

УДК 539.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО МАКРО- И МИКРОФОРМООБРАЗОВАНИЯ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, А.Е. Шершнев

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины*

## INVESTIGATION OF LASER MACRO- AND MICROFORM FORMATION OF BRITTLE NONMETALLIC MATERIALS BY THE METHOD OF FULL FACTOR EXPERIMENT

E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, S.I. Sokolov, A.E. Shershnev

*F. Scorina Gomel State University*

Проведены экспериментальные исследования по лазерной полировке кварцевого стекла с помощью полного факторного эксперимента первого порядка типа ПФЭ  $2^n$  с двухуровневым варьированием факторов. Составлена регрессионная модель полировки кварцевого стекла излучением лазера с учетом вычисленных значащих факторов с помощью дисперсионного анализа.

**Ключевые слова:** лазерная обработка, полный факторный эксперимент, кварцевое стекло.

Experimental studies on the laser polishing of quartz glass with the help of a full-order first-order phase-effect experiment of the PFE  $2^n$  type with a two-level variation of the factors are carried out. A regression model of polishing of quartz glass by laser radiation is calculated taking into account the calculated significant factors using the analysis of variance.

**Keywords:** laser treatment, full factor experiment, quartz glass.

### Введение

Синтетические и природные алмазы, кристаллический и аморфный кварц обладают рядом уникальных физических свойств. Физические свойства кристаллов алмаза обеспечивают стабильную работу в критических условиях устройств, созданных на его основе, и делают перспективным его применение при создании новой техники [1]. Свойства кварцевого стекла обеспечивают его применение в качестве материала для изготовления окон фотоприемников и колб газоразрядных ламп, из него производятся линзы для передачи ультрафиолетового излучения и призмы для монохроматоров и спектрофотометров [2].

Одним из важных направлений развития современных технологий обработки хрупких неметаллических материалов являются технологии лазерного макро- и микроформообразования. Примером эффективного использования лазерного излучения для формообразования поверхности хрупких неметаллических материалов является лазерная полировка кварцевого стекла [3]–[6].

Для оптимизации задачи изучения влияния параметров лазерного макро- и микроформообразования можно использовать метод полного факторного эксперимента. Он позволяет получить зависимость влияния различных факторов на выходной параметр при ограниченном числе опытов.

### 1 Методика эксперимента

При планировании опытов использовали методику полного факторного эксперимента первого порядка типа ПФЭ  $2^n$  с двухуровневым варьированием факторов (скорость обработки  $V$ , шаг сканирования  $h$ , радиус лазерного пучка  $r$ ), с выходным параметром шероховатости поверхности  $R_a$ . Статистической моделью объекта исследования являлась функция отклика (шероховатость поверхности  $R_a$ ), связывающая выходной параметр с факторами ( $V$ ,  $h$ ,  $r$ ), которые менялись в некоторых пределах при проведении опытов [7].

После преобразования независимых переменных в натуральном масштабе к безразмерным переменным с кодируемыми значениями:  $-1$ ,  $+1$  была получена следующая таблица 1.1.

Таблица 1.1 – Значения независимых переменных в кодированном виде

Факторы в безразмерной системе координат	-1	+1
Факторы		
Скорость обработки, мм/с	1	2
Шаг сканирования, мм	0,1	0,2
Радиус лазерного пучка, мм	1	2

После преобразования была построена матрица планирования эксперимента, соответствующая полному факторному эксперименту, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов.

При лазерной полировке использовались кварцевые стекла толщиной 3 мм. Лазерная обработка проводилась с помощью установки, схема которой приведена в [8].

Скорость обработки кварцевого стекла варьировалась в пределах от 1 до 2 мм/с, шаг сканирования от 0,1 до 0,2 мм, а радиус лазерного пятна от 1 до 2 мм.

Соответствующее уравнение регрессии при полном факторном эксперименте имеет следующий общий вид:

$$R_a = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (1.1)$$

## 2 Результаты эксперимента

В таблице 2.1 представлены результаты эксперимента по лазерной полировке кварцевого стекла, приведенные при всех значениях факторов.

