

Использование дифракционных оптических элементов для лазерной резки тонколистового картона

А.В. Меженин¹, Т.А. Груздев¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. С разработкой мощных СО₂-лазеров изготовление изделий из листового картона (складные упаковочные коробки, уплотнительные прокладки, игровые пазлы и т.д.) существенно упростилось за счет перехода от технологии штамповки к процессу автоматизированной лазерной резки. Одним из способов расширения технологических возможностей лазерной обработки, в частности, повышения скорости и точности, является применение дифракционных оптических элементов. Реализация нескольких связанных параллельных процессов может быть достигнута за счет использования многопорядковых дифракционных делителей пучка технологического лазера для резки по симметричным контурам. Выполнены эксперименты, показывающие возможность разделения исходного лазерного пучка дифракционными делителями на несколько лучей с фиксированным углом между ними. Методом конечных элементов проведено моделирование процесса разделения тонколистового картона как с сохранением ячеек в зоне реза, так с удалением ячеек, в которых достигается температура разрушения. Результаты подтверждают возможность практической реализации технологии автоматизированной лазерной резки тонких листов картона.

1. Введение

На сегодняшний день лазерное излучение широко применяется в научных исследованиях [1, 2], а также в различных областях промышленности при обработке материалов [3]. Это обусловлено тем, что лазерная обработка позволяет обеспечить высокое качество готовых изделий и производительность процессов, она относится к экологически чистым технологиям, а также позволяет значительно сэкономить людские и материальные ресурсы. Благодаря высокой концентрации энергии и локальности воздействия, применение лазерного луча в качестве инструмента представляет хорошую альтернативу механической обработке неметаллов [4–6].

Возможность применения технологических лазеров для различных видов обработки материалов зависит от энергетических характеристик и временных параметров излучения [5]. Среди лазерных источников, используемых для обработки материалов, широкое распространение получили мощные проточные газовые СО₂-лазеры. Они применяются в промышленности для проведения различных технологических операций – резки, сварки, маркировки и гравировки, термообработки и проч. Для неметаллических материалов наиболее часто применяются разделительные операции (резка, прошивка отверстий), а также гравировка. Лазерная резка обычно является автоматизированным технологическим процессом. В частности, за счет этого при переходе от технологии штамповки к лазерному раскрою картона отмечается резкое повышение производительности (при изготовлении упаковок, декора, обложек и т. д.).

В области лазерной резки до сих пор продолжают поиски оптимального способа управления излучением. Одним из таких способов является применение дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1]. По сравнению с линзовой оптикой дифракционные элементы обладают более широкими возможностями в плане перераспределения энергии в пространстве. Например, многопорядковые дифракционные делители пучка позволяют одновременно реализовать несколько энергетических источников на обрабатываемой поверхности в разных местах [7]. Одновременная реализация ряда параллельных процессов приводит к расширению технологических возможностей лазерной резки [8]. Жесткая взаимосвязь между отдельными лучами, обеспечиваемая ДОЭ, позволяет повысить требования к точности обработки, а выполнение раскроя по симметричным контурам – исключить холостые перемещения.

При воздействии лазерного излучения на материал происходит изменение его температуры в отдельных точках [9, 10]. Моделирование процессов нагрева и охлаждения материала под действием движущегося пучка лазерного излучения позволяет прогнозировать результаты лазерной резки, а также выбрать оптимальные параметры, определяющие качество реза. Современные программные средства (ANSYS, COMSOL и др.) облегчают решение задач расчета тепловых процессов в твердых телах, а также дают возможность физического моделирования непосредственно разделения материала при резке [11].

Целями данной работы являются исследование процесса формирования многопорядковыми дифракционными делителями пучка технологического лазера поверхностных энергетических источников и моделирование процесса резки тонких листов картона по симметричным контурам при воздействии таких источников в программном пакете ANSYS.

