

УДК 622.831.32; 624.131.543 (575.2) (04)

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ  
ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ**

*К.Т. Тажибаев* – докт. техн. наук,  
*М.С. Акматалиева* – научн. сотрудник,  
*Д.К. Тажибаев* – научн. сотрудник

The results of determination of residual stresses in hard materials by new ultrasonic method basing on use of polarized cross waves are presented. The conformity of these results with results of well-known methods is performed.

Переход горной породы в анизотропное состояние часто происходит под действием палеонапряжений и деформаций в процессе структурно-метаморфической эволюции метаморфических комплексов. Поэтому сравнительный анализ величин констант упругости, коэффициентов анизотропии и акустических данных позволяет получить сведения о напряженном состоянии пород, которое имело место на самом начальном этапе действия палеонапряжений [1].

Самым наглядным и достаточно точным методом для изучения остаточных напряжений в оптически активных материалах является метод фотоупругости. В связи с этим нами для исследований, наряду с ультразвуковым методом, привлекался и метод фотоупругости.

Экспериментальными исследованиями, проведенными нами в разных твердых материалах, установлено [2], что изменение величины нормального напряжения пропорционально изменению величины разности времени прохождения ортогонально поляризованных поперечных волн, т.е.  $T_{\Delta S} = T_{BC} - T_{BP}$ , где  $T_{BC}$ ,  $T_{BP}$  – время прохождения скрещенной и параллельной поляризованной поперечной ультразвуковой

волны через заданную базу твердого тела. Исходя из этого, была получена следующая формула [4]:

$$\sigma_{xy} = \frac{2 T_{\Delta S} T_P \mu K}{T_{BP} T_S} \quad (1)$$

Значение коэффициента напряженности  $K$  определяется на основе прозвучивания или механических испытаний образцов, так как данный коэффициент зависит от свойств упругости материала. При прозвучивании с использованием поляризованных поперечных волн время прохождения поперечной ультразвуковой волны –  $T_S$  определяется как среднее значение:

$$T_S = \frac{T_{BP} + T_{BC}}{2} \quad (2)$$

На основе экспериментальных исследований остаточных напряжений в образцах, изготовленных из эпоксидной смолы ЭД-6 и горных пород Кумторского месторождения, было установлено, что  $K = \frac{E\mu^2}{2}$ .

С учетом этого из уравнения (1) было получено [4]:

$$\sigma_{xy} = \frac{T_{\Delta S} T_P}{T_{BP} T_S} E\mu^3 \quad (3)$$

где  $T_p$  – время прохождения продольной ультразвуковой волны;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\sigma_{XY}$  – среднее нормальное напряжение (среднего сечения) для заданной базы по перпендикулярной к направлению прозвучивания ( $Z$ ) плоскости ( $XY$ ). Следует отметить, что знак остаточных напряжений (растягивающий – положительный, сжимающий – отрицательный, как это принято в классической механике) определяется в соответствии со знаком величины  $T_{\Delta S}$ .

При прозвучивании поляризованной поперечной волной модельных образцов (ЭД-6) и образцов горных пород путем поворота излучателя и приемника, нами устанавливались положения вектора поляризации и измерялось время  $T_{(ВИ)}$ ,  $T_{(ВС)}$ , определялась их разность  $T_{\Delta S}$ , а также скорости прохождения поляризованной поперечной волны для параллельного  $Vs(p)$  и скрещенного  $Vs(c)$  состояния преобразователей. При этом для каждой стороны АВ(1); ВС (11); СД(111); ДА(1V) поперечного сечения призмы (образца ЭД-6) размером  $5 \times 5 \times 10$  см проводились измерения времени прохождения поляризованной поперечной волны, через каждый  $30^\circ$  путем поворота преобразователя ультразвуковой волны начиная от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  по часовой стрелке. Отсчет при  $0^\circ$

соответствует параллельному положению к рассматриваемой стороне, например, – АВ (1).

