

МИНИМИЗАЦИЯ ЭНТРОПИИ В ТЕХНОЛОГИЯХ РАСКРОЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ СНИЖЕНИЯ ОТХОДООБРАЗОВАНИЯ В ИСТОЧНИКЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

*В работе предпринята попытка создания технологии получения заготовочного раскроя, в которой все компоненты, получаемые в ходе технологического процесса, имели бы свою товарную стоимость. Иными словами, сделана методическая попытка реализации принципа термодинамического двуединства в технологическом процессе. Показано, что большинство технологий раскроя при любых условиях дают более 30% отходов остаточного материала, которые подлежат вторичной переработке. За основу принят силуэт остаточного рисунка, получаемый на исходном полотне после вырезания шайб требуемых размеров и количества. Условием для функционирования такого полотна становится его светопропускание через множество отверстий, оставшихся после раскроя как основной технологии. Разработана модель обеспечения номенклатуры изначально требуемой продукции, определены основные источники энергии для ее обеспечения. Представлены граничные условия для светопропускания через полотно с отверстиями необходимого размера после вырезания шайб и наложения отверстий на фрагмент матрицы остаточного полотна. Сформулированы показатели, определяющие граничные условия формирования заказа на шайбы и остаточного полотна в виде художественного произведения и представлены результаты подобного расчета. Составлен алгоритм и разработана компьютерная программа, обеспечивающая создание художественного произведения на раскройном полотне в условиях реального производства. Блок-схема программного продукта технологии проектирования и изготовления металлических шайб на базе *imageToCirclesConverter* позволяет легко программировать проектирование такой технологии. Результатом реализации такой технологии является номенклатура основной товарной продукции, а именно, заданное количество шайб требуемого размера (нескольких размеров, в зависимости от основного заказа) и художественное произведение прикладного характера в виде матрицы с изображенной на нем картины из тонов и полутонов, видимых на просвет этой матрицы. При этом количество отверстий и шайб различного диаметра, приведенных к площади полотна, соответствует плотности света, пропускаемого через единицу этой площади. Этим достигается полное отсутствие технологических отходов и обеспечивается максимальная эффективность производства. Модель позволяет регулировать качество рисунка на остаточном полотне, его четкость, восприятие. Представлен пример реализации такой технологии, ее преимущества и области применения. В полном соответствии с положениями о термодинамическом неравновесии технологического процесса представлены параметры такой неравновесности для системы «полотно-шайбы». Рассчитанные величины негэнтропии, как эффективно потраченной энергии движения при традиционных технологиях производства шайб, позволили доказать, что даже дополнительные энергозатратные механизмы, связанные с перемещением инструмента при резании шайб, позволяют минимизировать общую энтропию системы.*

Ключевые слова: заготовочный раскрой, шайба, отходы, термодинамическое двуединство, технологический процесс, термодинамическая неравновесность, негэнтропия, лазерная резка.

¹ д-р техн. наук, профессор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

*Волошин В.С., Гарін Є.Б. Мінімізація ентропії в технологіях розкрою листових матеріалів як показник зниження відходоутворення в джерелі виникнення. У роботі зроблена спроба створення технології отримання заготовельного розкрою, в якому всі компоненти, що отримуються в ході технологічного процесу, мали б свою товарну вартість. Іншими словами, зроблена методична спроба реалізації принципу термодинамічної двоєдності в технологічному процесі. Показано, що більшість технологій розкрою при будь-яких умовах дають більше 30% відходів залишкового матеріалу, які підлягають вторинній переробці. За основу прийнято силует залишкового малюнка, що одержується на вихідному полотні після вирізання шайб необхідних розмірів і кількості. Умовою для функціонування такого полотна стає його світлопропускання через безліч отворів, що залишилися після розкрою як основної технології. Розроблено модель забезпечення номенклатури продукції, що початково необхідна, визначені основні джерела енергії для її забезпечення. Представлені граничні умови для світлопропускання через полотно з отворами необхідного розміру після вирізання шайб і накладення отворів на фрагмент матриці залишкового полотна. Сформульовано показники, що визначають граничні умови формування замовлення на шайби і залишкового полотна у вигляді художнього твору і представлені результати подібного розрахунку. Складено алгоритм і розроблено комп'ютерну програму, що забезпечує створення художнього твору на раскройному полотні в умовах реального виробництва. Блок-схема програмного продукту технології проектування і виготовлення металевих шайб на базі *image-ToCirclesConverter* дозволяє легко програмувати проектування такої технології. Результатом реалізації такої технології є номенклатура основної товарної продукції, а саме, задана кількість шайб необхідного розміру (декількох розмірів, в залежності від основного замовлення) і художній твір прикладного характеру у вигляді матриці із зображеною на ньому картиною з тонів і півтонів, видимих на просвіт цієї матриці. При цьому кількість отворів і шайб різного діаметру, приведених до площі полотна, відповідає щільності світла, що пропускається через одиницю цієї площі. Цим досягається повна відсутність технологічних відходів і забезпечується максимальна ефективність виробництва. Модель дозволяє регулювати якість малюнка на залишковому полотні, його чіткість, сприйняття. Представлений приклад реалізації такої технології, її переваги та області застосування. У повній відповідності з положеннями про термодинамічну нерівновагу технологічного процесу представлені параметри такої нерівноваги для системи «полотно-шайби». Розраховані величини негентронії, як ефективно витраченої енергії руху при традиційних технологіях виробництва шайб, які дозволили довести, що навіть додаткові енерговитратні механізми, пов'язані з переміщенням інструменту при різанні шайб, дозволяють мінімізувати загальну ентропію системи.*