2. Формирование излучения дифракционными делителями пучка

В данной работе в качестве делителей пучка были использованы дифракционные элементы – делители лазерного пучка на два и четыре порядка соответственно, их фотошаблоны показаны на рисунках 1 и 2. Известно, что отражающим делителем пучка на два порядка может являться обычная дифракционная решетка. В данном случае берем структуру с бинарным рельефом, период которой равен 600 мкм (рисунок 1). Расчет делителя на четыре дифракционных порядка проводился в программном обеспечении «FanOut2D» версии 2.01 [12], разработанным в Институте систем обработки изображений Российской академии наук (ИСОИ РАН) Волотовским С.Г. (рисунок 2). Оба элемента рассчитывались для работы на отражение излучения CO₂-лазера (длина волны 10,6 мкм) с поворотом освещающего пучка на 90°.

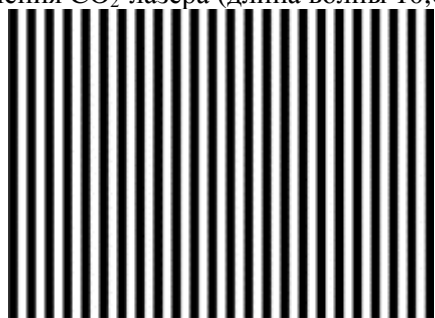


Рисунок 1. Фотошаблон отражающего делителя пучка на два порядка.



Рисунок 2. Фотошаблон отражающего делителя пучка на четыре порядка.

Регистрация распределения интенсивности излучения, формируемого ДОЭ, проводилась в режиме реального времени с использованием болометрической ИК-камеры XPORT-317, работающей в диапазоне длин волн 8–14 мкм. Наличие в оптической системе этого прибора влечет за собой установление ограничений по мощности лазерного пучка. По этой причине использовался LCD-1A номинальной выходной мощностью 1 Вт. Диагностическая система для регистрации параметров сформированного излучения, представлена на рисунке 3. Для регулировки поперечного размера лазерного пучка в оптическую систему включена диафрагма.

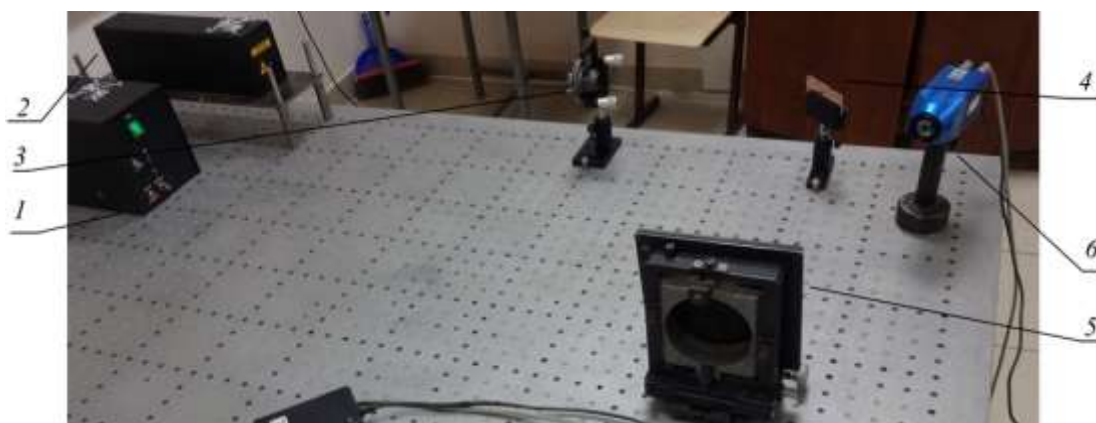


Рисунок 3. Диагностическая система для регистрации излучения, сформированного дифракционными делителями пучка: 1 – источник питания, 2 – излучатель, 3 – диафрагма; 4 – ДОО, 5 – экран, 6 – ИК-камера.

Для регистрации распределения интенсивности сформированного пучка использовалось программное обеспечение X-Control, поставляемое с камерой. На рисунке 4 показаны распределения интенсивности лазерного излучения, сформированные делителем пучка на два порядка на различных расстояниях от ДОО до экрана (плоскости регистрации).

