УДК: 539.4.01 (575.2) (04)
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-354-359

**МИНБАЕВА Б.Д., ХАЙДАРОВ Б.К., АБДЫЛДАЕВ О.Т., ХАЙДАРОВ К.**
Жусуп Баласагын атындагы КУУ,
Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясы
**МИНБАЕВА Б.Д.,[1] ХАЙДАРОВ Б.К.,[2] АБДЫЛДАЕВ О.Т.,[3] ХАЙДАРОВ К.[4]**
КНУ имени Жусупа Баласагына,[3]
Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясы
**B. MINBAEVA, B. KHAIDAROV, O. ABDYLDAEV K. KHAIDAROV**
KNU Jusup Balasagyn,
National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic

ORCID 0009-0007-4330-0694[3]

# МОНОКРИСТАЛЛДЫК СИНТЕТИКАЛЫК АЛМАЗДЫН БЕКЕМДИГИНЕ ТЕРМИКАЛЫК ИШТЕТҮҮНҮН ТААСИРИ

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЧНОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

## THE EFFECT OF THERMAL EFFECTS ON THE STRENGTH OF SINGLE CRYSTALS OF SYNTHETIC DIAMOND

**Кыскача мүнөздөмө:** Бул иште лазердик нурлануунун (ЛН) жана суюк азоттун (СА) синтетикалык алмаздын (САл) монокристаллдарына тийгизген таасири изилденди. Белгилүү режимдерде бул таасирлер алардын бекемдик мүнөздөмөлөрүнүн жогорулашына алып келери аныкталды. Бекемдикти өлчөө үчүн бир октуу статикалык кысуу сыноолорунун ыкмасы колдонулду. ЛНдин ар кандай тыгыздыгы менен иштетилген, дан өлчөмү 630/500дөн 400/315 мкмге чейинки ачык сары жана күңүрт боз түстөгү синтетикалык алмаздын монокристаллдары статикалык бекемдикке сыналды. Энергия тыгыздыгы 600 Дж/см² болгон ЛН таасир эткенде 630/500 фракциядагы САл монокристаллдарынын бекемдиги жогорулаганы аныкталды. Төмөнкү температуранын таасири үлгүлөрдү суюк азотко чөмүлтүү аркылуу жүргүзүлдү. Суюк азоттун кайноосу токтогондон кийин үлгүлөр 1 мүнөттөн 30 мүнөткө чейин кармалды. Лазердик иштетүүдөн кийин САл монокристаллынын бети баштапкы үлгүгө салыштырмалуу микротешикчелери жана микрожаракалары бар рельефтүү көрүнүшкө ээ болору аныкталды. Изилденген САл монокристаллдарында суюк азоттун таасиринен бекемдиктин байкаларлык өзгөрүүсү байкалган жок.

**Аннотация:** В работе рассмотрено воздействие лазерного излучения (ЛИ) и жидкого азота (ЖА) на монокристаллы синтетического алмаза (СА). Показано, что при определённых режимах указанные воздействия приводят к увеличению их прочностных характеристик. Для измерения прочности использовался метод статических испытаний на одноосное сжатие. Были проведены испытания на статическую прочность монокристаллов СА светло-жёлтого и тёмно-серого цветов зернистостью от 630/500 до 400/315 мкм после воздействия ЛИ различной плотности. Обнаружено увеличение прочности монокристаллов СА фракции 630/500 при воздействии ЛИ с плотностью энергии 600 Дж/см². Воздействие низкой температуры осуществлялось путём погружения образцов в ЖА. После прекращения кипения ЖА образцы выдерживались от 1 до 30 мин. Выявлено, что после обработки лазером поверхность монокристалла СА, в отличие от исходного

образца, приобретает более рельефный вид с микропорами и микротрещинами. В исследованных монокристаллах СА заметного изменения прочности при воздействии ЖА не обнаружено.

**Abstract:** This work examines the effect of laser radiation (LR) and liquid nitrogen (LN) on synthetic diamond (SD) single crystals. It is shown that, under certain conditions, these effects lead to an increase in their strength characteristics. The strength was measured using static uniaxial compression tests. Static strength tests were carried out on light-yellow and dark-gray SD single crystals with grain sizes ranging from 630/500 to 400/315 μm after exposure to LR of different energy densities. An increase in the strength of SD single crystals of the 630/500 fraction was observed after exposure to LR with an energy density of 600 J/cm². Low-temperature exposure was achieved by immersing the samples in LN. After LN boiling stopped, the samples were kept for 1 to 30 minutes. It was found that, after laser treatment, the surface of the SD single crystal, in contrast to the initial sample, acquired a more relief-like appearance with micropores and microcracks. In the studied SD single crystals, no noticeable change in strength was detected after exposure to LN.