Ключові слова: заготовельний розкрій, шайба, відходи, термодинамічне двоєдінство, технологічний процес, термодинамічна нерівновага, негентронія, лазерна різка.

V.S. Voloshin, E.B. Garin. Entropy minimization in sheet material shearing technologies as an indicator of reducing waste formation in the source of origin. The work attempts to create a technology of blank cutting, in which all the components obtained during the process had their own commodity value. In other words, a methodical attempt has been made to implement the principle of thermodynamic bi-unity in the technological process. It has been shown that most cutting technologies under any conditions produce more than 30% of residual material waste, which is to be recycled. The silhouette of the residual pattern, obtained on the original canvas after cutting the washers of the required size and quantity serves as the basis. The condition for the functioning of such a canvas is the light transmission through the numerous holes remaining in the canvas after cutting, as the main technology. A model for ensuring the range of initially required products has been developed and the main sources of energy to ensure it have been identified. The boundary conditions for light transmission through the canvas with the holes of the re-

quired size after cutting washers and overlaying the holes on the matrix fragment of the residual canvas have been presented. The indicators that determine the boundary conditions for the order of the washers and the residual canvas as a work of art have been formulated and the results of such a calculation have been presented. An algorithm has been compiled and a computer program has been developed that ensures the creation of an artwork on the cutting canvas in real production conditions. The block diagram of the software product design technology and the manufacture of metal washers based on the imageToCirclesConverter make it easy to program the design of such a technology. The result of the implementation of this technology is the nomenclature of the main commercial products, namely, the given number of washers of the required size (several sizes, depending on the main order) and an applied artwork in the form of a matrix with a picture of tones and halftones depicted on it, visible in this matrix breaks. The number of holes and washers of different diameters reduced to the area of the canvas corresponds to the density of light transmitted through a unit of this canvas area. This ensures complete absence of technological waste and ensures maximum production efficiency. The model makes it possible to adjust the quality of the picture on the residual canvas, its clarity, perception. An example of the implementation of such a technology, its advantages and applications has been presented. In full accordance with the provisions as to the thermodynamic disequilibrium of the technological process, the parameters of such a disequilibrium for the «cloth-washer» system are presented. The calculated values of negentropy, as the effectively spent movement energy with traditional washer production technologies, have made it possible to prove that even additional energy-consuming mechanisms resulting from moving the tool when cutting washers can minimize the overall entropy of the system.

Keywords: blank cutting, washer, waste, thermodynamic dualism, technological process, thermodynamic equilibrium, negentropy, laser cutting.

Постановка проблемы. Одной из важных составляющих современного машиностроения является заготовительное производство, в том числе технологии раскроя, ориентированные на максимальное использование деловых отходов металлопроката. Обращает внимание, как правило, высокая отходообразующая затратность технологий заготовки, необходимость последующей переработки отходов: металлостружки, послештамповочных отходов и др. Самый простой пример: существенное расширение технологических возможностей при термической резке листового металла позволило увеличить коэффициент использования металла на 22-28% [1]. Тем не менее, при любом расходе листового металла на получение раскройного материала получается отход.

