

Table 2. Coefficients *A*, *B*, *C* and *D* in the thermo-optic dispersion formulas, Eq. (2), for BeAl₆O₁₀ crystal

dn_i/dT	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
dn_p/dT	5.247	0.3421	0.3313	-0.01751
dn_m/dT	3.596	0.9238	0.04069	0.004808
dn_g/dT	4.319	0.5744	0.2007	-0.007805

For Cr³⁺:BeAl₆O₁₀ crystal, the typical emission wavelength is 0.83 μm [1]. Using the obtained thermo-optic dispersion formulas, the TOCs are calculated at 0.83 μm as $dn_p/dT = 6.4$, $dn_m/dT = 5.0$, $dn_g/dT = 5.6 (10^{-6} K^{-1})$.

References

1. Pestryakov, E. V. Prospects for the development of femtosecond laser systems based on beryllium aluminate crystals doped with chromium and titanium ions /

E. V. Pestryakov, A. I. Alimpiev, V. N. Matrossov // *Quantum Electron.* – 2001. – Vol. 31 (8). – P. 689–696.

2. A tunable laser action due to the ⁴T₂-⁴A₂ electron-vibrational transition in Cr³⁺ ions in BeAl₆O₁₀ / A. I. Alimpiev [et al.] // *Kvantovaya Elektron. (Moscow)*, 1988. – Vol. 15. – P. 509–511.

3. Pestryakov, E. V. Physical properties of BeAl₆O₁₀ single crystals / E. V. Pestryakov // *J. of Appl. Phys.* – 1977. – Vol. 82. – P. 3661–3666.

4. Thermo-optic coefficients measurements by a laser beam deviation method for the medium with linear thermal gradient / P. A. Loiko [et al.] // *Devices and Methods of Measurements*, 2010. – Vol. 1, № 3. – P. 70–77.

5. Thermo-optical properties of beryllium containing oxide crystals as materials for high power laser systems / E. V. Pestryakov [et al.] // *Proc. SPIE.* – 2007. – Vol. 6731. – P. 67312B-1–67312B-5.

6. Ghosh, G. *Handbook of Thermo-optic Coefficients of Optical Materials with Applications* / G. Ghosh // Academic Press, London, 1998.

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МРАМОРА

Алексеев В.А., Усольцева А.В.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация*

Аннотация. Проведено исследование связи свойств натуральных материалов с технологическими режимами лазерного производства на примере применяемого в приборостроении мрамора. В работе на основании заданных показателей для оценки шероховатости поверхности экспериментально определена связь между режимами лазерного гравирования и свойствами поверхности материала. С учетом отклонения физико-механических характеристик материала, которые не позволяют точно аналитически рассчитать режимы лазерной обработки, проведены эксперименты. Проведена статистическая оценка величины микронеровностей, дисперсии. По результатам экспериментального исследования качества поверхности даны рекомендации по выбору параметров лазерного излучения с учетом характеристик поверхности материалов. Показано практическое применение результатов.

Ключевые слова: мрамор, декоративная обработка, лазерная технология, шероховатость поверхности.

INVESTIGATION OF IMPACT OF PROCESS MODES ON SURFACE QUALITY OF MARBLE LASER TREATMENT

Alekseev V., Usoltseva A.

*Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov
Izhevsk, Russia*

Abstract. A study was conducted on the relationship of the properties of natural materials with the technological modes of laser production using the example of marble used in instrument making. In operation on the basis of specified parameters for estimation of surface roughness the relationship between laser engraving modes and properties of material surface is experimentally determined. Taking into account the deviation of the physical and mechanical characteristics of the material, which do not allow accurately analytically calculating laser processing modes, experiments were carried out. The value of micro-irregularities and dispersion was statistically estimated. Based on the results of the experimental study of surface quality, recommendations are made on the selection of laser radiation parameters taking into account the surface characteristics of materials. Practical application of results is shown.

Keywords: marble, decorative processing, laser technology, surface roughness.