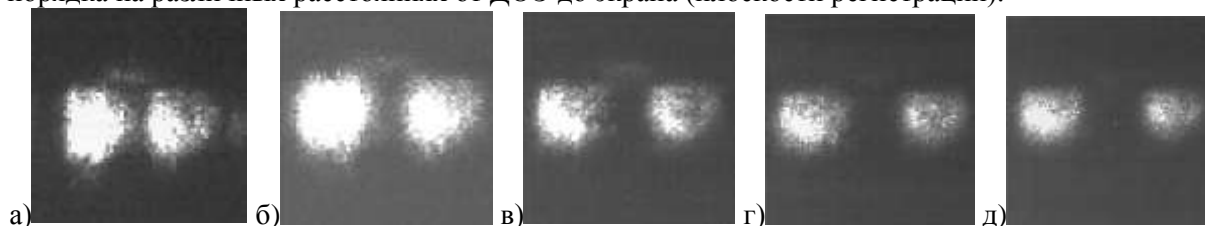


Рисунок 4. Формирование дифракционных максимумов на экране, расположенном на расстоянии от делителя пучка на два порядка: а – 20 см, б – 30 см, в – 40 см, г – 50 см, д – 60 см.

На рисунке 5 показаны распределения интенсивности излучения, сформированные в плоскости регистрации делителем пучка на четыре дифракционных порядка.

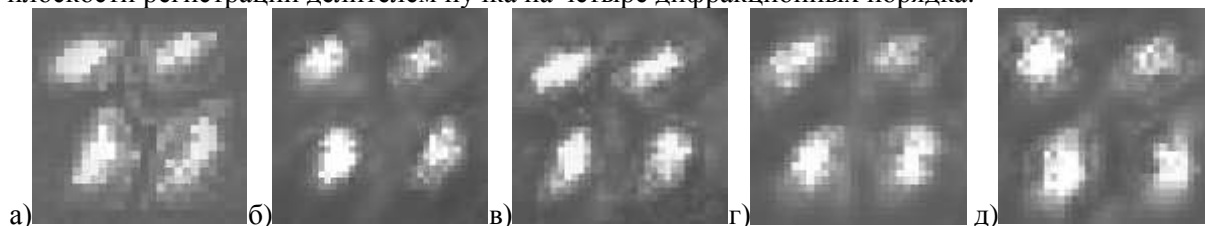


Рисунок 5. Формирование дифракционных максимумов на экране, расположенном на расстоянии от делителя пучка на четыре порядка: а – 20 см, б – 30 см, в – 40 см, г – 50 см, д – 60 см.

Рисунки 4 и 5 иллюстрируют формирование дифракционными делителями пучка на экране удаляющихся друг от друга двух и четырех поверхностных энергетических источников.

3. Моделирование процесса лазерной резки

Лазерной резкой называется процесс, при котором под действием лазерного излучения происходят нагревание, плавление или испарение материала по линии предполагаемого реза. Механизмы резки лазерным лучом основаны на процессах нагрева, плавления, испарения, химических реакциях горения и удаления расплава из зоны реза. Лазерная резка картона осуществляется по механизму испарения [5].

Моделирование процесса резки будем проводить в программном комплексе ANSYS, представляющем собой универсальную систему конечно-элементного анализа [11]. При этом принимаем, что процесс разделения материала реализуется, если температура вдоль линий предполагаемого реза на всей траектории в результате расчета превышает температуру разрушения, которая для картона составляет 230 °С. При моделировании принимаем, что картон имеет следующие теплофизические свойства: плотность 300 кг/м³, теплопроводность 0,14 Вт/(м·К) и теплоемкость 1510 Дж/(кг·К) [13]. В отличие от [14], считаем, что ослабления радиационного теплового потока парами материала не происходит, поскольку удаление продуктов испарения картона из зоны резки можно обеспечить установкой вытяжки. При лазерной обработке обычно учитывается также влияние на формирование температурных полей оптических свойств материала, изменяющихся при его нагреве [15]. Здесь в целях экономии вычислительных ресурсов допускаем, что происходит полное поглощение образцом всей энергии падающего пучка.

