

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Damir Numanović

Zagreb, 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelji rada:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Damir Numanović

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević-Lulić

Zagreb, 2010.

Sažetak

Prilikom osteosinteze periost ima važnu ulogu kod cijeljenja kosti. Da bi se smanjila oštećenja koja nastaju prilikom nalijeganja pločice na periost, modeliraju se pločice sa što manjom površinom nalijeganja. U ovom radu su ispitana mehanička svojstva pet pločica istih dimenzija s različitim oblicima kontaktne površine.

Ispitivanja su provedena za klasičnu pločicu s glatkom površinom, te pločice s uzdužno, koso, poprečno i mrežasto ožljebljenim kontaktnim površinama. Ispitivanja su vršena prema normi ISO 9585, te su za sve pločice određene ekvivalentna savojna krutost i savojna čvrstoća.

Dobiveni rezultati pokazuju da ožljebljenost pločice znatno smanjuje savojnu krutost i čvrstoću u odnosu na glatku pločicu bez žljebova, što je posljedica zareznog djelovanja kod ožljebljenih pločica. Iz rezultata je također vidljivo da zarežno djelovanje znatno ovisi i o položaju žljeba.

Ključne riječi: osteosinteza, savojna krutost, savojna čvrstoća, osteosintetske pločice, ISO 9585.

Summary

Osteosynthesis periosteum plays an important role in bone healing. To reduce the damage that occur during the periosteum bearing plates, plates are modeled with less seating. This work investigate the mechanical properties of five tiles of the same dimensions with different forms of contact area. Tests were performed for the classical plate with a smooth surface, and tiles with longitudinally, obliquely, transversely and mesh grooved contact surfaces. Tests were performed according to ISO 9585, and for all tiles equivalent to a certain bending rigidity and strength.

These results indicate that carved plates significantly reduces bending stiffness and strenght compared to the smooth plates without grooves, as a result of notch action by carved plates.

The results also shows that notch activity significantly depends on the position of groove.

Keywords: osteosynthesis, bending stiffness, bending strength, osteosintetske tiles, ISO 9585.

Sadržaj

| | |
|---|-----|
| Popis slika | I |
| Popis tablica | III |
| Popis oznaka..... | IV |
| 1. Uvod..... | 1 |
| 2. Osteosinteza | 2 |
| 2.1. Kostí | 2 |
| 2.1.1. Građa kosti | 2 |
| 2.1.2. Sastav kosti..... | 3 |
| 2.1.3. Cijeljenje kosti..... | 4 |
| 2.2. Kompresija kosti | 4 |
| 2.2.1. Postupak kompresije kosti..... | 5 |
| 2.3. Biokompatibilnost | 7 |
| 2.4. Osteosintetske pločice | 7 |
| 2.4.1. Funkcije osteosintetske pločice | 7 |
| 2.4.2. Vrste pločica..... | 8 |
| 3. Mehanička svojstva materijala | 10 |
| 3.1. Savojna čvrstoća i krutost materijala..... | 10 |
| 4. Ispitivanje osteosintetskih pločica prema normi ISO 9585 | 13 |
| 5. Ekperimentalno ispitivanje..... | 19 |
| 5.1. Ispitivanje na savijanje prema normi ISO 9585 | 19 |
| 5.1.1. Postupak mjerenja | 19 |
| 5.1.2. Rezultati | 24 |
| 6. Zaključak..... | 33 |
| 7. Literatura | 34 |

Izjavljujem da sam rad izradio samostalno koristeći se stečenim znanjem, navedenom literaturom i opremom Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku.

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Janošu Kodvanju na podršci i uloženom trudu pri izradi završnog rada. Također zahvaljujem dr. sc. Anti Bakiću na pomoći kod korištenja kidalice i videoekstenzometra.

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 2.1. Presjek kosti..... | 3 |
| Slika 2.2. Standardna oprema za kompresiju kosti..... | 5 |
| Slika 2.3. Standardni vijak za pritezanje..... | 5 |
| Slika 2.4. Postupak kompresije kosti..... | 6 |
| Slika 2.5. Različite vrste osteosintetskih pločica: a) koso ožljebljena, b) mrežasto ožljebljena, c) poprečno ožljebljena, d) uzdužno ožljebljena, e) glatka, bez ožljebljenja..... | 9 |
| Slika 3.1. Savijanje grede: a) čisto savijanje, b) poprečno savijanje..... | 10 |
| Slika 3.2. Savijanje u tri točke..... | 11 |
| Slika 3.3. Savijanje u 4 točke..... | 11 |
| Slika 3.4. Primjer prikaza rezultata savijanja..... | 12 |
| Slika 4.1. Shematski prikaz testa na savijanje..... | 14 |
| Slika 4.2. Dijagram sila – progib..... | 16 |
| Slika 5.1. Ispitivanje savojne krutosti pločice savijanjem u četiri točke..... | 19 |
| Slika 5.2. Postav mjernih uređaja tijekom provedbe mjerenja progiba..... | 20 |
| Slika 5.3. Položaj kamere u odnosu na ispitni uzorak..... | 21 |
| Slika 5.4. Kalibracijski objekt..... | 21 |
| Slika 5.5. Mjerenje pomaka u odnosu na fiksni referentni objekt..... | 22 |
| Slika 5.6. Mjerenje progiba pločice..... | 23 |
| Slika 5.7. Shematski prikaz mjernog sustava..... | 24 |
| Slika 5.8. Pločica nakon savijanja..... | 24 |
| Slika 5.9. Dijagram sila-progib za glatku pločicu..... | 26 |
| Slika 5.10. Dijagram sila-progib za poprečno ožljebljenu pločicu..... | 27 |
| Slika 5.11. Dijagram sila-progib za uzdužno ožljebljenu pločicu..... | 28 |

| | |
|--|----|
| Slika 5.12. Dijagram sila-progib za koso ožljebljenu pločicu..... | 29 |
| Slika 5.13. Dijagram sila-progib za mrežasto ožljebljenu pločicu..... | 30 |
| Slika 5.14. Dijagram sila-progib za sve vrste ispitivanih pločica..... | 31 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 5.1. Rezultati mjerenja za glatku pločicu..... | 26 |
| Tablica 5.2. Rezultati mjerenja za poprečno ožljebljenu pločicu..... | 27 |
| Tablica 5.3. Rezultati mjerenja za uzdužno ožljebljenu pločicu..... | 28 |
| Tablica 5.4. Rezultati mjerenja za koso ožljebljenu pločicu..... | 29 |
| Tablica 5.5. Rezultati mjerenja za mrežasto ožljebljenu pločicu..... | 30 |
| Tablica 5.6. Rezultati mjerenja za sve vrste ispitivanih pločica..... | 32 |

Popis oznaka

F [N] - sila

f [mm] - progib

K [Nm²] - ekvivalentna savojna krutost

S [N/m] - nagib sila/progib krivulje

P [N] - ispitno opterećenje

σ_S [Nm] - savojna čvrstoća

h [m] - udaljenost između unutrašnjih i vanjskih valjčica

k [m] - udaljenost između unutrašnjih valjčica

1. Uvod

Mehanička se svojstva mogu utvrditi isključivo eksperimentalnim putem, zbog jednostavne činjenice da ih je nemoguće točno i precizno utvrditi proračunom. Realni materijali sadrže različite nepravilnosti, te se za utvrđivanje mehaničkih svojstava prilikom eksperimenata koristi različita laboratorijska oprema. Prilikom ispitivanja u laboratorijima se simuliraju uvjeti kakvima će materijal biti podvrgnut u eksploataciji.

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja mehaničkih svojstava osteosintetskih pločica u ovisnosti o obliku kontaktne površine. Statički test savijanja proveden je prema normi ISO 9585.

Ispitivanja su pokazala da različite površine nalijeganja osteosintetske pločice na kost različito djeluju na integritet periosta kosti na mjestu prijeloma. Manje površine nalijeganja manje utječu na periost, tj. manja su oštećenja na samom periostu, bolja je prokrvljenost u području prijeloma kosti, te je samim time i cijeljenje prijeloma brže, kao i oporavak od ozlijede. Navedene činjenice traže optimalan odabir veličine osteosintetske pločice kao i oblika površine kojom naliježe na kost.

Razvojem novih tehnologija, razvijene su i pločice s različitim oblicima površine nalijeganja. Složene geometrije osteosintetskih pločica, kao i složene površine nalijeganja rezultat su razvoja novih tehnologija, gdje se prilikom razvoja i izrade pločica uzimaju u obzir i klinički i mehanički kriteriji.

Rad sadrži uvod, nakon kojeg slijedi drugo poglavlje u kojem je opisan postupak osteosinteze, te osnovni opis kostiju, frakture kostiju te oblika i funkcija osteosintetskih pločica. U trećem poglavlju opisana su mehanička svojstva materijala, dok je u četvrtom poglavlju prikazana eksperimentalna metoda određivanja savojne krutosti i čvrstoće osteosintetskih pločica prema normi ISO 9585. Konkretno ispitivanje, koje je i tema ovog rada, opisano je u petom poglavlju, te su u njemu izneseni rezultati eksperimenta. Na poslijetku dan je zaključak, temeljen na rezultatima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjem.

2. Osteosinteza

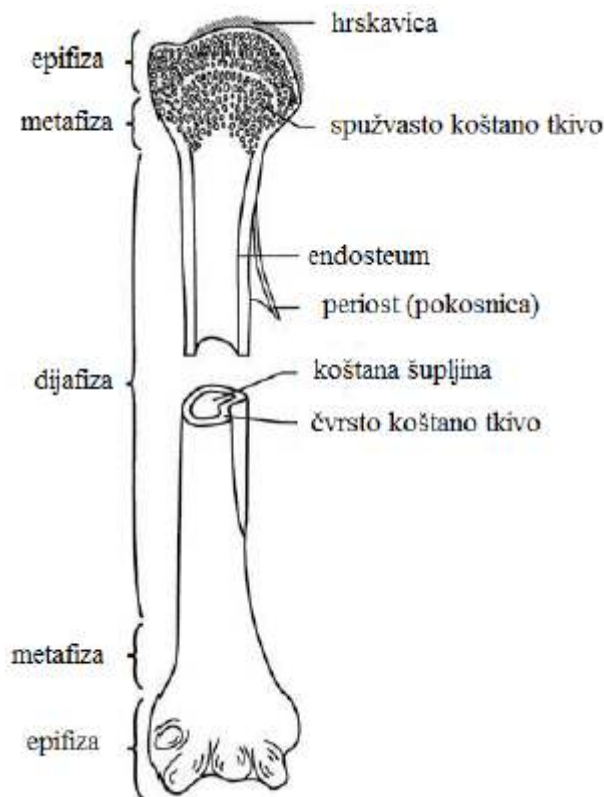
Osteosinteza je operativni postupak sa svrhom spajanja prelomljenih djelova kosti. Vršiti se stabilizacija i učvršćivanje na mjestu prijeloma. Da bi se to moglo izvesti, kao implantati se koriste metalne pločice koje se nazivaju osteosintetske pločice. One su izuzetnih mehaničkih svojstava, visoke čvrstoće te savojne krutosti. Također, osim dobrih mehaničkih svojstava, pločice su biokompatibilne kako ne bi izazivale neželjene reakcije s okolnim tkivom.

2.1 Kost

Kosti (*lat. Os*), ili koštano tkivo je povezivno tkivo koje podupire tjelesnu strukturu, a nalazi se kod većine živih bića. Kostur je skup svih kostiju koje se nalaze u ljudskom tijelu, te one zajedno s mišićima tvore sustav organa za kretanje. One su čvrsti dijelovi tijela. Kost u dužinu raste do između 16. i 23. godine, a poslije toga samo u širinu. Kost su međusobno povezane zglobovima i mišićima. Osim što su čvrste i jake one su i šuplje unutrašnjosti, stoga nisu teške te čine samo 14% ukupne tjelesne mase prosječnog čovjeka. One nisu mrtva tvar, već obnovljiva, stoga su prilikom unutarnjih lomova potrebne i izrazito korisne upravo osteosintetske pločice koje potpomažu da se kost obnovi u čvrstu i zdravu, jednake funkcionalnosti kao i prije loma. Ljudski kostur ima 206 kostiju.