Анализ последних исследований и публикаций. В качестве примера рассмотрим самую простую процедуру оптимального раскроя металлического листового заготовочного полотна на шайбы различного диаметра с целью получения минимального отхода в виде остатков заготовочного полотна (рис. 1). Существует огромное количество компьютерных программ, позволяющих оптимизировать раскрой таким образом, чтобы минимизировать потери и получить больше полезной продукции и меньше отходов для производителя [2-4]. В частности, это программные продукты типа «Модуль раскроя», системы «Интекс-раскрой» и другие. Тем не менее, эти программы не дают желаемого результата – не менее 30% материала основного полотна уходит в отходы и подлежит вторичной переработке.

В качестве основного параметра в таких задачах, как правило, принимается значение долей площади материала, которые идут на полезную продукцию, в данном случае – шайбы (F_1)

и на отход – остаточное полотно (F_2). В пределе, соотношение в виде $\eta = \frac{1}{1 + F_2 / F_1}$ должно

составлять одну единицу. На практике эта доля всегда менее единицы. Например, для любых сочетаний шайб круглой формы $\lim \eta = 0,69$. Это экспериментальный предел заполняемости исходного полотна. То есть 31% металлического полотна всегда уйдет в отходы.

Цель работы – на основании методов и правил обеспечения термодинамического единства получить минимально возможное количество отходов в технологиях раскроя.

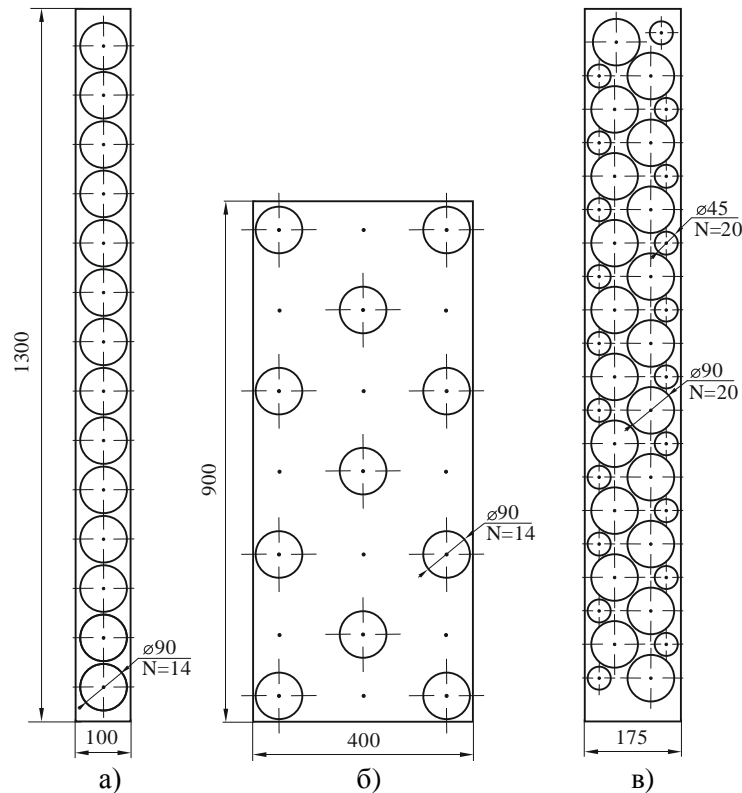


Рис. 1 – Примеры оптимального раскроя заготовочного листового полотна для получения круглых шайб: а – $F_1 + F_2 = 0,13 \text{ м}^2$; $F_1 = 0,09 \text{ м}^2$; $F_2 = 0,04 \text{ м}^2$; $\eta = 0,69$; б – $F_1 + F_2 = 0,36 \text{ м}^2$; $F_1 = 0,09 \text{ м}^2$; $F_2 = 0,27 \text{ м}^2$; $\eta = 0,25$; в – $F_1 + F_2 = 0,23 \text{ м}^2$; $F_1 = 0,16 \text{ м}^2$; $F_2 = 0,07 \text{ м}^2$; $\eta = 0,695$

Изложение основного материала. Попробуем отойти от технологического параметра, отражающего отношение площади занимаемой полезной продукцией к площади всего полотна раскроя, как определяющего, в произвольном направлении. За основу примем остаточный рисунок, который получается путем вырезания сквозных отверстий в заготовочном полотне. Смысловое наполнение такого «рисунка на просвет» может иметь потребительское качество, например, в рекламных целях.

