



Определяне на максималното срязващо напрежение върху произволно ориентирана скална прекъснатост, в контекста на геотехническата практика на пътното и тунелно строителство

Иван Димитров Иванов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, ул. Проф. Боян Каменов № 1, 1700 София

Finding of the maximum shear stress on arbitrary oriented rock discontinuity in the context of the geotechnical practice of road and tunnel construction

Ivan Dimitrov Ivanov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1 Prof. Boyan Kamenov str., 1700 Sofia; E-mail: idim68@abv.bg

Abstract. Graphical method for calculation of the orientation and values of the normal and shear stresses, due to gravity or tectonic loading on joints, faults, layer contacts, metamorphic foliation, dyke contacts and others is presented in this text. It is based on stereographic solution for finding of the resultant stress on geological discontinuity, located in the space by measuring with geologic compass. In the text methods are discussed for finding of the values and orientation of the principal lithostatic or tectonic stresses in the rock massif. This method can be employed for finding of the approximate values and orientation of the shear and normal stresses that acts on joints and faults in benches, road cliffs, tunnels foundations, bridge foundations and etc., using data from geological mapping and land surveying of the topography of the rock massif, at the stage of preliminary or detailed project development for road construction.

Keywords: normal and shear stress, joint, fault, lithostatic stress, stereographic projection, road stability.

Резюме. В този текст се излага графична методика за изчисляване на ориентацията и величината на нормалното и срязващото напрежение, породени от литостатичния или тектонския натиск на скалите върху пукнатини, разломи, повърхнини на литоложка слоестост, метаморфни фолиации, контакти на дайки и други скални прекъснатости, които се съдържат във всеки скален масив. Методиката е базирана на стереографско решение за намиране на резултантното напрежение върху геоложка прекъснатост, определена пространствено чрез измерване с геоложки компас. Дискутирани са методи за определяне на величината и ориентацията на главните литостатични или тектонски напрежения в скалния масив. Методиката е подходяща за приблизително изчисляване на срязващите напрежения, действащи по пукнатини и разломи в пътни откоси, тунели, фундаменти на мостове и др., като се използват данните от геоложката картировка и геодезичните данни за топографията на скалния масив, на етап предварително или детайлно проектиране на пътни съоръжения.

Ключови думи: нормално и срязващо напрежение, пукнатина, разлом, литостатичен натиск, стереографска проекция, стабилност на пътно съоръжение.

Увод

Обществените изисквания към пътното строителство налагат на проектантските организации ограничения за максималния наклон и кривината на пътищата. Тези ограничения водят до избор на пътни трасета, които в геоложко и геоморфоложко отношение са неподходящи за трайно функциониране на съоръженията, тъй като поставят бъдещия път в сложна геотехническа ситуация. Основното ограничение за максимален наклон от 5–6% води до това, че в полупланински и планински терен пътното трасе се избира така, че да премине не

през билата, а по склоновете, които обикновено са много стръмни.

Прокарването на трасето по стръмната част на склоновете поставя пътя под непрекъснатото въздействие на гравитационния натиск, предизвикан от скалите, които са разположени по-високо в склона. Пример за подобно проектантско решение е обходният път над язовир Цанков камък, но в действителност всички проектантски решения в полупланински или планински терени у нас страдат от този принципен проблем.

Борбата с гравитацията в дългосрочен аспект е невъзможна, а това означава, че след построяване-

то на съоръжението, разходите за поддръжка ще нарастват с всяка измината година, достигайки неприемливо големи стойности.

Движението и разрушаването на скалите в склона се извършва по разнообразни механизми – пълзене на повърхностната изветряла част от склона, пълзене на делувия, типични свлачища, срутища, откъсване и преобръщане на големи блокове (toppling), свличане на скални призми, ограничени от пресичащи се пукнатини или разломи, свличане на скални пластини по плоскостите на метаморфната фолиация и др.

За скалните материали важи правилото, че те се разрушават като напреженията в масива предизвикват срязване по вече съществуващи плоскости на прекъснатост, такива като разломи, пукнатини и фолиации.

В тази работа се разглежда една от основните задачи в скалната механика, а именно определяне на посоката и величината на срязващото напрежение върху съществуваща прекъснатост с произволна ориентация, в условията на тримерно напрегнато състояние с произволна ориентация на главните оси на напрежение. В контекста на геотехническата практика, методиката може да се използва за намиране на ориентируващата стойност и посоката на срязващото напрежение върху пукнатини, разломи или фолиационни плоскости, с цел проектиране на подпорни стени, крепеж на тунели или характеризирани на склонността на определени доминиращи прекъснатости да канализират движения на масива.

Както при всяка задача във физическия свят и при тази са налице обективни трудности за намиране на решение. По този повод Архимед е казал: „Дайте ми опорна точка и достатъчно дълъг лост и ще преобърна Земята.“ Ролята на опорната точка и дългия лост в случая се играе от обективната трудност да се намери ориентацията и стойностите на главните напрежения в масива, които действат върху анализираната скална прекъснатост. Едва когато тази ориентация и тези стойности са известни, може да се пристъпи към определяне на нормални и срязващи напрежения, които са определящи в геотехническото моделиране.

