

7. Gawande, P. G. An investigation on cracked plate for stress intensity factor for selected configurations under different loading modes / P. G. Gawande, A. S. Bharule // International Journal of Scientific Engineering and Research. – 2014. – Vol. 3, № 5. – P. 154–161.

8. Photoelastic observation of stress distributions in laser cleaving of glass substrates / K. Yamada [et al.] // Precision Engineering. – 2017. – Vol. 47. – P. 333–343.

9. Examination of internal stress by photoelasticity in laser cleaving of glass / S. Iwatsuki [et al.] // Precision Engineering. – 2020. – Vol. 64. – P. 122–128.

10. Повышение эффективности лазерного управляемого термораскалывания силикатных стекол / Е. Б. Шершнев [и др.] // Научный семинар по оптике и теоретической физике, посвященный 70-летию со дня рождения А.Н. Сердюкова, редкол.: А. В. Рогачев [и др.], 2014. – С. 251–253.

11. Повышение эффективности лазерного управляемого термораскалывания силикатных стекол с использованием метода фотоупругости / А. А. Серeda [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 2(97). – С. 34–40.

В. С. Смородин, Ю. В. Никитюк, В. А. Прохоренко

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОГО РАСКАЛЫВАНИЯ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ

Рассматриваются вопросы построения оптимального управления параметрами технологической операции [1] в процессе лазерного термораскалывания при резке неметаллических изделий.

Лазерное раскалывание является эффективным способом специальной обработки хрупких неметаллических материалов. При реализации данной технологии является важным формирование заданного режима нагрева и охлаждения обрабатываемого изделия, особенно по верхней границе максимально допустимой температуры, что оказывает прямое влияние не только на качество обработки, но и на принципиальную возможность формирования лазерноиндуцированной трещины [2]. При этом различные внешние факторы могут оказывать влияние на значения температур обрабатываемого изделия при осуществлении резки.

На рисунке 1 показана схема процесса лазерного раскалывания стеклянной пластины эллиптическим лазерным пучком с применением хладагента (вид сверху).

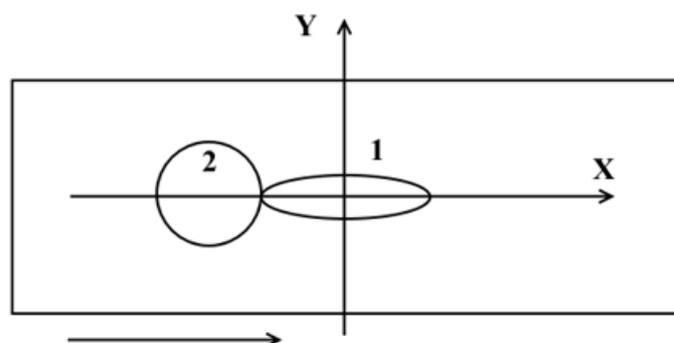


Рисунок 1 – Схема процесса лазерной резки, вид сверху: 1 – зона воздействия лазерного излучения, 2 – зона воздействия хладагента; движение лазерного пучка и пятна хладагента происходит слева направо

К факторам и откликам рассматриваемой задачи относятся: скорость движения лазерного пучка и хладагента относительно обрабатываемой поверхности (V); мощность излучения CO₂-лазера (P); полуоси эллиптического пучка (A, B); максимальные напряжения растяжения (σ_{yy}); максимальная температура в зоне обработки (T_{\max}).

Для аппроксимации откликов процесса лазерной резки может быть успешно применено нейросетевое моделирование, как показано в [3]. С целью дальнейшего построения имитационной модели системы управления процессом лазерной резки осуществлено обучение нейросетевых аппроксиматоров для откликов: максимальное напряжение (σ_{yy}) и максимальная температура (T_{\max}).

Входные сигналы аппроксиматоров включают в себя:

- скорость движения лазерного пучка и хладагента (V);
- мощность лазерного излучения (P);
- максимальное напряжение растяжения в текущий момент времени (σ_{yy}^t);
- максимальное напряжение растяжения в предыдущий момент времени (σ_{yy}^{t-1});
- максимальная температура в текущий момент времени (T_{\max}^t);
- максимальная температура в предыдущий момент времени (T_{\max}^{t-1}).

Исходные данные для обучения нейросетевых аппроксиматоров получены с использованием разработанных авторами средств конечноэлементного моделирования процесса лазерной резки [4]. Для обеих нейросетей выбраны архитектуры [6-30-30-1] с двумя скрытыми слоями. Нейросети и алгоритмы их обучения имплементированы с использованием библиотеки keras.