2.1.1 Građa kosti

Kosti razlikujemo prema obliku te ih djelimo na duge i pločaste kosti. Srednji dio kosti naziva se dijafiza, a zadebljani krajevi epifiza (slika 2.1). Prijelaz između ta dva dijela naziva se metafiza. Dijafiza je šuplji dio kosti, ispunjen koštanom srži. Površina kostiju kompaktna je i čvrsta, dok je unutrašnjost šuplja i spužvasta. Na površini se nalazi elastična opna, periost.



Slika 2.1 Presjek kosti

Čvrsto koštano tkivo prožeto je kanalićima oko kojih su kružno poredane koštane stanice, koje u međustanični prostor izlučuju kalcij i fosfor što kostima daje čvrstoću. Kanalićima prolaze krvne žile i živci. Hrskavica je glatka i čvrsta savitljiva nadopuna kostima koja smanjuje trenje u zglobovima. Spužvasto koštano tkivo jest koštano tkivo ispunjeno šupljinama i išarano malim potpornjima koji čine kosti čvrstim, ali ne i preteškima. Pokosnica obavija kost i čvrsto prirasta uz nju, a građena je od posebnog vezivnog tkiva. Koštana srž proizvodi većinu krvnih stanica i ispunjava cjevaste šupljine dugih kostiju i šupljine u spužvastom tkivu. Prijelazni dio između kosti i koštane srži naziva se endosteum.

2.1.2 Sastav kosti

Kosti su aktivno živo tkivo u tijelu. Građene su od koštanih stanica međusobno povezanih nastavcima. 25% kosti izgrađuje bjelančevina osin, a 10% kostiju čini voda. Kosti imaju krvne žile koje ulaze i izlaze iz njih, opskrbljujući ih kisikom i hranjivim tvarima, a oslobađaju ih štetnih tvari. Određene kosti sadrže srž koja proizvodi krvne stanice. Sve kosti imaju živce koji

ih čine osjetljivim na pritisak i bol. Kostii su građene od minerala, pretežitoo kalcija i drugih kemijskih tvari (oko 65%) koje kostima daju tvrdoću i krutost.

2.1.3 Cijeljenje kosti

Prilikom cijeljenja kostiju vrlo važan utjecaj imaju različiti čimbenici, kao što su opći i lokalni biološki čimbenici te mehanički, biomehanički i biofizički čimbenici.

Pod opće biološke čimbenike ubrajamo dob, hormonski status, prehrambene navike, funkciju živčanog sustava i tjelesnu konstituciju. Lokalni ovise o opsegu lokalne traume, tipu kosti, stupnju defekta, vaskularnim oštećenjima, lokalnim humoralnim čimbenicima, lokalnim patološkim procesima, infekciji. U mehaničke i biomehaničke čimbenike ubrajamo uspješnost repozicije, kontakt i položaj ulomaka te stabilnost i trajnost imobilizacije. Biofizički čimbenici zadiru u područje molekularne biologije čiji su procesi ključni u reparaciji loma kosti i to u sve tri faze, inflamatornoj, reparatornoj, te u pregradnji kosti.

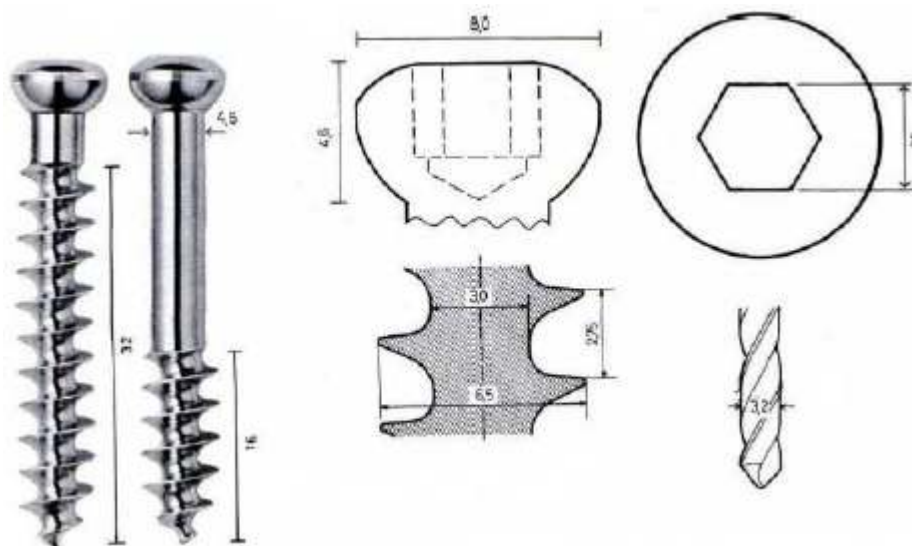
2.2 Kompresija kosti

Prilikom operativnog zahvata kod prijeloma ili frakture kosti, osteosintetska pločica se ugrađuje tako da naližeže direktno na periost. Periost je elastična opna, koja omotava čitavu kost. Pomoću periosta kost raste i obnavlja se. Sastoji se od unutarnjeg sloja, koji sadrži ćelije s elastičnim vlaknima i živcima, te vanjskog sloja koji je bogat kolagenim i elastičnim vlaknima te krvnim žilama koje prodiru u kost.

Cilj samog operativnog zahvata je postići stabilnost i nepomičnost koštanih ulomaka kako ne bi došlo do pregradnje, preklapanja i cijeljenja tako fiksirane kosti, već da bi kost zacijelila u prirodni oblik. Instrumenti potrebni za ovakav operativni zahvata prikazani su na slici 2.2 dok je na slici 2.3 prikazan pritezni vijak pomoću kojeg se ostvaruje pritisak između dva ulomka.



Slika 2.2 Standardna oprema za kompresiju kosti

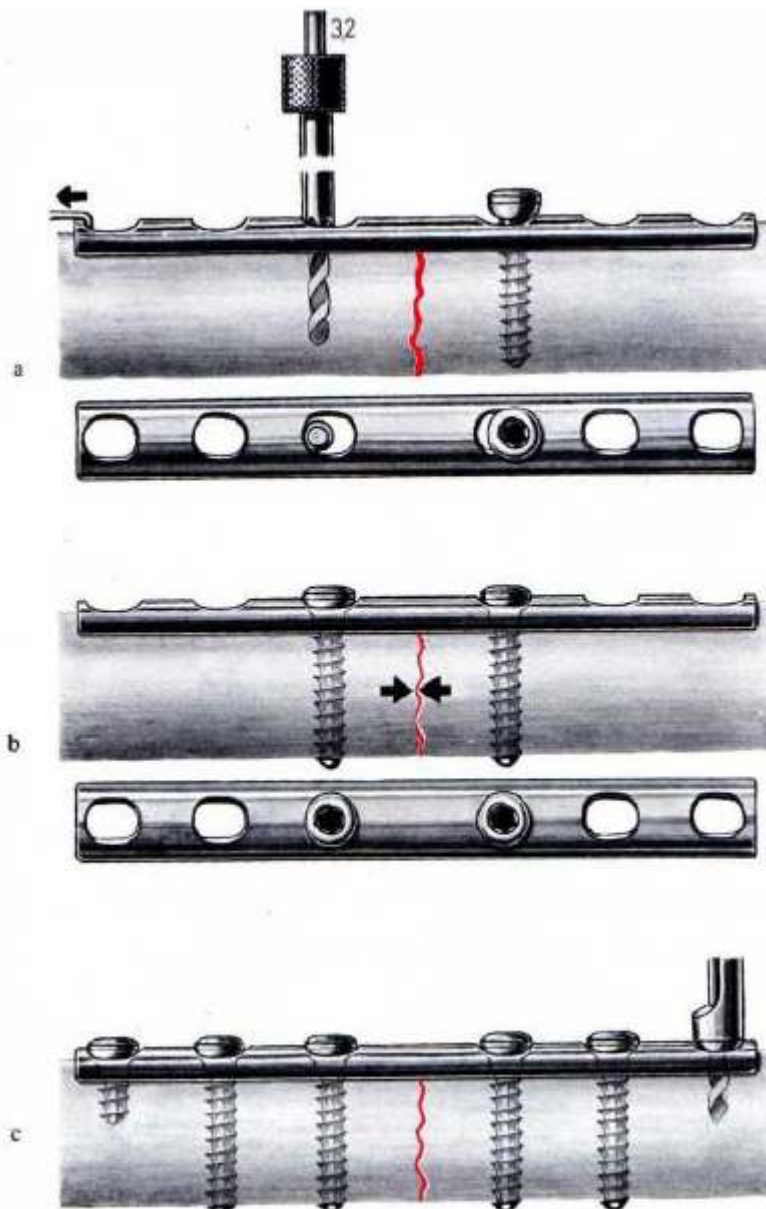


Slika 2.3 Standardni vijak za pritezanje

2.2.1 Postupak kompresije kosti

Postupak kompresije započinje bušenjem prvog provrta 10 mm od prijeloma. Zatim se narezuje navoj unutar provrta, postavlja se pločica, te se pritegne prvi vijak. Nakon fiksacije prvog vijka, pločica se povuče kukom u smjeru prijeloma te se buši provrt i na drugom ulomku (slika 2.4a). Nakon narezivanja navoja i pritezanja drugog vijka, dodatno se pritežu glave vijka te

se time dobiva dodatni pritisak između dva prijelomom razdvojena ulomka (slika 2.4b). Nakraju se pritežu ostali vijci (slika 2.4c).



Slika 2.4 Postupak kompresije kosti

Postupak je potrebno izvesti pravilno jer moguća su oštećenja pa i pucanje osteosintetske pločice ili vijaka. Najčešći razlozi su preveliko opterećenje pločice, nepravilno postavljena pločica kao i nepravilno postavljen vijak, bilo da je nepravilno bušeno ili da je vijak prekratak. Nakon što se kost obnovi i prijelom zacijeli, slijedi vađenje pločice, za što je minimalan rok 6

mjeseci do godinu dana. Potrebno ju je izvaditi da bi se kost potpuno obnovila i zacijelila, te da bi se spriječila reakcija okolnog tkiva na metal.

2.3 Biokompatibilnost

Prilikom ugradnje stranog tijela u ljudsko tijelo, treba paziti na moguće negativne reakcije koje tijelo može proizvesti. Iz tog razloga materijali od kojih se izrađuju implantati kao što su osteosintetske pločice, moraju biti biokompatibilni i uzrokovati minimalne nuspojave i reakcije u tijelu. Materijali koji se danas koriste za izradu metalnih implantata su medicinski čelik i titan, čija su svojstva, kemijska i mehanička, te metode ispitivanja propisane normom ISO 5832.

Najčešće nuspojave koje se mogu javiti zbog nedostatka biokompatibilnosti materijala s okolnim tkivom su lokalna toksična reakcija, alergijska reakcija te indukcija tumora. Rizici od lokalnih toksičnih reakcija, te alergijskih reakcija umnogo se smanjuju s korištenjem titana umjesto medicinskog čelika, posebice alergijske reakcije.

2.4 Osteosintetske pločice

Konkretniji razvoj i napredak osteosinteze pločicom započinje 1958. godine u Švicarskoj. Temelji se na biomehaničkim spoznajama, razvoju tehnologije, tehnološkim usavršavanjima, kliničkim iskustvima i eksperimentalnim metodama.

Osteosintetske pločice koriste se prilikom osteosinteze kako bi potpomogla kostima da se što prije obnove, da mjesto puknuća što prije zacijeli, da kost postigne prirodni oblik i strukturu te da se omogući vraćanje potpune funkcionalnosti kostima.

