Једноаксијално притисно оптерећење

Опит једноаксијалног притисног оптерећења ваљкастог узорка стене је једноставан и најчешће примењиван опит у механици стена. Изводе га све лабораторије, рутински, а у великом проценту и аљкаво.

Опит се изводи на ваљкастом узорку који је формиран дијамантским бушењем са језгровањем. Формирано језгро се скраћује на дужину која је најмање 2.5 пута већа од пречника. Попречни резови којим се формира узорак морају бити управни на осу узорка са максималном тачношћу. Резањем формиране површине треба избрусити, а по могућности и полирати. Испитивање се по правилу врши на хидрауличној преси. Узорак се оптерећује до лома. Током оптерећења мери се деформација у правцу и управно на правац оптерећења. Подразумева се да је притисно оптерећење (N/m^2) хидрауличног уља на клип пресе једнако притисном оптерећењу на површину узорка и да је то једнако нормалном напону у узорку. Потом се црта напонско деформациона крива у правцу оптерећења и бочно. Из односа дилатација срачунава се Поасонов коефицијент. Притисак хидрауличног уља у тренутку лома узорка се сматра притисном чврстоћом. Погрешним тумачењем Хуковог закона израчунава се Јунгов модул.

Оптерећење и напон

Сила притиска хидрауличког уља на клип пресе (N/m^2) није једнака отпору стене деформисању, односно нормалном притисном оптерећењу у узорку стене (N/m^2). Тачније у већини случајева није иста. Иста је само у случају када је брзина притисног таласа у стени иста као брзина притисног таласа у челику (6km/s). Већина стена има мању брзину (3km/s, 4km/s), а код неких стена та брзина је знатно већа (8km/s).

Пренос енергије са челичног клипа на стенски узорак није низ бесконачно малих промена, него је низ временски ограничених импулса чији је интензитет:

$$I = \frac{m \cdot V_p^2}{2} \cdot t, (MPa)$$

Где је:

m- запреминска маса (g/cm^3)

V_p - брзина притисног таласа (km/s)

t- време трајања импулса (s)

Кинетичка енергија се преноси тако што челична честица клипа удара у стенску честицу узорка. Када су брзине кретања честица челика и стене исте енергија се преноси без остатка. Када су брзине различите постоји пригушење.

Када је брзина притисног таласа у стени мања од брзине притисног таласа у челику стенска честица кочи челичну честицу и оне се крећу истом брзином. Када је брзина притисног таласа у стени већа од брзине притисног таласа у челику већ после првог импулса честица стене се одмиче (бежи од стенске честице). Челична честица је касније сустиже даје јој нови импулс и она се поново одмиче. Како се енергија преноси само док су честице у контакту и овде постоји пригушење.

Ако од уложене енергије одузмемо пригушење добићемо искоришћење енергетског трансфера, које се сходно претходној формули може израчунати из односа квадрата притисних таласа честица у контакту. Па ће тако у случају када је брзина притисног таласа у стени (V_s) нижа од брзине притисног таласа у челику ($V_č$) бити:

$$I_{st} = \frac{V_s^2}{V_č^2}$$

Па ако је брзина притисног таласа у челику ($V_č = 6km/s$), можемо написати да је:

$$I_{st} = \frac{V_s^2}{36}$$

А у случају када је брзина притисног таласа у стени (V_s) већа од брзине притисног таласа у челику ($V_č$) биће:

$$I_{st} = \frac{36}{V_s^2}$$

Па тако када се узорак стене која има брзину притисних таласа ($V_s = 5km/s$), сломи услед притисног оптерећења од 66MPa, његова притисна чврстоћа неће бити 66MPa, јер ће нормално притисно напрезање бити умањено због пригушења притисног таласа. Односно искоришћење трансфера кинетичке енергије са челика на стену ће бити:

