

УДК 539.3:621.74.037:681.3:519.6

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_25

EDN: JHWYWX

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГОРЯЧЕГО ВОЗДУХА И ХЛАДАГЕНТА

Ю.В. Никитюк¹, А.Ф. Иванов², И.П. Ситдикова²,
З.Ф. Зарипова², К.Л. Горшкова², И.Ю. Аушев³

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Альметьевский государственный нефтяной институт

³Университет гражданской защиты, Минск

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE PROCESS OF CONTROLLED THERMAL CRACKING OF SILICATE GLASSES UNDER THE ACTION OF A HOT AIRFLOW

Y.V. Nikitjuk¹, A.F. Ivanov², I.P. Sitdikova²,
Z.F. Zaripova², K.L. Gorshkova², I.Y. Aushev³

¹Francisk Skorina Gomel State University

²Almetyevsk State Oil Institute

³University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk

Аннотация. Проведена оптимизация параметров резки силикатного стекла потоком горячего воздуха с использованием генетического алгоритма MOGA в модуле DesignXplorer программы Ansys. С использованием языка программирования APDL были выполнены расчеты температур и термоупругих напряжений, которые возникают при термораскалывании силикатных стекол. С помощью центрального композиционного плана численного эксперимента были построены соответствующие регрессионные модели, в которых скорость резки, диаметр сопла устройства подачи горячего воздуха и температура горячего воздуха в центре пятна нагрева использовались в качестве варьируемых факторов, а значения максимальных температур и термоупругих напряжений в зоне обработки использовались в качестве откликов. Была проведена оценка влияния варьируемых факторов на отклики. Оптимизация управляемого термораскалывания под действием потока горячего воздуха по критерию максимума термоупругих напряжений и максимума скорости обработки позволила определить технологические параметры, которые позволяют повысить надежность и производительность процесса резки силикатных стекол.

Ключевые слова: лазерная резка, поток горячего воздуха, хладагент, MOGA, ANSYS.

Для цитирования: Оптимизация параметров процесса управляемого термораскалывания силикатных стекол под действием потока горячего воздуха и хладагента / Ю.В. Никитюк, А.Ф. Иванов, И.П. Ситдикова, З.Ф. Зарипова, К.Л. Горшкова, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 2 (55). – С. 25–30. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_25. – EDN: JHWYWX

Abstract. The optimization of the parameters of sharpening silicate glass with a hot airflow was carried out using the MOGA genetic algorithm in the DesignXplorer module of the Ansys program. Using the APDL programming language, the calculations of the temperature and thermoelastic stresses, which are typical for thermal cracking of silicate glasses were made. With the help of the central compositional plan of the numerical experiment, regression models were built in which the sharpness speed, hot air nozzle diameter and hot air temperature at the center of the heat spot were used as variable factors, and the maximum temperatures and thermoelastic stresses in the treatment zone were used as responses. The impact of variable factors on responses was assessed. Optimization of controlled thermal splitting under the consumption of air heat according to the criterion of maximum thermoelastic losses and maximum processing speed made it possible to determine the technological parameters that improve the reliability and productivity of the process of sharpening silicate glasses.

Keywords: laser cutting, hot airflow, coolant, MOGA, ANSYS.

For citation: Optimization of the parameters of the process of controlled thermal cracking of silicate glasses under the action of a hot airflow / Y.V. Nikitjuk, A.F. Ivanov, I.P. Sitdikova, Z.F. Zaripova, K.L. Gorshkova, I.Y. Aushev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 2 (55). – P. 25–30. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_25 (in Russian). – EDN: JHWYWX

Введение

В настоящее время методы лазерной резки хрупких неметаллических материалов получили широкое распространение, и наиболее

эффективным среди них является управляемое лазерное термораскалывание (УЛТ). УЛТ обладает недостатком – высокой стоимостью используемого лазерного оборудования. В связи с этим

вызывают интерес исследования процесса термораскалывания силикатных стекол под действием потока горячего воздуха [10]–[12]. Эффективность технологий обработки материалов, в том числе методами термораскалывания, может быть повышена путем оптимизации соответствующих технологических параметров при помощи генетического алгоритма MOGA [13]–[16]. В данной работе выполнена оптимизация параметров резки силикатного стекла методом управляемого термораскалывания под действием потока горячего воздуха и хладагента с использованием генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS. Такой подход позволяет повысить эффективность использования технологии резки и найти наиболее оптимальные условия процесса термораскалывания хрупких неметаллических материалов.