Авторът на тази работа посвети известна част от времето си на решаването на тази задача, като през 2003 г. публикува просто частично решение, стъпващо на разлагането на гравитационното напрежение върху статистически определена група от пукнатинни плоскости (Dimitrov, 2003). В настоящата публикация се разглежда пълното решение на проблема, като се използват формулите, изведени от Bott (1959) и стереографското решение на Goodman (1963). Това е фундаментална теория, която е сравнително нова, особено в България, и като се отчете времето, необходимо за навлизане на теорията в практиката, става ясно, че тя тепърва ще се внедрява в различни практически методики.

Основоположник на този подход е Wallace (1951), а строгият извод на формулите, които се представят тук, е направен от Bott (1959). Goodman (1963) предлага прост стереографски метод за практическо прилагане на формулите. По късно се появяват стереографските решения на Means (1989), Lisle (1989), Ragan (1990), Alaniz-Alvarez et al. (1998) и др. Никой от цитираните автори не предлага решение на въпроса *как да намерим величината и ориентацията на трите главни напрежения в масива* ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), а предлага стереографска техника за прилагане на изведените от Bott формули върху конкретната плоскост при условие, че ориентацията и величината на главните напрежения *вече са намерени по някакъв начин*.

В настоящата публикация е приложен класическият извод на уравненията на Bott, който е илюстриран с решение на примерна задача по метода на Goodman. Изводът на уравненията е наложителен с оглед на това, че дава възможност на читателя да разбере принципа на работа с тримерни напрежения.

За да се постави задачата в контекста на геотехническите проблеми, свързани с пътното строителство у нас, в дискуссионната част от работата е предложен геоложки подход за определяне на главните напрежения, базиран на зависимостта между литостатичния натиск и коефициента на Поасон, известна като зависимост на Хайм, и правилото на Андерсон (Anderson, 1951) за ориентацията на главните напрежения близо до земната повърхност. Допусканията, свързани с принципите на Хайм и Андерсон правят решението приблизително, тъй като точното определяне на коефициента на Поасон за масива е невъзможно, но при всички случаи приблизителното решение може да се използва за практически цели и е по-добро от никакво решение.

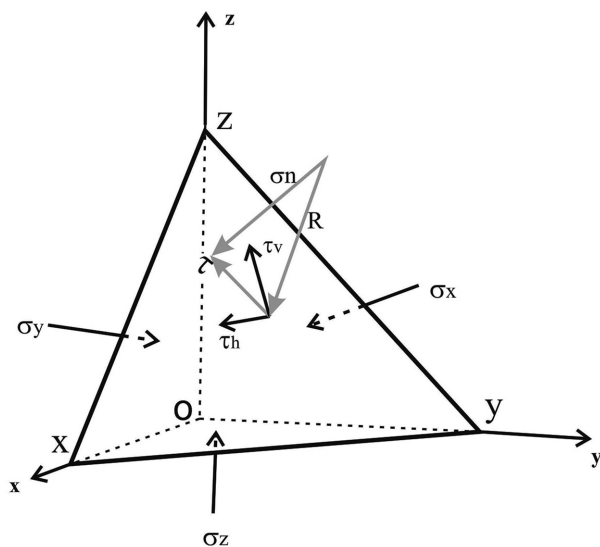
Тъй като изложените уравнения и геометрични процедури са универсални и могат да се използват както за геотехнически стабилитетни изчисления, така и за структурно-геоложко и тектонско моделиране на разломи и сеизмични въздействия върху структурно отслабени плоскости, в текста е коментирано и определянето на регионалното поле на напреженията, което се прави рутинно в структурната практика. Това поле може да се определи като ориентация, но не и като величина на главните напрежения, което дава възможност чрез симулиране на стойностите на напреженията да се моделира ориентация на срязващото и нормалното тектонско напрежение върху плоскост с рискова ориентация.

Напрежения в тримерното пространство

В текста се излага оригиналното решение на Bott (1959) за тримерните напрежения.

Търсят се стойностите на *максималното напрежение на срязване* и на *максималното нормално*

напрежение, действащи върху триъгълната площ XYZ в координатна система (фиг. 1), при която координатните оси (x, y, z) са избрани така, че да са паралелни на главните напрежения ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), т.е. σ_x действа паралелно на оста x, σ_y действа паралелно на оста y и σ_z действа паралелно на оста z.



Фиг. 1. Чертеж за визуализация на геометричните взаимоотношения, използвани за извеждане на основните уравнения за триизмерно нормално и срязващо напрежение, действащи върху скална прекъснатост по Bott (1959)

Обясненията са в текста.

Fig. 1. Drawing for visualization of the geometric relationships used to derive the main equations for three-dimensional normal and shear stress, acting on rock discontinuity, after Bott (1959)

The explanations are in the text.

Анализираната плоскост отсича отсечки с дължина X, Y и Z от координатните оси, а нейната площ се приема за равна на единица. Тази плоскост се представя чрез своята нормала, която сключва с осите на координатната система (x, y, z) посочни ъгли α, β и γ .

Косинусите на тези ъгли се наричат посочни косинуси и се означават с l, n и m. За математическите операции по разлагането на напреженията използваме принципа от аналитичната геометрия, че посочните косинуси (l, n, m) на нормалата към анализираната плоскост са свързани в уравнението:

$$l^2 + n^2 + m^2 = 1.$$

Понеже работим с единица площ, компонентите на напрежението са равни на силите, които

действат в същите направления. Чрез математически операции може да бъде доказано, че в случая, когато площта на триъгълника XYZ е равна на единица, площите на триъгълниците OYZ, OZX и OXY са равни по стойност на посочните косинуси l, n, m, които нормалата към плоскостта XYZ сключва с координатните оси (x, y, z).