$$I_{st} = \frac{25}{36} = 0.69$$

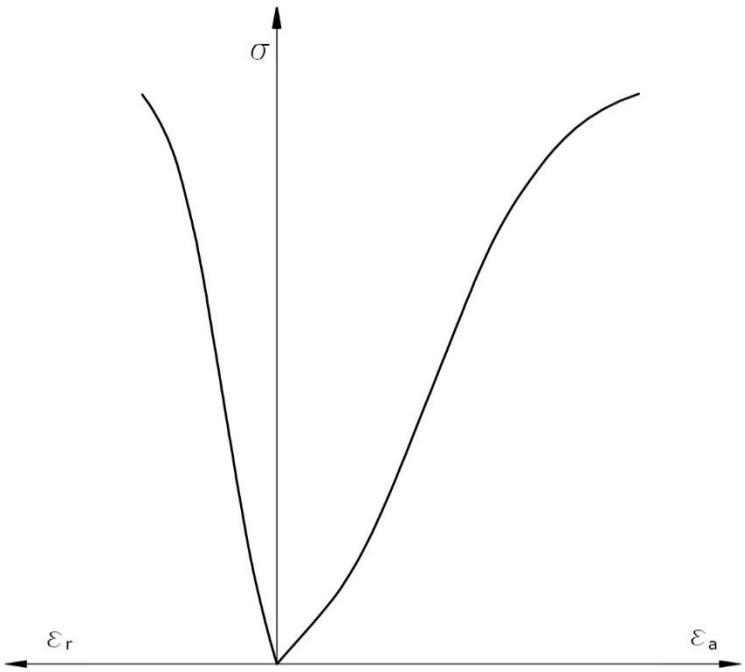
Па ће стварна притисна чврстоћа испитиваног узорка бити:

$$\sigma_c = 66 \cdot 0.69 = 45.5MPa$$

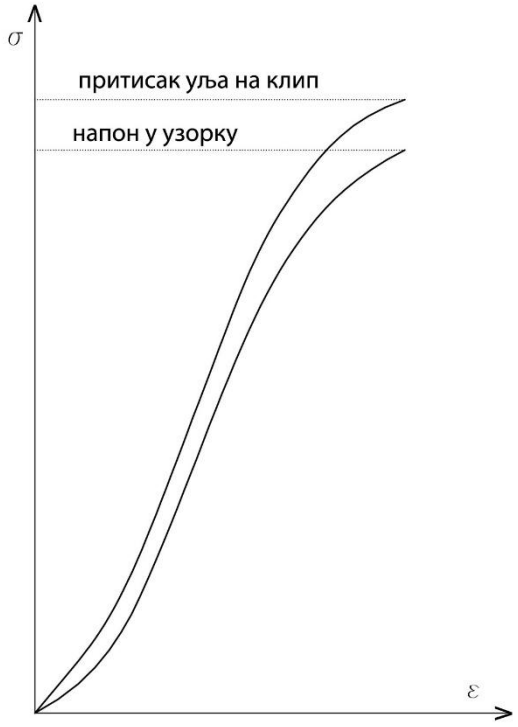
Напонско-деформациона крива

Током опита једноаксијалног притиска мери се деформација узорка у правцу оптерећења и бочно. У првом квадранту се црта крива промене аксијалне деформације у правцу оптерећења у функцији оптерећења, а у четвртом квадранту се црта крива радијалне деформације, такође у функцији аксијалног оптерећења, слика 1.

Позабавићемо се кривом у првом квадранту која осликава однос нормалног притисног напрезања и дилатације скраћења у правцу оптерећења. Подразумева се да је притисно напрезање у узорку бројчано једнако притисном оптерећењу клипа пресе. Како је већ објашњено то је тачно само у случају када је брзина притисног таласа у стени једнака брзини притисног таласа у челику. У свим другим случајевима постоји пригушење па је потребно израчунати стварно притисно оптерећење у узорку. На слици 2 је показана коригована деформациона крива паралелно са привидном деформационом кривом. У даљем разматрању користимо кориговану деформациону криву, слика 3. Тачнији назив би био крива отпора деформисању. Оптерећење на узорак се наноси у једнаким интервалима истог интензитета. Једнака оптерећења изазивају различите износе деформације, односно дилатације. То значи да се током процеса оптерећења под непромењеним условима од нулте тачке до лома, мења реакција стенског материјала. Мења се отпор деформисању који ћемо објаснити на приложеној кривој линији.