Результаты определения остаточных напряжений по предложенной формуле (3), в модельных образцах (ЭД-6), не имеющих и имеющих остаточные напряжения, а также в образцах горных пород месторождений Кумтор и Ингичке приведены на рис. 1, 3, 4, 6, 8, 10, 12–15. На рис. 2, 5, 7, 9, 11 представлены картины распределения остаточных напряжений в фотоупругих образцах (эпоксидная смола–ЭД-6), зафиксированных в поляризованном свете с помощью полярироидов.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что при отсутствии остаточных напряжений разность времени прохождения ортогональных поляризованных поперечных волн повсюду равна нулю и в соответствии с формулой (3) остаточные напряжения также равны нулю (рис. 1). Это согласуется с данными метода фотоупругости (на рис. 2 с помощью поляризованного света показано, что в данном образце остаточные напряжения полностью выведены, то есть отсутствуют).

Результаты, представленные на рис. 3, свидетельствуют о том, что в образце мраморизованного известняка остаточные напряжения незначительны, что согласуется с результатами ранее выполненных определений остаточных напряжений методом разгрузки [4].

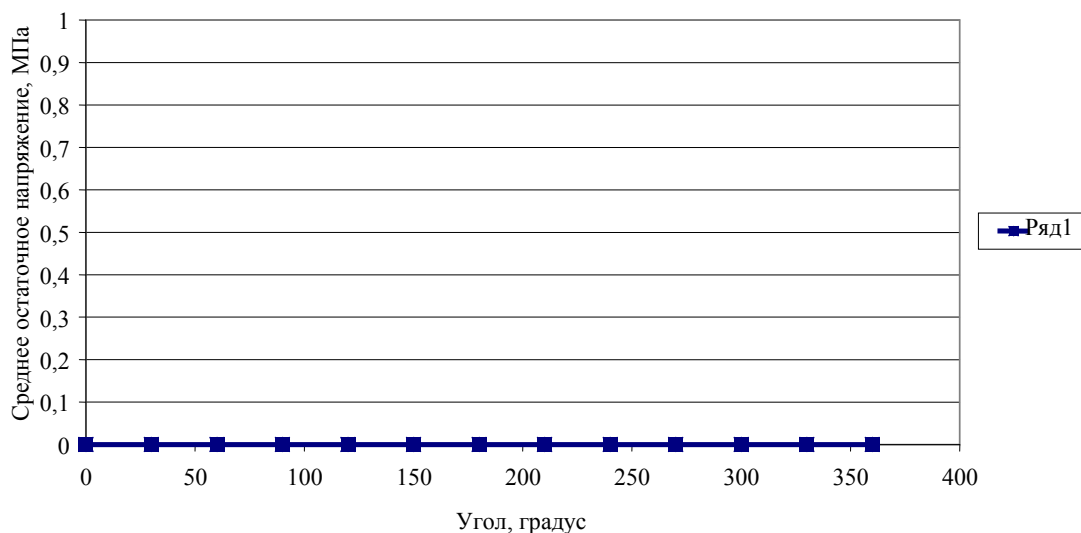


Рис. 1. График модельного образца 5 (ЭД6) без остаточных напряжений.



Рис. 2. Образец №5 (призма) без остаточных напряжений после пластической деформации (бочкообразование).