Силите, действащи нормално на стените на призмата, се определят като равни на $l\sigma_x, m\sigma_y$ и $n\sigma_z$. Тъй като системата е в равновесие, компонентите на резултантната сила, действаща на площта XYZ, са съответно: $-l\sigma_x, -m\sigma_y$ и $-n\sigma_z$, действащи паралелно на съответните координатни оси.

Следователно общата резултантна сила, действаща на площта XYZ се дава от израза:

$$R = -(l^2\sigma_x^2 + m^2\sigma_y^2 + n^2\sigma_z^2)^{1/2}.$$

Резултантната сила е със знак минус, защото тя уравновесява и следователно действа обратно на силите, участващи във формирането на напреженията σ_x, σ_y и σ_z .

Нормалната сила, упражнена върху площта XYZ, се получава чрез разлагане на всеки компонент върху посоката на нормалата към площта както следва:

$$\sigma_n = -(l^2\sigma_x^2 + m^2\sigma_y^2 + n^2\sigma_z^2).$$

Максималното срязващо напрежение (τ) (в случая е срязваща сила), действащо върху площта XYZ, може да бъде получено от зависимостта:

$$(R)^2 = (\sigma_n)^2 + (\tau)^2,$$

откъдето следва, че:

$$(\tau)^2 = (l^2\sigma_x^2 + m^2\sigma_y^2 + n^2\sigma_z^2) - (l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z)^2.$$

Ако в горното уравнение се замени с връзката между дирекционните косинуси

$$l^2 + n^2 + m^2 = 1$$

се получава преработена формула за максималното срязващо напрежение:

$$(\tau)^2 = m^2(\sigma_y - \sigma_x)^2 + n^2(\sigma_z - \sigma_x)^2 - \{m^2(\sigma_y - \sigma_x) + (n^2\sigma_z - \sigma_x)\}^2.$$

За удобство в горния извод приемаме, че оста z на координатната система е вертикална.

Нека да изчислим компонента на срязващото напрежение (τ), който действа по линията на максимален наклон (τ_v) на площта, и компонента, действащ по посока на хоризонтална линия (τ_h) от площта. Те са свързани със следната алгебрична връзка:

$$(\tau)^2 = (\tau_h)^2 + (\tau_v)^2.$$

Разлагайки компонента на силата по посока на правата YX, установяваме, че:

$$\text{th} = \text{Im}(\sigma_y - \sigma_x) / (I^2 + m^2)^{1/2} \text{ (решение в случая, когато } n = \cos 90^\circ = 0).$$

Комбинирайки горните уравнения, получаваме израз за силата, действаща по линията на максималния наклон на плоскостта, а именно:

$$\text{tv} = n \{ m^2(\sigma_y - \sigma_x) - (1 - n^2)(\sigma_z - \sigma_x) \} / (1 - n^2)^{1/2}.$$

Ъгълът (ψ) в анализиранията плоскост между хоризонталната посока и посоката на максималното напрежение на срязване се дава от връзката:

$$\tan \psi = \text{tv} / \text{th}.$$

Замествайки изразите за tv and th в горното уравнение, получаваме формула за ориентацията на напрежението на срязване, изразена чрез посочните косинуси на нормалата към анализиранията плоскост и стойностите на главните напрежения:

$$\tan \psi = n / \text{Im} \{ m^2 - (1 - n^2)(\sigma_z - \sigma_x) / (\sigma_y - \sigma_x) \}.$$

Анализ на нормалните и срязващите напрежения в тримерното пространство

Тук се разглежда процедурата за намиране на нормалното и срязващото напрежение, действащо върху произволно ориентирана прекъснатост (разлом, пукнатина, пластова повърхнина и др.), когато ориентацията и стойността на главните напрежения в пространството е известна. Решението включва стереографски процедури, предложени от Goodman (1963):

- Намиране на посочните косинуси на нормалата към анализиранията плоскост.
- Изчисляване на резултантното напрежение (R) върху тази плоскост, използвайки данните за ориентацията на плоскостта и главните напрежения.
- Определяне на посоката на резултантното напрежение чрез изчисляване на посочните му ъгли и нанасяне на тези ъгли като малки кръгове около главните оси. Точката на пресичане на малките кръгове дава ориентацията на резултантното напрежение.
- Отчитане на ъгъла между резултантното напрежение и изследваната плоскост директно от стереографската мрежа.
- Посоката на максималното срязващо напрежение се намира графично, като се използва фактът, че резултантното напрежение, нормалното напрежение и срязващото напрежение лежат в една равнина.

Ако осите на координатната система (x, y, z) са подбрани така, че да съвпадат по ориентация с направленията на главните напрежения ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) и са известни посочните косинуси ($l = \cos \alpha, m = \cos \beta, n = \cos \gamma$) на ъглите (α, β, γ), които резултантното

напрежение (R) сключва с осите на координатната система, то величината на R се дава от израза:

$$R^2 = \sigma_1^2 l^2 + \sigma_2^2 m^2 + \sigma_3^2 n^2.$$

В реалните проблеми от практиката обаче главните напрежения са наклонени под някакъв ъгъл спрямо земната повърхност. Следователно основният проблем на механиката на скалите е дефиниране на напрегнатото поле с произволно ориентирани оси, което действа на равнина с произволна ориентация. Решението на този проблем ще бъде илюстрирано с един пример.