В состав переменных управления $\{U\}$ программно-технологического комплекса оптимизации параметров резки неметаллических изделий входят скорость движения лазерного пучка и хладагента (U_V), мощность лазерного излучения (U_P), полуоси эллиптического пучка (U_A, U_B). При этом доступными для корректировки в режиме реального времени являются $\{U_P, U_V\}$ – мощность лазерного излучения и скорость движения лазерного пучка.

Требуемая стабилизация параметров лазерной резки может быть осуществлена с применением системы адаптации управления, осуществляющей корректирующие воздействия [5, 6].

В рамках данного подхода к адаптивному управлению осуществляется построение нейрорегулятора на основе использования методов обучения с подкреплением совместно с имитационной моделью рассматриваемой технической системы [7].

Схема технологической операции лазерной резки включает в себя микротехнологические операции, представленные на рисунке 2. Операции $MTCO_{1-3}$ отвечают за начало резки, осуществление резки и остановку резки; операции $MTCO_{21-24}$ – за установку параметров резки V, P, A, B .

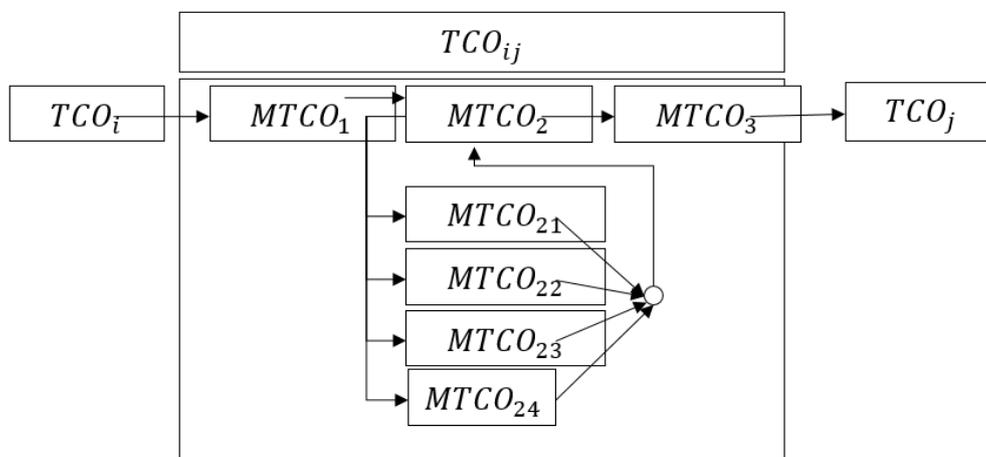


Рисунок 2 – Фрагмент схемы выполнения микротехнологических операций при лазерной резке неметаллических изделий

Имитационная модель системы управления технологическим процессом резки включает в себя:

- генератор случайных возмущений $GENSGN_\varepsilon$ и генераторы откликов $GENSGN_\sigma$ и $GENSGN_T$, основанные на работе нейросетевых аппроксиматоров σ_{yy} и T_{max} , принимающих значения текущего набора факторов задачи, определенных переменными управления, и значения аппроксимированных откликов на текущем и предыдущем шагах времени;
- исполнители EX_{1-4} , отвечающие за выполнение микротехнологических операций [1] по установке значений переменных управления $\{U_p, U_v\}$ (изменение с заданным шагом в сторону увеличения либо уменьшения).

Нейрорегулятор для осуществления корректирующих воздействий имеет 5 выходов – бездействие, либо изменения одной из доступных переменных управления в сторону увеличения, либо в сторону уменьшения с заданным шагом. Максимальный выход определяет выбранную операцию. С целью построения нейрорегулятора использован метод policy gradient [7]. В качестве среды для обучения агента использована описанная имитационная модель. Агенту доступны для наблюдения факторы и отклики на текущем и предыдущем шагах симуляции: $T_{max}^t, T_{max}^{t-1}, \sigma_{yy}^t, \sigma_{yy}^{t-1}, V, P, P_{t-1}$. В качестве нейрорегулятора использован многослойный персептрон архитектуры [7-50-30-10-5].

Агенту доступно 4 действия для активации микротехнологических операций, ответственных за изменения переменных $\{U_p, U_v\}$.

Обучение нейрорегулятора происходило на протяжении 500 эпизодов отыгрыша взаимодействия со средой со случайными значениями переменных управления $\{U\}$.

$$R = \alpha_1 R_T + \alpha_2 R_V + \alpha_3 R_\sigma. \quad (1)$$

Функция вознаграждения (1) агента в процессе обучения с подкреплением включала в себя компоненты, ответственные за максимизацию скорости резки и напряжения при условии невыхода максимальной температуры за допустимые рамки.