Для моделирования технологии резки принимаем, что диаметр энергетических источников на образце составляет 0,3 мм. Распределение плотности мощности внутри источников – круговое гауссовское. Скорость движения источников составляет 4 м/мин (66,7 мм/с). Геометрия моделей включает траектории предполагаемого реза (рисунки 6 и 7).

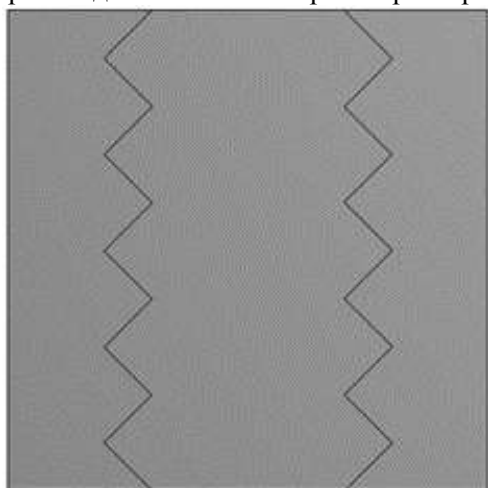


Рисунок 6. Геометрия образца и траектории реза в случае резки по двум симметричным контурам.

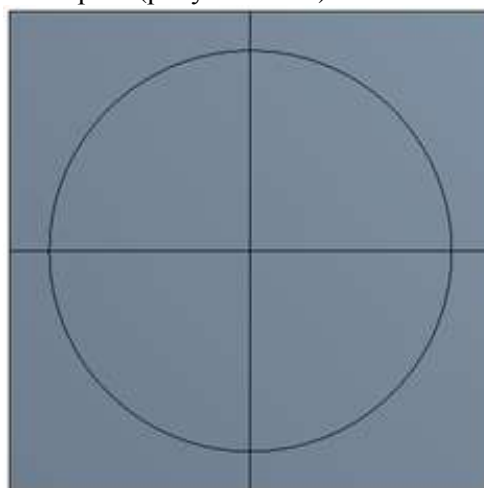


Рисунок 7. Геометрия образца и траектории реза в случае радиально симметричной резки по четырем контурам.

Следующим этапом описания рассматриваемой задачи в ANSYS является построение сетки конечных элементов. Этот процесс в ANSYS аналогичен процессу «заполнения» твердотельной модели узлами и элементами. Поскольку лазерный луч является концентрированным источником энергии, для решения поставленной задачи требуется построение градиентной сетки более мелкой в области воздействия лучей. С учетом малой моделируемой толщины картона (1 мм) строим двумерную сетку твердотельных конечных элементов. Сетки из треугольных четырехугольных элементов с преобладанием последних создается таким образом, чтобы их размер увеличивался от линий реза, поскольку зона воздействия поверхностных источников характеризуется значительно большими температурными градиентами (рисунки 8 и 9).

В рамках описания задачи для объекта с известными физическими свойствами указываются краевые условия. Начальное условие состоит в задании температуры (22 °С) в начальный момент времени во всех точках образца. Теплообмен за счет естественной конвекции, описываемый законом Ньютона–Рихмана, осуществляется со всей верхней поверхности тела (рисунки 10 и 11). Мощность каждого поверхностного источника составляет 20 Вт. Цель расчета сводится к определению температуры в моделируемых объектах при воздействии тепловой нагрузки.

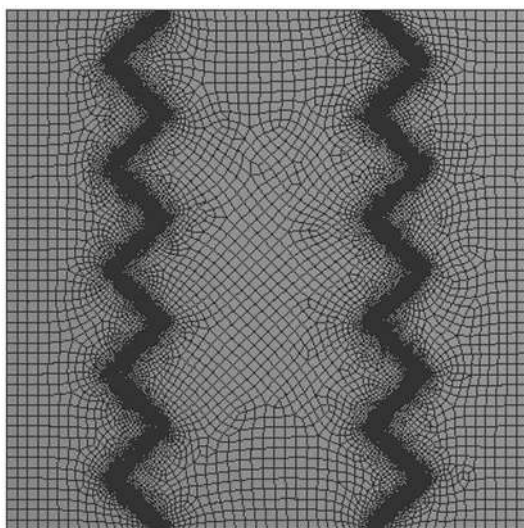


Рисунок 8. Расчетная сетка для случая симметричной резки по двум контурам.

