A nemesopál színjátéka

Az élettelen anyag egyik legragyogóbb jelensége, a nemesopál színjátéka keletkezésének korrekt magyarázatát az elektronmikroszkóp segítségével adhatjuk meg.

Az opál névvel jelölt népes ásványcsoporthoz tartozik a nemesopál, melyet külső alaktalan megjelenése miatt a szilícium-dioxid (SiO_2) amorf módosulataként tartanak számon. Az egyes opálváltozatok között a legfeltűnőbb különbség a színükben mutatkozik. Színük alapján homogén, általában átlátszatlan „közönséges" opálokra és a látható spektrum színeiben tündöklő nemesopálra különíthetők el. A nemesopál igen közkedvelt drágakő. A 20. század elejéig a legszebb példányok a ma Csehszlovákia területére eső Vörösvágás (Červenica) melletti bányákból kerültek elő. Színjátékukban többféle szín található (a vörös is), megjelenésük lágy, bársonyos. A 20. század végén bekapcsolódott a termelésbe Ausztrália, és ma már gyakorlatilag a forgalomba hozott mennyiség nagy része (90–95%) innen származik. A kitermelt nemesopál értéke 1976-ban elérte a 30 millió dollárt. Az itt bányászott ékkövek általában kék és zöld színben pompáznak.

A nemesopált kétféle színhatás jellemzi. Az egyik az alapszín vagy testszín, amely színtelen, szürke, kékesfehér, fehér, sárgás, vöröses vagy fekete lehet. Ezek az árnyalatok általában az eltérő víztartalommal, a szerkezetbe beépült szennyező elemek vagy idegen ásvány jelenlétével magyarázhatók.

A másik a nemesopál egyedülálló tarka színjátéka, amelynek három fő jellemzője van:

– Az első az, hogy a szín apró foltokban jelenik meg, és az egymás melletti foltok színe eltérő. A foltok nagysága és elhelyezkedése változó lehet, amely befolyásolja a nemesopálok értékét. Legértékesebbnek tartják az ún. harlekin opálokat, melyeknek színei közel azonos méretű, élesen lehatárolt, szorosan illeszkedő foltokban jelentkeznek.

– A színjáték másik jellemző tulajdonsága, hogy minden egyes foltnak a megvilágítás és/vagy az észlelés irányának a változtatásával cserélődik a színe. Adott irányból nézve a nemesopál egyes foltjai színesek, míg mások az alapszínt mutatják. Ha a jelenséget ugyanolyan kameraállással fényképezik, de közben változik a megvilágítás szöge, akkor a színek átrendeződnek. Természetesen ugyanez tapasztalható a minta forgatása, döntése közben is. A színjáték csak ráeső fényben vizsgálható, áteső fényben gyakorlatilag nem jelentkezik.

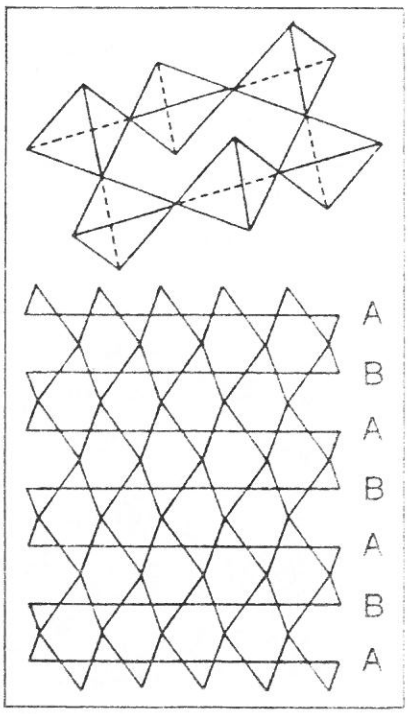
– A harmadik lényeges tulajdonsága az, hogy egy-egy folt csak olyan színeket mutat, amelyek a látható tartomány keskeny sávjait képviselik. Keverékszínek csak nagyon ritkán fordulnak elő.

A nemesopál színjátéka az opalizálás, ami tehát azt jelenti, hogy a nemesopálban adott irányú megvilágítás esetén egy szín egy folton csak adott irányból figyelhető meg. A színjáték e jellegzetességei alapján egyrészt jól elhatárolható más ásványok színeinek (például: az íriszkvarc repedés mentén fellépő interferencia-jelensége) keletkezési mechanizmusától, másrészt ismeretükben sajátos belső szerkezetre lehet következtetni.

