

**Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, В. А. Прохоренко**  
УО «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь,

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КВАРЦЕВЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СТЕКОЛ С ПОМОЩЬЮ СОЧЕТАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

### **Введение**

В настоящее время искусственные нейронные сети получили широкое применение в различных областях науки техники, в том числе для моделирования технологических процессов лазерной обработки [\[1\]](#).

В ряде случаев при решении научно-практических задач оказывается эффективным сочетание возможностей нейросетевых технологий и метода конечных элементов [2–6].

В работах [7–9] приведены результаты исследований процесса лазерного раскалывания стеклянных пластин, полученных при использовании золь-гель метода.

В данном исследовании искусственная нейронная сеть была использована для определения значений температур и термоупругих напряжений, формируемых при лазерном раскалывании кварцевых пластин.

### 1. Конечно-элементный анализ

Для формирования обучающего массива данных и данных для тестирования нейронной сети расчеты температурных полей и полей термоупругих напряжений выполнялись с использованием метода конечных элементов [10]. Моделирование проводилось для пластины с геометрическими размерами  $20 \times 10 \times 0,5$  мм. На рисунке 1 приведено расположение лазерного пучка и хладагента в плоскости обработки.

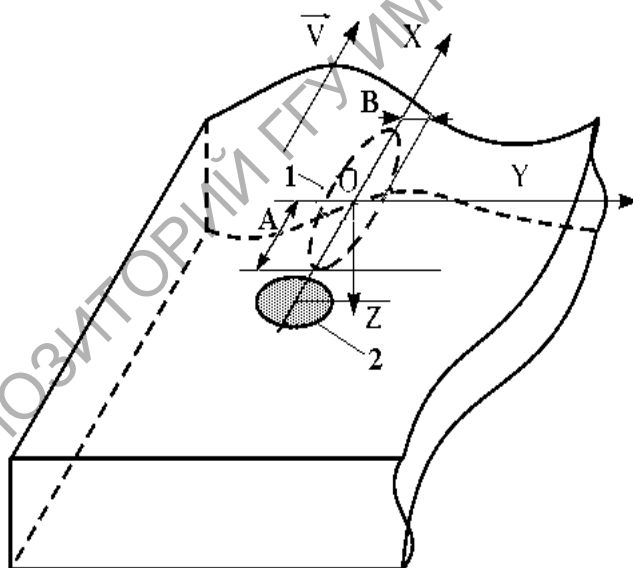


Рисунок 1 – Расположения лазерного пучка и хладагента в плоскости обработки

Позицией 1 отмечен лазерный пучок с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм, позицией 2 отмечена зона подачи хладагента. Расчеты были выполнены для 81 варианта входных параметров, 75 из которых была использована для обучения нейронной сети. Часть входных параметров и ре-

зультатов расчетов представлены в таблице 1.  $V$  – скорость резки,  $A$  и  $B$  – полуоси эллиптического лазерного пучка,  $P$  – мощность лазерного излучения,  $\sigma_y$  – расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки,  $T$  – максимальные расчетные температуры в обрабатываемой пластине. При расчетах использовались свойства кварцевых стекол, полученных при использовании коллоидного варианта золь-гель метода [7, 9].

Таблица 1 – Входные параметры конечно-элементной модели и расчетные значения температур и термоупругих напряжений в зоне лазерной обработки кварцевых золь-гель стекол

N	$V$ , м/с	$A$ , м	$B$ , м	$P$ , Вт	$\sigma_y$ , Па		$T$ , К
1.	0,04	0,001	0,0005	20	-50026868	7778470	1833
2.	0,04	0,002	0,0005	20	-28947801	6275683	1408
3.	0,04	0,002	0,0005	25	-36184751	7844605	1687
4.	0,04	0,002	0,0005	30	-43421701	9413529	1966
5.	0,04	0,003	0,0005	20	-20039443	5316337	1153
6.	0,04	0,001	0,001	20	-27446531	6158121	1244
7.	0,04	0,001	0,001	25	-34308163	7697651	1482
8.	0,04	0,001	0,001	30	-41169798	9237185	1720
9.	0,05	0,001	0,0005	20	-46684739	6625864	1691
10.	0,05	0,002	0,0005	20	-27441351	5576820	1318
11.	0,05	0,002	0,0005	25	-34301688	6971024	1574
12.	0,05	0,002	0,0005	30	-41162026	8365232	1830
13.	0,05	0,003	0,0005	20	-19047927	4714341	1083
14.	0,05	0,003	0,0005	25	-23809913	5892915	1280
15.	0,05	0,003	0,0005	30	-28571896	7071501	1478
16.	0,05	0,001	0,001	20	-25384505	5281742	1145
17.	0,06	0,001	0,0005	20	-44032196	5782897	1581
18.	0,06	0,001	0,0005	25	-55040245	7228622	1904
19.	0,06	0,002	0,0005	20	-26256817	4985452	1248
20.	0,06	0,002	0,0005	25	-32821019	6231811	1487
21.	0,06	0,002	0,0005	30	-39385222	7478173	1726
22.	0,06	0,003	0,0005	20	-18288450	4222693	1030
23.	0,06	0,003	0,0005	25	-22860562	5278360	1214
24.	0,06	0,003	0,0005	30	-27432675	6334034	1399
25.	0,05	0,003	0,0015	25	-9101927	4189554	745
26.	0,05	0,003	0,0015	30	-10922315	5027472	835
27.	0,04	0,003	0,0005	25	-25049305	6645426	1368
28.	0,04	0,003	0,0005	30	-30059167	7974502	1582
29.	0,06	0,003	0,0015	25	-8456838	3650307	698
30.	0,06	0,003	0,0015	30	-10148206	4380357	780