Пример: Изследваме разломна плоскост в основата на инженерно съоръжение. Определете посоката на потъване, наклона и абсолютната стойност на резултантното напрежение, действащо върху пукнатинна плоскост със страна и наклон $225/70$, ако главните напрежения в региона имат посока на потъване и наклон: $\sigma_1 = 9/38, \sigma_2 = 135/36$ и $\sigma_3 = 250/32$. Стойностите на главните напрежения са $\sigma_1 = 10 \text{ Mr}, \sigma_2 = 5 \text{ Mr}$ и $\sigma_3 = 3 \text{ Mr}$.

Решение: Построяваме нормалата към анализиранията плоскост и осите на главните напрежения като полюси в горна полусфера на стереографска (равноъгълна) мрежа (фиг. 2а). Работата в горна полусфера се налага поради необходимостта да спазим конвенциите за знак на напреженията при анализа. Изчертаните в горна полусфера оси отстоят на 180° от тези в долна полусфера и затова представят отрицателните посоки на главните напрежения.

Измерваме ъглите между нормалата към плоскостта (N) и главните напрежения ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), които са съответно (фиг. 2а): 36° между отрицателната посока на σ_1 и N ; 76° между отрицателната посока на σ_2 и N ; 123° между отрицателната посока на σ_3 и N .

Ъглите (α, β, γ) спрямо положителните посоки на главните напрежения са:

$$\alpha = 180 - 36 = 144^\circ;$$

$$\beta = 180 - 76 = 104^\circ;$$

$$\gamma = 180 - 123 = 57^\circ.$$

Посочните косинуси на тези ъгли са:

$$l = \cos \alpha = -0,809;$$

$$n = \cos \beta = -0,24;$$

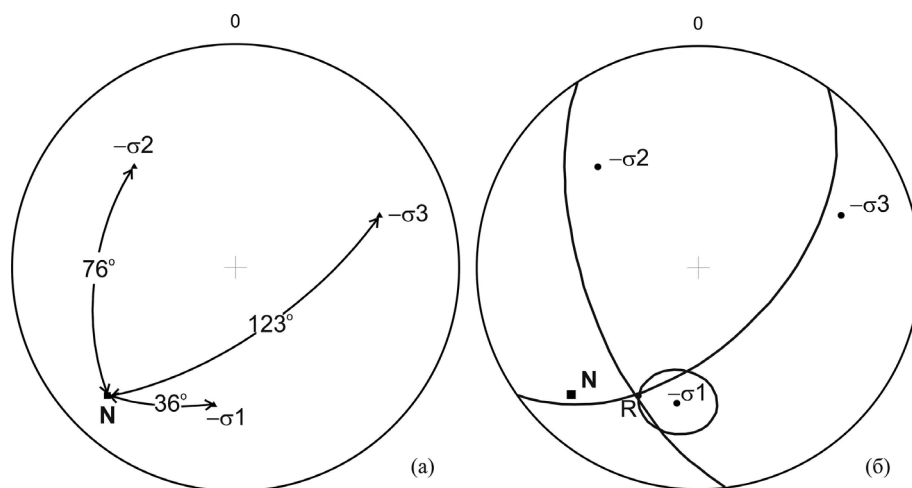
$$m = \cos \gamma = +0,54.$$

Стойността на резултантното напрежение, изчислена чрез посочните косинуси и стойностите на главните напрежения, дадени в задачата, е:

$$R^2 = 100.0,65 + 25.0,06 + 9.0,29 = 69,1;$$

$$R = 8,3 \text{ MPa}.$$

Ориентацията на резултантното напрежение в пространството може да се определи върху стерео-



Фиг. 2. а) плоскост (N) със страна и наклон 225/70 и оси на главни напрежения $\sigma_1 - 9/38$, $\sigma_2 - 135/36$, $\sigma_3 - 250/32$, построени в горна полусфера на равнобъгълна мрежа; б) малки окръжности с радиус 13°, 82° и 101° около осите на главните напрежения. Малките окръжности се пресичат в т. R, която представя ориентацията на резултантното напрежение, действащо върху плоскостта с нормала N.

Fig. 2. a) plane (N) with dip direction and dip 225/70 and plunge and dip of the principal stress directions $\sigma_1 - 9/38$, $\sigma_2 - 135/36$, $\sigma_3 - 250/32$ in upper hemisphere of equal-area stereographic net; б) small circles with radiuses 13°, 82° и 101° around the axes of the principal stress directions. The small circles intersect at point R, which represents the orientation of the resultant stress, acting on plane with normal N.

графската мрежа след като първо се изчислят посочните му косинуси чрез изразите:

$$lR = R_x/R, mR = R_y/R, nR = R_z/R;$$

$$R_x = \sigma_1 \cdot l, R_y = \sigma_2 \cdot m, R_z = \sigma_3 \cdot n,$$

откъдето

$$lR = \sigma_1 \cdot l/R, mR = \sigma_2 \cdot m/R, nR = \sigma_3 \cdot n/R;$$

$$lR = (5 \cdot -0,809)/8.3 = -0,975;$$

$$mR = (5 \cdot -0,24)/8.3 = -0,144;$$

$$nR = (5 \cdot 0,54)/8.3 = 0,195.$$

От посочните косинуси намираме стойността на посочните ъгли чрез функцията \arccos , например $\arccos(-0,975) = 167^\circ$. Тези ъгли са: $\alpha R = 167^\circ$, $\beta R = 98^\circ$ и $\gamma R = 79^\circ$.