2.4.1 Funkcije osteosintetske pločice

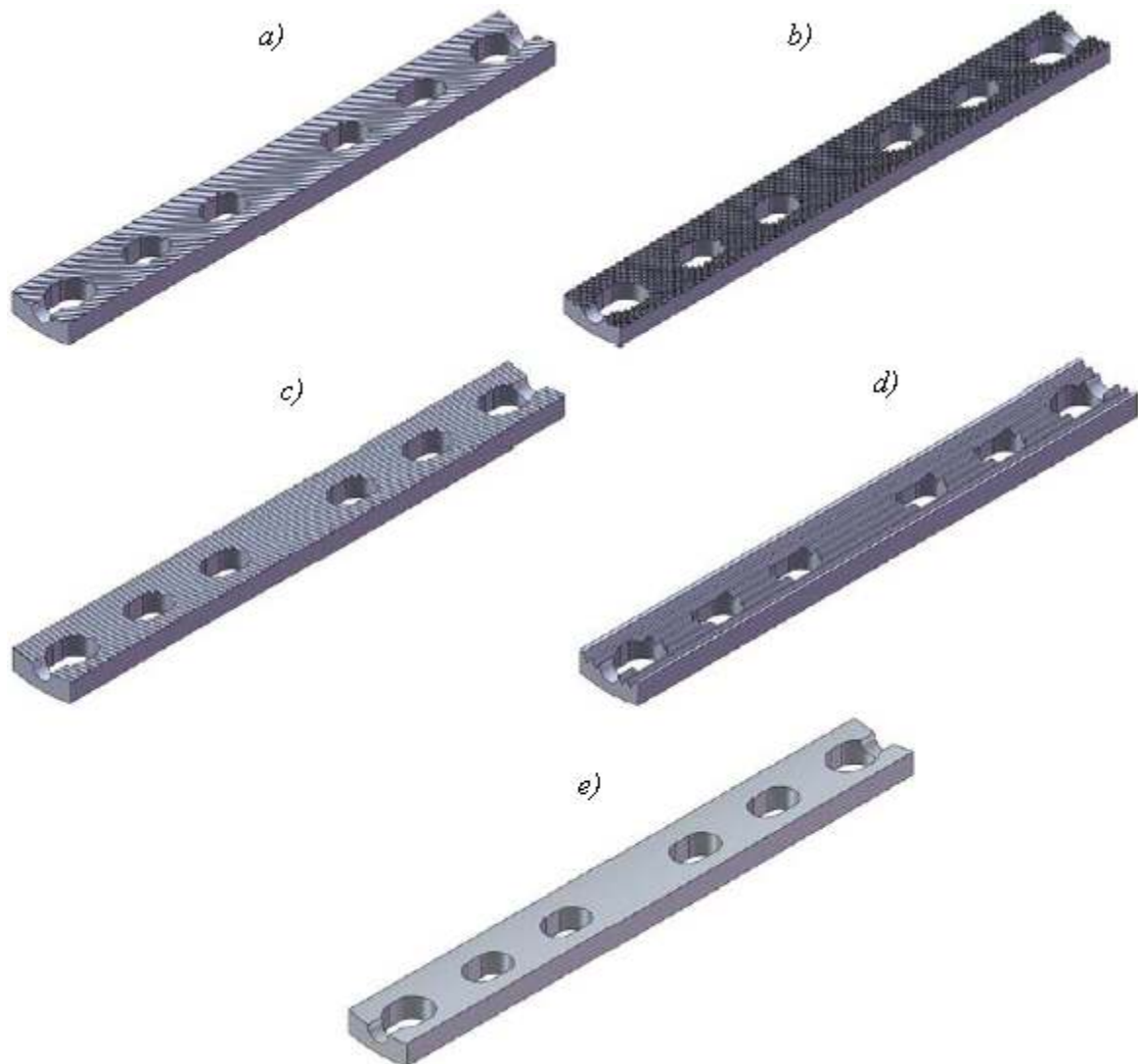
Osnovna zadaća osteosintetskih pločica je stvaranje uvijeta za cijeljenje i obnovu kosti. To se postiže stabilizacijom i smanjenjem sila opterećenja na mjestu prijeloma te osiguravanjem minimalne pokretljivosti ulomaka.

Osnovne funkcije pločica su statička i dinamička kompresija, potporna i neutralizacijska, te premošćujuća funkcija. Kod statičke kompresije, pločica aksijalno komprimira prijelom pomoću

vlačnog opterećenja postignutog operacijskim zahvatom. Pločica vrši dinamičku kompresiju preuzimajući sve vlačne sile, tako da na mjestu prijeloma djeluju samo aksijalne sile pritiska. Pločica ima i potpornu funkciju, služi protiv raspada na mjestu frakture. Najčešća funkcija pločice je neutralizacijska funkcija. Nakon postavljanja samostalnih vijaka ili vijaka s pločicom, postavlja se neutralizacijska pločica. Ona zaštićuje prijelom i osteosintezu postignutu priteznim vijcima, te neutralizira sile torzije, smika i savijanja.

2.4.2 Vrste pločica

Smanjenjem površine nalijeganja pločice na kost, tj. na periost, smanjuje se oštećenje tkiva, te se samim time smanjuje i mogućnost nastanka komplikacija, što sve zajedno utječe na kvalitetnije cijeljenje i obnovu kosti, kao i brži cjelokupni oporavak od ozlijede. Veličina i oblik kontaktne površine utječu na cirkulaciju u području periosta, pa je pločicu potrebno tako konstruirati da što manje ometa taj proces. Na slici 2.5 su prikazane pločice različitih oblika površine nalijeganja na periost.



Slika 2.5 Različite vrste osteosintetskih pločica: a) koso ožljebljena, b) mrežasto ožljebljena, c) poprečno ožljebljena, d) uzdužno ožljebljena, e) glatka, bez ožljebljenja

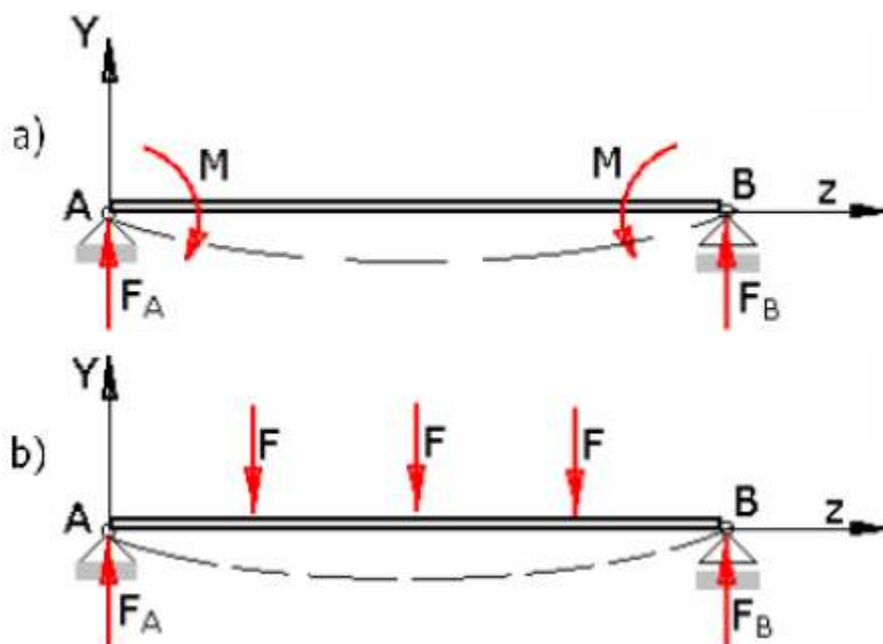
Pločice su izrađene u “Instrumentaria d.d” iz medicinskog čelika, sastava C2CrNiMo i s 0,02% ugljika, 18% kroma, 15% nikla i 3% molibdena. Dužina pločice je 103 mm, širina 12 mm, debljina 4 mm sa šest ovalnih otvora za vijke.

3. Mehanička svojstva materijala

Odabirom materijala se bitno utječe na tehničke karakteristike proizvoda. Stoga su mehanička svojstva materijala osnovni kriterij pomoću kojeg se odabire materijal za određeni proizvod. Materijali su tijekom upotrebe izloženi mnogim različitim mehaničkim opterećenjima što uzrokuje naprezanja i deformacije samog materijala. Razlikuju se statička i dinamička opterećenja, a u ovaj rad bavi se samo statičkim opterećenjem. Čvrstoća materijala je sposobnost materijala da prenosi opterećenje odnosno silu bez pojave loma ili neželjenih deformacija. Prema smjeru djelovanja vanjskih sila razlikuju se opterećenja na vlak-tlak, savijanje, smicanje, uvijanje ili torziju, te izvijanje. Kako je tema rada utvrđivanje savojne čvrstoće i krutosti materijala, slijedi kratak opis pojmova.

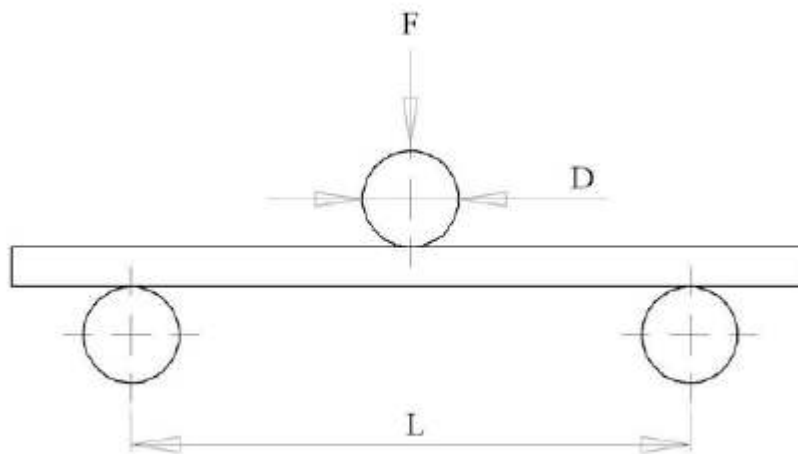
3.1 Savojna čvrstoća i krutost materijala

Prilikom savijanja, uzdužna se os štapa pod djelovanjem vanjskog opterećenja zakrivljuje ovisno o vrsti i smjeru djelovanja vanjskog opterećenja. Djeluju vlačna i tlačna opterećenja, te se stoga neka vlakna u gredi sabijaju a neka izdužuju. Razlikuju se dvije vrste vanjskog opterećenja, čisto savijanje ili savijanje spregovima, te poprečno savijanje ili savijanje silama (slika 3.1a i 3.1b).

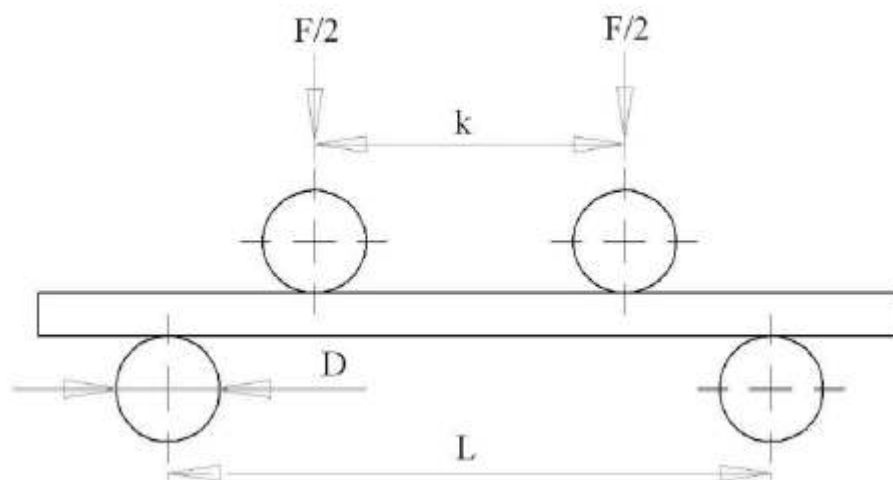


Slika 3.1 Savijanje grede: a) čisto savijanje, b) poprečno savijanje

Ispitivanje materijala na savijanje vrši se pomoću uređaja zvanih kidalice. Današnje kidalice su univerzalne, pa je pomoću njih moguće vršiti više različitih testiranja. Što se tiče konkretno ispitivanja na savijanje, test se može provesti na dva načina: opterećivanjem ispitnog uzorka u tri (slika 3.2) ili četiri točke (slika 3.3).