1 Определение оптимальных параметров управляемого термораскалывания силикатных стекол под действием потока горячего воздуха и хладагента

Конечно-элементные расчеты температурных полей и полей термоупругих напряжений, формируемых в силикатных стеклах при обработке потоком горячего воздуха и хладагентом, были выполнены в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [17]. Моделирование выполнялось с использованием языка программирования APDL (ANSYS parametric design language) [18] в соответствии со схемой, приведенной в работе [12]. Для расчетов были использованы свойства силикатного стекла, приведенные в работе [12]. Расчеты были выполнены для прямоугольного образца размерами $3 \times 2 \times 0,3$ мм. Расчетная модель состояла из 61920 элементов (рисунок 1.1).

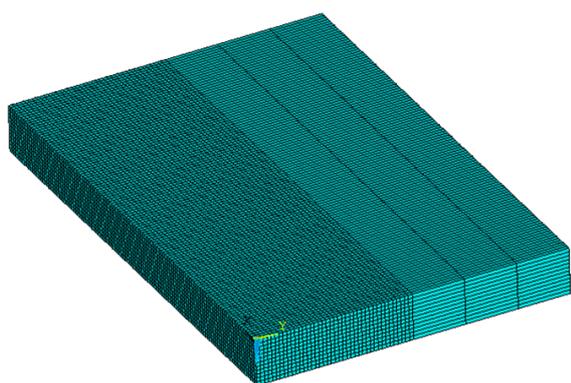


Рисунок 1.1 – Конечно-элементная модель

Для проведения моделирования технологического процесса использовались следующие параметры обработки: скорость перемещения V обрабатываемого изделия относительно действующих на образец потоков составила $0,01$ м/с, диаметр сопла D устройства подачи горячего воздуха равнялся $0,003$ м, температура горячего

воздуха T_v в центре пятна нагрева составляла 250°C , а расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности Z было равно $0,01$ м.

Для определения коэффициентов теплоотдачи в зоне воздействия направленного потока горячего воздуха на поверхность материала использовалась эмпирическая зависимость, связывающая число Нуссельта и число Рейнольдса, которая была описана в работе [10]. Аналогично значения коэффициентов теплоотдачи в зоне воздействия хладагента были определены в соответствии с методикой, описанной в работе [19].

На рисунках 1.2–1.3 представлены значения температурных полей и полей термоупругих напряжений, полученные в результате конечно-элементного моделирования. Анализ этих данных позволяет заключить, что при использовании направленного потока горячего воздуха в качестве технологического инструмента нет существенных различий в пространственной локализации областей термоупругих напряжений сжатия и растяжения в обрабатываемом материале по сравнению с реализацией УЛТ. При этом использование направленного потока горячего воздуха приводит к более широкому нагреву обрабатываемой поверхности по сравнению с лазерным нагревом, что может снизить точность резки по сравнению с УЛТ, как показано в работе [12].