Размер отверстий, которые остаются после вырезания шайб, влияет на светопропускание через такой остаток заготовочного полотна. Чтобы придать ему качество товарной продукции, предлагается сформировать светопропускание через остаток такого полотна в виде прикладного художественного произведения, где светлые и темные тона и полутона определяются числом и диаметром отверстий на единицу площади в различных участках матрицы остаточного полотна. Таким образом, на остаточном полотне можно формировать необходимые силуэты, рисунки заданной тональности, видимые на просвет.

Основной параметр для восприятия такого рисунка на расстоянии зависит от силы света источника, пропускаемого через наше остаточное металлическое полотно, которое, собственно, и становится квазиисточником света. Решением такой задачи следует считать условие светопропускания через полотно с отверстиями необходимого размера после вырезания шайб. Например, сегментарный фрагмент изображения розы в масштабе расчетной матрицы остаточного полотна (рис. 2) должен учитывать параметры, обозначенные в табл. 1. Исходные данные: F_1 – суммарная площадь шайб требуемых размеров, F_2 – площадь матрицы остаточного полотна (это уже не отход) после получения основной продукции; $F_1 + F_2$ – общая площадь заготовочного полотна для получения шайб.

Следует отметить, что программно размер вырезаемых шайб и их количество регламентируется заказчиком, а их распределение на плоской поверхности определяется компьютерной программой исполнителя.

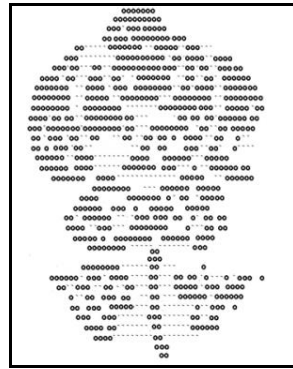


Рис. 2 – Пример сегментарной модели художественного изображения (роза) на плоской поверхности методом выделения шайб круглого размера: количество шайб $\varnothing 32 - 850$ шт.; $\varnothing 8 - 400$ шт.; $F_1 + F_2 = 1,30 \text{ м}^2$; $F_1 = 0,701 \text{ м}^2$; размер листа $1 \times 1,30 \text{ м}$; степень заполнения листа $\eta = F_1 / (F_1 + F_2) = 0,54$

Таблица 1

Показатели, определяющие граничные условия формирования заказа на шайбы и остаточного полотна в виде художественного произведения

№ п/п	Наименование параметра	Сырье	Продукция	Отход
1	Заданные диаметры номенклатуры шайб	-	$d_1, d_2, \dots d_i$	-
2	Число шайб требуемого размера	-	$n_1, n_2, \dots n_i$	-
3	Параметрический долевого коэффициент	F_1 / F_2	$F_1 / 1$	$1 / F_2$
4	Плотность отверстий на единицу площади матрицы (определяется компьютерной программой)	0	-	$\frac{\Delta F_1}{\Delta(F_1 + F_2)}$
5	Распределение светового потока через форматированную матрицу (определяется компьютерной программой)	0	-	$\frac{\Delta \Phi_{v1}}{\Delta \Phi_{v1,2}}$
6	Освещенность через форматированную матрицу	0	-	E_2
7	Опосредованная характеристика отношения приведенных энергий перемещения лазерной головки	-	e_1 / e_0	e_2 / e_0

Модель процедуры получения металлических шайб нужного диаметра в требуемом количестве с условием отсутствия отхода в виде остаточного металлического полотна имеет вид, описанный выражениями (4)-(7).

1. Условие достижения требуемой освещенности через матрицу остаточного полотна с учетом коэффициента пропорциональности k_p , получаемого как экспериментальную величину

$$E_1 \sim k_0 \frac{1}{1 + F_1 / F_2}. \quad (4)$$

2. Баланс светового потока через полученные отверстия различного диаметра и упорядоченные согласно программе формирования изображения имеет вид

$$\Phi_{v1} (1 - 0,25\pi \sum_i n_i d_i^2) = \Phi_{v1,2} \left(\frac{F_1}{F_2} \right). \quad (5)$$

При этом для матричного фрагмента ΔF должно сохраняться условие

$$\frac{n_{i-1}}{n_i} = \frac{F_i}{F_{i-1}} \quad (6)$$

или $n_1 F_1 = n_2 F_2 = \dots = n_i F_i$.