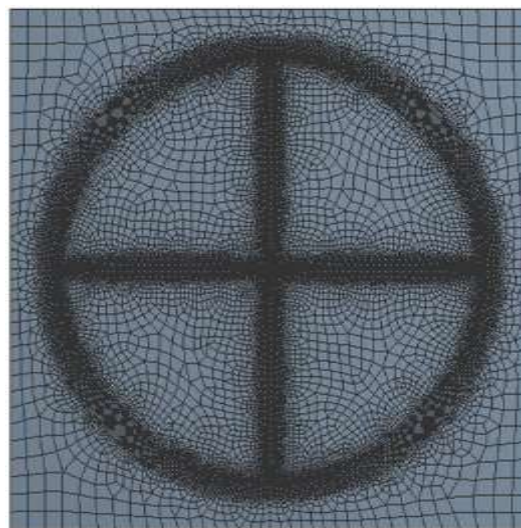


Рисунок 9. Расчетная сетка для радиально симметричной резки по четырем контурам.

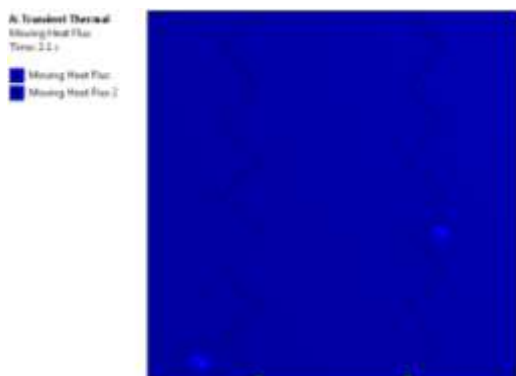


Рисунок 10. Тепловая нагрузка и граничные условия для случая симметричной резки по двум контурам.

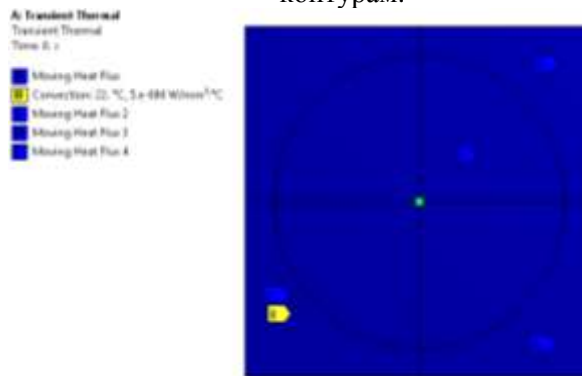


Рисунок 11. Тепловая нагрузка и граничные условия для радиально симметричной резки по четырем контурам.

Результаты моделирования процессов лазерной резки даны на рисунках 12–15. Отличие заключается в том, что на рисунках 12, 13 представлены результаты для случая, когда ячейки, которых достигается температура разрушения, остаются в расчетной модели, а на рисунках 14, 15 – результаты для случая, когда ячейки, которых достигается температура разрушения, по достижении критической температуры удаляются из расчетов. В обоих случаях видно, что рез формируется по всей длине траекторий, в первом случае симметричных относительно центральной продольной оси в плоскости образца, а во втором случае симметричный контур реза формируется сначала от центра по радиусу, а затем – по четырем сегментам окружности.

На рисунках 12, 13 по мере продвижения источников рез становится шире за счет накопления теплоты в расчетных ячейках. На рисунках 14, 15 рез сохраняет свою ширину по всей длине реза.

Даже для случая, когда ячейки не удаляются из расчетной области, температура разрушения достигается по всему контуру резки. Формирование реза с постоянной шириной по длине продвижения источников лучше согласуется с практикой.

