Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т.XIУ, вып. 1, 1974 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ ВЛИЯНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ ПОРОДНОГО КОНТУРА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИКОНТУРНОЙ ЗОНЫ МАССИВА ПОРОД

Е.А.Зимина, Е.Н.Тарасенко

В настоящее время накоплен значительный опыт экспериментальных и теоретических исследований по распределению напряжений вокруг выработок различной формы поперечного сечения [2, 3, 4]. Большинство этих исследований проведено применительно к выработкам с гладким контуром. Вместе с тем известно, что при буровзрывном способе проходки получается неровный контур выработки. Образующиеся при этом технологические неровности, а также происходящие в некоторых случаях вывалы пород вызывают перераспределение напряжений с образованием зон повышенной их концентрации. В натурных условиях определить величину концентрации напряжений в этих зонах трудно. Поэтому исследования обычно проводят на моделях.

В данной статье приводятся некоторые результаты исследований влияния на напряженное состояние окружающих пород технологических неровностей контура горизонтальных выработок круглой, квадратной, сводообразной и арочной форм поперечного сечения, выполненных на плоских и объемных моделях.

На трех плоских моделях имитировались выработки указанных форм сначала с гладким, а затем с неровным контуром при равном числе выступов и впадин, имеющих определенный радиус кривизны. На этих моделях изучалось напряженное состояние пород в приконтурной зоне. На двух плоских и двух объемных моделях имитировалась горизонтальная выработка арочной формы поперечного сечения с гладким контуром и с одиночной выемкой в ее подошве. В этом случае изучалось напряженное состояние окружающих пород вдоль выработки и по ее контуру.

Статистическими исследованиями реальных контуров выработок при буровзрывном способе проходки установлено, что практически неровный характер контура можно описать наложением на гладкий контур синусоидальных кривых [2]

$$\left.\begin{aligned} x &= C\cos m\varphi \\ y &= C\sin m\varphi \end{aligned}\right\},$$

где C – амплитуда возмущений в долях радиуса R проектного контура выработки; m – число неровностей на контуре выработки без единицы; φ – угловая координата.

Поэтому при моделировании неровный контур имитировался характерис -

тными C и m, которые для разной формы поперечного сечения имеют свои значения. Для круглой формы $C = 0{,}0625\,R$, $m = 7$; для квадратной $C = 0{,}0556\,R$ и $m = 7$, $R = \frac{1}{2}(a+b)$, где a – половина стороны квадрата, b – половина диагонали квадрата, углы выработки на модели закруглены по радиусу $r = 7$ мм; для сводообразной формы с закругленными углами и сторонами, соответственно, по радиусу $r_1 = 5$ мм и $r_2 = 27$ мм, $C = 0{,}0495\,R$, $m = 8$, $R = \frac{1}{2}(a_1 + b_1)$, где a_1 – расстояние от центра тяжести сводообразной выработки до наиболее удаленной точки контура, b_1 – расстояние от центра тяжести сечения до наименее удаленной точки контура.

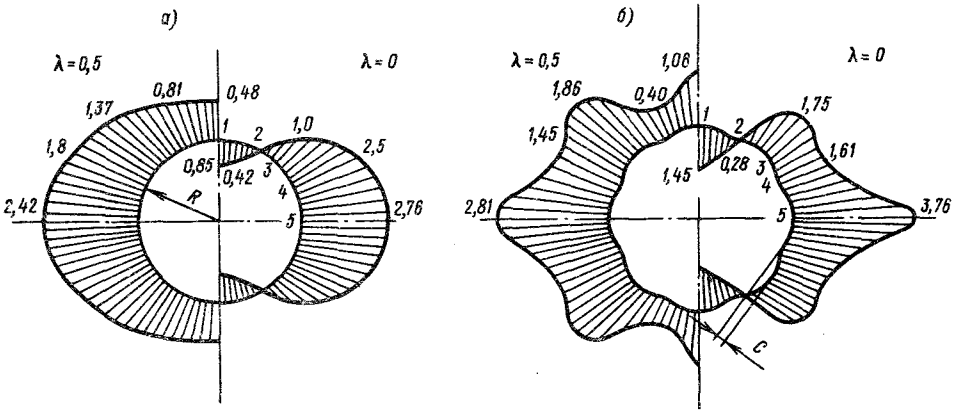


Рис.1. Распределение напряжений σ_θ по гладкому (а) и неровному (б) контуру выработки круглой формы поперечного сечения при боковом распоре $\lambda = 0$ и $\lambda = 0{,}5$