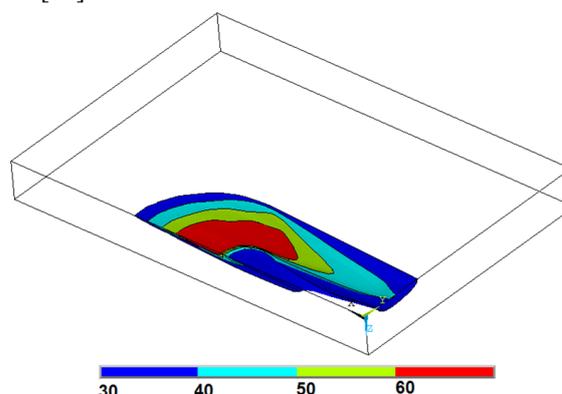


Рисунок 1.2 – Распределение температуры в объеме обрабатываемого образца, $^\circ\text{C}$

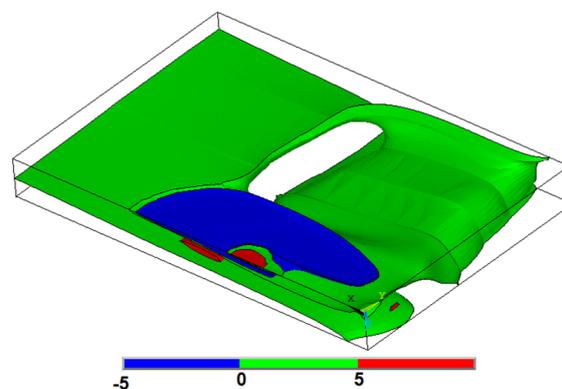


Рисунок 1.3 – Распределение напряжений σ_y в объеме обрабатываемого образца, МПа

В работе была выполнена оптимизация параметров обработки силикатных стекол потоком горячего воздуха и хладагентом с помощью модуля DesignXplorer в программе Ansys. Был применен алгоритм оптимизации, представленный в работе [14]. Поверхности отклика были сформированы с использованием трехфакторного варианта центрального композиционного плана численного эксперимента [20]. В качестве варьируемых факторов использовались скорость резки V , температура горячего воздуха T_v в центре пятна нагрева и диаметр сопла D устройства подачи горячего воздуха. Отклики были определены в виде максимальных температур T и термоупругих напряжений σ_y в зоне обработки, как указано в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – План эксперимента и результаты расчетов

| № | P1 V , м/с | P2 T_v , °C | P3 D , м | P4 T , °C | P5 σ_y , Па |
|----|-----------------|------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| 1 | 0,02 | 250 | 0,003 | 104 | $1,09 \cdot 10^7$ |
| 2 | 0,01 | 250 | 0,003 | 126 | $1,83 \cdot 10^7$ |
| 3 | 0,03 | 250 | 0,003 | 92 | $7,42 \cdot 10^6$ |
| 4 | 0,02 | 200 | 0,003 | 86 | $8,50 \cdot 10^6$ |
| 5 | 0,02 | 300 | 0,003 | 123 | $1,32 \cdot 10^7$ |
| 6 | 0,02 | 250 | 0,002 | 79 | $7,18 \cdot 10^6$ |
| 7 | 0,02 | 250 | 0,004 | 124 | $1,51 \cdot 10^7$ |
| 8 | 0,01 | 200 | 0,002 | 81 | $9,69 \cdot 10^6$ |
| 9 | 0,03 | 200 | 0,002 | 58 | $3,82 \cdot 10^6$ |
| 10 | 0,01 | 300 | 0,002 | 115 | $1,51 \cdot 10^7$ |
| 11 | 0,03 | 300 | 0,002 | 80 | $5,94 \cdot 10^6$ |
| 12 | 0,01 | 200 | 0,004 | 119 | $1,92 \cdot 10^7$ |
| 13 | 0,03 | 200 | 0,004 | 91 | $8,26 \cdot 10^6$ |
| 14 | 0,01 | 300 | 0,004 | 174 | $2,99 \cdot 10^7$ |
| 15 | 0,03 | 300 | 0,004 | 130 | $1,28 \cdot 10^7$ |