A nemesopál sajátos szerkezetének és a látható fény kölcsönhatásának jellegét, azaz a színjáték keletkezésének az okát az RTG-diffraktométeres és az elektronmikroszkópos vizsgálatok tisztázták. Az opál szerkezetének meghatározásáról azonban ma sem beszélhetünk.

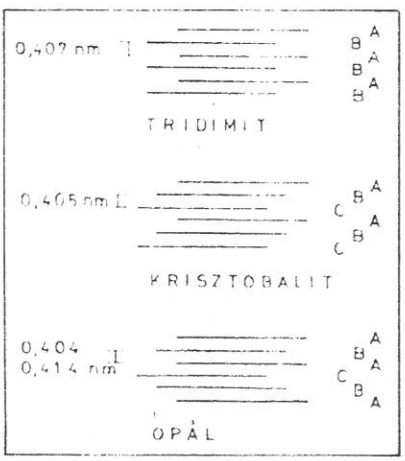
Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a korábbi eredményeket, majd ezeket saját kutatásaink alapján kiegészítve megkíséreljük felvázolni a szerkezetről kialakult képet.

Az opál szerkezetének legkisebb egysége a szilikát-tetraéder, amely négy oxigénatomból és a köztük elhelyezkedő szilíciumatomból áll. Az oxigénatom mérete úgy viszonylik a szilíciuméhoz, mint pingponglabda a borsószemhez. Ha az oxigénatomok középpontjait egyenesekkel kötjük össze, akkor négy lappal határolt (tetraéder = négylapú) testet kapunk. A szilícium- és az oxigénatomok ilyen illeszkedése rendkívül stabil, ezért a legtöbb esetben ebben a formában fordulnak elő. Gyakori a síkban hatosával való összekapcsolódásuk oly módon, hogy a páratlanok csúcsa lefelé, a párosoké felfelé néz. Ez a tetraéder sík gyöngyfüzérszerűen tovább növekedhet, egykristály esetében egészen a szemcse határáig. A tetraéder síkok közötti kapcsolatot a kristályszerkezetben a felső sík lefelé, ill. az alsó sík felfele néző tetraéderei biztosítják (*1. ábra*). Ilyen illeszkedés alapján három, SiO_2-összetételű ásvány (a tridimit, a krisztobalit és az opál) szerkezete megegyezik. A különbséget közöttük csak az egymásra következő síkok sorrendje, azaz az ismétlődés szabályszerűsége adja. A szemléletesség kedvéért a továbbiakban a tetraéder síkokat egyenes szakaszokkal ábrázoljuk, különböző helyzetüket eltérő betűvel jelöljük. A tridimit esetében ilyen módon a sorrend ABABAB, a krisztobalitnál ABCABC, az opálnál ABACBA, tehát az utóbbiban nem mutatható ki semmilyen szabályszerűség, a síkok elrendeződése véletlenszerű (*2. ábra*). Az opál szerkezetében a tetraéder síkok adott orientációja csak kis távolságon (legfeljebb 10–100 nm-en) keresztül követhető, mert ezután megváltozik. Ennek a mikroszerkezetnek a színjáték előidézésében nincs közvetlen szerepe. De nagyon lényeges az a megfigyelés, hogy a kristályos részletek nagyobb méretű morfológiai elemekké állnak össze (*3. ábra*). A továbbiakban ezeknek az elrendeződését, vagyis a másodlagos szerkezetet vizsgáljuk, mert az itt tapasztalható mére-