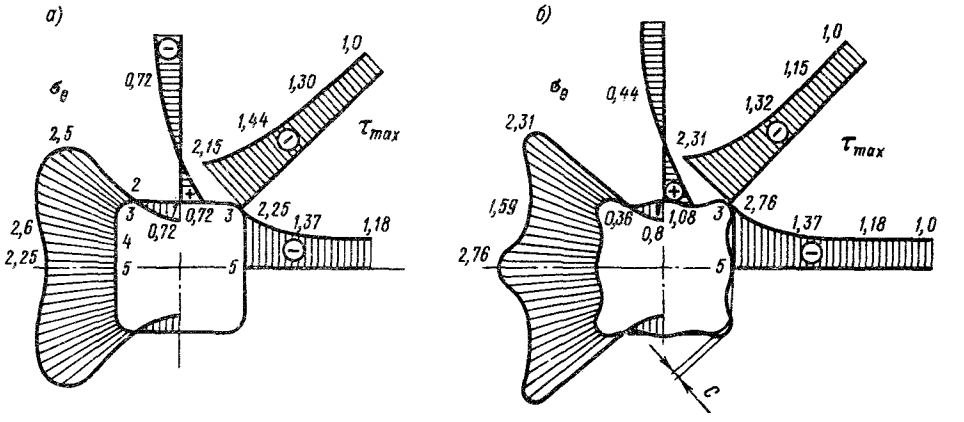


Рис.2. Распределение напряжений σ_θ по гладкому (а) и неровному (б) контуру выработки квадратной формы поперечного сечения и τ_{max} в массиве пород при $\lambda = 0$

Общими точками гладкого и неровного контуров при трех указанных формах поперечного сечения выработок являются точки 2, 4 (рис. 1 и 2). Другие точки гладкого контура при неровном контуре были смещены на величину амплитуд. Модели испытывались под действием равномерно распределенных по контуру сжимающих усилий. Таким образом, весомый массив горных пород для упрощения решения задачи заменен невесомым, нагруженным усилиями на бесконечности. Плоские модели испытывались при различной величине бокового распора.

Для характеристики напряженного состояния массива пород вокруг выработок определялись компоненты напряжений и коэффициенты концентрации напряжений K, равные отношению соответствующего напряжения в зоне пройденной выработки к напряжению в соответствующей точке ненарушенного массива. Кроме того, определялась зона влияния выработок принятых при моделировании формы и характера контура.

Напряжение в нетронутом массиве при моделировании составляло $\sigma_0 = 0{,}338$ кГ/см^2, цена полосы материала $\tau_0^{(1)} = 0{,}12$ кГ/см.

Как показали исследования, на гладком контуре выработки круглой формы при $\lambda = 0$ наибольшее значение сжимающих напряжений, равное 0,93 кГ/см^2, получено в боках выработки (рис. 1, точка 5). Соответствующий коэффициент концентрации $K = 2{,}76$.

Наибольшее растягивающее напряжение, равное 0,272 кГ/см^2, наблюдается в кровле выработки (рис. 1, точка 1), соответствующий ему коэффициент концентрации составляет 0,85.

Подобная задача имеет точное аналитическое решение [3]. Напряжения на контуре определяются по формуле

$$\sigma = \sigma_0 (1 - \cos 2\theta) ,$$

где θ - угол, отсчитываемый от вертикальной оси модели.

В точке 5 (рис. 1) $K = 3$, а в точке 1 $K = 1$. Разница в значениях коэффициентов концентраций, полученных экспериментально и теоретически, находится в допустимых пределах.

Наибольшее сжимающее напряжение при неровном контуре также имеет место в точке 5 и равно $\sigma_\theta = 1{,}27$ кГ/см^2. Коэффициент концентрации в этой точке равен 3,76. В точке 1 наибольшее растягивающее напряжение $\sigma = 0{,}49$ кГ/см^2, а коэффициент концентрации $K = 1{,}45$.

Из сопоставления значений напряжений видно, что в точках 1, 3 и 5 при неровном контуре они выше, чем при гладком примерно в 1,7 раза. Это объясняется увеличением радиуса кривизны в этих точках при неровном контуре. В точках 2 и 4, где радиус кривизны меняет знак, напряжения при неровном контуре уменьшаются.