## 2. Применение нейронной сети

Для определения параметров лазерной обработки золь-гель стекол была использована полносвязанная нейронная сеть прямого распространения с архитектурой [30-15-3], созданная в открытой программной библиотеке для машинного обучения TensorFlow [11]. При создании сети использовалась функция активации ReLu (Rectified Linear Unit), оптимизатор – Adam, являющийся расширением алгоритма стохастического градиентного спуска. Сеть была скомпилирована с функцией потерь mse (mean squared error), вычисляющей квадрат разности между предсказанными и целевыми значениями. Количество эпох при обучении сети равнялось 500.

Для тестирования сети использовались варианты параметров, расположенных в шести последних строчках таблицы 1. Результаты работы созданной нейронной сети приведены в таблице 2. В качестве значений, характеризующих точность определения искомых параметров, рассматривались относительные ошибки  $\epsilon$ . Величины относительных ошибок при определении максимальных напряжений растяжения и температур в зоне обработки не превысили 3% и 5% соответственно. Худший результат нейронная сеть показала при определении максимальных по величине напряжений сжатия, соответствующие относительные погрешности находятся в пределах 4–10 %. В целом можно сделать вывод о возможности применения сочетания метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей для расчета параметров лазерной обработки кварцевых золь-гель стекол.

Таблица 2 – Значения температур и термоупругих напряжений в зоне лазерной обработки, определенные нейронной сетью

N	$\sigma_y$ , Па	$\epsilon$ , %	$\sigma_x$ , Па	$\epsilon$ , %	T, К	$\epsilon$ , %
1	-10045140	10,4	4080146	2,7	765	2,6
2	-12013910	9,1	4902673	2,5	843	0,9
3	-27236900	8,0	6827214	2,7	1411	3,0
4	-31489420	4,5	8209408	2,9	1602	1,2
5	-9413820	10,2	3640268	0,3	733	4,8
6	-11262320	9,9	4456808	1,7	805	3,1

## Литература

1. A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining / A. N. Bakhtiyari, Z. Wang, L. Wang, H. Zheng // Optics & Laser Technology – 2021 – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106721>.

2. Kant, R. An integrated FEM-ANN model for laser bending process with inverse estimation of absorptivity / R. Kant, S. N. Joshi, U. S. Dixit, // *Mech Adv Mater Mod.* – 2015. – Process 1, 6. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1186/s40759-015-0006-1>.

3. Соловьев, А. Н. Идентификация круговых трещин, выходящих на поверхности труб с помощью сочетания метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей / А. Н. Соловьев, Нгуен З. Ч. Занг // *Экологический вестник научных центров ЧЭС.* – 2014. – № 1. – С. 76–84.

4. Светашков, П. А. Оптимизация пространственных конструкции на основе гибридной нейросетевой программы: автореферат дис. ... канд. техн. наук / П. А. Светашков. – Красноярск, 2005. – 20 с.

5. Rusia, S. Application of Artificial Neural Network for Analysis of Triangular Plate with Hole Considering Different Geometrical and Loading Parameters / S. Rusia, K. Pathak // *Open Journal of Civil Engineering.* – 2016. – Vol. 6. – P. 31–41, doi: 10.4236/ojce.2016.61004.

6. Алгоритм прогнозирования вибрационного состояния ротора турбины с использованием машинного обучения / М. А. Болотов, В. А. Печенин, Е. Ю. Печенина, Н. В. Рузанов // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* – 2020. – Т. 19, № 1. – С. 18–27, doi: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-18-27.

7. Никитюк, Ю. В. Физические закономерности лазерного термораскалывания силикатных стекол и алюмооксидной керамики: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.21 / Ю. В. Никитюк. – Гомель, 2009. – 165 с.

8. Shalupaev, S. V. Silica gel glasses after laser radiation / S. V. Shalupaev, A. V. Semchenko, Y. V. Nikitjuk // *Material Science.* – 2003. – Vol. 21, № 4. – P. 495–501.

9. Лазерная обработка кварцевых стекол, синтезированных золь-гель методом / С. В. Шалупаев, В. В. Гайшун, А. В. Семченко, Ю. В. Никитюк // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2005. – № 2. – С. 70–73.

10. Шабров, Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н. Н. Шабров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 212 с.

11. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.