Приведенные результаты расчетов позволяют сделать вывод, что лазерная резка тонколистового картона с использованием дифракционных делителей пучка может оказаться более эффективным технологическим процессом по сравнению с традиционной лазерной резкой в плане точности (за счет фиксированной ориентации лучей) и производительности (за счет исключения холостых перемещений между отдельными контурами).

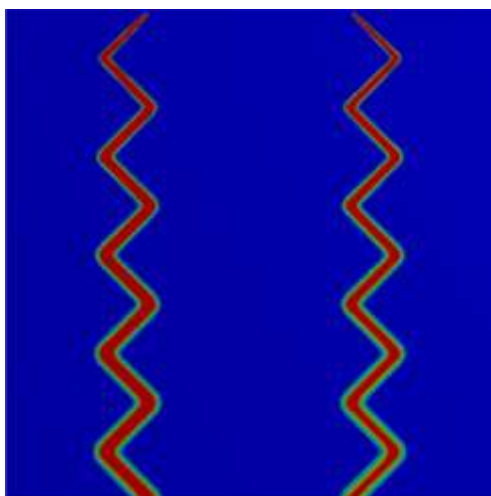


Рисунок 12. Траектории реза для случая симметричной резки по двум контурам (без удаления ячеек).

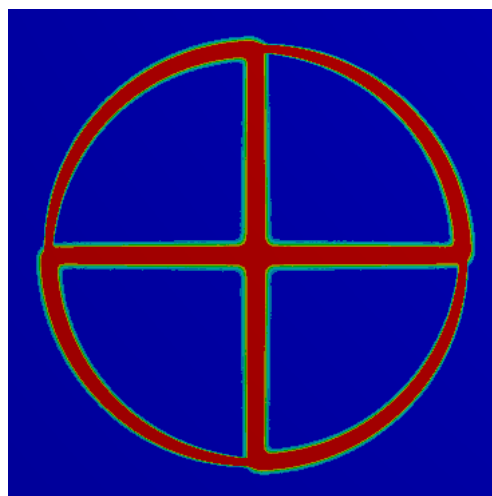


Рисунок 13. Траектории реза для радиально симметричной резки по четырем контурам (без удаления ячеек).

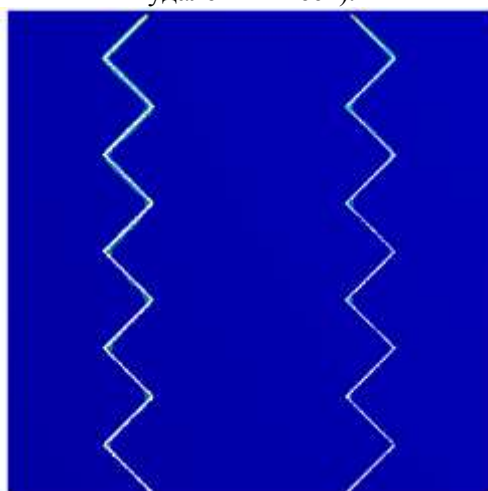


Рисунок 14. Траектории реза для случая симметричной резки по двум контурам (с удалением ячеек).

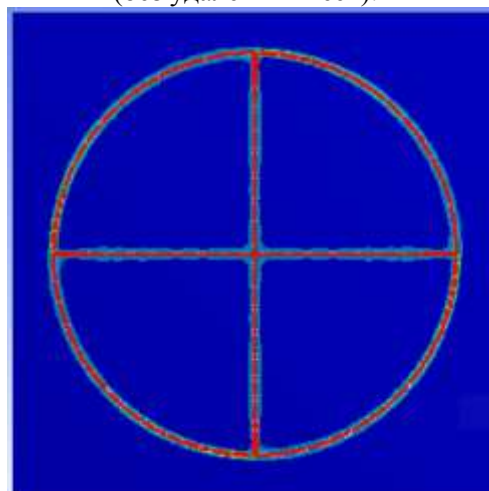


Рисунок 15. Траектории реза для радиально симметричной резки по четырем контурам (с удалением ячеек).

4. Заключение

В данной работе проведен анализ процесса лазерной резки картона с использованием дифракционных делителей пучка как средства управления излучением. На основании литературных данных определены ключевые технологические параметры (материала, источника и т.д.) необходимые для моделирования.