Зона влияния выработки при неровном контуре увеличивается незначительно. В основном перераспределение напряжений, вызванное неровностями контура, происходит в непосредственной близости от него. Наибольшие изменения напряжений вследствие неровностей наблюдаются в направлении точки 3 под углом 45^0 к оси модели. Здесь напряжения выравниваются на расстоянии трех радиусов.

В направлении точки 5 при удалении от контура напряжения резко сни-

ется и уже на расстоянии одного радиуса $K = 1{,}24$.

Наибольшие растягивающие напряжения наблюдаются в кровле и подошве выработки. На расстоянии, равном радиусу, в этих направлениях они меняют знак и становятся сжимающими.

При боковом распоре $\lambda = 0{,}5$ во всех точках контура выработки возникают только сжимающие напряжения, наибольший коэффициент концентрации при гладком контуре $K = 2{,}42$ наблюдается в боках выработки, а при неровном контуре $K = 2{,}81$ (см.рис. 1).

Для гладкого контура при плоском напряженном состоянии можно получить теоретические зависимости сложением двух решений для взаимноперпендикулярных линейных напряженных состояний. При этом напряжение на контуре будет

$$\sigma = \sigma_z\left(1 - 2\cos 2\theta\right) + \sigma_x\left(1 - 2\cos 2\theta_1\right),$$

где θ, θ_1 – угол между данным направлением и напряжением, соответственно, σ_z, σ_x. Но $\theta_1 = 90 + \theta$, а $\sigma_x = \lambda\sigma_z$. При этом

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_z\left(1 - 2\cos 2\theta\right) + \lambda\sigma_z\left(1 + 2\cos 2\theta\right) = \\ &= \sigma_z - 2\sigma_z\cos 2\theta + \lambda\sigma_z + 2\lambda\sigma_z\cos 2\theta = \\ &= \left(1 + \lambda\right)\sigma_z - 2\left(1 - \lambda\right)\cos 2\theta .\end{aligned}$$

При $\lambda = 0{,}5$

$$\sigma = 1{,}5\sigma_z - \sigma_z\cos 2\theta = \left(1{,}5 - \cos 2\theta\right)\sigma_z ,$$

причем $\sigma_z = \sigma_0$.

При гладком контуре выработки квадратной формы поперечного сечения при $\lambda = 0$ в кровле и подошве ее наблюдаются растягивающие напряжения, а в боках сжимающие.

В точке 1 (рис. 2) $K = 0{,}72$, а в точке 4 $K = 2{,}6$.

Напряжения в точках 1, 3 и 5 при неровном контуре выше их значений при гладком контуре. Наибольший коэффициент концентрации соответствует точке 5 и составляет $K = 2{,}76$. В точках 2 и 4 напряжения по сравнению с гладким контуром уменьшились почти в два раза.

Графики распределения максимальных касательных напряжений τ_{max} в массиве пород (см.рис. 2) показывают, что при гладком контуре выработки квадратной формы напряжения выравниваются на расстоянии от ее контура, равном трем четвертям ширины выработки. Зона наибольшей концентрации напряжений расположена в непосредственной близости от гладкого контура в направлении точки 3, $K = 1{,}3$.

При неровном контуре характер распределения напряжений в массиве пород такой же, как при гладком. Наибольший коэффициент концентрации напряжений в боках выработки составляет 2,76.

При боковом распоре $\lambda = 0{,}5$ во всех точках контура выработки квадратной формы поперечного сечения напряжения сжимающие. Наибольший коэффициент концентрации в углах выработки равен 2,46 при гладком

и 2,88 при неровном контуре.

При сводообразной форме поперечного сечения и гладком контуре большие сжимающие напряжения возникают вблизи нижних углов выработки (K = = 2,25), а при неровном, кроме углов (K = 3,02), большие напряжения возникают в боку выработки (K = 2,66). При боковом распоре λ = 0,5 напряжения во всех точках контура сжимающие.

Исследование влияния одиночной выемки в подошве горизонтальной выработки на напряженное состояние пород вдоль выработки и вокруг нее при различных величинах бокового распора проводилось в связи с изучением вопроса о причинах внезапных выбросов породы в выработку при ее проведении на глубине 1200 м. Для этого были изготовлены две объемные и две плоские модели. Объемные модели представляли собой кубы размером 12x12x12 см. В одной модели имитировалась выработка арочной формы поперечного сечения, имеющая в натуре высоту 3,5 м и ширину по подошве 4 м. Во второй модели в средней части подошвы аналогичной выработки имитировалась одиночная выемка.