3. Граничным условием для светопропускания через полотно с отверстиями необходимого размера после вырезания шайб и наложения отверстий на фрагмент матрицы остаточного полотна dF является зависимость

$$E \leq \frac{d\Phi_{v1,2}}{dF_2}, \quad (7)$$

где отношение светового потока к площади отверстий отличается по своему свойству от смысла освещенности.

Программный продукт, позволяющий реализовать поставленную задачу, представлен блок-схемой (рис. 3).

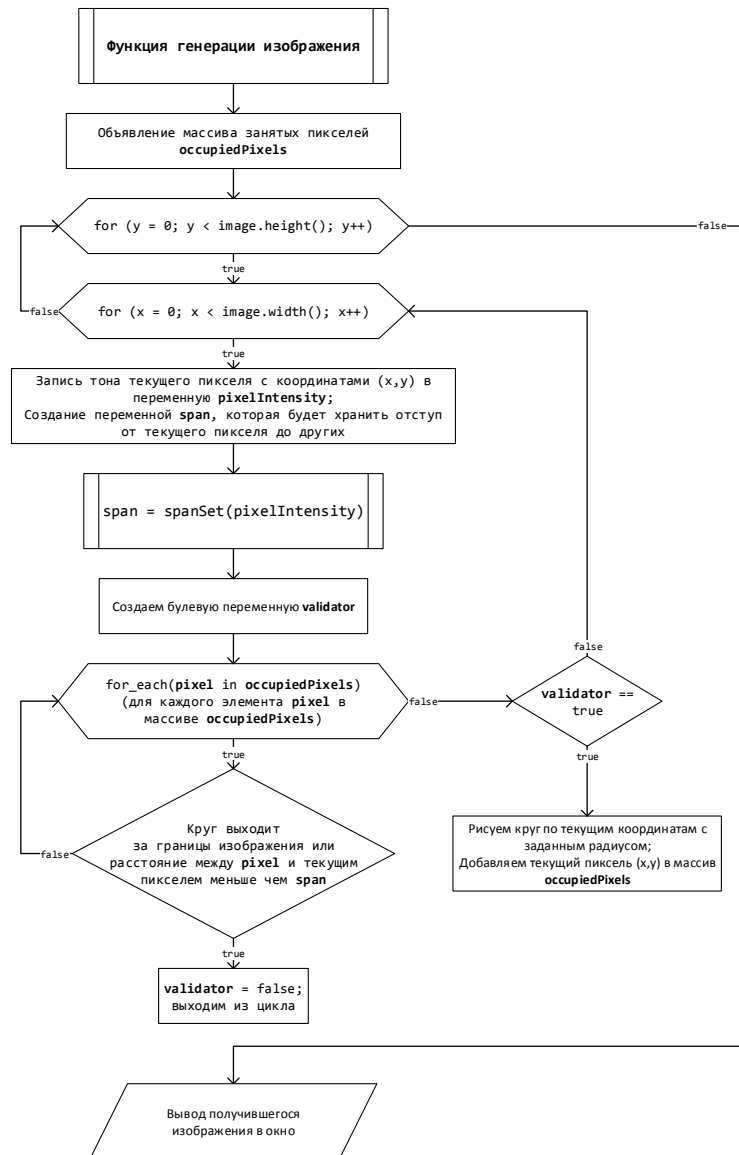


Рис. 3 – Блок-схема программного продукта технологии проектирования и изготовления металлических шайб на базе imageToCirclesConverter (автор программы Е.Б. Гарин)

В результате мы получаем готовую продукцию из требуемой номенклатуры шайб необходимого диаметра, а также художественное произведение прикладного характера в виде матрицы с изображенной на нем картиной из тонов и полутонов, просматриваемых на просвет этой матрицы. При этом количество отверстий и шайб различного диаметра соответствует плотности света, пропускаемого через единицу площади полотна (рис. 4). Этим достигается полное отсутствие отходов при такой технологии.