Изготовлены фазовые бинарные отражающие дифракционные делители пучка технологического CO_2 -лазера. Экспериментально исследованы параметры излучения, сформированного ДОЭ. Продемонстрирована возможность одновременного создания нескольких поверхностных энергетических источников на плоскости регистрации.

Смоделирован процесс лазерной резки тонколистового картона по симметричным контурам воздействию двух и четырех сосредоточенных энергетических источников, сформированных дифракционными делителями пучка. Результаты позволяют прогнозировать повышение эффективности технологического процесса лазерной резки тонких листов картона при использовании дифракционных элементов в плане точности (за счет фиксированной взаимной ориентации лучей) и производительности (за счет исключения холостых перемещений между отдельными контурами и одновременного формирования нескольких резов).

5. Литература

- [1] Казанский, Н.Л. Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31, № 2. – С. 48-51.
- [2] Казанский, Н.Л. Синтез нанопористых структур в металлических материалах под действием лазера / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, Е.Л. Осетров, В.И. Трегуб // Оптика и лазеры в технике. – 2011. – Т. 49. – С. 1264-1267.
- [3] Кёбнер, Г. Промышленное применение лазеров – М.: Машиностроение, 1988.
- [4] Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
- [5] Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
- [6] Рогов, В.А. Технология конструкционных материалов. Обработка концентрированными потоками энергии / В.А. Рогов, А.Д. Чудаков, Л.А. Ушамирская – М.: Юрайт, 2016.
- [7] Меженин, А.В. Лазерная резка тонколистового картона с использованием дифракционных оптических элементов / А.В. Меженин, Т.А. Груздев // XVII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции – М.: ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 2019. – С. 243-249.
- [8] Альтшуллер, Г.С. Найти идею: Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 400 с.
- [9] Мурзин, С.П. Применение метода контрольного объема для расчета температурного поля при лазерном воздействии / С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – № 2(15). – С. 123-129.
- [10] Мурзин, С.П. Расчет температурных полей в конструкционных материалах в программном комплексе Star-CD / С.П. Мурзин, А.В. Меженин, Е.Л. Осетров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 767-771.
- [11] ANSYS. Лицензирование, внедрение, консалтинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cadferm-cis.ru> (11.10.2017).
- [12] Volotovskiy, S.G. Software on 2D diffractive beam splitter calculation. “FanOut2D”. Version 2.01. – Samara: IPSI of RAS, 2006. – 8 p.
- [13] Кикоин, И.К. Таблицы физических величин. Справочник – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
- [14] Горский, В.В. Ослабление радиационного теплового потока парами материала при лазерной резке стеклопластика / В.В. Горский, И.М. Евдокимов, А.В. Запривода, В.Г. Реш // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 1. – С. 126-130.
- [15] Битюков, В.К. Влияние оптических свойств на формирование температурных полей в оксиде алюминия при его нагреве и плавлении концентрированным лазерным излучением / В.К. Битюков, В.А. Петров, И.В. Смирнов // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 1. – С. 29-38.

The use of diffractive optical elements for laser cutting of sheet cardboard

A.V. Mezhenin¹, T.A. Gruzdev¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. With the development of high-power CO₂-lasers, the manufacture of sheet cardboard products (folding packaging boxes, gaskets, game puzzles, etc.) has been greatly simplified due to the transition from stamping technology to automated laser cutting. One of the ways to expand the technological capabilities of laser processing, in particular, increasing the speed and accuracy, is the use of diffractive optical elements. The implementation of several connected parallel processes can be achieved through the use of multi-order diffraction beam splitters a for cutting along symmetrical contours with using technological laser. Experiments those show the possibility of dividing the initial laser beam by diffraction splitters into several beams with a fixed angle between them have been performed. To simulate the separation of thin-sheet cardboard has been used the finite element method both with the preservation of cells in the cutting zone and with the removal of cells where the fracture temperature is reached. The results confirm the feasibility of the practical implementation automated laser cutting technology of thin-sheet cardboard.