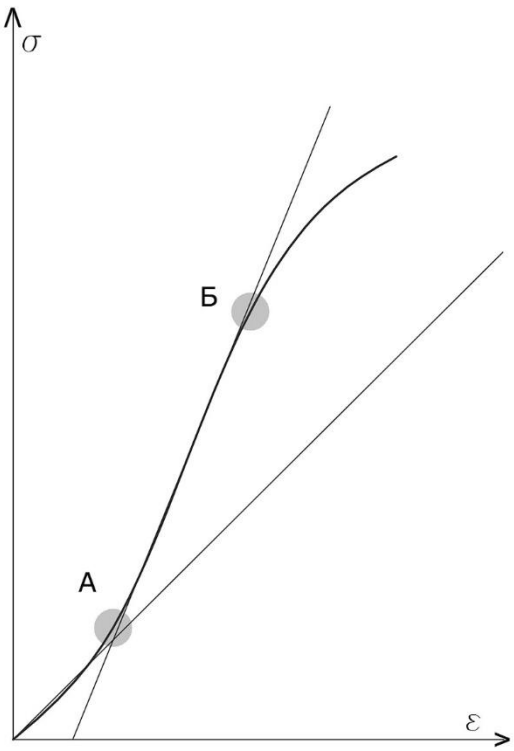
Слика 1. Комплетна деформациона крива



Слика 2. Коригована деформациона крива

На кривој се могу издвојити две карактеристичне тачке које криву деле у три сектора. Први сектор од нулте тачке до тачке „А" који карактерише линеарна зависност између напона и дилатације. Потом се крива повија на горе и све до тачке „Б" задржава линеарну зависност између напона и дилатације. При том, истом прираштају напона одговара мањи прираст дилатације. После тачке „Б" крива се константно повија све до момента лома, а истом прираштају напона одговара прогресивно мањи прираштај дилатације.

Наношењем аксијалног оптерећења на честицу „а" оптерећују се и честице „б" и „ц" , а што је приказано на слици 4. Честица „а" настоји да раздвоји честице „б" и „ц", а томе се супроставља отпор трења на контактним површинама. Отпор трења се изједначи са оптерећењем у тачки „А" и после тога честица „а" клиза по по површинама честица „б" и „ц" и изазива њихово раздвајање. Од тачке „А" отпору деформисању се придодаје и отпор трења, па се крива повија на горе. Честице су изграђене од субчестица, тј. понавља се примарна структура, па се честице еластично деформишу, издужују се у правцу управном на оптерећење и скраћују се у правцу оптерећења.