Тъй като работим в горна полусфера с отрицателните направления на главните напрежения, за да локализираме резултантното напрежение ще използваме допълнителните към 180° посочни ъгли. Те се получават чрез разлагане от типа: $167 = 180 - 13$; $98 = 180 - 82$ и $79 = 180 - 101$.

Накрая построяваме малки окръжности с радиус 13°, 82° и 101° около всяко от отрицателните главни напрежения, т.е. около $-\sigma_1$, $-\sigma_2$ и $-\sigma_3$ (фиг. 2б). Намерените по този начин посока на потъване и наклон на резултантното напрежение R, отчетени в горна полусфера, са 26/36.

По-нататък анализът продължава с намирането на стойността на нормалното и срязващото напрежение върху анализираната плоскост N (фиг. 3). За да намерим решение изхождаме от факта, че резултантното, нормалното и срязващото напрежение лежат в една и съща плоскост, като в същото време срязващото напрежение лежи в плоскостта N, а нормалното напрежение съвпада по ориентация с нормалата към N (фиг. 3а).

Изхождайки от схемата на фигура 3а, можем да съставим отношенията:

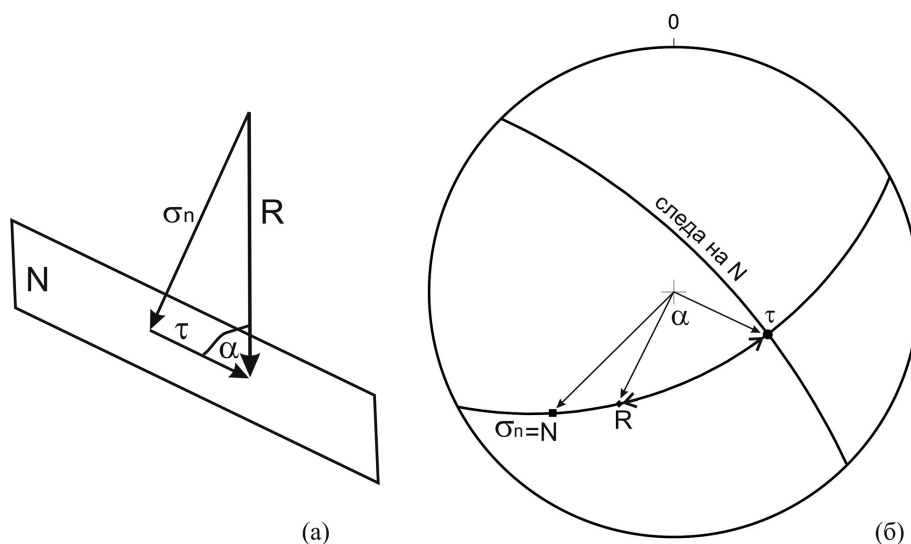
$$\tau = R \cdot \cos \alpha;$$

$$\sigma_n = R \cdot \sin \alpha.$$

Коментар: Горните две формули на пръв поглед характеризират векторни свойства на напреженията. В действителност обаче отношенията не са векторни. Напрежението не е векторна, а тензорна величина (напр. Means, 1976). Детайлно разписани, тези отношения са от типа $F\tau/A = (FR/A) \cdot \cos \alpha$, където $F\tau$ и FR са сили, действащи по посоките на τ и R .

Тъй като обаче и трите напрежения в схемата действат върху една и съща площ (A), която се приема за единица ($A = 1$), то формулите се опростяват до гореописания вид.

Тъй като от фигура 3б се установява, че $\alpha = 66^\circ$, изчислените по горните формули стойности за τ и σ_n са 3,4 МПа и 7,6 МПа.



Фиг. 3. а) кинематична схема за ориентацията на резултантното (R), нормалното (σ_n) и срязващото напрежение (τ) върху плоскостта (N); б) стереографска проекция за намиране на ъгъла (α) между срязващото (τ) и резултантното (R) напрежение и за определяне на ориентацията на срязващото напрежение

Fig. 3. a) kinematic sketch for the orientation of the resultants (R), normal (σ_n) and shear (τ) stress acting on a plane (N); б) stereographic projection for finding of the angle (α) between the shear (τ) and resultant (R) stress and for finding of the orientation of the shear stress

Дискусия

Определяне на ориентировъчни стойности на главните напрежения в масива и тяхната ориентация

За прилагане на гореописаното стереографско решение са необходими:

1. стойностите на трите главни напрежения в пространство σ_1 , σ_2 и σ_3 ;
2. ориентацията на тези напрежения в пространството чрез техните геоложки координати, изразени в посока на потъване и наклон;
3. ориентацията на плоскостта на срязване (разломната плоскост) в пространството, изразена чрез страна и наклон така, както са измерени с геоложки компас.