Функции отклика, связывающие выходные параметры (T, σ_y) с факторами (V, T_v, D), имеют следующий вид:

$$Y_T = 4,12 - 219 \cdot V + 0,0475 \cdot T_v + 3210 \cdot D + 4120 \cdot V^2 - 3,94 \cdot 10^{-5} \cdot T_v^2 - 4,09 \cdot 10^5 \cdot D^2 - 0,44 \cdot V \cdot T_v + 6,14 \cdot D \cdot T_v,$$

$$T = (Y_T \cdot 0,51 + 1)^{\frac{1}{0,51}} - 1,$$

$$Y_\sigma = 14,9 - 86,4 \cdot V + 9,87 \cdot 10^{-3} \cdot T_v + 621 \cdot D + 784 \cdot V^2 - 1,02 \cdot 10^{-5} \cdot T_v^2 - 4,49 \cdot 10^4 \cdot D^2 + 2250 \cdot V \cdot D,$$

$$\sigma_y = (Y_\sigma \cdot 0,005 + 1)^{\frac{1}{0,005}} - 1.$$

Для оценки полученных регрессионных уравнений были использованы следующие критерии:

– коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2},$$

– средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square error, $RMSE$)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2},$$

где d_i – значения, определенные методом конечных элементов, y_i – значения, определенные с использованием регрессионных моделей.

Коэффициенты детерминации для выходных параметров T и σ_y составляют 0,9998 и 0,9999 соответственно, а значения $RMSE$ для T и σ_y равны $0,3^\circ\text{C}$ и 49070 Па соответственно. Это свидетельствует о необходимом соответствии регрессионных моделей данным конечно-элементного анализа.

Представленные на рисунке 1.4 данные также подтверждают адекватность полученных регрессионных уравнений. На графике отображены нормализованные значения, полученные при конечно-элементном моделировании по оси абсцисс, и соответствующие нормализованные значения, полученные с помощью регрессионных уравнений по оси ординат. Точность регрессионной модели выше, когда точки находятся ближе к диагонали графика.

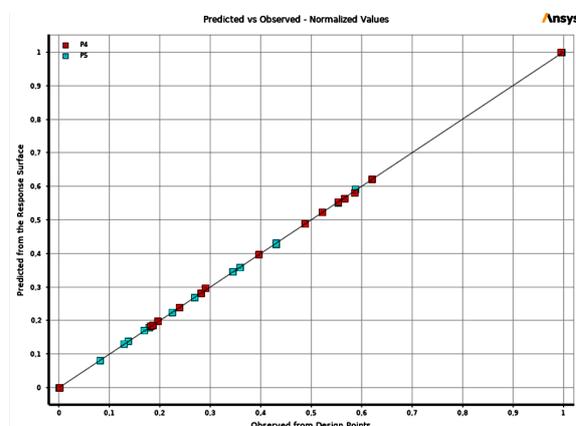


Рисунок 1.4 – Проверка адекватности регрессионных уравнений P4 – T , P5 – σ_y

Исследование воздействия входных параметров на выходные параметры показало, что диаметр сопла устройства подачи горячего воздуха является наиболее важным фактором, влияющим на максимальные температуры T в зоне обработки, а скорость обработки оказывает наибольшее воздействие на максимальные термоупругие напряжения σ_y (рисунок 1.5).

Диаграммы, показывающие зависимость максимальной температуры в зоне обработки T и максимальных напряжений растяжения σ_y в

зоне обработки от скорости обработки V , температуры горячего воздуха T_v в центре пятна на-

грева и диаметра сопла D устройства подачи горячего воздуха, представлены на рисунках 1.6, 1.7.