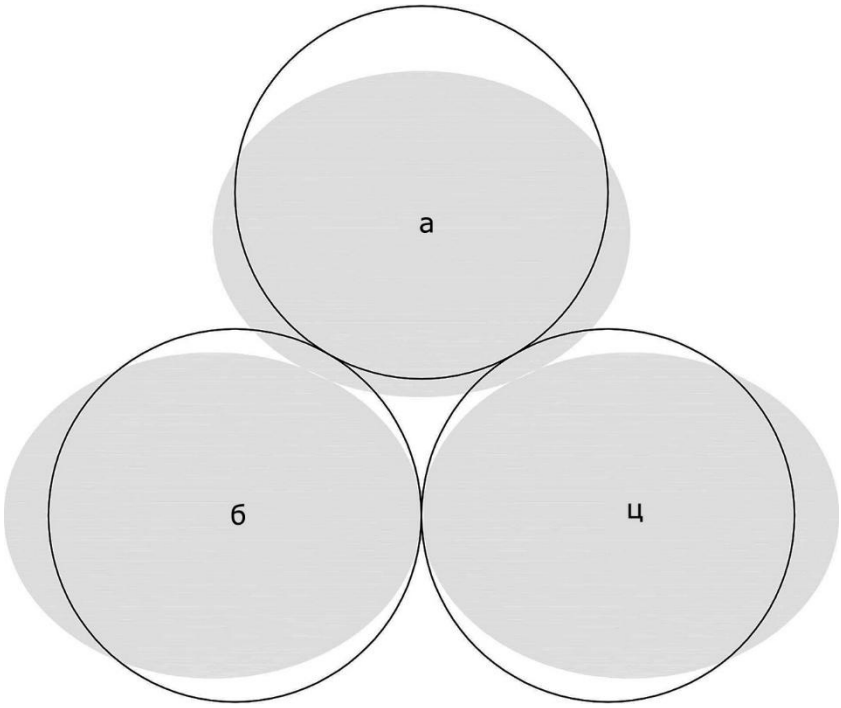


Слика 3. Карактеристичне тачке на деформационој кривој

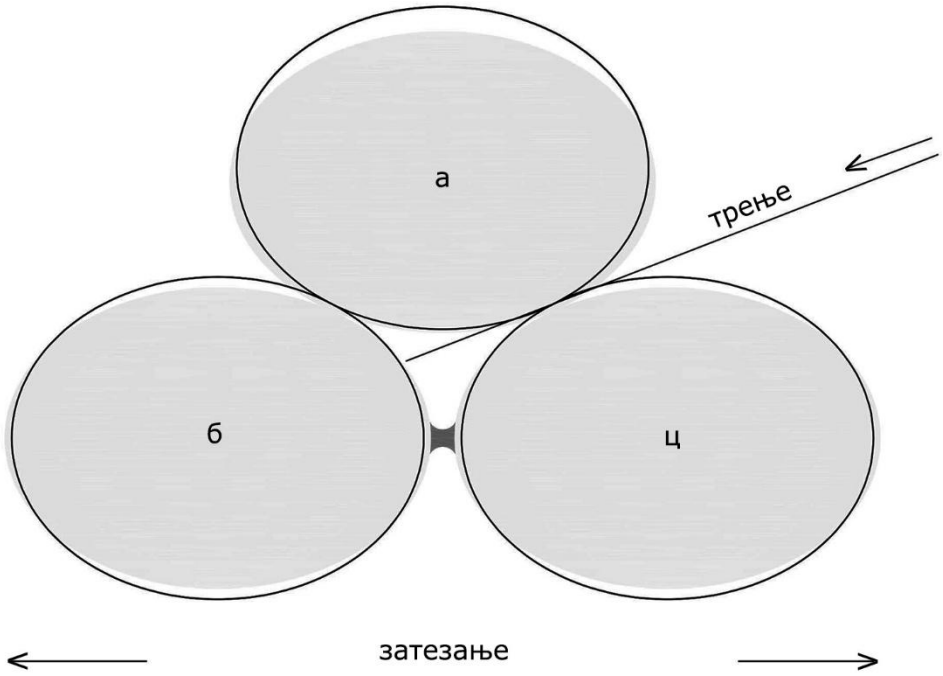
Очигледна је линеарна зависност између оптерећења и дилатације. У овој зони енергија уложена у деформациони рад се конвертује у потенцијалну енергију еластично деформисаних честица.

У сектору 2 између тачака „А" и „Б" расте отпор деформисању услед укључивања отпора трења при клизању честице „а" по честицама „б" и „ц", слика 5.

У тачки „Б" почиње повијање криве отпора деформисању на доле. За исте вредности импулса оптерећења расте износ дилатације. Део кинетичке енергије која је потрошена на раздвајање примарних и секундарних честица конвертован је у потенцијалну енергију еластично деформисаног материјала. А део енергије који је потрошен на савладавање отпора трења конвертован је у топлотну енергију. У тачки „Б" количина топлоте односно степен загрејаности је такав да слаби кохезија, односно отпор раздвајању. То траје све до лома, односно до пуцања кохезионих веза између честица.



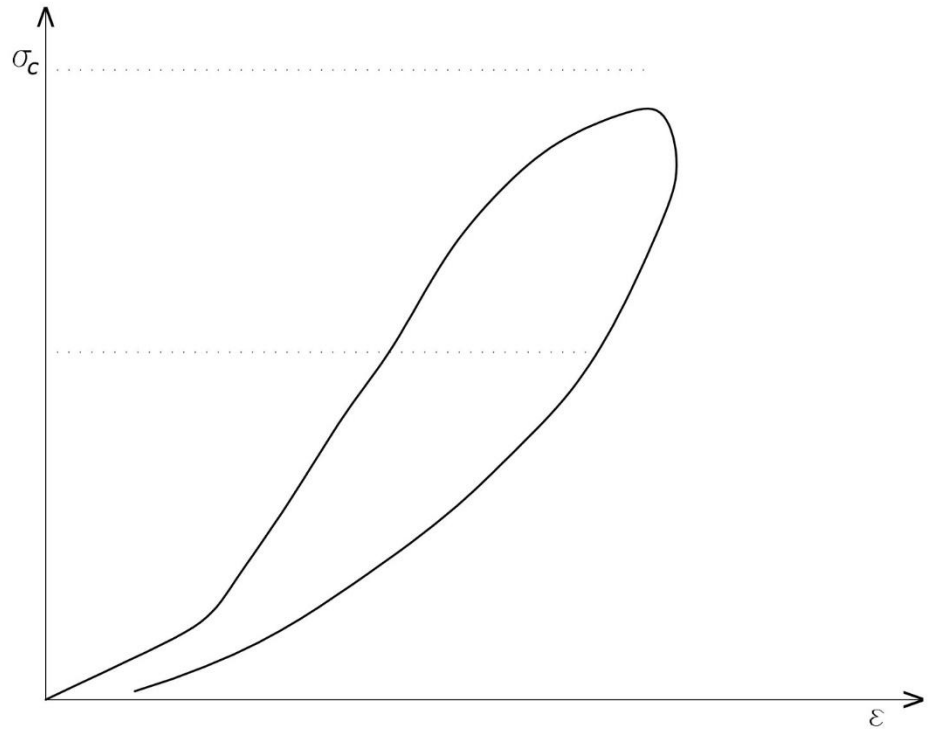
Слика 4 Стање материјалних честица у првом сектору