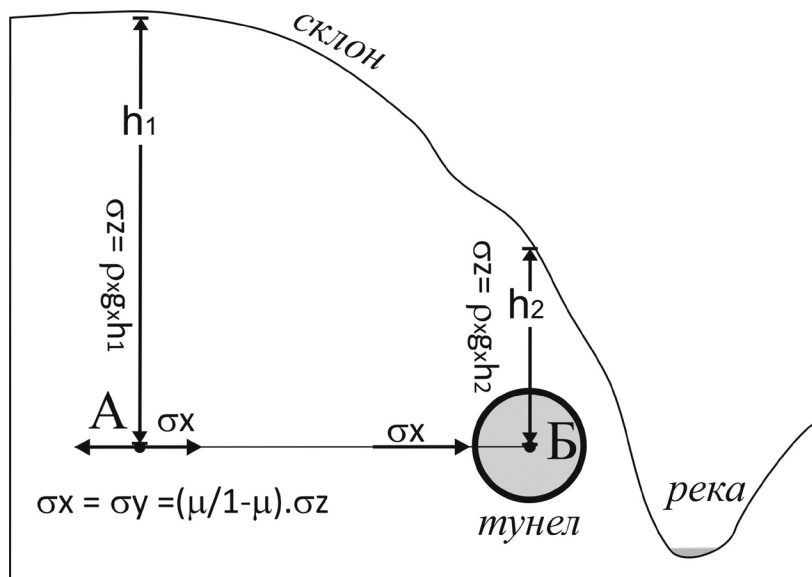
Ако приемем, че в обхвата на изследваното съоръжение отсъстват значими тектонски въздействия, или те са пренебрежими в сравнение с литостатичния натиск, тогава трите главни напрежения могат да бъдат получени чрез изчисляване на литостатичния натиск във високата част от хълма и след това прилагане на връзката между литостатичния натиск и коефициента на Поасон, известна като зависимост на Хайм (познат у нас от рускоезичната миньорска литература, като *коэффициент бокового распора*).

В тази зависимост определящ е коефициентът на Поасон (μ), който се представя от отношението между относителната напречна и относителна-

та надлъжна деформация на скален образец. Този коефициент се прилага много широко в геотехниката и се определя от повечето лаборатории по скална механика. За различните скали той се изменя между 0,1 и 0,5. Следва да се има предвид, че в случая се използва усредненият коефициент за целия масив, изведен на базата на лабораторни данни и експертна оценка, а не този, определен от малки по обем лабораторни проби.

По този коефициент може да се съди за страничния натиск в изкуствените подземни кухни чрез съотношението $\varepsilon = \mu/1 - \mu$. При $\mu = 0,5$ разпределението на напреженията се извършва по законите на хидростатиката. Връзката между главните напрежения и коефициента на Поасон се дава от формулата $\sigma_x = \sigma_y = (\mu/1 - \mu) \cdot \sigma_z$. Тази зависимост дава решение за две равни по стойност хоризонтални (σ_x , σ_y), или близки до хоризонтални напрежения (фиг. 4), което в редица случаи може да не отговаря на истината, но изведените приблизителни стойности все пак имат практически смисъл.

Съгласно принципа на Андерсон земната повърхност играе ролята на *повърхност на нулево срязване и перпендикулярно на нея се ориентира една от осите на главното напрежение*. В случая това е литостатичният натиск (σ_z). Хоризонталното напрежение (σ_y) (отново като следствие на принципа на Андерсон) се ориентира по оста на тунела. За напрежението по посока на оста x (σ_x) остава да бъде ориентирано перпендикулярно на оста на тунела. При стръмни склонове литостатичният натиск няма да бъде вертикален и съответно σ_x и



Фиг. 4. Схематичен разрез през хълмист терен, в който е проектирано тунелно съоръжение, ориентирано приблизително паралелно на склона

На показаната схема литостатичният натиск в т. А и т. Б се определя от височините на скалните колони (h_1 и h_2), обемната плътност на скалите (ρ) и константата на земното ускорение (g). Зависимостта между вертикалните и хоризонталните напрежения се дава от зависимостта на Хайм, в която участва коефициентът на Поасон (μ) на масива.

Fig. 4. Schematic section through hilly terrain in which a tunnel is projected, oriented approximately parallel to the slope of the hill

In the sketch the lithostatic pressure at points A and B is determined by the height of the rock columns (h_1 and h_2), the density of the rock (ρ) and constant of the earth acceleration (g). The relationship between the vertical and horizontal stresses is given by the ratio of Heim, in which the Poisson coefficient (μ) of the massif takes part.

σ_y няма да бъдат хоризонтални, но както видяхме от решението по-горе стереографският метод се справя лесно с наклонена координатна система.

Изчисленията за нормално и срязващо напрежение са валидни за точка в масива в непосредствена близост до стената на тунела.

Принципът на Хайм позволява да се изследва провата на планински натиск от високата част на хълма към по-ниската (фиг. 4). Планинският натиск засилва ролята на страничния литостатичен натиск (σ_x) и съответно склонността към реактивация на предварително отслабени пукнатинни или разломни зони. Този проблем е особено актуален, тъй като много от тунелите преминават по склона, като високата част на хълма остава над тях.

Определяне на ориентацията на главните тектонски напрежения чрез двойка спрегнати пукнатини

Всяка област от земната кора се характеризира с регионално поле на напреженията, което действа на скалните прекъснатости от типа на разломи и пукнатини, и при определени условия благоприятства тяхната реактивация. Счита се, че систематичните

пукнатини в скалите, които не са свързани с точков източник на енергия от типа на интрузия или вулкан и не са в деформационната зона на разлом, могат да се използват за определяне на ориентацията на осите на регионалния елипсоид на напреженията. Изведените по този начин ориентации на осите могат да се използват за моделиране на срязващите напрежения по гореописаната методика за разломни плоскости, които представляват интерес от инженерно-геоложка гледна точка. Формулите на Vott могат да се използват и за моделиране на сеизмични въздействия върху конкретни разломи, ако разбира се можем да предскажем къде ще е епицентъра на следващото голямо земетресение.