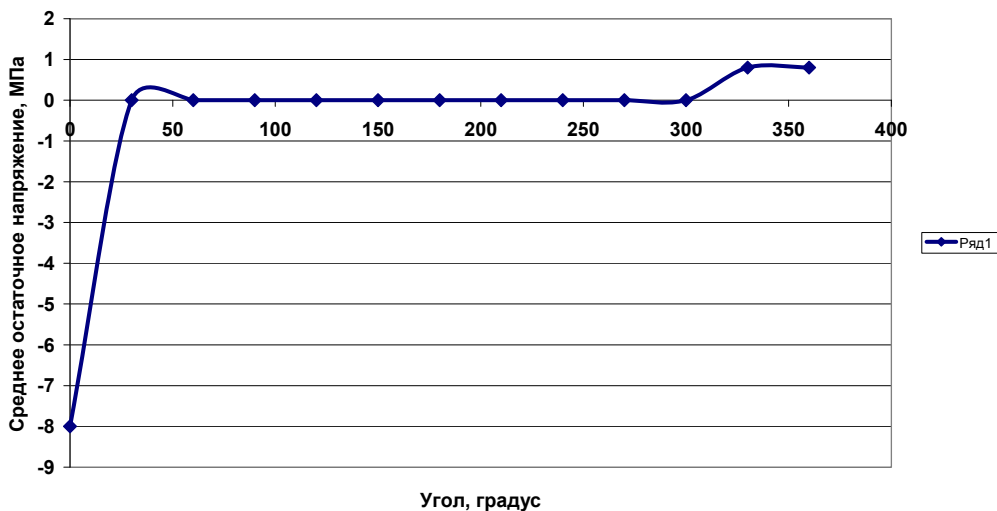


Рис. 3. График остаточны напряжений образца 3 мраморизованного известняка (Ингичке, диаметр 60 мм, диаметр 89 мм)

График зависимости остаточных напряжений (рис. 4) свидетельствует о наличии как сжимающих, так и растягивающих остаточных напряжений, а также их взаимной перпендикулярности. Следует отметить линейный характер изменения остаточных напряжений, который согласуется с данными фотоупругости. Действительно, при повороте образца на  $90^0$  картина напряжения изменяется радикально (см. рис. 5 и 7, где сторона АВ перпендикулярна стороне ВС). Остаточные напряжения (рис. 5) оказались как бы поляризованными по плоскостям, параллельным плоскости АВ, что подтверждается также на рис. 9 и 11.

В горных породах Кумторского месторождения имеются неоднородные и значитель-

ные остаточные напряжения (рис. 12–15). Круговые диаграммы остаточных напряжений (рис. 13, 15) свидетельствуют о возможности определения главных нормальных напряжений в плоскости и их компонент (тензора) по предложенному нами неразрушающему методу [4]. Главные нормальные напряжения в ориентированном отобранном образце филлит-хлорит-серицитовой горной породы, ориентированы по направлению азимута  $10^0$  и  $100^0$  (рис. 12, 13). По азимуту  $100^0$ , т.е. почти в субширотном направлении имеются значительные растягивающие остаточные напряжения, что согласуется с фактами образования вертикальных трещин на бортах карьера рудника Кумтор.

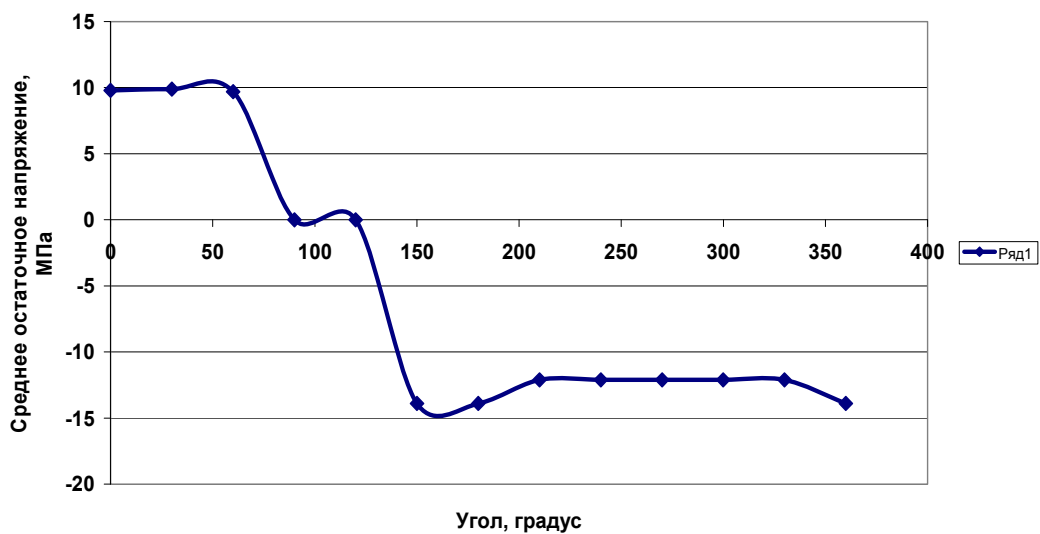


Рис. 4. График остаточных напряжений образца 9 (ЭД6) с генетическими остаточными напряжениями, сторона АВ.