Слика 5 Стање материјалних честица у другом сектору

Оптерећење и растерећење

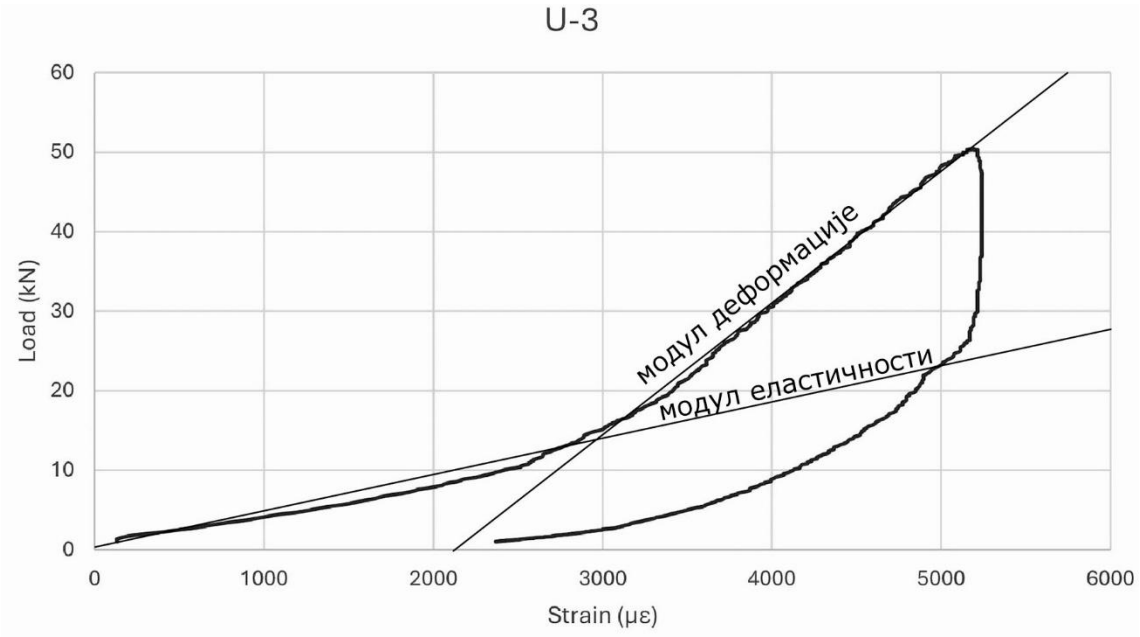
Опит једноаксијалног оптерећења и растерећења се веома ретко изводи јер нема практичан значај и не обезбеђује податке неопходне за инжењерске прорачуне. На слици 6 показан је идеализовани приказ напонско-деформационе криве оптерећења и растерећења. Као што се на приказу види са оптерећењем се ишло скоро до очекиване границе лома. Ову криву карактеришу два битна момента. Први је да после 2/3 укупног оптерећења почиње повијање деформационе криве због загревања услед трења, а што за последицу има снижавање кохезије, односно отпора деформисању. Потом највиша тачка где се крива ломи услед прекида довођења енергије или тачка застоја пре почетка растерећења крије једну значајну чињеницу. Када се прекине са довођењем енергије притисак хидрауличког уља задржава достигнуту вредност иако је уље (течност) нестишљиво и не акумулира енергију. Међутим челични суд у којем је уље, укључујући и клипове део кинетичке енергије конвертују у потенцијалну енергију еластично деформисаног материјала.