Адрес для переписки: Усольцева А.В., ул. Черемуховая, 3, г. Ижевск 426023, Удмуртия
e-mail: ajieksa_o@mail.ru

Обработка мрамора, одного из наиболее дорогих и разнообразных материалов среди всех используемых каменных пород, пользуется достаточно высоким спросом [1]. По разнообразию структурных рисунков и вариантов окраски, присущих мрамору, он не имеет равных среди всех иных пород камня.

При красоте и высоких эстетических качествах обработка мрамора является довольно проблемным вопросом. Прежде всего, это вызвано его химическим составом и кристаллической решеткой. Невысокая твердость и хрупкость приводит к тому, что обработка мрамора ударно-гравировальным станком не делается в принципе. Лазерное гравирование мрамора, с одной стороны достаточно простое, с другой стороны, натуральный мрамор достаточно быстро стареет, особенно в условиях эксплуатации на открытом воздухе с повышенной влажностью и перепадами температур, в результате чего впитывает влагу и преждевременно разрушается, что приводит к ухудшению качества изображения.

Для повышения потребительских свойств художественно – промышленных изделий проведено исследование влияния технологических режимов лазерной обработки на качество поверхности мрамора. Для достижения поставленной цели проведен анализ физических, механических, химических свойств мрамора, его технологий производства, видов и распространенность изделий из данного материала, определены преимущества лазерной обработки мрамора в сравнении с альтернативными технологиями, выбрана лазерная установка для обработки, заданы режимы обработки, получены опытные образцы, проведено исследование качества поверхности полученных образцов для уточнения и корректного задания технологического режима.

С учетом оптических, энергетических и технологических характеристики лазерных установок для обработки мрамора выбран CO₂-лазер, работающий на длине волны 10,6 мкм [2]. Для проведения эксперимента использована лазерная установка Trotec Speedy 300.

Эксперимент проводился при следующих режимах лазерного излучения: мощность лазерного излучения изменялась от 0 до 9,6 Вт, при постоянной скорости перемещения лазерного излучения 27,0 см/с, разрешающей способности 500 dpi, частоте импульсов 1000 Гц, диаметре сфокусированного лазерного луча 0,1 мм, вертикальном направлении лазерного луча на материал.

Для определения зависимости качества поверхности от режимов воздействия лазерного излучения проведена проверка применения предлагаемой методики с воспроизведением ступенчатого клина при изменении мощности излучения от нуля до максимально заданной. Для измерения микронеровностей на поверхности

после лазерной обработки образца использовался микроинтерферометр «МИИ-4» [3].

В соответствии с требованиями научно-технической документации для шероховатости поверхности определена высота неровностей профиля, снятая в 10 точках на одной ступени и рассчитано среднее арифметическое значение отклонения профиля [4].

Для повышения информативности рассчитана дисперсия, характеризующая разброс значений случайной величины микронеровностей относительно математического ожидания [5].

С увеличением мощности излучения глубина удаления материала пропорционально увеличивается, шероховатости поверхности увеличивается до определенного уровня, потом начинает уменьшаться.

Установленная зависимость качества поверхности лазерной обработки мрамора от технологических режимов работы лазерной установки позволяет получить поверхность с заданными параметрами шероховатости, успешно компенсировать имеющиеся естественные неоднородности материала, стабильно добиваться высоких результатов при промышленном изготовлении высокохудожественных эксклюзивных изделий, повысить сохранность нанесенных изображений.

Проведенные исследования показали, что для достижения заданного состояния обработанной поверхности мрамора перспективно применение проведенных экспериментов. В результате проведенных экспериментов выяснено, что при задании режимов лазерного гравирования при декоративной обработке мрамора, оптимальное значение мощности лазерного излучения составляет 5,5–10,5 Вт. Аналогичную методику можно использовать при задании скорости лазерного гравирования, разрешающей способности, частоты импульсов, диаметра сфокусированного лазерного луча на материале, угла падения лазерного луча и т. д. Перспективно продолжение работ применительно к другим материалам.

Представленный подход экспериментального обоснования режимов лазерной обработки материалов использован при разработке учебно-методического пособия [6], выбранные в результате эксперимента технологические режимы (лазерной резки и лазерного гравирования) позволили провести полное изготовление прибора письменного настольного [7].