С цел пълнота на изложението тук са коментирани основните моменти от методиката за намиране на ориентацията на осите на регионалния елипсоид на напреженията чрез спрегнати (синхронни) пукнатини на срязване.

Кинематична класификация на пукнатините

Природните пукнатини най-често се класифицират като пукнатини на разтягане (или на скъсване), пукнатини на срязване и хибридни пукнатини.

Пукнатините на разтягане (P на фигура 5а) са паралелни на главното компресионно напрежение (σ_1). Те отразяват разтягане на материала по посока на минималното компресионно напрежение (σ_3). По морфологията това са пукнатини с груби повърхности, по които липсват индикации за срязване. Понякога може да се наблюдава съвпадение на бразди и издатини в разделените от пукнатинната повърхност блокове.

Пукнатините на срязване (C на фигура 5а) се формират в две направления, склучващи остър ъгъл (ϕ) с посоката на максималното компресионно напрежение. Тези пукнатини имат гладки, плътно прилепващи повърхности. Често по тези повърхности се наблюдава полировка. Под микроскоп може да се наблюдава разместване на минерални зърна или фосили, разсечени от пукнатинните повърхности.

Хибридни пукнатини се разполагат в затъмнената област от фигура 5а, която е ограничена от пукнатините на срязване. Тези пукнатини притежават част от характерните особености и на пукнатините на срязване и на пукнатините на разтягане.

Разграничаването на терена на пукнатини на срязване и разтягане е необходимо за геотектонските изследвания, тъй като чрез пукнатините на срязване може да се реконструира ориентацията на главните тектонски напрежения (фиг. 5б).

Стереографски процедури за определяне на ориентацията на главните напрежения

Реконструкцията на главните тектонски напрежения включва следните стъпки:

1. Прави се статистически анализ на пукнатинните системи и се определя ориентацията на двойките пукнатини на срязване.

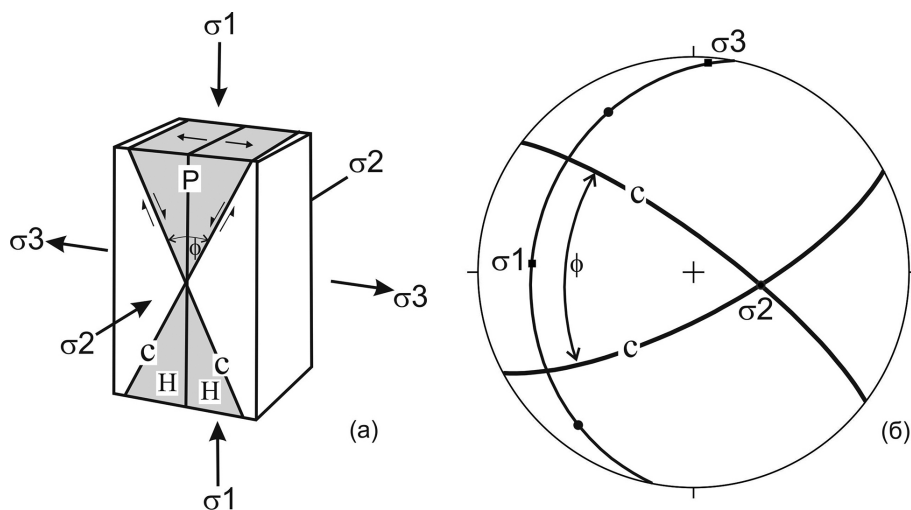
2. Определените статистически пукнатини на срязване се нанасят на стереографска проекция като големи кръгове.

3. В случай, че пукнатините отразяват двойка едновременно образувани пукнатинни плоскости средното по величина компресионно напрежение σ_2 има ориентация, паралелна на пресечницата на пукнатинните плоскости.

4. За да намерим максималното напрежение σ_1 прекарваме спомагателна плоскост, която съдържа нормалите към пукнатините на срязване. Ъгълът (ϕ), който двете спрегнати пукнатини отрязват от тази плоскост, разделяме на две равни части, като маркираме σ_1 в средата на този ъгъл.

5. Главното напрежение се явява ъглополовяща на острия ъгъл, сключен между пукнатините на срязване.

6. Минималното напрежение σ_3 намираме като отброим 90° от σ_1 по следата на спомагателната плоскост. Необходимо е намерената по този начин



Фиг. 5. а) ориентация на пукнатини на срязване и на разтягане (опън) спрямо посоките на главните напрежения (Hancock, 1985) в подложен на всестранен натиск скален обем: C – пукнатина на срязване, P – пукнатина на разтягане, H – хибридни пукнатини, σ_1 – главно напрежение, σ_2 – средно напрежение, σ_3 – минимално напрежение, ϕ – ъгъл на разрушаване; б) стереографска проекция на взаимоотношенията между пукнатините на срязване и ориентацията на главните напрежения, съгласно схемата от фиг. 5а

Fig. 5. а) orientation of shear and tension joints, with respect to the principal stress directions (Hancock, 1985) in rock volume subjected to three-dimensional stress: C , shear joint, P , tension joint, H , hybrid joint, σ_1 , main stress direction, σ_2 , intermediate stress direction, σ_3 , minimal stress direction, ϕ , angle of failure; б) stereographic projection showing the position of the shear joints with respect to the principal stress orientations according to Fig. 5а

ориентация на σ_3 да сключва ъгъл от 90° , както с σ_1 , така и с σ_2 .