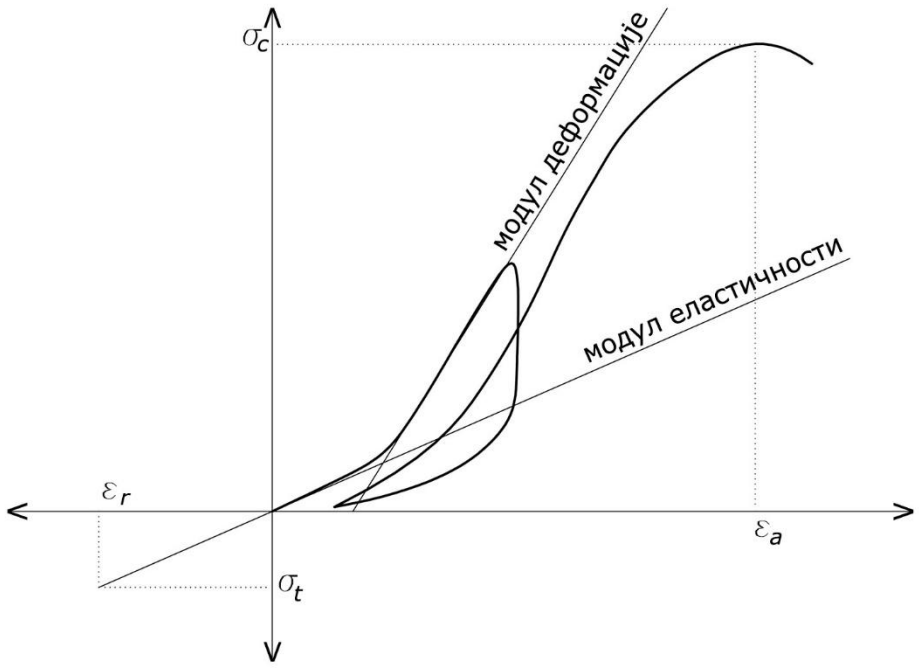
Слика 6. Идеализовани приказ криве оптерећење-растерећење

Када се крене са растерећењем осим енергије акумулиране у стенском узорку у враћању честица у почетни (нулти) положај учествује и потенцијална енергија акумулирана у челику. Код чврстих стена и високих нивоа оптерећења то може бити знатан износ потенцијалне енергије еластично деформисаног тела.

На слици 7 је показана реална (необрађена) напонско деформациона крива реалног стенском материјала са аутентичним вредностима параметара. Са оптерећењем се ишло до износа од 1/3 притисне чврстоће. Са оптерећењем се стало пре озбиљнијег загревања и видљивог пада кохезије. Осим тога минимизирано је учешће потенцијалне енергије акумулиране у челику. Максимално оптерећење је било 50kN, које је после почетка растерећења пало на 25 kN без промене дилатације. Јасно је да је реч о материјалу са ниским еластичним потенцијалом и да је половина утрошене енергије у деформациони рад конвертовано у топлотну енергију. Уочљиво је да се нагиб овако конструисаног модула еластичности подудара са почетним нагибом деформационе криве пре почетка клизања честица и појаве отпора трења.



Слика 7. Крива оптерећење-растерећење са ниским нивоом оптерећења



Слика 8. Комплетан једноаксијални опит

Очигледно је да је само тај први део деформационе криве зона еластичности и да се Хуков закон односи само на тај део криве.

За обезбеђење неопходних параметара предлаже се опит приказан на слици 8. Први корак је оптерећење узорка испод ½ очекиване носивости. Потом следи растерећење, а после тога оптерећење до лома узорка. Коса линија која репрезентује модул еластичности продужи се у трећи квадрант кординатног система. Из пресека те линије и измерене попречне дилатације може се одредити затезна чврстоћа узорка.