Плоские модели изготавливались в форме креста толщиной 5 мм и размером рабочего поля в его центральной части 106x106 мм. На этих моделях имитировалась та же выработка, что и на объемных.

Объемные модели испытывались при температуре "замораживания", плоские при комнатной температуре в специально сконструированном загрузочном устройстве, позволяющем прикладывать к ветвям креста различные вертикальные P и горизонтальные Q нагрузки. Ветви креста имели продольные прорези, благодаря чему в средней части модели создавалось однородное натряженное состояние. Такой способ испытаний на двухосное растяжение описан И.И.Бугаковым [1]. Полученные значения напряжений в плоских моделях справедливы и для сжимающих нагрузок. Боковой распор $\lambda = -\frac{Q}{P}$ принимался равным 0; 0,25; 0,5; 1; 1,25 и 1,5.

Исходные данные оптического метода δ и φ измерялись методом компенсации на координатно-синхронном поляриметре КСП-5.

В объемных моделях изучался характер распределения напряжений вдоль выработки на разных расстояниях от ее подошвы и кровли, для чего из объемной модели вырезались основной шлиф по продольной оси выработки и из половины куба на уровне изучаемых сечений дополнительные горизонтальные шлифы. Перпендикулярно продольной оси выработки также вырезались шлифы; один непосредственно по выемке в подошве, другой по середине между краем модели и выемкой в подошве.

Как показали исследования, в кровле и подошве выработки арочной формы сечения с гладкой поверхностью во всех продольных сечениях вертикальные сжимающие напряжения σ_z распределяются равномерно, постепенно увеличиваясь вглубь массива, и на расстоянии, примерно равном высоте выработки, достигают напряжения в нетронутом массиве.

Горизонтальные растягивающие напряжения σ_x вблизи кровли и подошвы составляют 10–15% от напряжения σ_z в нетронутом массиве. При удалении вглубь массива от подошвы выработки σ_x уменьшается и на расстоянии, равном половине высоты выработки, меняют знак.

Влияние выемки в подошве сказывается только в непосредственной близости от нее (рис. 3). Так, на расстоянии в натуре 0,37 м от подошвы