Не трябва да се забравя, че важно условие за коректността на гореописания анализ е анализираниите пукнатини да бъдат именно пукнатини на срязване, образувани едновременно под действието на едно и също стресово поле. Като потвърждение на генезиса на пукнатините на срязване може да се използва наличието на пукнатини на разтягане, които статистически се групират в ъглополюващата между пукнатините на срязване.

Съществуват и други методи за определяне на посоките на регионалните тектонски напрежения (напр. Angelier, Mechler, 1977; Angelier, 1989 и др.). При разновидностите на метода, известен като метод на ортогоналния двустен (right dihedral), се използват няколко разлома, за които са измерени посоките на преместване по разломните плоскости, индикирани от харниши и стриации. Стереографската процедура стъпва на изчертаването на допълнителна плоскост, която е перпендикулярна едновременно на разломната плоскост и на посоката на преместване. *Прави се допускане, че преместването по тези разломи, индикирано от стриациите, е формирано от едно и също поле на напреженията.* Това обаче в общия случай не е вярно, защото разломите обикновено са разновъзрастни, а движенията по тях се инициират многократно от различни по време и посока на въздействието тектонски усилия. По принцип, дадено тектонско въздействие ще реактивира различно отделните структури от разломната мрежа, в зависимост от тяхната ориентация спрямо напреженията на това въздействие. Много често по разломните плоскости се наблюдават стриации, индикиращи различна посока на преместване, а векторът и амплитудата на истинското преместване, когато се

изчисляват чрез два некопланарни маркера, изобщо не съответстват на посоките, индикирани от стриациите и харнишите. Съществуват и други съображения от чисто геоложко естество, които правят реконструкцията на напреженията, на база данни от разломи, не особено надеждна.

Заклучение

Илюстрираното в тази работа решение е много обещаващо, но се прилага рядко, поради трудностите при намирането на посоката и ориентацията на главните напрежения. То има практическо значение, тъй като може да се използва при анализа на устойчивостта на скални масиви. Въпреки че на пръв поглед решението е обърквато, поради конвенциите за положителни и отрицателни напрежения и работата в горна полусфера на стереографска проекция, то все пак е най-простото решение, известно от литературата. Съществува голям клас от инженерно-геоложки задачи (напр. Goodman, 1976, 1989; Priest, 1993 и др.), които се решават с помощта на стереографска проекция, като използват подхода, изложен в тази публикация. За осмисляне на методиката авторът препоръчва на читателя да се запознае и с работите на Means (1989), Lisle (1989) или Ragan (1990). Горното решение е кодирано в редица софтуерни продукти, някои от които могат да се използват и в българската практика. При всички случаи е полезно инженер-геологът да знае откъде тръгва изчислителната методика за тримерните напрежения и да е в състояние да я прилага самостоятелно, вместо да използва софтуера „на сляпо“, без да знае как работи и, най-важното, без да знае какви допускания и опростявания на реалната геоложка среда са заложили в него.

Литература References

- Alaniz-Alvarez, S. A., A. F. Nieto-Samaniego, G. Tolson. 1998. A graphical technique to predict slip along a preexisting plane of weakness. – *Engineer. Geol.*, 49, 53–60.
- Anderson, E. M. 1951. *The Dynamics of Faulting*. 2nd Ed. Edinburgh, Oliver & Boyd, 430 p.
- Angelier, J. 1989. From orientation data to magnitudes in palaeostress determinations using fault slip data. – *J. Struct. Geol.*, 11, 37–50.
- Angelier, J., P. Mechler. 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: La méthode des diedres droits. – *Bull. Soc. Géol. France*, 19, 1309–1318.
- Bott, M. H. P. 1959. The mechanics of oblique slip faulting. – *Geol. Mag.*, 96, 109–117.
- Dimitrov, I. 2003. Simple procedure for quantification of the gravitational stress field in fractured hard rock massifs. – *Engineer. Geol.*, 68, 397–400.
- Goodman, R. E. 1963. The resolution of stresses in rock using stereographic projection. – *Int. J. Rock Mech.*, 1, 93–103.

- Goodman, R. E. 1976. *Methods of Geological Engineering in Discontinuous*. San Francisco, West Publishing, 472 p.
- Goodman, R. E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. 2nd Ed. New York, John Wiley and Sons, 562 p.
- Hancock, P. L. 1985. Brittle microtectonics: Principles and practice. – *J. Struct. Geol.*, 7, 437–457.
- Lisle, R. J. 1989. A simple construction for shear stress. – *J. Struct. Geol.*, 11, 493–496.
- Means, W. D. 1976. *Stress and Strain. Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists*. New York Inc., Springer-Verlag, 339 p.
- Means, W. D. 1989. A construction for shear stress on a generally oriented plane. – *J. Struct. Geol.*, 11, 625–628.
- Priest, D. S. 1993. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Springer Science & Business Media, 473 p.
- Ragan, D. M. 1990. Direction of shear. – *J. Struct. Geol.*, 12, 929–931.
- Wallace, R. E. 1951. Geometry of shearing stress and relation to faulting. – *J. Geol.*, 59, 118–130.

Постъпила на 11.04.2018 г., приета за печат на 16.07.2018 г.
 Отговорен редактор Пламен Иванов