Источники энергии, используемые в технологии фрагментирования полотна, следующие: ω_0 – приведенная к общему количеству шайб энергия лазерного луча для края шайб нуж-

ного диаметра в заданной последовательности. Зависит только от суммарной длины окружностей всех шайб и толщины полотна;

e_0 – приведенная к площади раскроя заготовочного полотна ($F_1 + F_2$) энергия последовательного перемещения головки лазера для кроя очередной шайбы в стандартной технологии раскроя;

e_1 – приведенная к площади раскроя заготовочного полотна энергия упорядоченного перемещения головки лазерного источника в требуемый фрагмент матрицы для программируемого формирования изображения при помощи отверстий нужного размера;

e_2 – приведенная к площади раскроя заготовочного полотна энергия упорядоченного перемещения головки лазера при последовательном вырезании шайб нужного размера. Для нашей технологии следует $e_1 = e_2$;

$\Phi_{v,1,2}$ – интегральный световой поток, проникающий через обработанную целевым образом матрицу остаточного полотна после ее формирования.

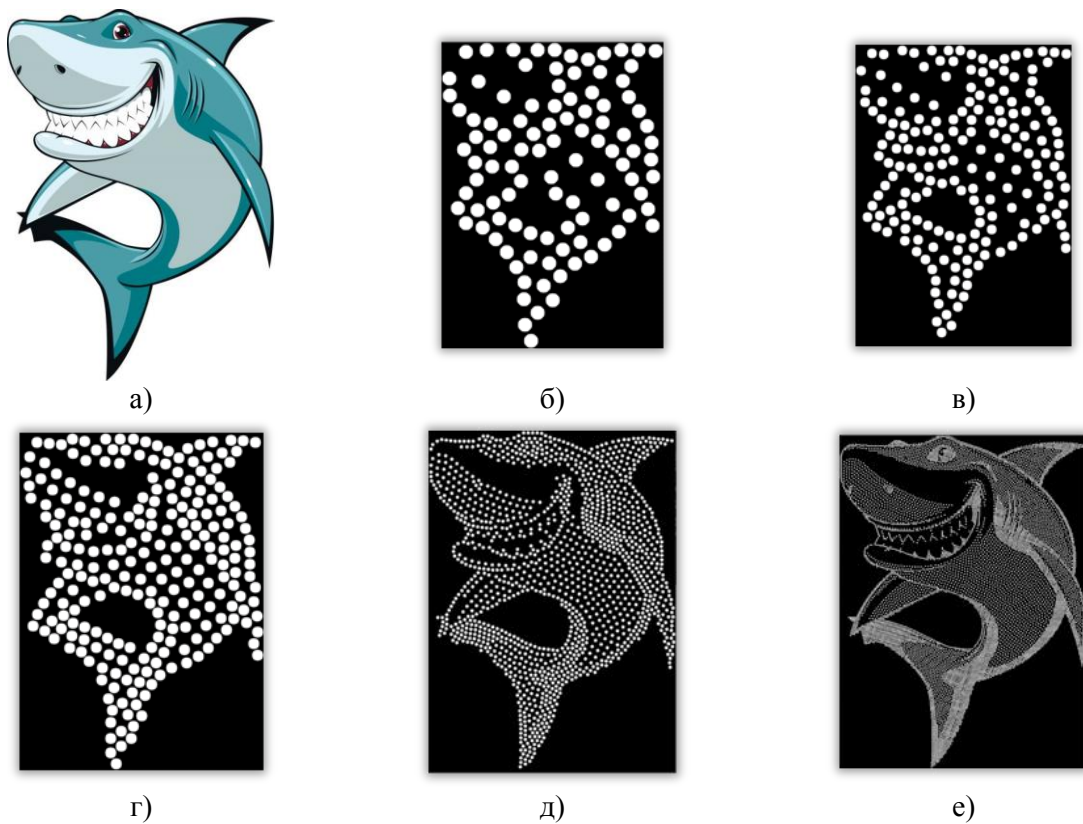


Рис. 4 – Реализация программы получения металлических шайб заданных размеров на полотне с фрагментированным изображением (в данном случае заказное изображение – стилизованная фигура акулы): а – исходное изображение, ширина 2,2 м, высота 3,06 м, площадь изображения 6,73 м²; радиус круга, см: б – 7, в – 5, г – 5, д – 1,5, е – 0,5; коэффициент отступов: б – 10, в – 10, г – 3, д – 2, е – 1; количество кругов, шт.: б – 103, в – 183, г – 242, д – 1406, е – 8029; площадь всех кругов, м²: б – 1,58, в – 1,44, г – 1,9, д – 1, е – 0,6; плотность кругов, %: б – 23,52, в – 21,34, г – 28,22, д – 114,62, е – 8,95