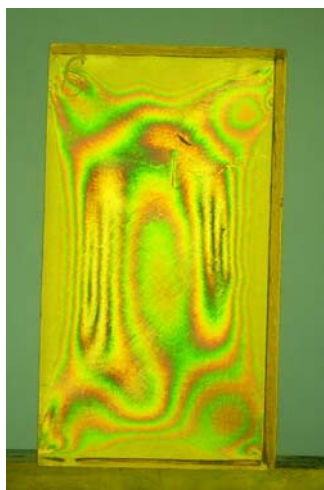


Рис. 5. Образец №9 с плоскополяризованным остаточным напряжением (параллельная к плоскости поляризации сторона – АВ).

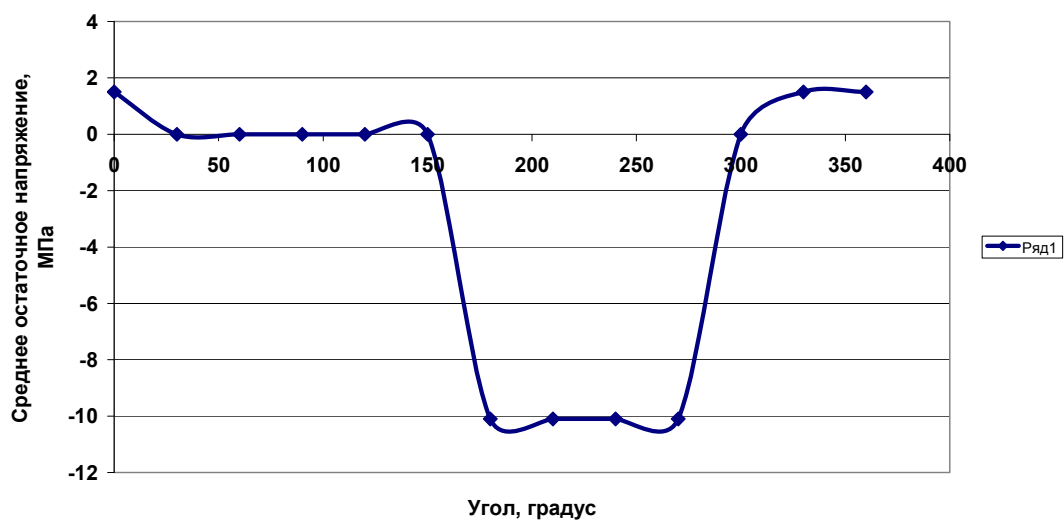


Рис. 6. График остаточных напряжений образца 9 (ЭД6) с генетическими остаточными напряжениями, сторона ВС.



Рис. 7. Образец №9 с плоскополяризованным остаточным напряжением (перпендикулярная к плоскости поляризации сторона ВС).