Енергетски биланс и угао унутрашњег трења

Из произвољно одабране тачке у сектору 2 деформационе криве повучемо вертикалну линију до пресека са апсцисом и очитамо вредност (ε). Из исте тачке повучемо хоризонталну линију до пресека са ординатом и очитамо вредност (σ_1). На основу ове две вредности можемо израчунати уложену енергију () односно укупан деформациони рад, односно укупан отпор деформисању (R_u).

$$R_u = \sigma_1 \cdot \varepsilon \left[\frac{Nm}{m^3}\right]$$

Потом из тачке пресека вертикалне линије и косе линије која означава модул затезања или отпор деформисању због размицања честица очитамо вредност (σ_t). Сада можемо израчунати отпор деформисању због размицања честица коме се супроставља кохезија (R_t), а који је бројчано једнак напону затезања.

$$R_t = \sigma_t \cdot \varepsilon \left[\frac{Nm}{m^3}\right]$$

Разлика између ова два отпора деформисању је отпор трења услед кретања честица честица (R_e). Енергија која је потрошена на савладавање отпора трења конвертује се у топлотну енергију и представља ентропију.

$$R_e = R_u - R_t$$

Односно:

$$R_e = (\sigma_1 - \sigma_t) \cdot \varepsilon$$

Са друге стране:

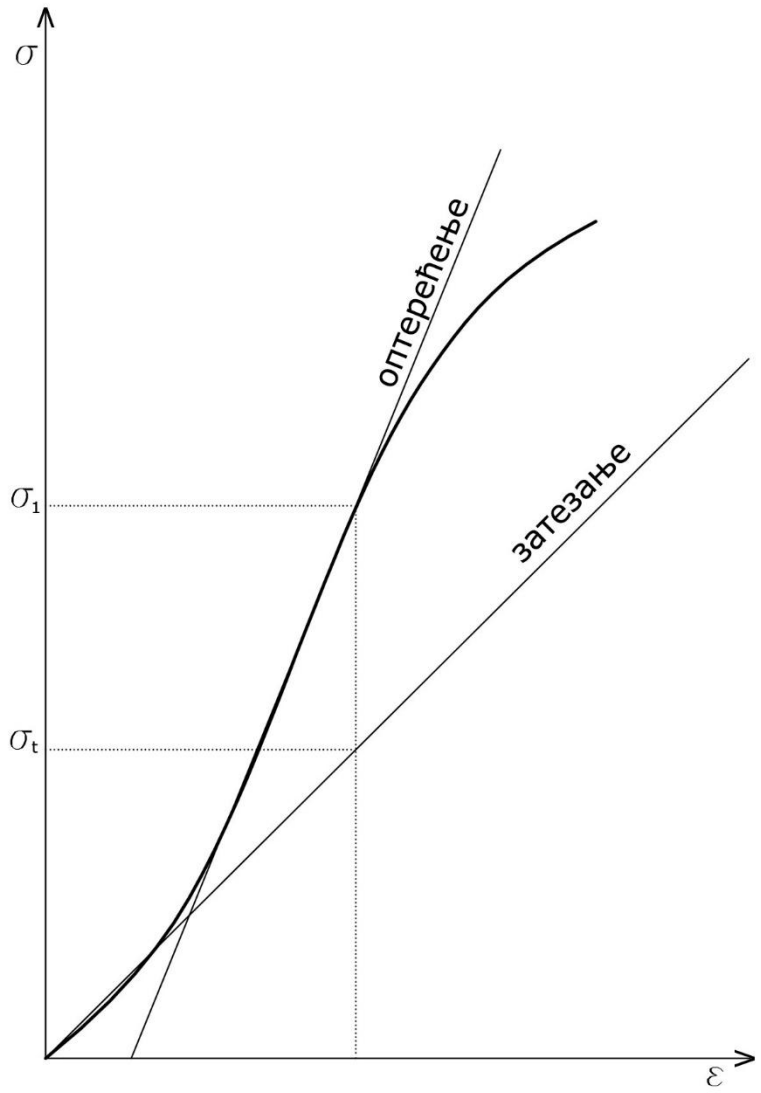
$$R_e = \sigma_t \cdot tg\varphi \cdot \varepsilon$$

Па је:

$$(\sigma_1 - \sigma_t) \cdot \varepsilon = \sigma_t \cdot tg\varphi \cdot \varepsilon$$

Односно:

$$tg\varphi = \frac{\sigma_1}{\sigma_t} - 1$$



Слика 9. Енергетски биланс

Из претходног произилази да ако су отпор деформисања услед трења (R_e) и отпор деформисања услед размицања честица (R_t) једнаки онда је угао унутрашњег трења 45^o.