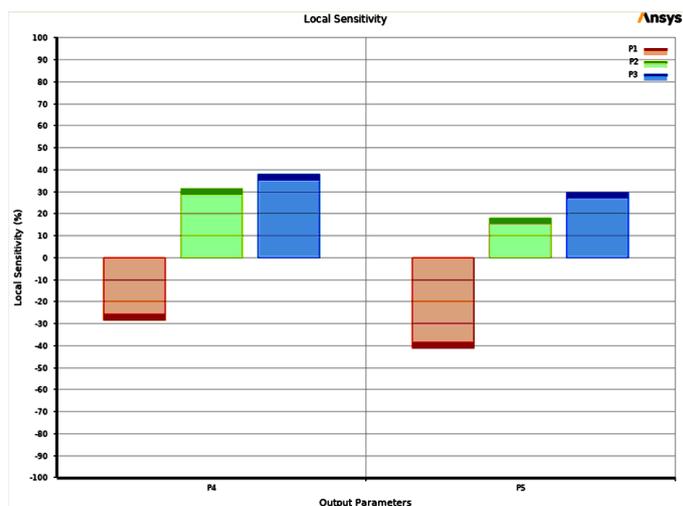


Рисунок 1.5 – Диаграмма чувствительности оптимизируемых параметров P1 – V , P2 – T_v , P3 – D , P4 – T , P5 – σ_y