В результате процесса обучения с подкреплением построен нейрорегулятор, обеспечивающий корректирующие воздействия на переменные управления $\{U\}$ с требованием недопущения выхода параметров технологического процесса лазерной резки (максимальной температуры T_{max}) за рамки допустимого интервала. На рисунке 3 приведен график изменения метрик агента под управлением нейрорегулятора в процессе обучения с подкреплением.

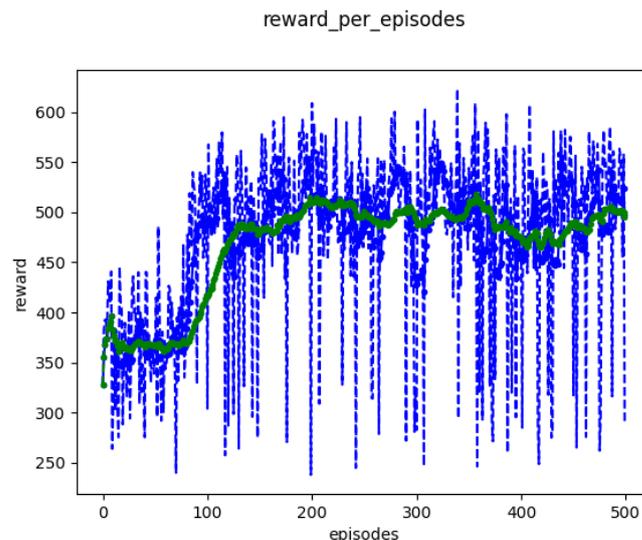


Рисунок 3 – Изменение функции вознаграждения агента в процессе обучения с подкреплением (сплошной линией показано усредненное значение)

Заклучение. Предложен новый подход к построению системы оптимизации параметров технологических операций процесса лазерной резки хрупких неметаллических материалов. Обратные связи по управлению формируются на основании алгоритмов построения нейрорегуляторов с применением интеллектуальной системы нового поколения для поиска оптимальной стратегии адаптации управления оборудованием согласно заданным критериям.

Литература

1. Смородин, В. С. Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства: монография / В. С. Смородин, И. В. Максимей; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 369 с.

2. 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.

3. Применение искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов для определения параметров обработки кварцевых золь-гель стекол эллиптическими лазерными / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, В. А. Прохоренко, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. Сер.: Физика. – 2021. – № 3(48). – С. 30–36.

4. Разработка программных средств моделирования и оптимизации параметров лазерной резки хрупких неметаллических материалов / Ю.В. Никитюк [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. Сер.: Физика. – 2024. – № 3(60). – С. 18–22.

5. Смородин, В. С. Стабилизация параметров технологического цикла при построении обратных связей по управлению / В. С. Смородин, В. А. Прохоренко // Проблемы физики, математики и техники. Сер.: Информатика. – 2023. – № 2(55). – С. 83–88.

6. Прохоренко, В. А. Система адаптивного управления технологическим циклом автоматизированного производства / В. А. Прохоренко // Известия Гомельского государственного университета имени Ф.Скорины. Сер.: Естественные науки. – 2023. – № 3(138). – С. 69–73.

7. Smorodin, V. Stabilization of Parameters of Technological Operations in the Presence of External Control Actions / V. Smorodin, V. Prokhorenko // Open semantic technologies for intelligent systems. – 2024. – Iss. 8. – P. 263–268.

Yu. V. Nikitjuk¹, V. A. Prokhorenko¹, D. G. Piliptsov¹, B. Zhou²

¹Francisk Skorina Gomel State University,
Gomel, Republic of Belarus,

²Taiyuan University of Technology, Taiyuan, People's Republic of China

DETERMINATION OF PARAMETERS OF LASER CUTTING OF DIAMONDS USING NEURAL-FUZZY NETWORKS

The properties of diamonds ensure stable operation of devices created on their basis under critical conditions and opens up new ways in the development of new technology. Laser cutting of diamond crystals is characterized by a number of advantages, which primarily include the ability to obtain narrow cuts combined with high productivity of the dimensional processing and wide the possibility of process automation. The distribution of temperature fields in diamond crystals under laser irradiation is the main characteristic, based upon which the determination of the parameters necessary for high-quality processing of this material becomes possible. Laser processing of diamonds can be modeled using the ANSYS finite element analysis software complex [1–6].