По результатам, представленным в таблице 2.1, была построена математическая модель полировки кварцевого стекла, показывающая зависимость шероховатости кварцевого стекла от параметров обработки (скорость обработки  $V$ , шаг сканирования  $h$ , радиус лазерного пучка  $r$ ). Для этого были вычислены коэффициенты регрессии  $b_i$  (таблица 2.2) в уравнении (1.1), где  $i$  – индекс, указывающий на соответствующий фактор. Результаты расчетов представлены в таблице 2.2.

Для проверки адекватности математической модели были высчитаны оценка дисперсии и критерий Кохрена по стандартной методике, описанной в [7]. Для полученных результатов критерий Кохрена составил 0,154 при критическом значении 0,68, что говорит об однородности серии экспериментов.

Рассчитанный критерий Фишера 7,811 меньше критического значения 8,7, что говорит о том, что регрессионная модель оказалась адекватна полученным экспериментальным данным.

Для оценки влияния факторов  $V$ ,  $h$ ,  $r$  проведен трехфакторный дисперсионный анализ.

Независимые факторы  $V$ ,  $h$ ,  $r$  имеют соответственно по 2 уровня, при каждом сочетании которых получено по 5 значений шероховатости  $R_a$ . Тогда число всевозможных сочетаний уровней этих факторов равно  $2 \cdot 2 \cdot 2$ , а общее число наблюдаемых значений признака  $N = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 = 40$ .

Таблица 2.2 – Коэффициенты регрессии

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента
$b_0$	0,447
$b_1$	0,185
$b_2$	0,0875
$b_3$	-0,00193
$b_{12}$	0,0628
$b_{13}$	-0,0507
$b_{23}$	-0,0693
$b_{123}$	-0,0176

Совокупность наблюдаемых значений приведены в таблице 2.1.

В случае трехфакторного дисперсионного анализа имеем следующие источники изменчивости значений шероховатости  $R_a$ : фактор  $V$ ; фактор  $h$ ; фактор  $r$ ; взаимодействие факторов  $V$  и  $h$ ; взаимодействие факторов  $V$  и  $r$ ; взаимодействие факторов  $h$  и  $r$ ; взаимодействие факторов  $V$ ,  $h$  и  $r$ ; неучтенные случайные причины.

Вследствие того, что вычисленная оценочная дисперсия  $S_z^2$  оказалась очень мала, за дисперсию шума бралось значение в соответствии с параметрами точности использованного прибора для измерения шероховатости Surtronic S-100. Методика математической обработки данных дисперсионного анализа предполагает использование в качестве дисперсии шума параметра  $S_z^2$ , однако в данном случае это не представляется корректным. Предлагаемая методика оценки значимости основывается на предположении о том, что установка значений координат факторного пространства не содержит погрешностей. В то же время ее значение обеспечивается конструктивными особенностями прибора. Равно, как и оценка получаемых значений функции отклика в точках измерения. Поэтому приборная погрешность должна с неизбежностью учитываться в качестве составляющей дисперсии шума. В данном случае неопределенность, обусловленная погрешностями прибора, является превалирующей. Проверка значимости влияния факторов по критерию Фишера позволила выделить в качестве влияющих факторов скорость  $V$  и шаг сканирования  $h$ .

Таблица 2.1 – Результаты эксперимента

Номер комбинации факторов, $n$	Факторы			Шероховатость				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$R_{a1}$ , мкм	$R_{a2}$ , мкм	$R_{a3}$ , мкм	$R_{a4}$ , мкм	$R_{a5}$ , мкм
1	-1	-1	-1	0,211	0,226	0,231	0,234	0,202
2	+1	-1	-1	0,412	0,421	0,428	0,442	0,426
3	-1	+1	-1	0,291	0,321	0,301	0,327	0,319
4	+1	+1	-1	0,839	0,821	0,842	0,837	0,854
5	-1	-1	+1	0,247	0,237	0,259	0,265	0,267
6	+1	-1	+1	0,551	0,543	0,522	0,524	0,549
7	-1	+1	+1	0,244	0,271	0,274	0,257	0,267
8	+1	+1	+1	0,712	0,722	0,732	0,731	0,734