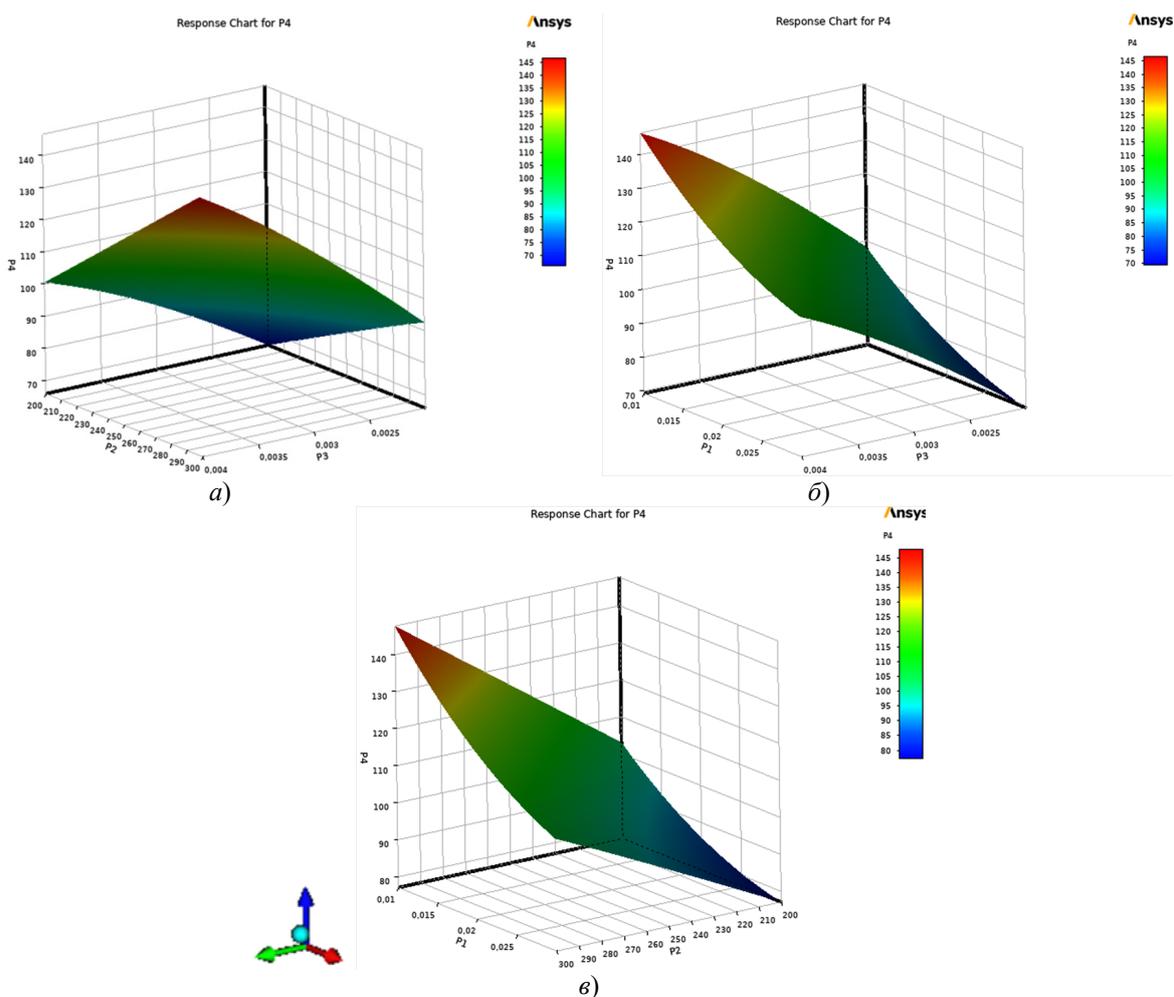


Рисунок 1.6 – Зависимость максимальной температуры T от параметров обработки а) V – const; б) T_v – const; в) D – const