**Негизги сөздөр:** синтетикалык алмаз; монокристалл; термикалык таасир; бекемдик; лазер; суюк азот; криогендик иштетүү.

**Ключевые слова:** синтетический алмаз; монокристалл; термическое воздействие; прочность; лазер; жидкий азот; криогенная обработка.

**Keywords:** synthetic diamond; single crystal; thermal treatment; strength; laser; liquid nitrogen; cryogenic treatment.

**Киришүү.** Керектүү жана өркүндөтүлгөн мүнөздөмөлөргө ээ синтетикалык алмазды (СА) алуу максатында СА кристаллдарынын физика-механикалык касиеттерине тышкы факторлордун таасирин изилдөө актуалдуу болуп саналат. Бул макалада СА монокристаллдарынын механикалык касиеттерине төмөнкү жана жогорку температуралардын тийгизген таасирин изилдөөнүн натыйжалары берилген.

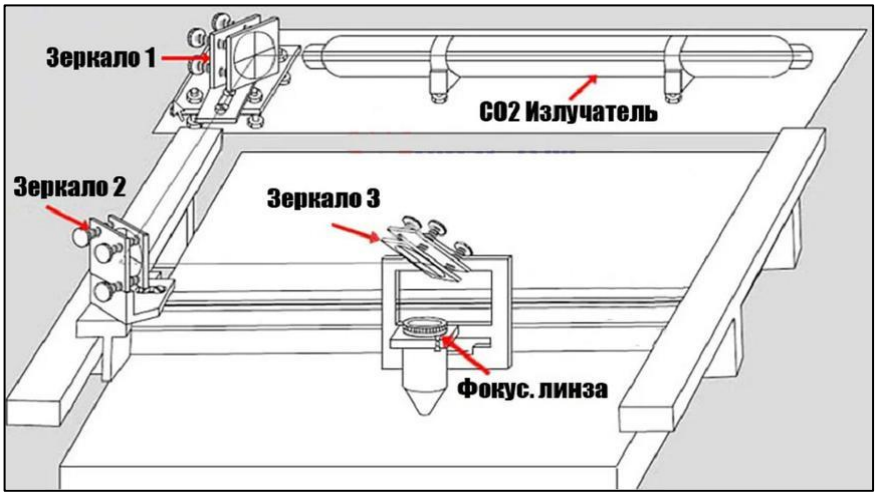
Алмазды иштетүү технологиясында лазердик нурлануу (ЛН) негизинен локалдык жылытуу каражаты жана жогорку концентрациялуу жылуулук булагы катары колдонулат. ЛН башка ыкмаларга караганда бир катар олуттуу артыкчылыктарга ээ: ал материалга энергияны контактсыз киргизүүнүн жогорку ылдамдыгын камсыз кылууга жана кеңири температуралык диапазондо СА кристаллдарынын локалдык аймактарын өтө тез жылытууга мүмкүндүк берет.

Лазердик нурлануу СА кристаллдары менен өз ара аракеттенгенде беттик жана структуралык дефекттердин болушу негизги фактор болуп саналат. Материалдарды лазер менен бузуу процессине структуралык дефекттердин, мисалы, курамынын бир текүү эместигинин, бөтөн фазалардын кошулушунун ж.б. чечүүчү таасири бар экендиги аныкталган [1].

Кээ бир физикалык жана механикалык касиеттери боюнча СА кристаллдары табигый алмаздан төмөн турат. Механикалык касиеттердеги мындай айырма СА кристаллдарынын көлөмүндө ички кристаллдык металл кошулмаларынын, микро- жана макродефекттердин болушу менен шартталган. Ошондуктан лазер нуру менен иштетүүдө бул кошулмалардын САнын физика-механикалык касиеттерине тийгизген таасирин изилдөө маанилүү.