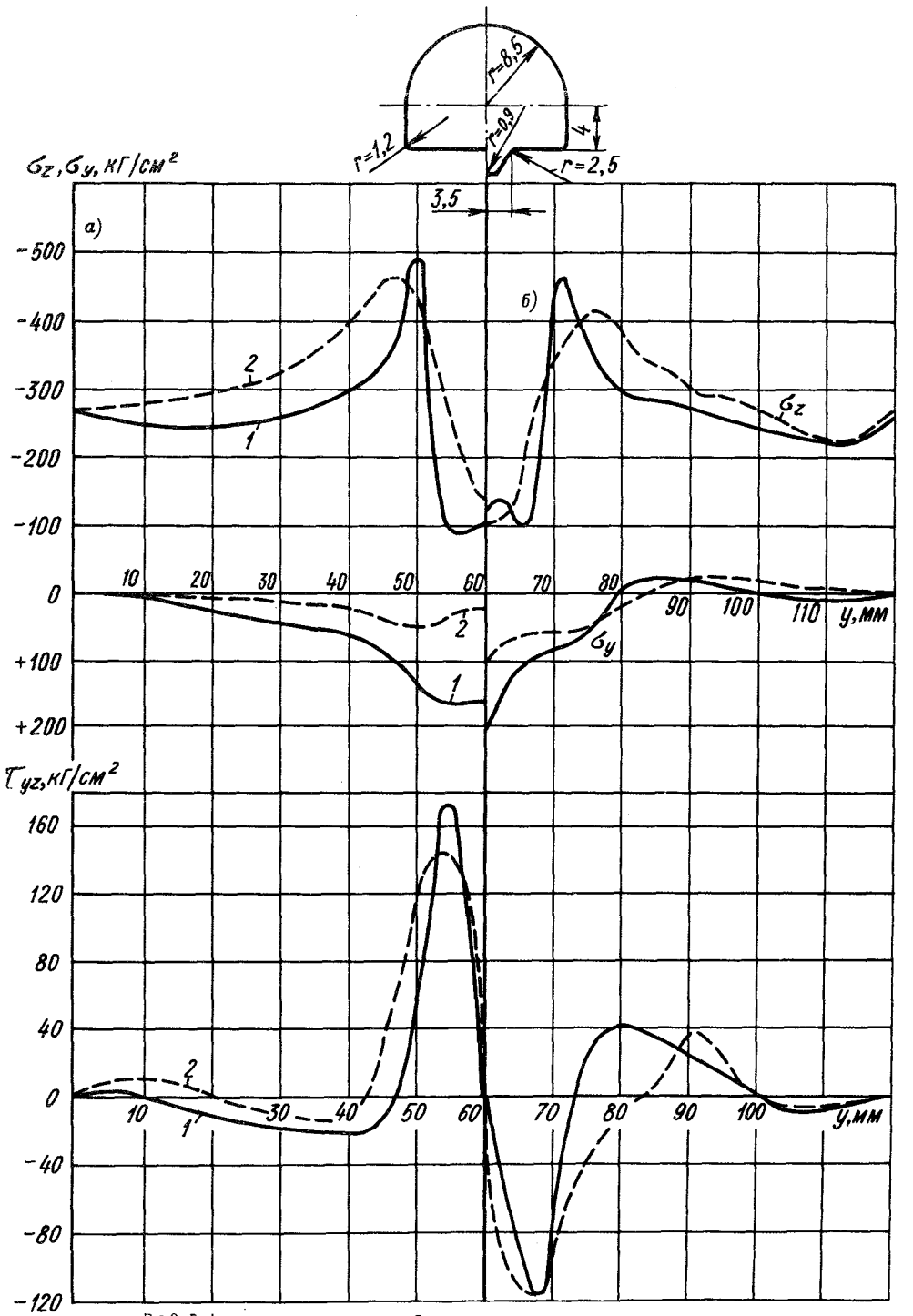


Рис. 3. Графики распределения напряжений σ_z, σ_y, τ_{yz} под выработкой: а – с гладким контуром; б – с выемкой в подошве выработки; 1 – по сечению, расположенному на расстоянии 0,37 м от подошвы выработки; 2 – то же на расстоянии 1 м