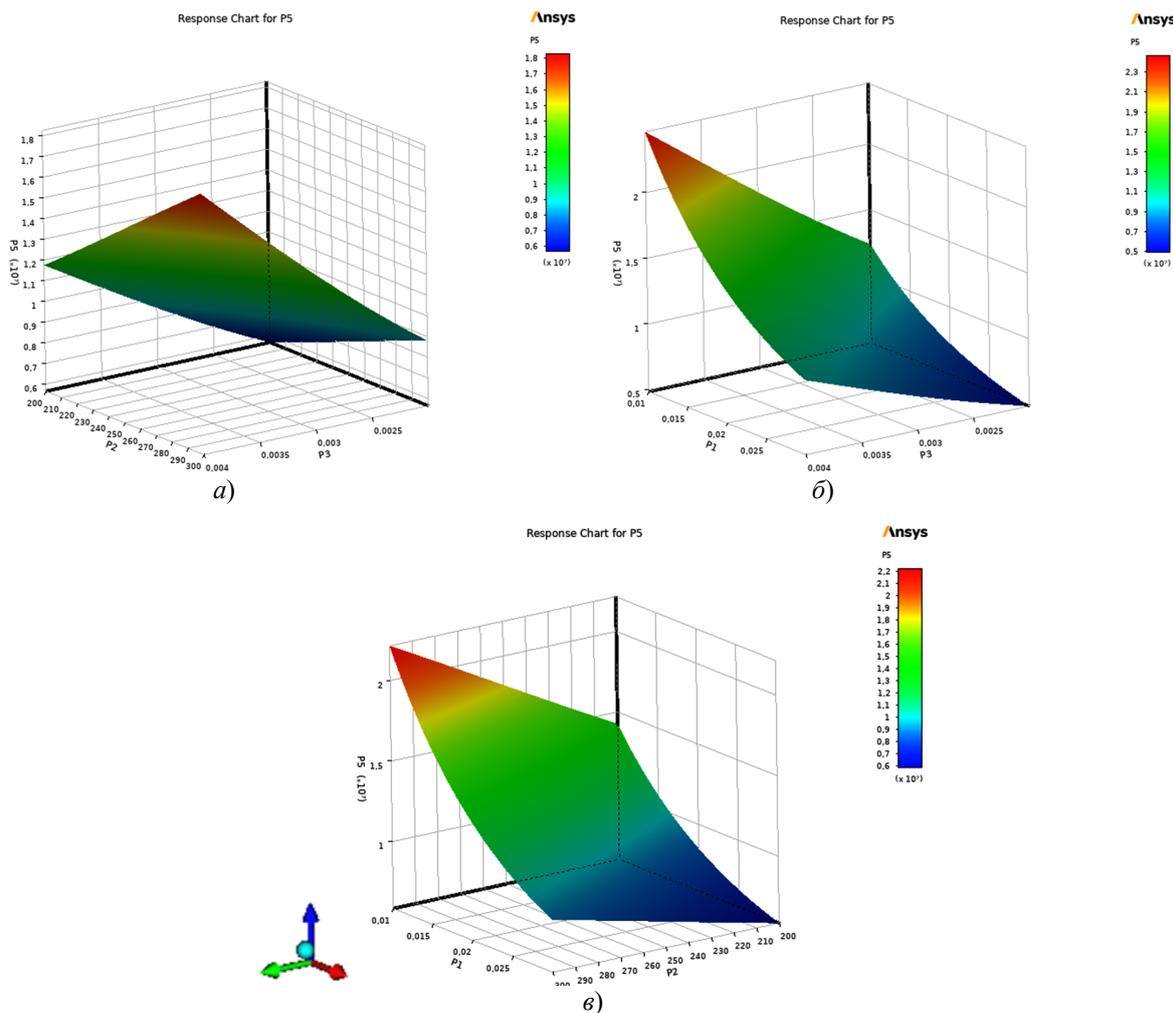


Рисунок 1.7 – Зависимость максимальных напряжений σ_y от параметров обработки
 а) $V = \text{const}$; б) $T_v = \text{const}$; в) $D = \text{const}$

2 Оптимизация процесса обработки силикатного стекла

С использованием многокритериального генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer с начальной популяцией из 500 индивидуумов и числом индивидуумов за итерацию, также равным 500, была проведена оптимизация процесса обработки силикатного стекла при использовании потока горячего воздуха и хладагента. Оптимизация проводилась по критериям максимума термоупругих напряжений

$$\sigma_y \rightarrow \max$$

и максимума скорости обработки

$$V \rightarrow \max.$$

Результаты оптимизации приведены в таблице 2.1, где в скобках указаны значения параметров, полученные в результате конечно-элементного моделирования. При этом максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, не превысила 1% при определении температур и термоупругих напряжений.

Таблица 2.1 – Результаты оптимизации

| P1 $V, \text{ м/с}$ | P2 $T_v, \text{ }^\circ\text{C}$ | P3 $D, \text{ м}$ | P4 $T, \text{ }^\circ\text{C}$ | P5 $\sigma_y, \text{ Па}$ |
|------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--|
| 0,03 | 296 | 0,004 | 129 (128) | $1,26 \cdot 10^7$ $(1,27) \cdot 10^7$ |