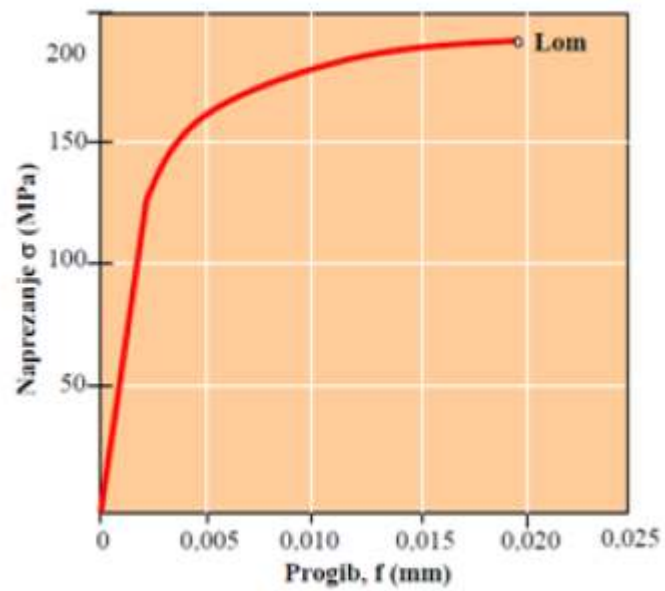


Slika 3.2 Savijanje u tri točke



Slika 3.3 Savijanje u 4 točke

Prije početka testa, odredi se brzina deformiranja, a tijekom samog eksperimenta mjere se sila i progib. Rezultati se prikazuju u tablici ili najčešće u dijagramu sila-progib ili naprezanje-progib (slika 3.4).



Slika 3.4 Primjer prikaza rezultata savijanja

4. Ispitivanje osteosintetskih pločica prema normi ISO 9585

Norma ISO 9585 [7] opisuje metodu i uvjete određivanja savojne čvrstoće i krutosti osteosintetskih pločica. Može se koristiti za testiranje pločica male zakrivljenosti, a ne preporuča se za pločice dužine manje od 50 mm. Zahtjevi norme kojih se tijekom ispitivanja treba pridržavati odnose se na uređaje za ispitivanje, način provedbe mjerenja, te izračunavanje savojne čvrstoće i ekvivalentne krutosti pločica (I-V).

I. Definicije

Savojni moment [Nm] - moment koji djeluje oko osi okomite na uzdužnu stranicu pločice uslijed kojeg se javljaju poprečne deformacije.

Progib [mm] - linearni pomak uslijed djelovanja savojnog momenta okomitog na početnu os pločice.

Savojna čvrstoća [Nm] - vrijednost savojnog momenta u trenutku pucanja pločice ili u određenoj točki ispitivanja, uzima se niža vrijednost.

Ekvivalentna savojna krutost [Nm²] - čvrstoća pločice izračunata iz izraza 4.2 ili 4.3, koja ovisi o dimenzijama konfiguracije eksperimenta i nagibu linearnog dijela krivulje S iz dijagrama sila/progib.

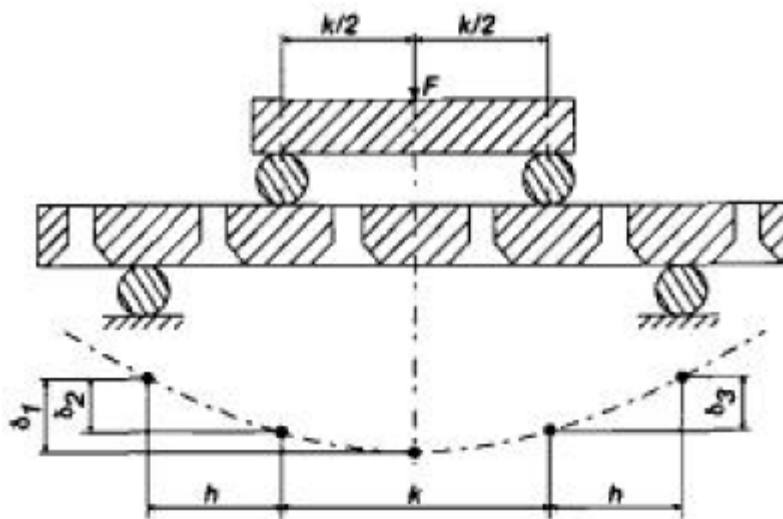
II. Uređaji i instrumenti

Za ostvarivanje opterećenja koji je u skladu sa slikom 4.1, potrebno je osigurati međusobnu paralelnost osi četiri valjčića tijekom trajanja eksperimenta. Valjčići moraju biti cilindričnog oblika i jednakih promjera u granicama od 8 - 13 mm, ili imati oblik profila pločice koja se ispituje. Poželjno je da jedan od valjčića bude pričvršćen za mjerni uzorak kako bi se spriječio horizontalni pomak, te da svi valjčići zadrže svoj relativni položaj. Sredstvo pomoću kojeg se

ostvaruje sila je statička kidalica. Također je potrebno imati uređaje za mjerenje relativnog progiba.

III. Provedba eksperimenta

Testovi savijanja provode se na uređajima i instrumentima opisanim u točki II. Cilindrični valjčići koriste se za ispitivanje ravnih pločica i pločica sa zaobljenim dijelovima čije odstupanje od ravnine centra pločice nije veće od $b/6$, gdje je b širina pločice.



Slika 4.1 Shematski prikaz testa na savijanje

Kod postavljanja uzorka u mjerni uređaj treba voditi računa o sljedećem:

- a) pločicu postaviti tako da su unutrašnji valjčići u dodiru s onom površinom pločice koja je namijenjena kontaktu s kosti,
- b) ako je pločica simetrična, pločicu je potrebno položiti tako da se unutrašnji provrti nalaze između dva unutrašnja valjčića,

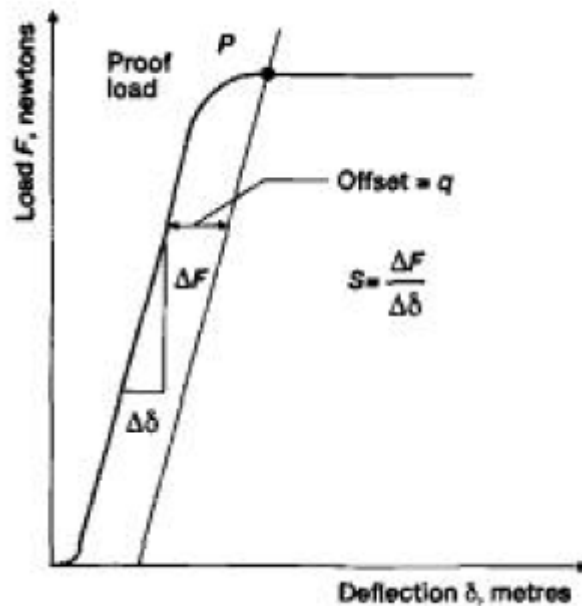
- c) ako pločica ima provrt u sredini, pločicu je potrebno položiti tako da su središnji provrt i neki drugi provrt simetrično postavljeni između dva unutrašnja valjčića,
- d) ako je pločica asimetrična, treba ju položiti tako da su dva provrta između unutrašnjih valjčića kako bi položaj frakture za koju je namijenjena bila između dva unutrašnja valjčića,
- e) vanjski valjčići moraju biti na jednakoj udaljenosti h od unutrašnjih valjčića, tako da je na toj udaljenosti samo jedan provrt između unutrašnjih i vanjskih valjčića, slika 4.1,
- f) unutrašnji valjčići ne smiju biti u kontaktu s onim mjestima pločice gdje se nalaze provrti, a kad je moguće vanjski valjčići ne bi smjeli doći u kontakt s dijelom pločice koji uključuje provrt,
- g) mjeri se udaljenost k između nutarnjih valjčića,
- h) os pločice mora biti okomita na osi valjčića,
- i) progib pločice se mjeri relativno u odnosu na početni položaj vanjskih valjčića.

Progib se može mjeriti na tri načina:

1. na središnjoj liniji između centralnih valjčića (δ_1),
2. na jednom od centralnih valjčića (δ_2),
3. ili na svakom od centralnih valjčića (δ_2 i δ_3).

Ako pozicija provrta pločice nije simetrična u odnosu na relativni položaj duljine pločice, preporuča se 3. način.

Sila F djeluje na središnjoj liniji gdje se i mjeri odgovarajući progib. Prilikom postepenog povećavanja vrijednosti sile F bilježi se odgovarajući progib crtajući graf sve dok sila ne dosegne vrijednost pri kojoj dolazi do pucanja pločice $F = F_{max}$, ili dok progib pločice δ u grafu ne dostigne željenu vrijednost ispitnog opterećenja $F = P$ kao što je prikazano na slici 4.2.



Slika 4.2. Dijagram sila – progib

Svaki mjerni uzorak upotrebljava se samo jednom i ne smije se koristiti za višekratna mjerenja.

IV. Izračunavanje rezultata

IV.1 Prosječni progib

Ako se progibi δ_2 i δ_3 određuju kao što je opisano u III.i)3., prosječni progib se izračunava pomoću izraza (4.1) i crta se graf sile F u ovisnosti o δ_4

$$\delta_4 = 0,5(\delta_2 + \delta_3) \quad (4.1)$$

IV.2 Ekvivalentna savojna krutost

Za određivanje ove veličine potrebno je nacrtati pravac najbolje što je moguće kroz početni linearni dio dijagrama sila/progib, u kojem nacrtani pravac ima nagib S kao što je prikazano na slici 4.2. Ako je progib mjeren prema III.i)1., ekvivalentna savojna krutost izračunava se pomoću izraza

$$K = \frac{(4h^2 + 12hk + k^2)Sh}{24} \quad (4.2.)$$

gdje je h razmak između unutrašnjih i vanjskih valjčića u metrima, k razmak između unutrašnjih valjčića u metrima i S nagib sila/progib krivulje u N/m.

Ako je pak progib mjeren načinom III.i)3., ekvivalentna savojna krutost se izračunava pomoću izraza

$$K = \frac{(2h + 3k)Sh^2}{12} \quad (4.3.)$$

IV.3 Savojna čvrstoća

Na dijagramu sila/progib potrebno je nacrtati pravac paralelno linearnom dijelu grafa pomaknuto za q metara kao što je prikazano na slici 4.2. Sjecište pravca s krivuljom je točka ispitivanja, koja definira ispitno opterećenje P . q se izračuna iz izraza

$$q = 0,02(2h + k) \quad (4.4)$$

a savojna čvrstoća u Nm se dobiva prema

$$\sigma_s = 0,5Ph \quad (4.5)$$

gdje je P ispitno opterećenje u N, a h udaljenost između unutrašnjih i vanjskih valjčića u metrima. Ako dođe do loma pločice prije nego što krivulja sila/progib presječe paralelno pomaknut pravac, savojna čvrstoća se izračuna pomoću izraza

$$\sigma_s = 0,4F_{max}h \quad (4.6)$$

gdje je F_{max} maksimalno opterećenje u N, a h razmak između unutrašnjih i vanjskih valjčića. Ovaj izraz koristi ekvivalentno ispitno opterećenje koje je 20% manje od maksimalnog opterećenja.

V. Izvješće o ispitivanju

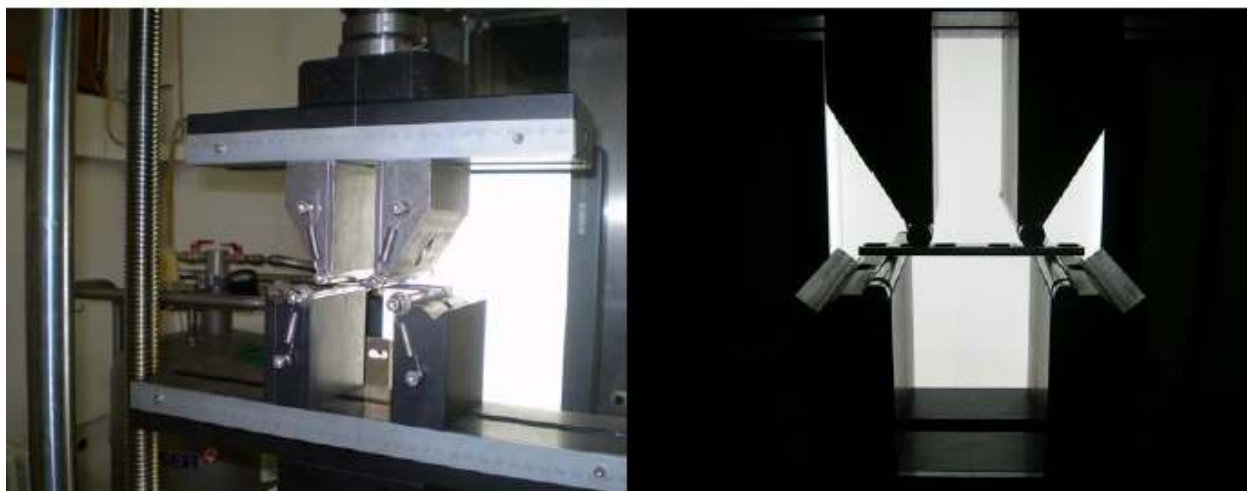
Izvješće o ispitivanju mora sadržavati sljedeće informacije:

- a) savojnu čvrstoću u Nm,
- b) paralelni pomak q , u metrima da bi se utvrdila točka ispitivanja,
- c) ekvivalentnu savojnu krutost u Nm^2 , koja se izračunava iz izraza 4.2 ili 4.3 već prema tipu eksperimenta,
- d) ako je došlo do loma pločica prije vrijednosti točke ispitivanja, to treba zabilježiti,
- e) potrebno je zabilježiti vrstu pločice, npr. tip, dužina, kataloški broj proizvođača, serijski broj, itd.