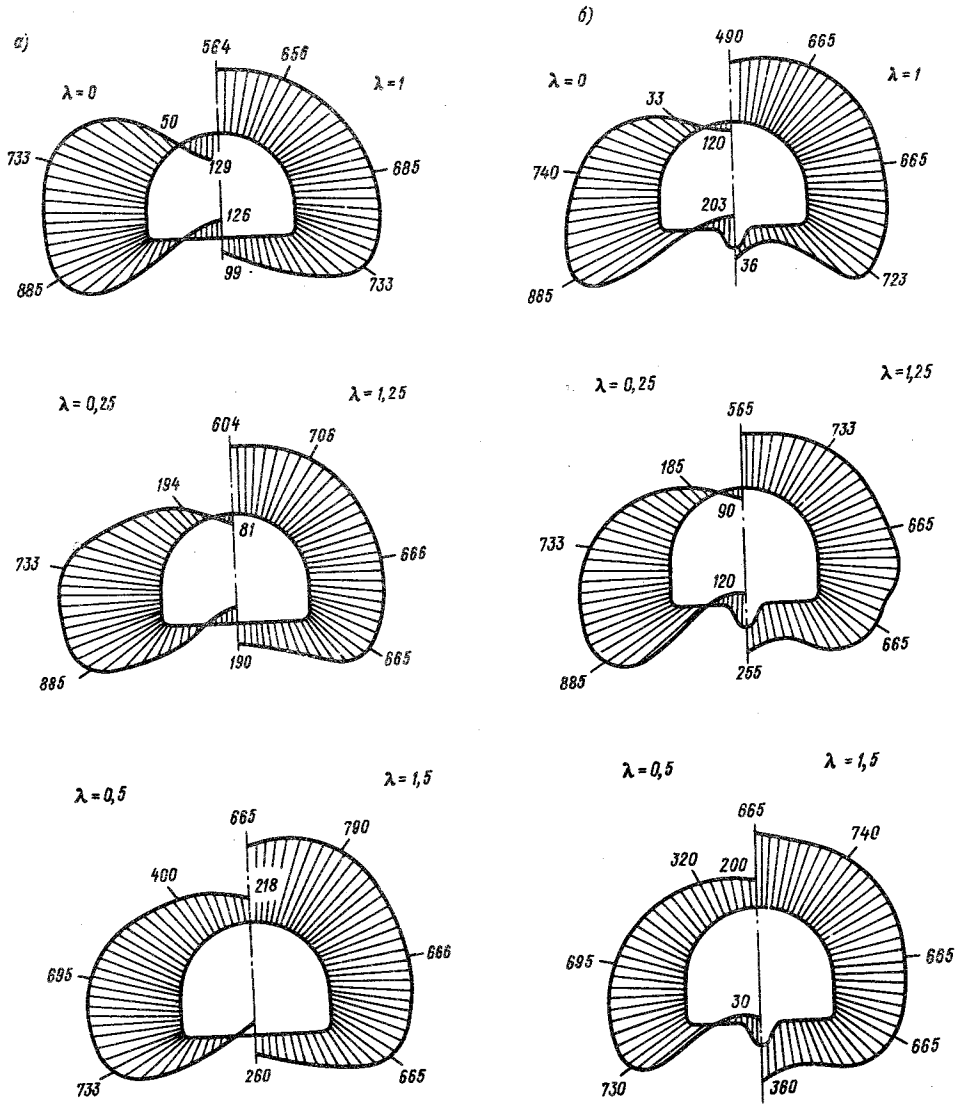


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений σ_θ по контуру выработки арочной формы поперечного сечения при различной величине бокового распора λ : *а* – с гладким контуром, *б* – с выемкой в подошве выработки

вертикальные напряжения σ_z под выемкой возрастают примерно на 30%, горизонтальные на 36%. На расстоянии около 1 м от подошвы выработки напряжения имеют ту же величину, что и при гладкой подошве.

На распределение напряжений в боках и кровле выработки выемка в подошве существенно не влияет.

В плоских моделях определялись напряжения σ_θ, нормальные к контуру сечения (рис.4), и коэффициенты концентрации K (таблица).

При одноосном напряженном состоянии в подошве и кровле выработки – напряжения растягивающие ($K = 0{,}41$); в остальных точках контура сжимающие, наибольшей величины они достигают в углах выработки ($\sigma_\theta = 885$ кГ/см^2, $K = 2{,}95$).

Значения коэффициентов концентрации K по контуру выработки арочной формы поперечного сечения при различной величине бокового распора λ

Точки	Значения K в зависимости от величины бокового распора λ					
	0	0,25	0,5	1	1,25	1,5
	При гладком контуре					
1	2,95	2,95	2,44	2,44	2,32	2,22
2	2,44	2,44	2,32	2,28	2,22	2,28
3	0,1	0,65	1,33	2,18	2,36	2,63
4	–0,41	–0,27	0,73	1,88	2,01	2,22
5	–0,42	–0,33	–0,03	0,33	0,63	0,87
	При наличии выемки в подошве					
1	2,95	2,95	2,44	2,41	2,22	2,22
2	2,63	2,44	2,32	2,22	2,22	2,22
3	0,11	0,62	1,32	2,22	2,44	2,63
4	–0,4	–0,3	0,69	1,63	1,89	2,22
5	–0,67	–0,4	0,1	0,12	0,85	1,2

По мере увеличения распора напряжения по контуру выработки выравниваются. Растягивающие напряжения постепенно уменьшаются и при $\lambda > 0{,}5$ меняют знак. Сжимающие напряжения в боках выработки с увеличением распора уменьшаются незначительно (от $K = 2{,}44$ до $K = 2{,}22$).

Выемка в подошве выработки вызывает местное перераспределение напряжений, не влияя на распределение напряжений в ее боках и кровле.

Резюмируя изложенное, можно сделать вывод, что неровности контура приводят к перераспределению напряжений в сторону их увеличения. Особенно опасным следует считать увеличение растягивающих напряжений.

Литература

1. Бугаков И.И., Смирнова С.В. О напряженном состоянии в растягиваемой плоскости с вырезом в условиях ползучести. – В кн.: Исследования по упругости и пластичности, сб. 7. Изд. ЛГУ, 1967.

2. Динник А.Н., Моргаевский А.Б., Савин Г.Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок. Тр. совещания по управлению горным давлением. Изд. АН СССР, 1938.

3. Савин Г.Н. Концентрация напряжений около отверстий. ГИТЛ, 1951.

4. Трумбачев В.Ф. Распределение напряжений вокруг горных выработок. Углетехиздат, 1956.