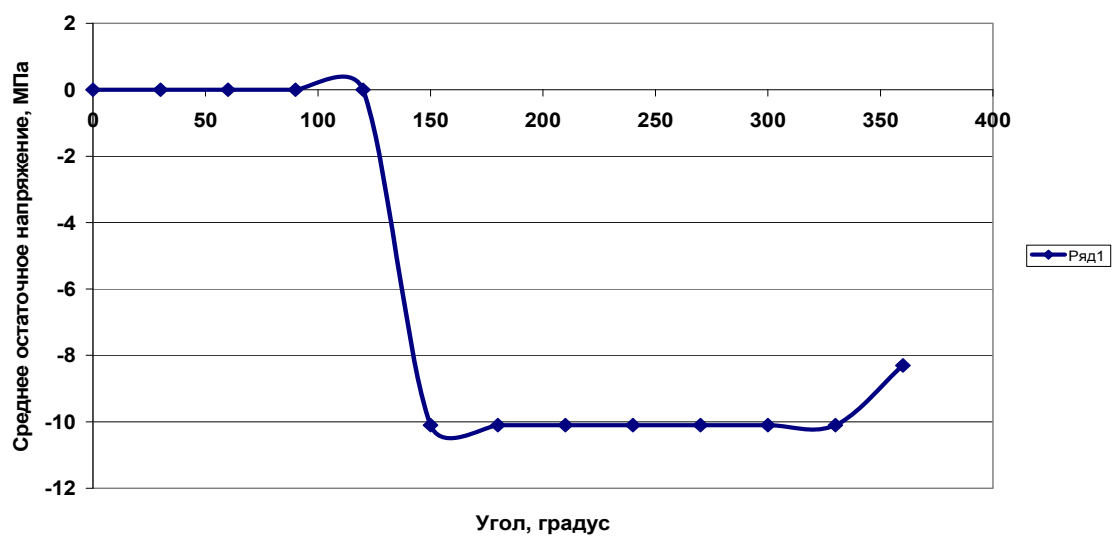


Рис. 8. График остаточных напряжений образца 9 (ЭД6) с генетическими остаточными напряжениями, сторона СД.

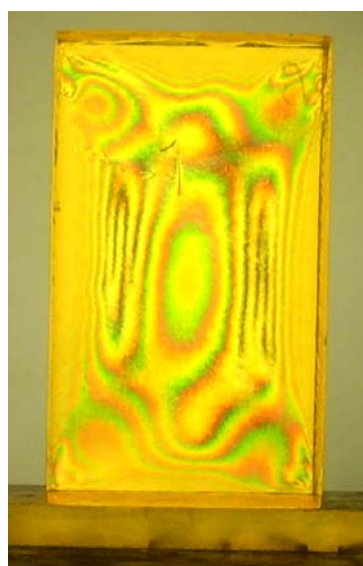


Рис. 9. Образец №9 с плоскополяризованным остаточным напряжением (параллельная к плоскости поляризации сторона СД).

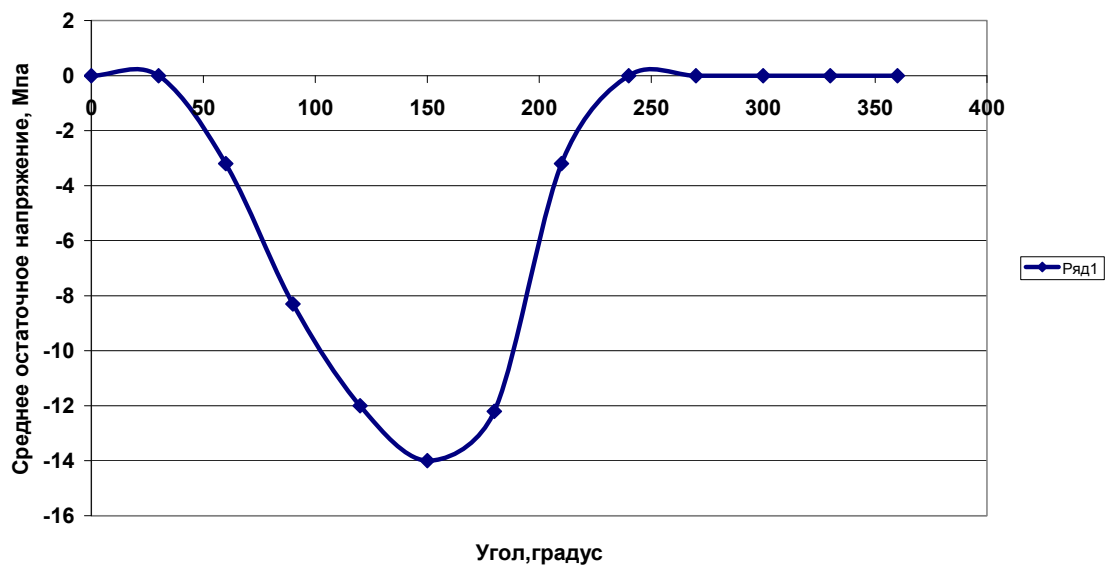


Рис. 10. График остаточных напряжений образца 9 (ЭДб, 5×5×10 см) с генетическими остаточными напряжениями, сторона ДА.