Литература

1. Приборостроение – XX век. / Сост. М. С. Шкарбандя. – М. : Совершенно секретно, 2004. – 768 с.
2. Исследование влияния режимов лазерной обработки на качество поверхности материалов в приборостроении / В. А. Алексеев [и др.] // Приборостроение–2019: материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 года, Минск, Республика Беларусь / ред-

кол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.] – Минск : БНТУ, 2019. – С. 433–435.

3. Alekseev, V. A. Increase in efficiency of use of laser technologies for identification / V. A. Alekseev, A. V. Usoltseva, V. P. Usoltsev // International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” Part 1: Participants’ reports in English 2019 December 11, 2019. Beijing, China, 2019 PRC. – 2019. – P. 149–156.

4. Гибадуллин, И. Н. Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки шероховатости / И. Н. Гибадуллин, В. А. Валетов // Изв. вузов. Приборостроение–2019. – Т. 91, № 1. – С. 86–92.

5. Алексеев, В. А. Регрессионная модель лазерного воздействия на натуральные материалы / В. А. Алексеев, А. В. Усольцева, В. П. Усольцев // Лазерно-информационные технологии в медицине,

биологии, геоэкологии и на транспорте – 2020: труды XXVIII Междунар. конф. г. Новороссийск, 7–12 сентября 2020 г.) / под ред. проф. В. Е. Привалова. – Пенза : ПГУ, 2020. – С. 95–99.

6. Задание режимов лазерной обработки немаetalлических материалов. / В. А. Алексеев [и др.] // Учебно-методическое пособие по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» направление подготовки 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск: Управление информационных ресурсов ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. – 32 с.

7. Прибор письменный настольный : пат. образец RU 109645 / А. В. Усольцева, В. П. Усольцев, М. М. Черных. – Опубл. 16.07.2018. Бюл. № 7.

УДК 535.317; 681.7

ВАРИООБЪЕКТИВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Артюхина Н.К.¹, Шарко Д.С.², Чергейко С.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены анализ базовой схемы и результаты расчета нового вариообъектива для приемника излучения с охлаждаемой диафрагмой.

Ключевые слова: вариообъектив, объектив, система технического зрения, качество изображения.

ZOOM LENS FOR VISION SYSTEMS

Artioukhina N.¹, Sharko D.², Charheika S.¹

¹Belarusian National Technical University

²JSC “PELENG”

Minsk, Belarus

Abstract. The analysis of the basic scheme and the designing of a new zoom lens for a cooled infrared image sensor are presented.

Key words: zoom lens, lens, vision system, image quality.

Адрес для переписки: Чергейко С.В., ул. Ак.Высоцкого 3-114, г. Минск 220076, Республика Беларусь
e-mail: ich0@bk.ru

Объективы с плавным изменением фокусного расстояния находят широкое применение в различных сферах деятельности человека. Они сопровождают нас повсеместно: в кинематографии, микроскопии, телевидении, фотографии, видеотехнике, спектрофотометрии, оптической когерентной томографии, астрономии, медицине, тепловидении, пирометрии (последнее время очень популярно), лазерной технике, системах технического зрения (СТЗ) и других областях. При изменении фокусного расстояния можно решить, прежде всего, две основные задачи:

– быстрый поиск наблюдаемого объекта и введение его в поле зрения системы (это выполнимо при малом фокусном расстоянии и большом поле зрения);

– наблюдение за объектом: выполнение различных измерений, наблюдение увеличенных

деталей, фиксация, запись и множество других операций (это выполнимо при увеличении фокусного расстояния и соответственно уменьшении поля зрения).

При больших фокусных расстояниях поле зрения системы заметно уменьшается [1].

В последнее время объективы с переменным фокусным расстоянием, в частности вариообъективы, все чаще стали применяться в СТЗ, так как современная элементная база позволяет создавать многоспектральные оптико-электронные приборы со значительно меньшими массой и габаритными размерами, при сохранении высоких технических характеристик [2]. Поэтому такие СТЗ возможно применять при проектировании беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для дистанционного зондирования Земли, а также мониторинга объектов в