5. Ekperimentalno ispitivanje

5.1 Ispitivanje na savijanje prema normi ISO 9585

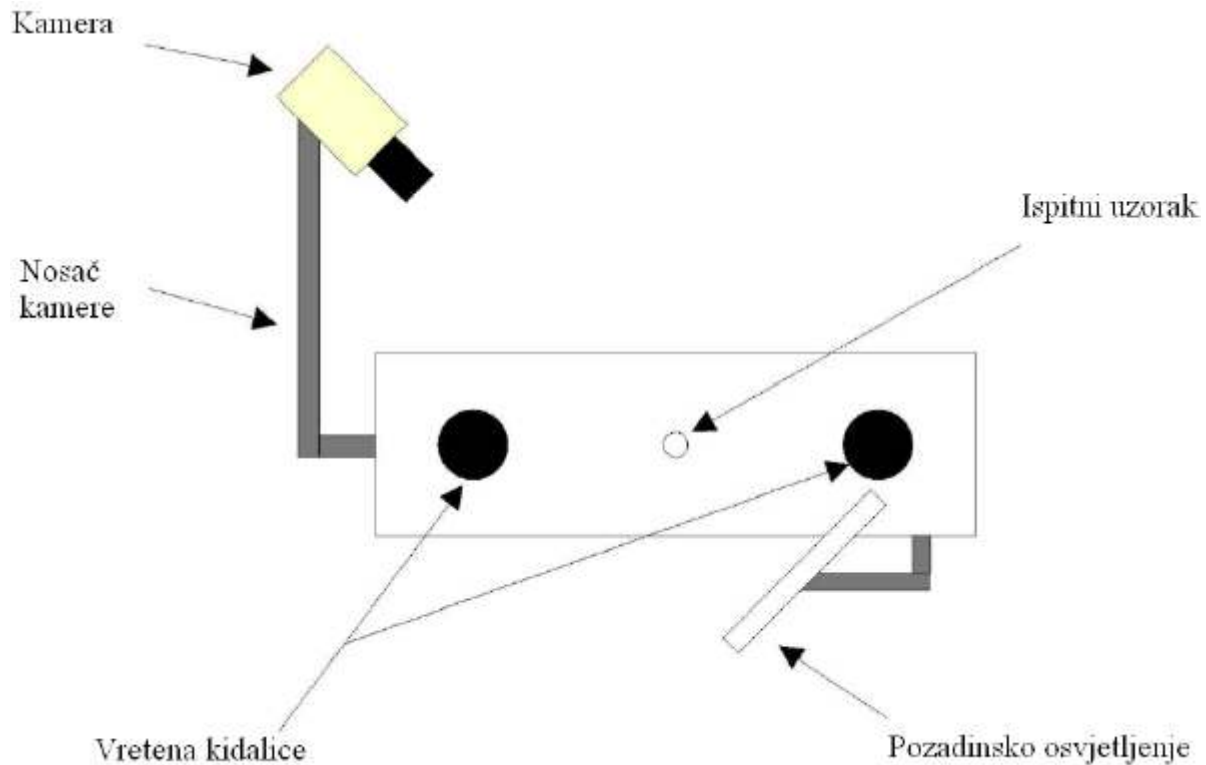
Ispitivanje na savijanje se provodi pomoću četiri valjčića čiji su promjeri određeni standardima (slika 5.1). Donji par valjčića služi kao oslonac dok su gornja dva pomična. Ispitivanje se vrši na taj način da se pločica položi na donja dva valjčića dok gornji vrše savijanje pločice gibajući se konstatnom brzinom. Tijekom ispitivanja snima se progib pločice u njenom središtu uz mjerenje sile savijanja.



Slika 5.1 Ispitivanje savojne krutosti pločice savijanjem u četiri točke

5.1.1 Postupak mjerenja

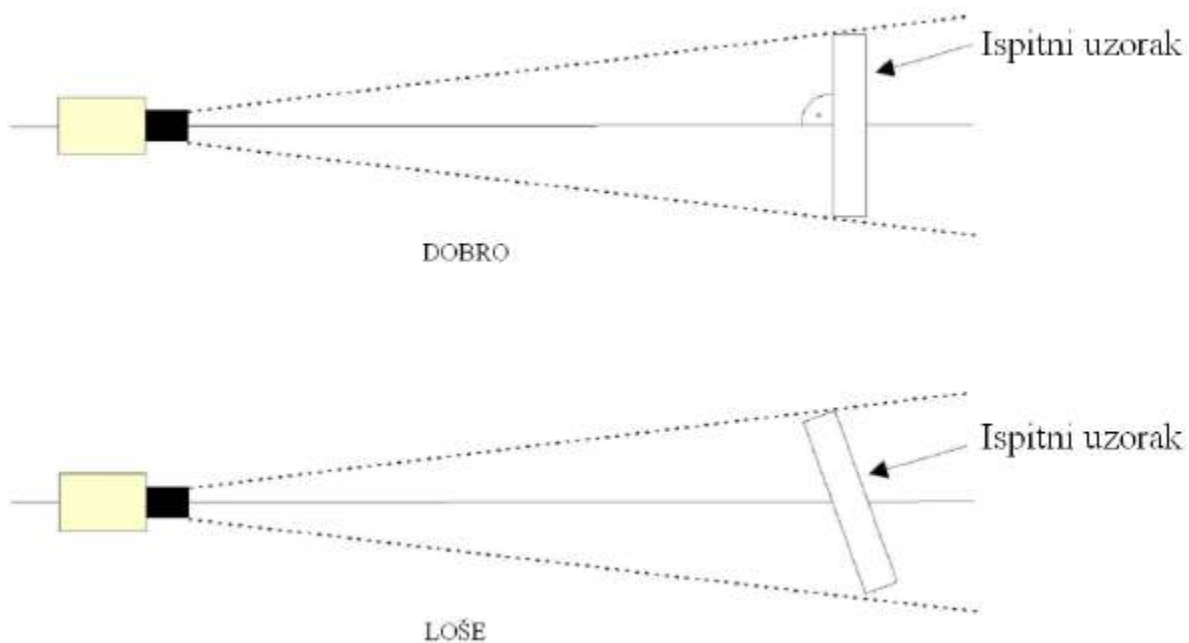
Za mjerenje progiba pločice korišten je videoekstenzometar. Videoekstenzometar je optički mjerni uređaj koji pomoću jedne kamere postavljene okomito na mjerni uzorak bezkontaktno mjeri progib pločice (slika 5.2).



Slika 5.2 Postav mjernih uređaja tijekom provedbe mjerenja progiba

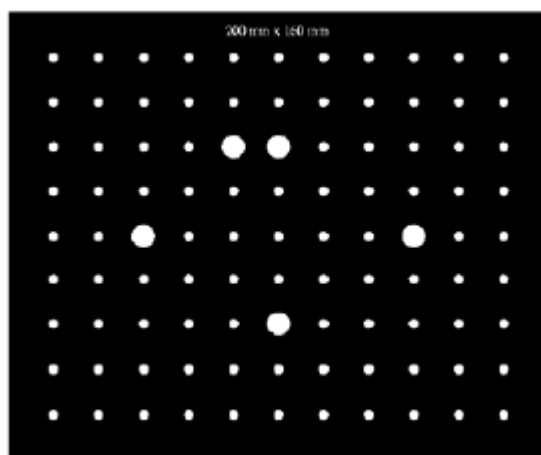
Postupak mjerenja se odvija u četiri faze. Prvo se priprema model i sustav, zatim slijedi kalibracija sustava, potom mjerenje progiba, te naposljetku obrada i prikaz dobivenih rezultata.

Mjerni objekt se postavlja u vidno polje sustava. Kamera se postavlja u horizontalni položaj, na određenu visinu, ali vrlo važno je da je nepomična u odnosu na mjerni objekt (slika 5.3). Nakon toga slijedi izoštravanje slike na mjerni objekt te namještanje otvora objektiva čiji prsteni za regulaciju moraju biti učvršćeni, jer bilo kakav pomak uzrokovao bi promjene u parametrima mjernog sustava.



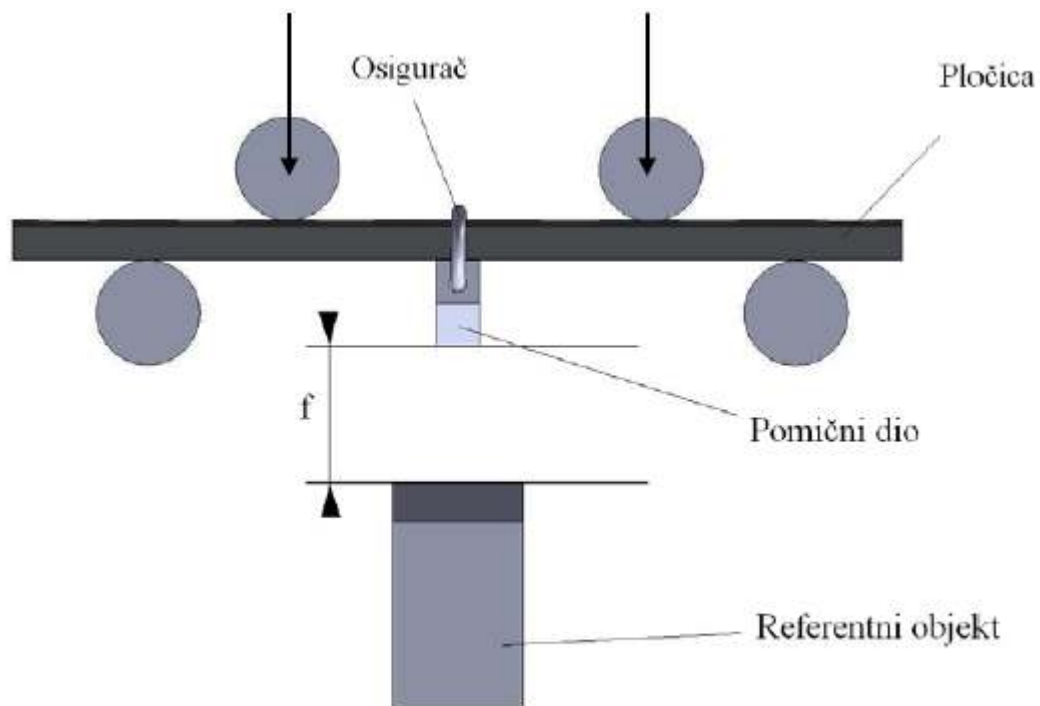
Slika 5.3 Položaj kamere u odnosu na ispitni uzorak

Nakon što je izvršena priprema modela i sustava, slijedi kalibracija sustava. Kalibracija je postupak kojim se dovodi u odnos objektne i slikovne koordinate, tj. definiira se koliko piksela odgovara jednome milimetru. To se postiže snimanjem kalibracijskog objekta (slika 5.4) koji je strogo definiranog oblika i geometrije, koji se postavlja u vidno polje kamere na mjesto na kojem će stajati mjerni objekt.