Рис. 11. Образец №9 с плоскополяризованным остаточным напряжением (перпендикулярная к плоскости поляризации сторона ДА)



Рис. 12. График среднего остаточного напряжения по кругу образца филлита хлорит-серицитового (Кумтор, скв. Д794, глуб. 27,9–28,7 м, диаметр обр. 60 мм, высота 170 мм)

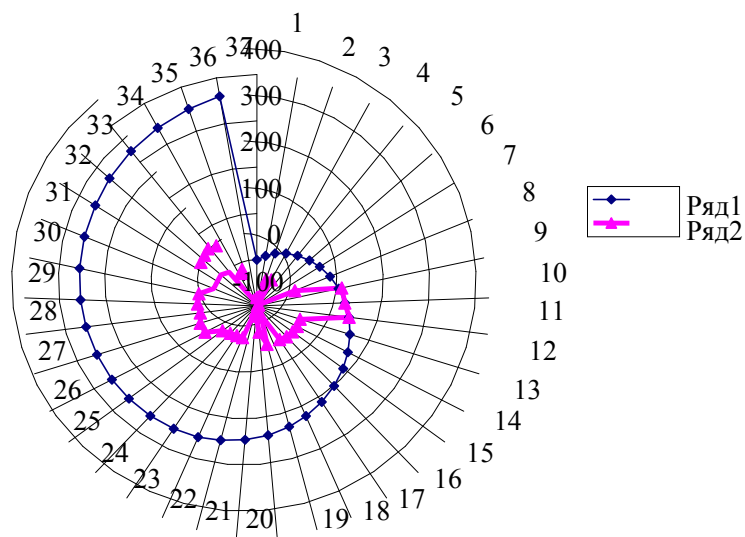


Рис. 13. Круговая диаграмма остаточных напряжений образца филлита хлорит-серицитового по азимуту (Кумтор, скв. Д794, глуб. 27,9–28,7 м, диам. обр. 60 мм, высота 170 мм., угол азимута 10 град.)