**Үлгүлөрдү даярдоо жана эксперименттин ыкмасы.** Лазердик нурлардын СА менен өз ара аракеттенүүсүн изилдөө атайын эксперименталдык түзүлүштү колдонуу менен жүргүзүлдү (1-сүрөт). Түзүлүш 10,6 мкм толкун узундугунда иштеген $CO_2$ лазерин жана айлануучу күзгүлөрдү камтыйт.

Лазердик нурлануу фокустук аралыгы 0,01 мм болгон сфералык линза менен фокусталган. Жумушчу аянты 900 × 600 мм, кубаттуулугу 0дөн 60 Втка чейин өзгөртүлөт.




**1-сүрөт.** $CO_2$ -лазери менен орнотмонун схемасы.

Изилдөөлөр дан өлчөмү 630/500, 500/400 жана 400/315 мкм болгон монокристаллдарда жүргүзүлгөн. Бул СА кристаллдары боюнча алынган эксперименталдык натыйжалар илимий гана эмес, практикалык жактан да кызыгуу жаратат.

Монокристаллдардын үлгүлөрү эки түргө бөлүнгөн: I түрү - ачык сары, II түрү - күңүрт боз. СА үлгүлөрүн нурланткан лазердик кубаттуулуктун тыгыздыгы ЛН (γ) эки жол менен өзгөртүлгөн. Биринчи учурда ЛН таасир этүү убактысы 5 секунддан 10 секундга чейин өзгөртүлүп, лазердин интенсивдүүлүгү туруктуу болгон. Экинчи учурда лазердин интенсивдүүлүгү өзгөртүлүп, нурлануу убактысы туруктуу бойдон калган. Лазердик энергиянын агым тыгыздыгы ЛН (γ) күчөтүүчү лампага берилүүчү токтун өзгөрүшү аркылуу жөнгө салынган. Бул чоңдуктардын ортосундагы корреляция алдын ала аныкталып, иш жүзүндө түз сызыктуу болгон.

СА монокристаллдарынын өтө жогорку катуулугу, жогору морттугу жана кичинекей өлчөмдөрү механикалык сыноо үчүн талап кылынган формадагы үлгүлөрдү даярдоону техникалык жактан кыйла кыйындатат. Ушуга байланыштуу СА кристаллдарынын бекемдигинин негизги мүнөздөмөсү катары берилген үлгү бузулгандагы жүктүн мааниси («бекемдик көрсөткүчү») алынат [2; 3].

СА үлгүлөрүнүн бекемдик көрсөткүчү (Р) DA-2M аппаратынын жардамы менен аныкталган. Бекемдиги боюнча дан өлчөмү 630/500 мкм болгон СА монокристаллдары АС80 классындагы майдалоочу порошокторго, ал эми дан өлчөмү 500/400 жана 400/315 мкм болгон үлгүлөр АС100 классына туура келген [2]. Изилденген монокристаллдар негизинен кубооктаэдрдик габитуска ээ болгон.

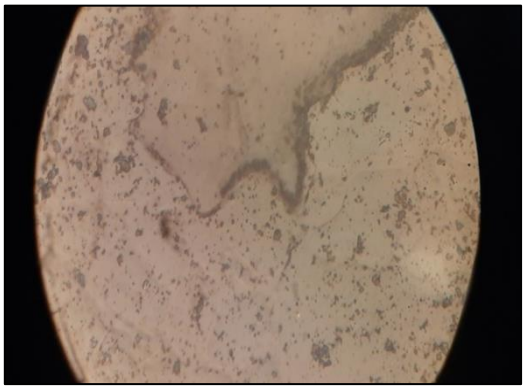
Визуалдык байкоо MICRO200T-01 оптикалык микроскопунун жардамы менен жүргүзүлгөн. СА монокристаллдарына түсү боюнча визуалдык байкоо жүргүзүүдө алардын жалпы санынын 10–15%ын түзгөн тунук эмес кристаллдар аныкталган.

Тунук кристаллдарда микроскоп аркылуу кристаллдын чокуларына жана кырларына чейин созулган, кубооктаэдрдик габитуска ээ көзгө көрүнгөн жип сымал кошулмалар байкалган. Тунук эмес кристаллдар бүт көлөмүндө же кристаллдын чоң бөлүгүндө майда кошулмаларды камтыган, бирок алар так аныкталган регулярдуу формага жана бетке ээ болгон эмес.