Таблица 2.3 – Дисперсионный анализ данных

Источник изменчивости	Сумма квадратов эффектов	Число степеней свободы	Исправленная дисперсия	Критерий $F$ Фишера
$V$	$Q_V = 1,352$	$\nu_V = 1$	$S_V^2 = \frac{Q_V}{\nu_V} = 1,352$	$F_V = \frac{S_V^2}{S_Z^2} = 1502,259$
$h$	$Q_h = 0,299$	$\nu_h = 1$	$S_h^2 = \frac{Q_h}{\nu_h} = 0,299$	$F_h = \frac{S_h^2}{S_Z^2} = 331,776$
$r$	$Q_r = 0,00384$	$\nu_r = 1$	$S_r^2 = \frac{Q_r}{\nu_r} = 0,00384$	$F_r = \frac{S_r^2}{S_Z^2} = 0,427$
$Vh$	$Q_{Vh} = 0,155$	$\nu_{Vh} = 1$	$S_{Vh}^2 = \frac{Q_{Vh}}{\nu_{Vh}} = 0,155$	$F_{Vh} = \frac{S_{Vh}^2}{S_Z^2} = 171,948$
$Vr$	$Q_{Vr} = 0,000774$	$\nu_{Vr} = 1$	$S_{Vr}^2 = \frac{Q_{Vr}}{\nu_{Vr}} = 0,000774$	$F_{Vr} = \frac{S_{Vr}^2}{S_Z^2} = 0,86$
$hr$	$Q_{hr} = 0,607$	$\nu_{hr} = 1$	$S_{hr}^2 = \frac{Q_{hr}}{\nu_{hr}} = 0,607$	$F_{hr} = \frac{S_{hr}^2}{S_Z^2} = 67,427$
$Vhr$	$Q_{Vhr} = 0,0154$	$\nu_{Vhr} = 1$	$S_{Vhr}^2 = \frac{Q_{Vhr}}{\nu_{Vhr}} = 0,0154$	$F_{Vhr} = \frac{S_{Vhr}^2}{S_Z^2} = 17,161$
$Z$	$Q_Z = 0,0001$	$\nu_Z = 32$	$S_Z^2 = \frac{Q_Z}{\nu_Z} = 0,009$	

Кроме того, влияющим оказалось опосредованное воздействие радиуса пучка при изменении скорости и шага сканирования. Самостоятельного влияния данного фактора не выявлено. Данное обстоятельство позволило предположить о целесообразности построения регрессионной модели функции отклика с использованием четырех составляющих. Совместное влияние радиуса пучка со скоростью и шагом сканирования позволяет сделать вывод о замене такого фактора как радиус на плотность мощности.

После вычислений и проверки уравнение (1.1) выглядит следующим образом:

$$R_a = 0,447 + 0,185x_1 + 0,0875x_2 + 0,0628x_1x_2 - 0,0693x_2x_3 - 0,0176x_1x_2x_3.$$

При переходе к реальным значениям уравнение регрессии получается:

$$R_a = 0,447 + 0,185V + 0,0875h + 0,0628Vh - 0,0693hr - 0,0176Vhr.$$

#### Заключение

В работе составлена регрессионная модель полировки кварцевого стекла излучением лазера с учетом вычисленных значащих факторов с помощью дисперсионного анализа. Полученное уравнение адекватно экспериментальным данным. Планируется применение методики полного факторного эксперимента для исследования лазерного макро- и микроформообразования синтетических алмазов и других хрупких неметаллических материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Митягин, А.Ю. Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной техники / А.Ю. Митягин, А.А. Алтухов, А.Б. Митягина // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 1. – С. 53–58.
2. Арбузов, В.И. Основы радиационного оптического материаловедения / В.И. Арбузов. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
3. Многопрофильная лазерная технология обработки кварцевого стекла / В.К. Сысоев // Электронный научный журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/053.pdf>. – Дата доступа: 25.01.2009.
4. Sysoev, V.K. Laser etching and polishing of quartz tubes / V.K. Sysoev // Glass and Ceramics. – 2003. – Vol. 60. – P. 106–107.
5. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – № 12. – P. 452–461.
6. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand [et al.] // Physics Procedia. – 2012. – № 39. – P. 277–285.
7. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
8. Исследование процесса лазерной полировки кварцевого стекла / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнев, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 4 (25). – С. 45–49.

Поступила в редакцию 16.10.17.