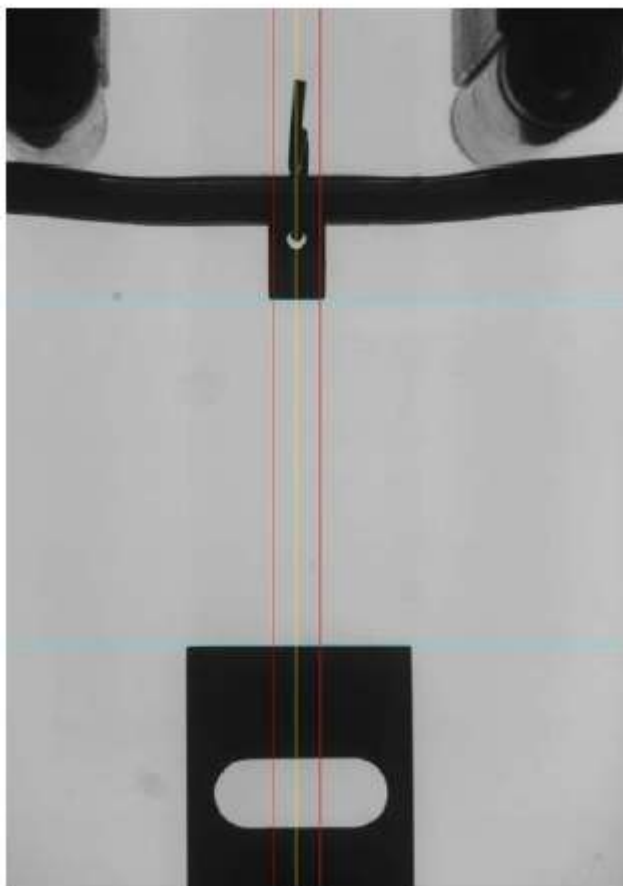
Slika 5.4 Kalibracijski objekt

Za snimanje slika koristi se CCD kamera koja radi frekvencijom od 10 Hz, tj. svakih 100 ms se prikazuje obnovljena slika. Program VideoextensometerNG radi na principu traženja rubova na vertikalnoj liniji koja je prethodno definirana. Da bi kontrast između rubova bio uočljiv, koristi se bijelo pozadinsko svjetlo. Jedan od rubova koje program detektira je između referentnog dijela i bijele pozadine, a drugi je rub između pomoćnog dijela koji je pričvršćen osiguračem na pločicu na kojoj se mjeri progib (slika 5.5). Pomoćni dio i referentni dio moraju biti čvrsto fiksirani u centar mjernog uzorka da rezultati budu što točniji.



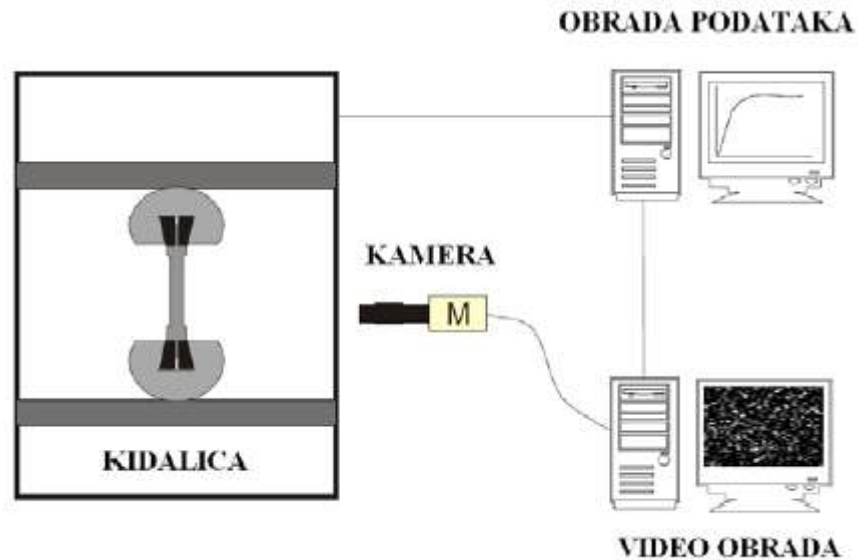
Slika 5.5 Mjerenje pomaka u odnosu na fiksni referentni dio

Prilikom ispitivanja mjeri se razmak između gornjeg i donjeg referentnog dijela (slika 5.6). Stoga je prikladno da se za mjerno područje, tj. Field of View izabere samo to područje, da se računalo ne opterećuje nepotrebnim podacima.



Slika 5.6 Mjerenje progiba pločice

Na slici 5.6 se može vidjeti sam način rada programa VideoextenzometarNG. Program na vertikalnoj liniji traži karakterističan prijelaz iz crnog u bijelo područje, te pomičući se po liniji dalje prijelaz iz bijelog u crno područje. Tamo gdje je program detektirao karakteristične prijelaze iscrtava horizontalne linije koje definiraju početni razmak između oslonca i pločice. Da bi rezultati za silu koji se dobivaju od kidalice, i rezultati za pomak koje daje videoekstenzometar bili vremenski usklađeni, ova dva uređaja trebaju biti međusobno povezana. Za povezivanje te dvije odvojene upravljačke jedinice koristi se UDP protokol. Shematski prikaz mjernog sustava prikazan je na slici 5.7.



Slika 5.7 Shematski prikaz mjernog sustava

Računalo za obradu podataka sprema podatke u jednu datoteku u kojoj se može očitati vrijeme trajanja ispitivanja, sile opterećenja, pomak čeljusti, te progib mjenom videoekstenzometrom.

5.1.2 Rezultati

Ispitivanje savojne krutosti osteosintetskih pločica provedeno je za pet različitih površina nalijeganja na periost. Na slici 5.8. prikazana je pločica nakon savijanja.



Slika 5.8. Pločica nakon savijanja

Mjerenja su vršena na 5 različitih tipova pločica: glatka površina nalijeganja na perioist, poprečno, uzdužno, koso i mrežasto ožljebljena kontaktna površina. Dimenzije pločica su 103 x 14 x 4 mm te sadrže 6 rupa.

Mjerni uređaj na kojem su vršena ispitivanja je statička kidalica Messphysik Beta 50-5. Razmak oslonaca je 74 mm, dok je razmak opterećenja 42 mm. Područje sile opterećenja je od 0 do 50 kN. Brzina deformiranja je 2 mm/min. Ispitivanja su vršena pri temperaturi od +22 °C.

Ekvivalentna savojna krutost je računata prema izrazu

$$K = \frac{(4h^2 + 12hk + k^2)Sh}{24} \quad (5.1)$$

gdje je h razmak između unutrašnjih i vanjskih valjčića u metrima, k – razmak između unutrašnjih valjčića u metrima (vidi sliku 4.1) i S – nagib sila/progib krivulje u N/m

$$S = \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

Savojna čvrstoća je računata prema izrazu

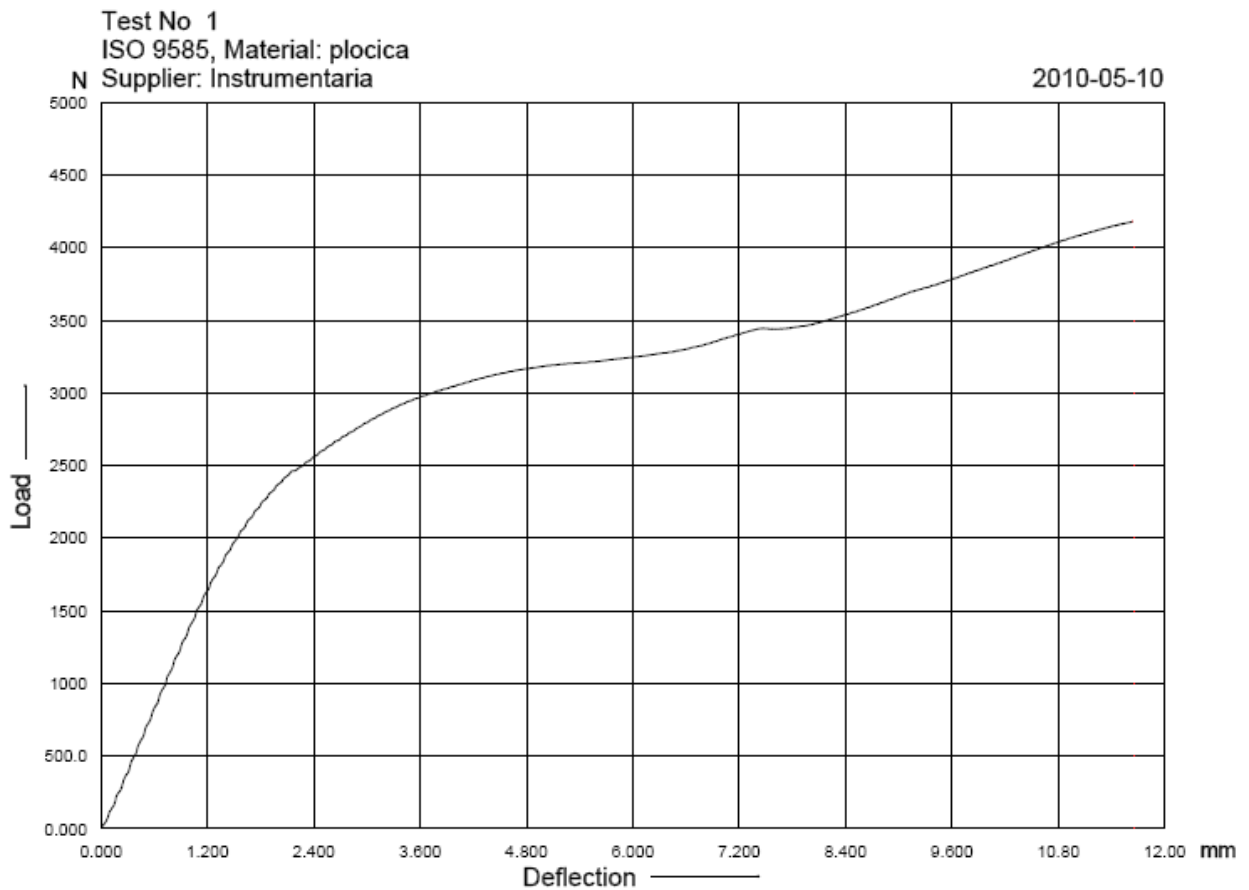
$$\sigma_s = 0,5Ph \quad (5.2)$$

gdje je P – točka ispitnog opterećenja u N, a h je udaljenost između unutrašnjih i vanjskih valjčića u metrima. Na krivulji opterećenje-progib povuče se pravac paralelno linearnom dijelu krivulje pomaknuto za q metara, što se izračuna pomoću izraza (vidi sliku 4.2)

$$q = 0,02(2h + k). \quad (5.3)$$

U ovom slučaju je $k = 0,042$ m, dok je $h = 0,016$ m, pa je $q = 0,0015$ m.