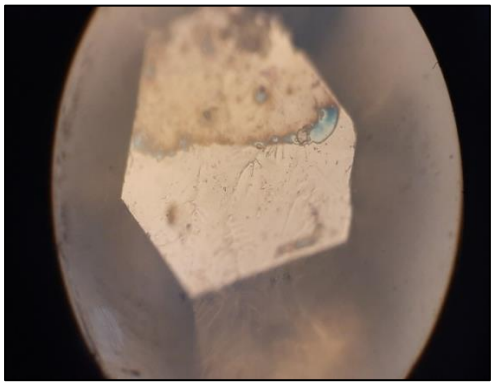
Изилденген СА монокристалл үлгүлөрүн төмөнкү температурада иштетүү Дьюар идишинде 77 К температурада, башкача айтканда суюк азотто, жүргүзүлгөн. СА үлгүлөрүн төмөнкү температурага дуушар кылуу методу аларды серпилгич баштыкка салып, Дьюар идишиндеги суюк азот ваннасына толугу менен чөмүлтүүдөн жана суюк азоттун кайноосу токтогон учурдан тартып 1 мүнөттөн 30 мүнөткө чейин кармоодон турган.

Андан кийин үлгүлөр салынган баштык суюк азоттон алынып, айлана-чөйрөнүн температурасына чейин жылытылган. Суюк азот менен иштетилген үлгүлөрдүн **Р** маанилери жогоруда сүрөттөлгөн ыкма менен бөлмө температурасында өлчөнгөн.

**Эксперименттин жыйынтыктары жана аларды талкуулоо.** Ачык сары СА монокристаллынын лазердик нурлантууга чейинки жана андан кийинки беттери тиешелүүлүгүнө жараша 2- жана 3-сүрөттөрдө көрсөтүлгөн. Бул сүрөттөрдү салыштырганда монокристаллдын бети ЛНге чейин бир калыптуу түзүлүшкө ээ болсо, лазердик нурлантуудан кийин ал рельефтүү мүнөзгө ээ болуп, микротешикчелер жана микрожаракалар байкалат.



**2-сүрөт. СА монокристаллынын баштапкы абалы СА х500**



**3-сүрөт. СА лазердик нурлантуудан кийинки абалы х500**

Эксперименттердин жүрүшүндө 630/500 мкм өлчөмүндөгү СА монокристаллдары өзгөчө кызыгуу жаратты, анткени дал ушул үлгүлөрдө ЛН $\gamma = 0{,}6$ кДж/см² таасир эткенде бекемделүү эффектиси байкалган.

Р нын **γ** га көз карандылыгы боюнча эксперименттик натыйжаларды талдоо I типтеги үлгүлөрдүн бекемделишине алып келген **γ** маанилери II типтеги үлгүлөргө караганда төмөн экенин көрсөтөт. **γ** нын андан ары көбөйүшү үлгүлөрдүн эки түрүнүн тең начарлашына алып келет.

Бирок бул процесс кара боз үлгүлөргө караганда тунук сары кристаллдарда интенсивдүү жүрөт. Акыркылар үчүн жумшаруу **γ** нын жогорку маанилеринде байкалат**.** Р(γ) мындай жүрүм-турумун тунук сары СА монокристаллдары кара боз кристаллдарга караганда ар кандай типтеги дефекттерди азыраак камтышы менен түшүндүрүүгө болот [4].

I типтеги үлгүлөр II типтеги үлгүлөргө караганда лазердик нурлануунун көбүрөөк бөлүгүн оптикалык жактан өткөрөт. Лазердик нурлануу өсүп жаткан кристалл тарабынан кармалып калган металл эриткичтин жана графиттин аралашмалары тарабынан сиңирилет, ал эми алмаз матрицасы 1064 нм толкун узундугунда тунук болот.

ЛН энергиясын жутуунун эсебинен металл аралашмалары жогорку температурага чейин ысытылат, ал эми ЛНдин айрым режимдеринде эрүү абалына жетет. Эриген металл аралашмалары алмаз матрицасындагы микрожаракаларды жана микротешикчелерди толтуруп, ошону менен бузуучу жүктү жогорулатат.

**γ** нын көбөйүшү менен эриген металл кристаллдын бетине чыгып, ал тургай бууланып кетиши мүмкүн. Муну менен катар алмаздын жарым-жартылай графиттешүүсү жүрөт. Бул процесстер биргелешип ЛНдин **γ** жогорку маанилеринде алмаз кристаллдарынын бекемдигинин азайышына алып келет.