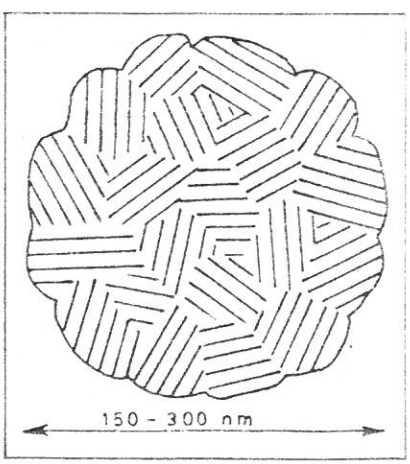


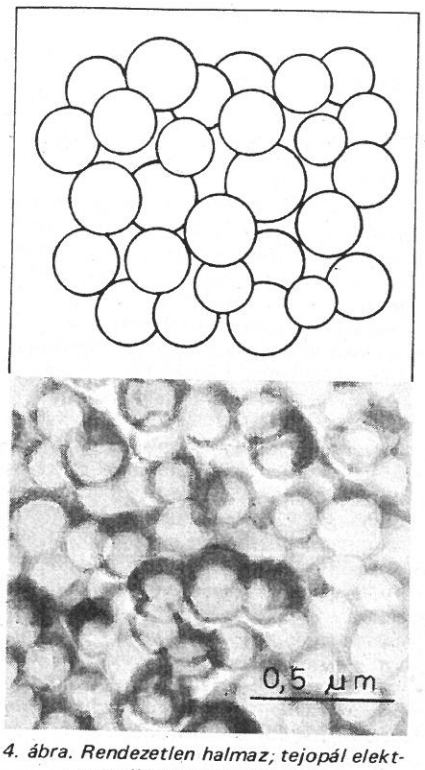
1. ábra. Tetraéder sík felülnézetben és a tetraéder síkok illeszkedése oldalnézetben

2. ábra. Tetraéder síkok rétegsorrendje

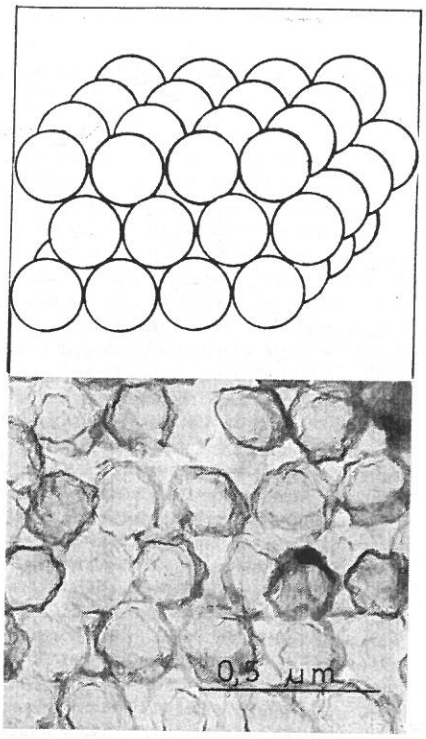


3. ábra. Morfológiai elem

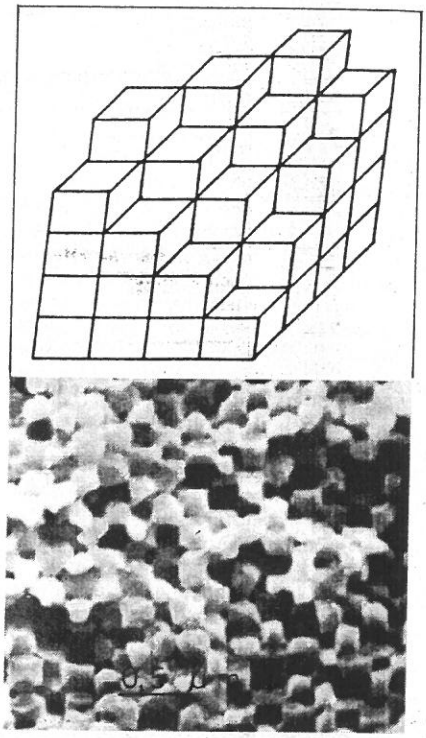




4. ábra. Rendezetlen halmaz; tejopál elektronmikroszkópos felvétele



5. ábra. Rendezett halmaz; ausztrál nemesopál elektronmikroszkópos felvétele



6. ábra. Szögletes morfológiai elemek rendezett halmaza: vörösvágási nemesopál elektronmikroszkópos felvétele

tek (150–300 nm) közel állnak a látható fény hullámhosszához, ami alapján értelmezhető a színek keletkezése.

A morfológiai elemek szabályszerűség nélküli rendezetlen elhelyezkedését mutatja a *4. ábra*. amely a tejopálra jellemző. Méretük következtében a morfológiai elemek a beeső fehér fényt a tér minden irányába szórják. Mivel a színek közül a kéknek van a hozzájuk legközelebb eső hullámhossza, ezért azt szórják a legerősebben. Ennek következménye a tejopálra jellemző kékesfehér szín, az ún. opaleszcencia megjelenése.

A morfológiai elemeknek a tér három irányában meghatározott szabályszerűséggel való illeszkedésével háromdimenziós térrács jön létre (*5. ábra*). Az ausztrál nemesopálban a gömbölyű elemeknek ilyen magas szimmetriájú elrendeződése valósul meg. A legújabb hazai kutatások azt igazolták, hogy szabályszerű elrendeződés alacsony szimmetriával szögletes elemekből is létrejöhet, ez jellemző a vörösvágási nemesopálra (*6. ábra*).