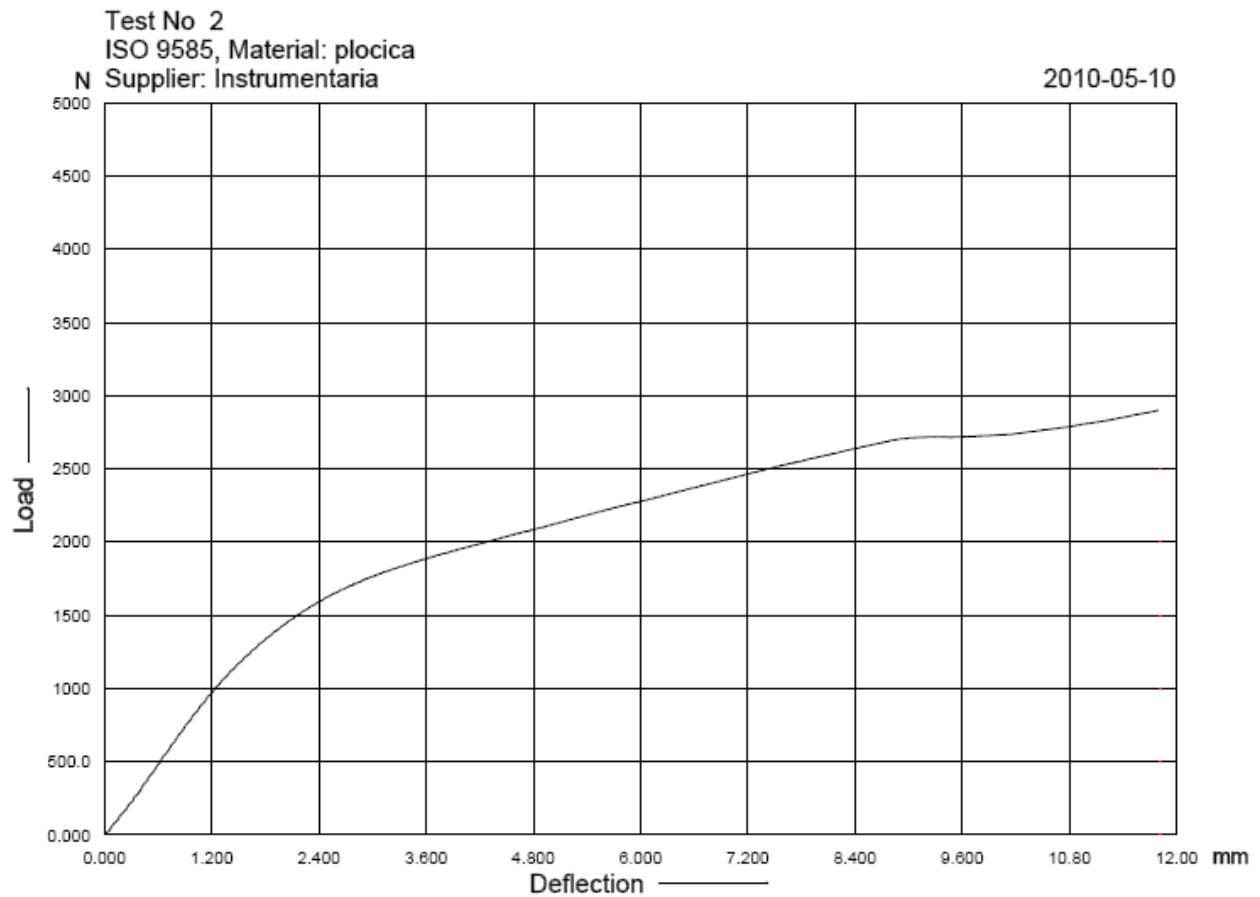
Sjecište te linije s krivuljom je točka ispitivanja, a to definira ispitno opterećenje P . Rezultati ispitivanja savojne krutosti za pločice s različitim površinom nalijeganja prikazane su dijagramom na slikama od 5.9 do 5.13 i u tablicama od 5.1 do 5.5.



Slika 5.9 Dijagram sila-progib za glatku pločicu

Tablica 5.1 Rezultati mjerenja za glatku pločicu

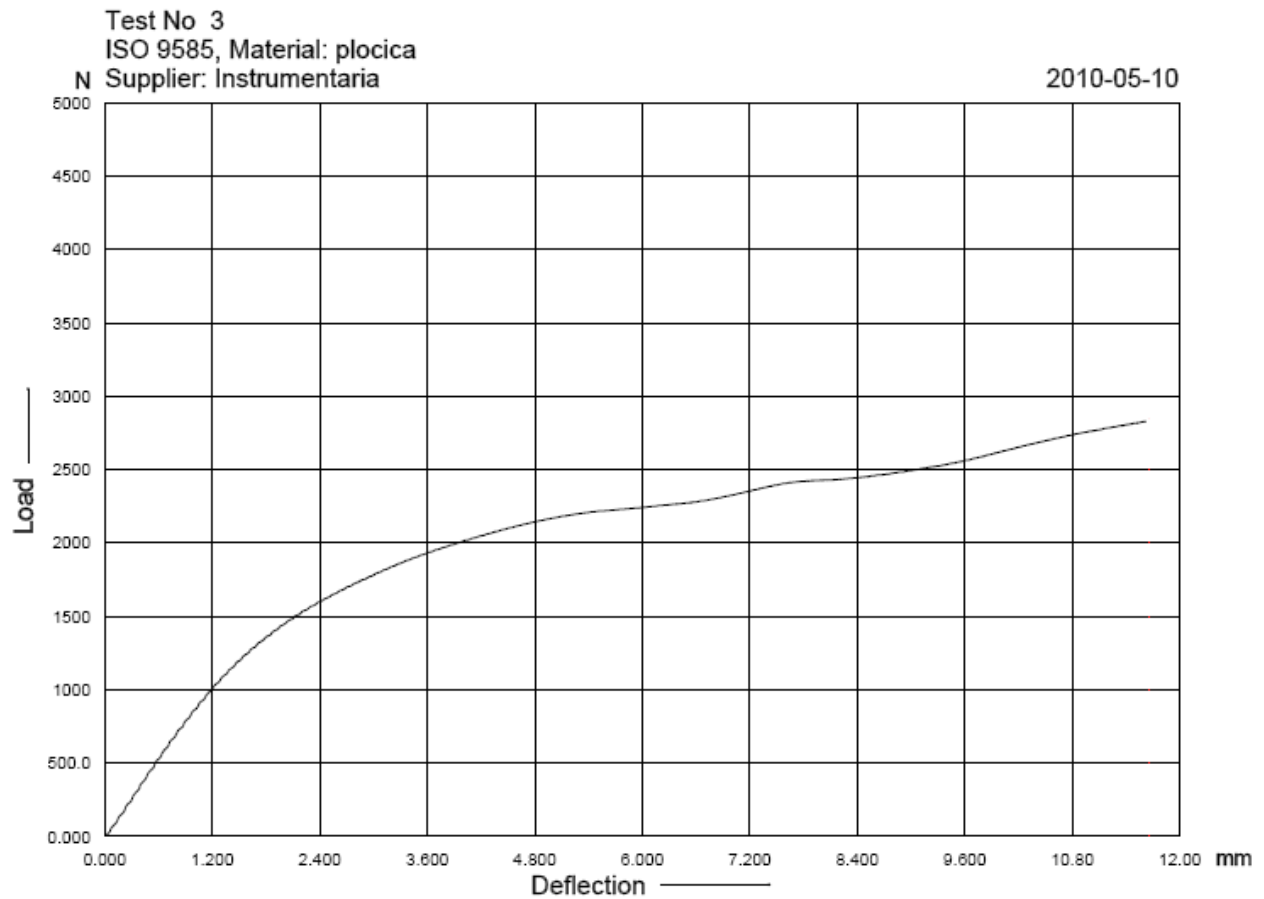
| silu F [N] | progib f [mm] |
|------------------------|-----------------|
| 500 | 0.3722 |
| 1000 | 0.7274 |
| S [N/mm] | 1407.61 |
| P [N] | 3032 |
| σ_s [Nm] | 24.256 |
| K [Nm ²] | 9.2823 |



Slika 5.10 Dijagram sila-progib za poprečno ožljebljenu pločicu

Tablica 5.2 Rezultati mjerenja za poprečno ožljebljenu pločicu

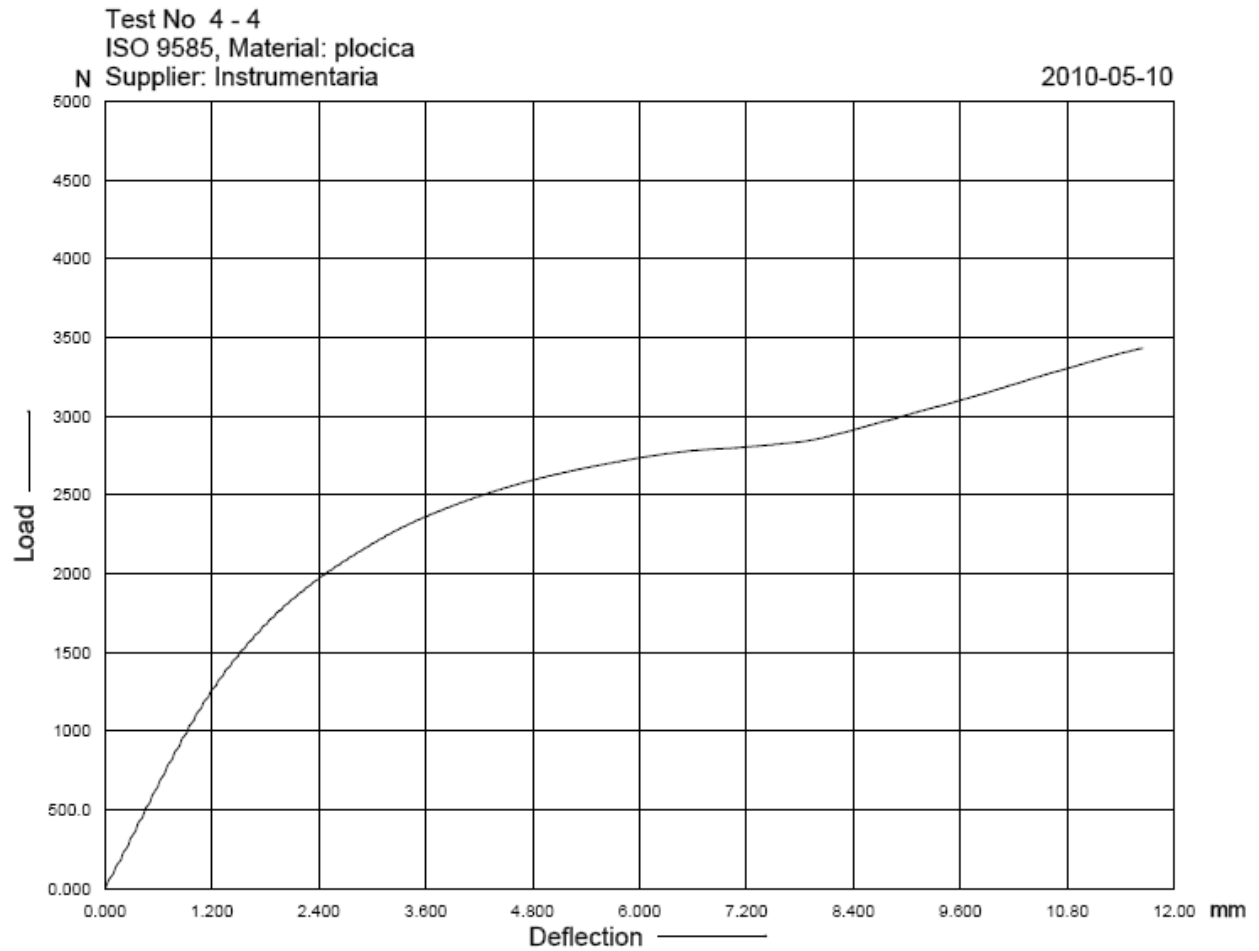
| | |
|------------------------|-----------------|
| silu F [N] | progib f [mm] |
| 500 | 0.6235 |
| 1000 | 1.2308 |
| S [N/mm] | 823.25 |
| P [N] | 1928 |
| σ_s [Nm] | 15.424 |
| K [Nm ²] | 5.4291 |