400/315 жана 630/500 мкм дан өлчөмүндөгү монокристалл үлгүлөрүнүн кысуудагы Р өлчөөлөрүнүн натыйжалары таблицада келтирилген. Биринчи графада монокристалл күкүмүнүн

дан өлчөмү <D> мкм менен, экинчи графада tвыд мүнөт менен, үчүнчү графада бузуу жүгү P ньютон менен, төртүнчү графада формула боюнча эсептелген бузулуу чыңалуусу σ ГПа менен берилген:

$$\sigma = P / S = P / <D>^2,$$

мында S - берилген дан өлчөмү үчүн CA монокристаллдарынын орточо кесилишинин аянты, <D> - ошол эле фракция үчүн үлгүлөрдүн орточо сызыктуу өлчөмү, ал эми бешинчи тилкеде изилденген CA үлгүлөрүнүн тышкы габитус жана түсү камтылган.

**1-таблица. Суюк азотто ар кандай кармоо убакыттарында CA монокристаллдарынын ар түрдүү өлчөмдөрү үчүн бекемдик мүнөздөмөлөрү**

| Данчалар, мкм | tвыд., мин | P, H | σ, ГПа | Габитус жана өңү |
|---|---|---|---|---|
| 400/315 | Баштапкы үлгүлөр | 116 ± 25 | 0,905 | Ачык сары, тунук кубооктаэдрдик монокристаллдар |
| | 5 | 107 | | |
| | 10 | 128 | | |
| | 20 | 123 | | |
| | 30 | 109 | | |
| 630/500 | Баштапкы үлгүлөр | 202 ± 48 | 0,706 | Сары, тунук кубооктаэдрдик монокристаллдар |
| | 5 | 194 | | |
| | 10 | 225 | | |
| | 20 | 211 | | |
| | 30 | 188 | | |
| 630/500 | Баштапкы үлгүлөр | 96 ± 23 | 0,336 | Кара саргыч, кубдук жана кубооктаэдрдик монокристаллдар |
| | 5 | 87 | | |
| | 10 | 102 | | |
| | 20 | 80 | | |
| | 30 | 78 | | |

Ар бир дан өлчөмүндөгү үлгүлөр үчүн бузуу жүгүнүн маанилериндеги айырмачылыктар жана бузулуу чыңалуусунун мааниси таблицада төмөнкү температурага дуушар болбогон баштапкы үлгүлөр үчүн гана көрсөтүлгөн. Себеби суюк азотто иштетилген үлгүлөр үчүн бул маанилер каралып жаткан фракциянын баштапкы үлгүлөрүнүн маанилери менен иш жүзүндө дал келет.

Лазердик иштетүүдөн кийин CA монокристаллынын бети, баштапкы үлгүгө салыштырмалуу, микротешикчелер жана микрожаракалар менен мүнөздөлгөн көбүрөөк рельефтүү көрүнүшкө ээ болору көрсөтүлгөн. Лазердик нурлануунун белгилүү режимдеринде CA монокристаллдарынын бекемдигинин жогорулашы байкалган. Суюк азот менен иштетилгенде CA монокристаллдарында бекемдиктин байкаларлык өзгөрүүсү аныкталган эмес.

**Колдонулган адабияттар**

1. Углов А. А., Фокин С. А., Сипягин В. В., Васильев К. Д. Использование лазеров для обработки, улучшения качества и контроля алмазного сырья // ФиХОМ. - 1977. - № 6. - С. 10–18.
2. Порошки алмазные. Технические условия : ГОСТ 9206–80. - М. : Издательство стандартов, 1989. - 45 с.

3. Получение, свойства сверхтвёрдых материалов и перспективные технологии их применения : сб. науч. тр. / АН УССР, Институт сверхтвёрдых материалов. - Киев, 1990. - 148 с.
4. Хайдаров К., Минбаева Б. Д. Влияние лазерного излучения на прочность синтетического монокристаллического алмаза // Естественные и математические науки в современном мире : сб. ст. по материалам XXXIX Междунар. науч.-практ. конф. - Новосибирск : АНС «СибАК», 2016. - № 2 (37). - С. 140–146.

**Рецензент: физика-математика илимдеринин кандидаты Мамытбеков У.К.**