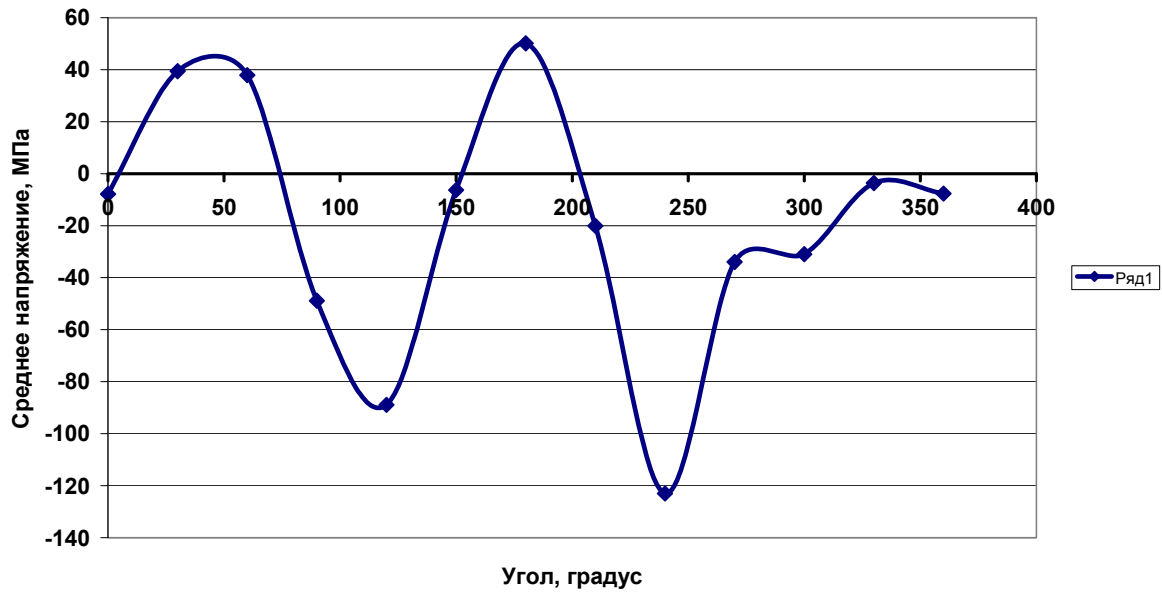


Рис. 14. График среднего остаточного напряжения по кругу образца метасаматита (Кумтор, скв. Д778, глуб. 131 м, диаметр обр. 60 мм, высота 155 мм, сторона В).

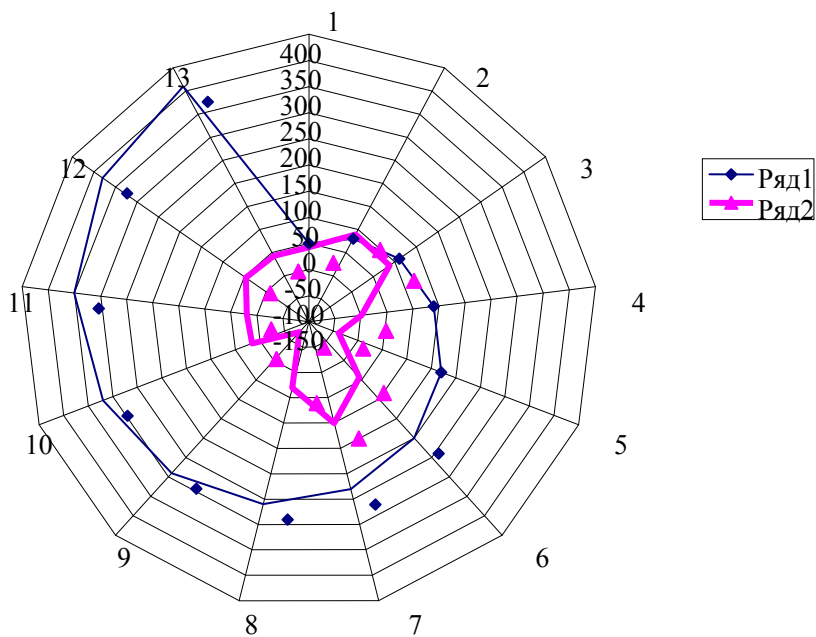


Рис. 15. Круговая диаграмма остаточных напряжений образца метосамотита (Кумтор, скв. Д778, глуб. 131 м, диам. обр. 60 мм, высота 155 мм, сторона В, угол 30 град.)

Таким образом, на основании метода фотоупругости, метода разгрузки и производственных данных можно отметить, что предлагаемый ультразвуковой метод, основанный на использовании поляризованных поперечных волн, позволяет определять величину и направление остаточных напряжений в твердых материалах.

**Литература**

1. Горбачев Ф.Ф. Акустополарископия порообразующих минералов и кристаллических пород. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. – 140 с.
2. Тажибаев К.Т. Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов. – Фрунзе: Илим, 1989. – 180 с.
3. Тажибаев К.Т., Акматалиева М.С., Тажибаев Д.К. Оценка остаточных напряжений ультразвуковым методом // Наука, техника, технология: Мат-лы 1-й межд. конф. ИА КР. – Бишкек, 2007. – С. 10–15.
4. Тажибаев К.Т. Метод определения остаточных напряжений и их тензора в твердых материалах // Вестн. КРСУ. – 2008. – №10. – С. 54–59.