Slika 5.11 Dijagram sila-progib za uzdužno ožljebljenu pločicu

Tablica 5.3 Rezultati mjerenja za uzdužno ožljebljenu pločicu

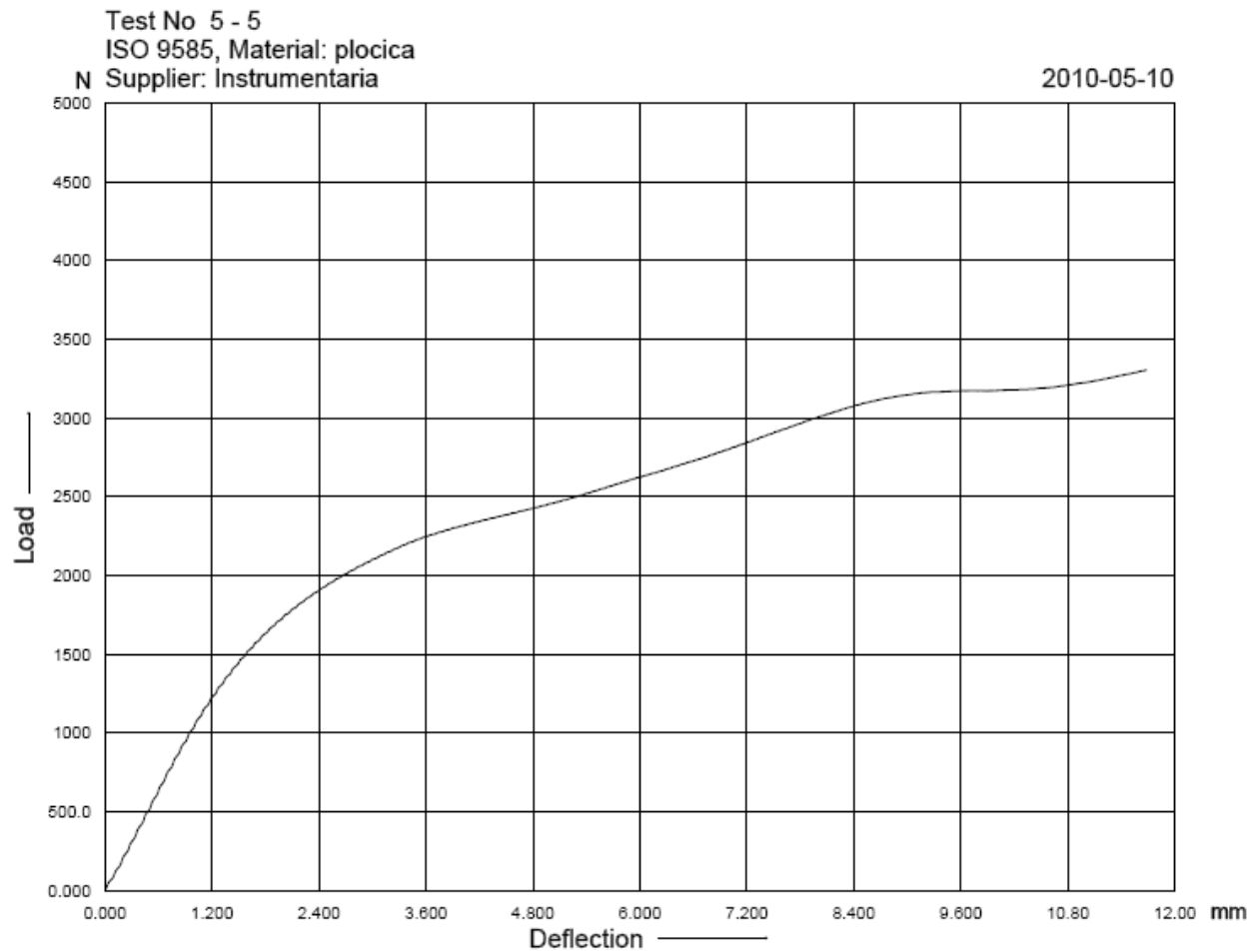
| | |
|------------------------|-----------------|
| silu F [N] | progib f [mm] |
| 500 | 0.5587 |
| 1000 | 1.1942 |
| S [N/mm] | 786.75 |
| P [N] | 1984 |
| σ_s [Nm] | 15.872 |
| K [Nm ²] | 5.1884 |



Slika 5.12 Dijagram sila-progib za koso ožljebljenu pločicu

Tablica 5.4 Rezultati mjerenja za koso ožljebljenu pločicu

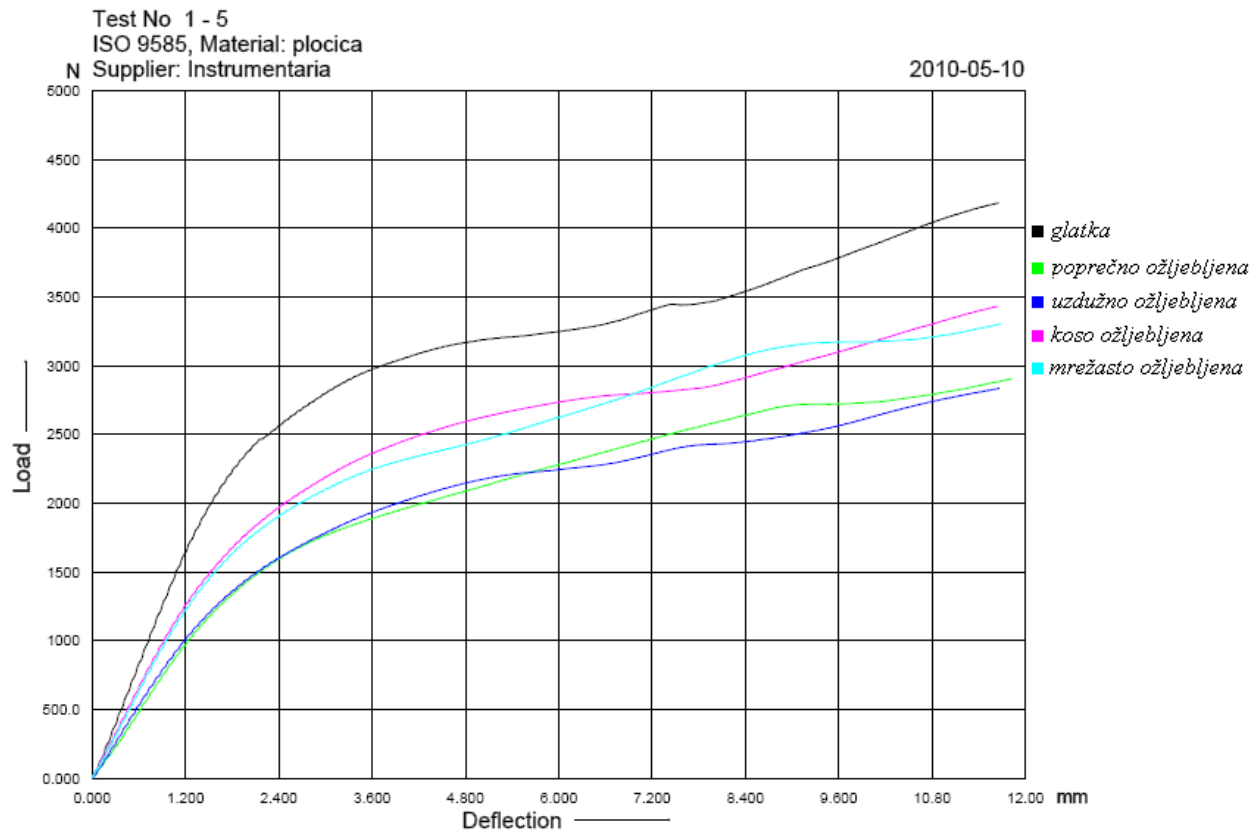
| | |
|------------------------|-----------------|
| silu F [N] | progib f [mm] |
| 500 | 0.4483 |
| 1000 | 0.921 |
| S [N/mm] | 1057.83 |
| P [N] | 2373 |
| σ_s [Nm] | 18.984 |
| K [Nm ²] | 6.976 |



Slika 5.13 Dijagram sila-progib za mrežasto ožljebljenu pločicu

Tablica 5.5 Rezultati mjerenja za mrežasto ožljebljenu pločicu

| | |
|------------------------|-----------------|
| silu F [N] | progib f [mm] |
| 500 | 0.4796 |
| 1000 | 0.9459 |
| S [N/mm] | 1072.28 |
| P [N] | 2225 |
| σ_s [Nm] | 17.80 |
| K [Nm ²] | 7.0713 |



Slika 5.14 Dijagram sila-progib za sve vrste ispitivanih pločica

Na slici 5.14 prikazana je grafička usporedba vrijednosti svih pet vrsta pločica, dok su u tablici 5.6 prikazani svi karakteristični podaci za svaku od pet vrsta pločica.

Tablica 5.6 Rezultati mjerenja za sve vrste ispitivanih pločica

| | Nagib sila/progib krivulje | Savojna čvrstoća | Ekvivalentna savojna krutost |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| | S [N/mm] | σ_s [Nm] | K [Nm ²] |
| Glatka pločica | 1407.61 | 24.256 | 9.2823 |
| Poprečno ožljebljena | 823.25 | 15.424 | 5.4291 |
| Uzdužno ožljebljena | 786.75 | 15.872 | 5.1884 |
| Koso ožljebljena | 1057.83 | 18.984 | 6.9760 |
| Mrežasto ožljebljena | 1072.28 | 17.8 | 7.0713 |

Prema dobivenim rezultatima mjerenja vidljivo je da glatka pločica ima najveću savojnu krutost i čvrstoću. U skupini ožljebljenih pločica, prema rezultatima najveću savojnu čvrstoću daje koso ožljebljena pločica, dok je ekvivalentna savojna krutost približno jednaka kod koso i mrežasto ožljebljene pločice. Najmanje vrijednosti savojne čvrstoće i krutosti imaju poprečno i uzdužno ožljebljena pločica.

Ovakvi rezultati su posljedica koncentracije naprezanja koja djeluju kod ožljebljenih pločica. Naprezanja ovise o vrsti i geometriji kontaktne površine, obliku, dubini, polumjeru zakrivljenosti dna te gustoći žljebova. Također, osim oblika žljebova na rezultate utječe i položaj samog žljeba. Kod koso i poprečno ožljebljenih pločica, žljebovi su praktički jednakih dimenzija ali rezultati su svejedno različiti, što je utjecaj povoljnijeg položaja žljebova kod koso ožljebljenih pločica. Zanimljivo je i da broj žljebova znatno ne utječe na rezultate, jer primjerice za koso i mrežasto ožljebljene pločice, rezultati se neznatno razlikuju, što znači da znatno veći broj žljebova kod mrežasto ožljebljenih pločica nije utjecao na krajnje rezultate. Također, loši rezultati kod uzdužno ožljebljenih pločica mogu se pripisati velikim širinama i dubinama žljebova radi čega je i sam poprečni presjek manji nego kod ostalih pločica, te automatski i lošija mehanička svojstva.

6. Zaključak

Cilj ovoga rada bio je eksperimentalno odrediti savojnu krutost osteosintetskih pločica s različitim oblicima površine nalijeganja na periost. Ispitivanja su provedena na 5 pločica istih dimenzija s različitim oblicima kontaktne površine. Ispitivane su pločice s glatkom površinom, te pločice s uzdužno, koso, poprečno i mrežasto ožljebljenim kontaktnim površinama. Progibi pločica tijekom opterećivanja na statičkoj kidalici određeni su bezkontaktno pomoću videoesktenzometra.

Prilikom odabira pločice za kliničku upotrebu bitno je voditi računa o njezinim mehaničkim svojstvima. Pločice trebaju imati što optimalniju veličinu kontaktne površine kao i njezin oblik, što se postiže ožljebljenjima na samoj površini nalijeganja. Rezultati dobiveni eksperimentalnim putem prilikom izrade rada, pokazuju da ožljebljenja znatno smanjuju savojnu krutost i čvrstoću pločice. Najveću savojnu krutost i čvrstoću pokazala je pločica s glatkom površinom nalijeganja. Zatim slijede koso i mrežasto ožljebljenje pločice koje su približno sličnih svojstava. Taj podatak ukazuje da broj žljebova ne utječe znatno na rezultate. Iako mrežasto ožljebljena pločica ima mnogo više žljebova, svojstva se neznatno razlikuju. Naposljetku, najlošije rezultate daju poprečno i uzdužno ožljebljene pločice, što se može pripisati manjem poprečnom presjeku pločice zbog veće širine i dubine žljebova u odnosu na ostale pločice.

Prikazani i elaborirani rezultati odnose se samo na statička ispitivanja, što znači da bi dobili pravu sliku kvalitete pločica moralo bi se provesti i dinamičko ispitivanje. Tek tada bi se sa sigurnošću mogla odabrati najpovoljnija pločica za korištenje u praksi, naravno uz potrebna klinička ispitivanja.

7. Literatura

- [1] M. E. Müller, M. Allgöwer: *Udžbenik osteosinteze*, Jugoslavenska medicinska naklada, Zagreb, 1981.
- [2] W. Lungerhausen, P. Ullrich: *Biological osteosynthesis*, Zentralblatt Für Chirurgie, 1997.
- [3] I. Alfirević: *Nauka o čvrstoći*, Tehnička knjiga d.d., Zagreb, 1995.
- [4] B. Kraut: *Strojarski priručnik*, Axiom, Zagreb, 1997.
- [5] M. Frantz: *Mehanička svojstva materijala*, FSB, Zagreb, 1998.
- [6] I. Premužić Meštrović: *Pošteda cirkulacije prijeloma kosti kod osteosinteze „biološkim pločicama“*, Magistarski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 2009.
- [7] Norma ISO 9585: 1990(E)