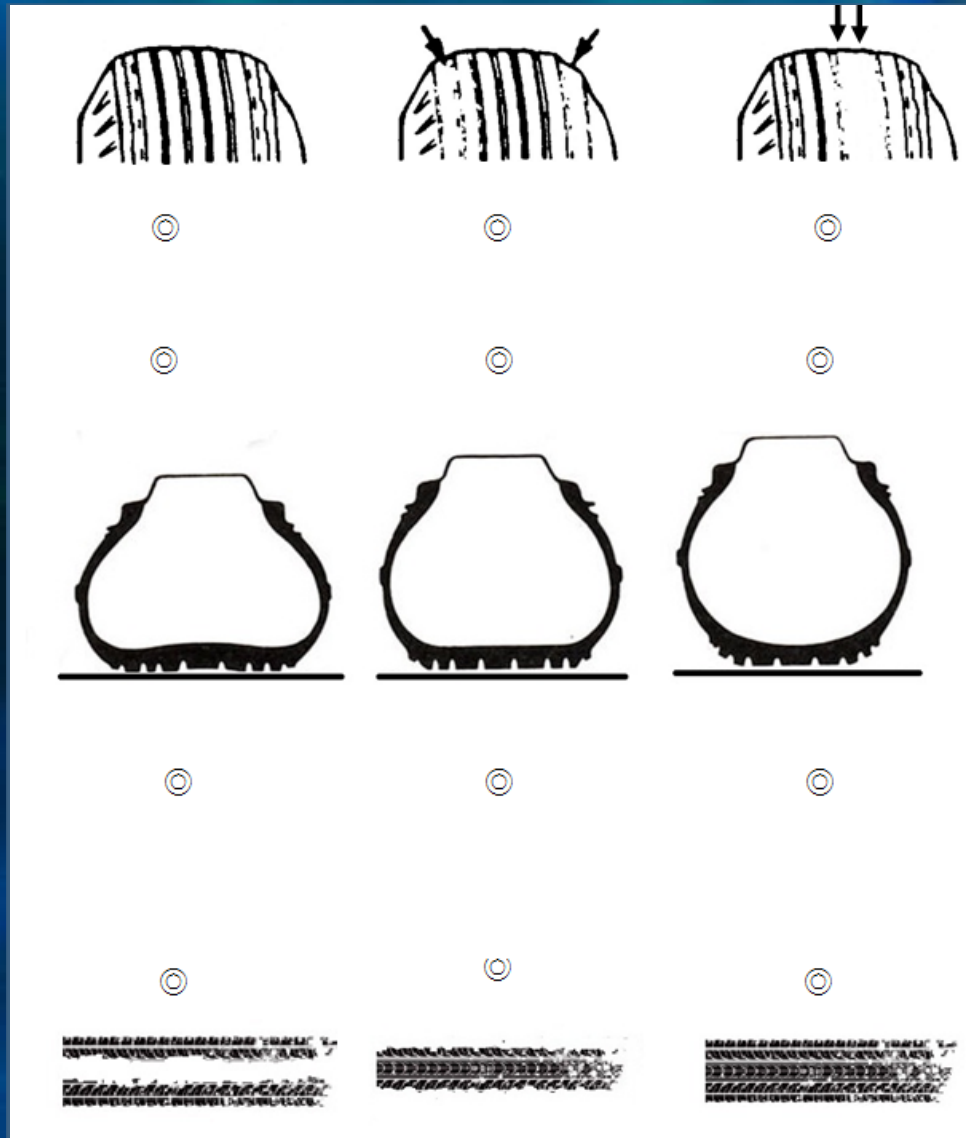
Figure 1



PRIMERI



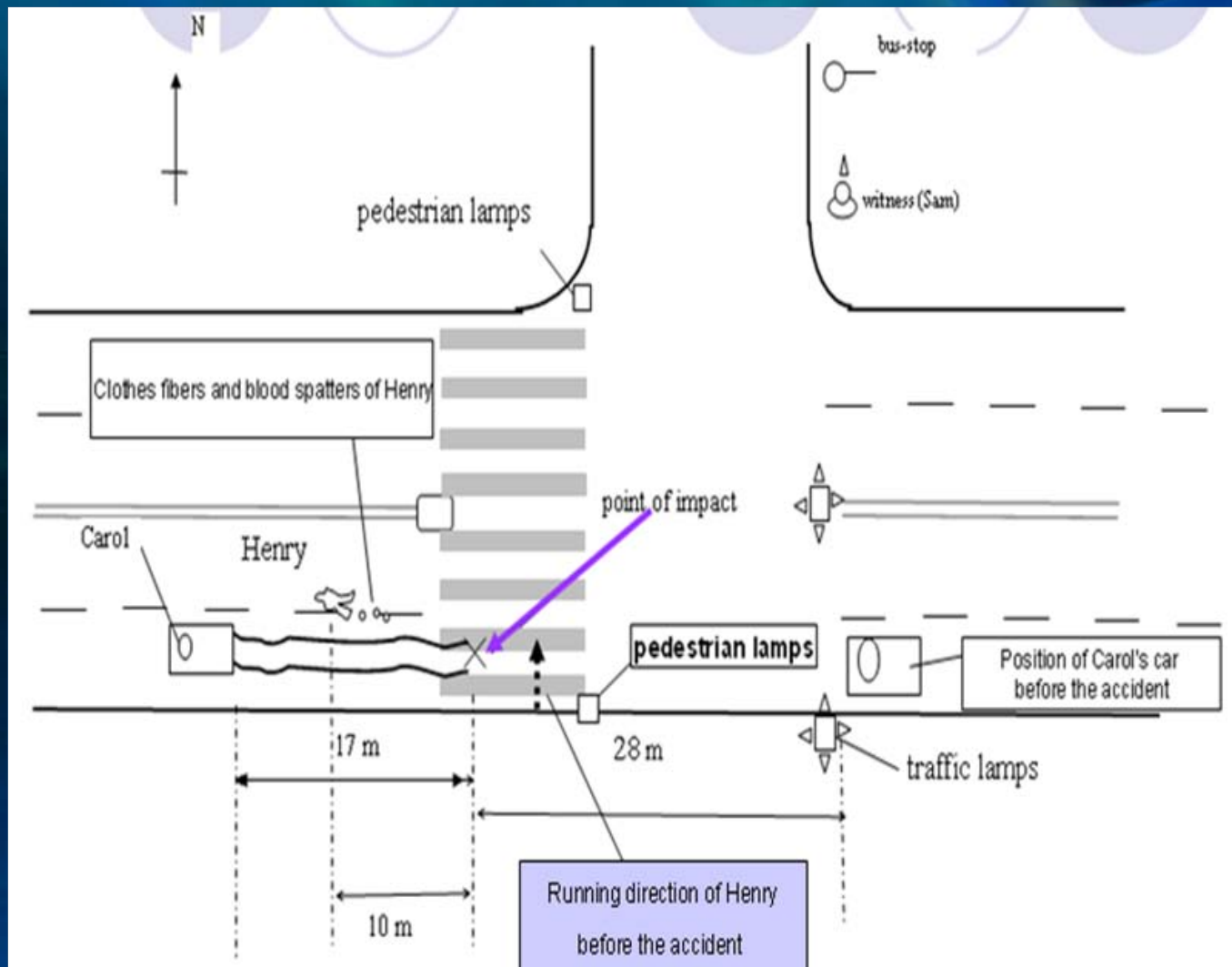
PRIMERI



PRIMERI

Vozilo	BMW 530i	Toyota Corolla
Ubrzanje	4.28 ms^{-2}	2.84 ms^{-2}
Rastojanje koje se pređe do brzine 100 km/h pri maksimalnom ubrzanju		

PRIMERI



Masa vozila sa vozačem: 1100 kg; masa Henrija: 60 kg; ograničenje brzine: 50 km/h; koeficijent prijanjanja: 0.7; max. Ubrzanje vozila: 2.4 m/s^2

Forenzičko inženjerstvo

Hvala na pažnji