Mivel a nemesopálban tapasztalható periodicitás a látható fény hullámhosszának a nagyságrendjébe esik, a másodlagos szerkezet és a beeső fehér fény között kölcsönhatás, optikai diffrakció jön létre. A tejopálhoz képest az a lényeges különbség, hogy a szóródó sugarak között a morfológiai elemek rendezettsége következtében bizonyos irányokban állandó fáziskülönbség lép fel. Amelyik irányban ez a fáziskülönbség a fehér fény adott hullámhosszú komponensére nézve a hullámhossz egész számú többszöröse, a fázisok erősítik egymást, és megjelenik az illető szín. A többi irányba szóródó sugarak között nincs erősítés, ezért a színek helyett az alapszín látszik.

A diffrakció révén megjelenő szín árnyalatát, irányát a morfológiai elemek mérete, illeszkedésük szimmetriája, illetve a megvilágítás hullámhossz-eloszlása határozza meg. A nemesopálban lejátszódó optikai diffrakcióra is érvényes a Bragg-törvény: $n\lambda = 2dN \sin\theta$; ahol d a rácssíkok távolsága, θ a rácssíkok és a beeső fénysugarak hajlásszöge, λ a diffraktálódó hullámhossz, n a reflexió rendűsége és N az opál törésmutatója. Mivel esetünkben csak a legintenzívebb elsőrendű reflexió az érdekes, tehát n = 1. Az opál törésmutatója (N) általában 1,45. Ennek figyelembevétele azért szükséges, mert a beeső fénysugár a levegő–opál határfelületen megtörik és csak ezután vesz részt a diffrakcióban. A megtört sugarak beesési szöge maximálisan 90° lehet, ebből következően sin 90° = 1, így a képlet a következő formára egyszerűsödik $\lambda = 2{,}9\ d$. A képlet alapján kiszámolható az a szín, illetve maximális hullámhossz, amely az adott periodicitású rácssíkok esetén létrejöhet. A 700 nm-es vörös szín tehát már 240 nm-es periodicitásnál megjelenik, míg 138 nm alatt a nemesopálra jellemző színjáték nem tapasztalható.

A keletkező színjátékot befolyásolja a megvilágítás hullámhossz-eloszlása is. Mivel a mesterséges fényforrások és a Nap hullámhossz-eloszlása eltérő, ezért különböző megvilágításban a színek intenzitásarányai megváltoznak, a sárga és a vörös javára. Ezen az alapon magyarázható az a régi tapasztalat, amely szerint a bányabeli világításnál a nemesopál nem mutat olyan sokféle színt, mint a felszíni napfényben. A drágakő szempontjából az a legelőnyösebb, ha természetes fényben vagy nappali fényű lámpával vizsgáljuk.

A másodlagos szerkezet szimmetriája alapvetően meghatározza, hogy a színek milyen irányokban hagyják el a foltot, és mennyi jelenhet meg belőlük. Magas szimmetriájú elrendeződés néhány irányban kevés színt eredményez. Alacsony szimmetria esetén sokféle irányban többféle színt tapasztalunk.

A morfológiai elemek alakja befolyásolja a színek intenzitását. A gömbölyű elemek egyenletesen szórják a fényt, és ha ez egyforma mérettel párosul, akkor a diffrakció tökéletes, a színek nagy intenzitással szinte „szúrósan" villannak fel a nemesopál forgatása közben. A szögletes elemek lapjaikon, éleiken, csúcsaikon különböző mértékben szórnak, aminek következtében a diffrakció tökéletlenül játszódik le, így a színek intenzitása kisebb, megjelenésük lágyabb, bársonyosabb.

Az ausztrál és a vörösvágási minták morfológiai elemeinek eltérő alakja és illeszkedésük különböző szimmetriája lehetőséget ad az elkülönítésükre. Ez azért lényeges, mert a vörösvágási nemesopál ára a nemzetközi drágakőpiacon mintegy kétszerese az ausztrálénak.

A nemesopál színjátékának csodálatos varázsa abban áll, hogy a bemutatott fényjelenség minden egyes folt esetében különkülön létrejön. Mivel az egymás mellett elhelyezkedő foltok orientációja a forgatással állandóan változik, ez olyan hatást kelt, mintha a színek elmozdulnának az opálban. Az ámuló szemlélő már csak a foltok összjátékát, a kompozíciót látja.

TAKÁCS JÓZSEF