Заключение

В данной работе была продемонстрирована возможность оптимизации параметров обработки силикатного стекла при помощи потока горячего воздуха и хладагента с использованием многокритериального генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer. Для получения регрессионных моделей термораскалывания стекла был применен центральный композиционный план эксперимента. Также было установлено соответствие между регрессионной моделью и результатами конечно-элементного анализа. В результате численных экспериментов были определены оптимальные параметры термораскалывания силикатного стекла под воздействием потока горячего воздуха и хладагента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nisar, S. Laser glass cutting techniques – A review / S. Nisar // Journal of laser applications. – 2013. – Vol. 25, № 4. – P. 042010-1–11.
2. Laser cutting of ceramic materials with a metallized surface / S.V. Shalupaev, A.V. Maksimenko, V.N. Myshkovets, Y.V. Nikityuk // Journal of Optical Technology. – 2001. – Vol. 68, № 10. – P. 758–760. – DOI: 10.1364/JOT.68.000758.
3. Two-beam laser thermal cleavage of brittle nonmetallic materials / S.V. Shalupaev, E.B. Shershnev, Y.V. Nikityuk, A.A. Sereda // Journal of Optical Technology. – 2006. – Vol. 73, № 5. – P. 356–359. – DOI: 10.1364/JOT.73.000356.
4. Shalupaev, S.V. Laser thermal cleavage of brittle nonmetallic materials along closed curvilinear contours / S.V. Shalupaev, Y.V. Nikityuk, A.A. Sereda // Journal of Optical Technology. – 2008. – Vol. 75, № 2. – P. 75–78. – DOI: 10.1364/JOT.75.000075.
5. Serdyukov, A.N. Features of controlled laser thermal cleavage of crystalline silicon / A.N. Serdyukov, S.V. Shalupaev, Y.V. Nikityuk // Crystallography Reports. – 2010. – Vol. 55, № 6. – P. 933–937. – DOI: 10.1134/S1063774510060064.
6. The analysis of laser thermosplitting of fragile materials by using of special geometry beams / S.V. Shalupaev, Y.V. Nikitjuk, A.A. Sereda, M. Aleksiejuk // Archives of Metallurgy and Materials. – 2011. – Vol. 56, № 4. – P. 1149–1155. – DOI: 10.2478/v10172-011-0128-3.
7. Features of controlled laser thermal cleavage of crystal quartz / A.N. Serdyukov, E.B. Shershnev, Y.V. Nikityuk [et al.] // Crystallography Reports. – 2012. – Vol. 57, № 6. – P. 792–797. – DOI: 10.1134/S1063774512060120.
8. Modeling of mechanical influence of double-beam laser on single-crystalline silicon / S.V. Shalupaev, A.N. Serdyukov, Y.V. Nikitjuk [et al.] // Archives of Metallurgy and Materials. – 2013. – Vol. 58, № 4. – P. 1381–1385. – DOI: 10.2478/amm-2013-0179.
9. Nikitjuk, Y.V. Laser splitting of bilayer structures made of silicon wafers and glass substrates / Y.V. Nikitjuk, A.N. Serdyukov, I.Y. Aushev // Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University. – 2021. – № 6 (129). – P. 178–183.
10. A study of thermal cutting of glass / S. Muralidhar [et al.] // Journal of American Ceramic Society. – 1999. – Vol. 82. – P. 2166–2176.
11. Shahani, A.R. Simulation of glass cutting with an impinging hot air jet / A.R. Shahani, M. Seyyedean // International Journal of Solids and Structures. – 2004. – Vol. 41. – P. 1313–1329.
12. Никитюк, Ю.В. Исследование процесса управляемого термораскалывания хрупких неметаллических материалов под действием потока горячего воздуха / Ю.В. Никитюк, В.Ф. Шолох // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 1 (6). – С. 36–39.
13. Fonseca, C. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization / C. Fonseca, P. Flemingz // In Proceedings of The 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc. – 1993. – P. 416–423.
14. Никитюк, Ю.В. Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю.В. Никитюк, А.Н. Сердюков, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28. – DOI: 10.54341/20778708_2021_4_49_21.
15. Nikityuk, Y.V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Y.V. Nikityuk, A.N. Serdyukov, I.Y. Aushev // Journal of Optical Technology. – 2022. – Vol. 89, № 2. – P. 121–125. – DOI: 10.1364/JOT.89.000121.
16. Nikitjuk, Yu.V. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models / Yu.V. Nikitjuk, A.N. Serdyukov, I.Y. Aushev // Journal of the Belarusian State University. Physics. – 2022. – № 1. – P. 35–43. – DOI: 10.33581/2520-2243-2022-1-35-43.
17. Коваленко, Л.Д. Основы термоупругости / Л.Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 307 с.
18. Официальный сайт компании ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com>. – Дата доступа: 03.03.2023.
19. Богуславский, И.А. Высокопрочные закаленные стекла / И.А. Богуславский. – Москва: Издательство литературы по строительству, 1969. – 208 с.
20. Планирование и анализ результатов эксперимента: учебное пособие / А.П. Моргунов, И.В. Ревина; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 343 с.

Поступила в редакцию 07.03.2023.

Информация об авторах

Никитюк Юрий Валерьевич – к.ф.-м.н., доцент
 Иванов Алексей Федорович – к.пед.н., доцент
 Ситдикова Ирина Петровна – к.т.н., доцент
 Зарипова Зульфия Филаритовна – к.пед.н., доцент
 Горшкова Кристина Леонидовна – к.т.н., доцент
 Аушев Игорь Юрьевич – к.т.н., доцент