В качестве опосредованной энергетической характеристики, позволившей использовать матрицу остаточного полотна в виде полезной продукции за счет ее состояния сильной термодинамической неравновесности, следует принять отношение приведенных энергий $e_1 / e_0 \leq 1,0$. Очевидно, что это отношение в обычном варианте не может быть выше единицы. Тем не менее, можно показать, что это отношение может быть и другим. Рассмотрим пример, иллюстрирующий эту преамбулу.

Задача. Для металлического полотна толщиной 0,8 мм и размерами 3000×1500 мм необходимо получить 100 шайб ($\varnothing_1 = 15$ мм), 15 шайб ($\varnothing_2 = 7,5$ мм), 100 шайб ($\varnothing_3 = 5$ мм). Остаточное полотно должно содержать заданный рисунок определенного качества для внешней рекламы, обладая, таким образом, свойством потребительской стоимости. Без отходов.

Примем за основу лазерное изготовление шайб из заготовочного металлического полотна необходимого качества и размера. Неравновесность в этом случае задается характером энергии перемещения головки лазера. Если для получения только шайб лазер перемещается поступательно и последовательно вдоль металлического заготовочного полотна, то в новой технологии энергозатраты на перемещение лазерной головки увеличиваются за счет программного движения той же головки по различным направлениям плоскости заготовочного полотна. Для этих целей используем волоконный лазерный станок модели SF3015M3 марки SENFENG. Необходимые нам исходные данные станка приведены в табл. 2. Задача сводится к известной проблеме сегментарной диджитализации фигурного изображения на плоскости.

Таблица 2

Характеристики модели оптоволоконного лазерного станка типа SF3015G3

№ п/п	Параметры	Значения
1	Площадь рабочей поверхности, м ²	0,045
2	Координаты перемещения головки, мм	3000×1500×100
3	Мощность оптоволоконного лазера, Вт	1000
4	Мощность привода каретки, Вт	1500
5	Вес перемещающейся каретки с лазерной головкой, кг	1,1
6	Максимальная скорость движения каретки, м/сек	0,12
7	Точность позиционирования, мм	±0,02

Решение.

1. Расчетные данные для общепринятой «технологии 1» раскроя полотна лазером:

- площадь исходной поверхности полотна для изготовления 215 шайб указанной номенклатуры традиционным способом составила бы (при максимально плотном раскрое)

$$F_1 + F_2 = 0,03 \text{ м}^2.$$

- общая площадь рабочей поверхности полотна, использованной под шайбы $F_1 = 0,0203 \text{ м}^2$;

- геометрический путь головки лазера составил бы 6,63 м;

- технологический путь головки лазера (с учетом подготовительных и координатных перемещений) составил 7,12 м;

- расчетное время производства 215 шайб лазером – $t = 55$ с;

- приведенная энергия для выполнения такой работы $e_0 = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{м}^2$;

- опосредованная характеристика отношения приведенных энергий перемещения лазерного луча для последовательного получения шайб составила бы $e_1 / e_0 = 13,25$.

В результате получения 215 шайб остаточное полотно (отход) имело бы вес 0,6 кг и было бы направлено на переплавку в сталеплавильный агрегат.

2. Рассмотрим теперь «технология 2» компьютерного раскроя шайб указанной номенклатуры с целью получения не только основной продукции, но и прикладного художественного изображения на металлическом полотне размером 0,3×0,15 м и площадью 0,045 м² при помощи программ сегментарной диджитализации. Исходные параметры для расчета:

- общая площадь рабочей поверхности полотна, использованной непосредственно под шайбы, остается прежней – $F_1 = 0,0203 \text{ м}^2$;

- площадь остаточного полотна в соответствии с программой расчета расположения всех шайб должна быть не менее $F_2 = 0,0187 \text{ м}^2$;

$$\eta = \frac{F}{F + F_2} = 0,52;$$

- геометрический путь головки лазера составляет 16,6 м, то есть увеличивается в $16,6/6,63 = 2,5$ раза.
 - технологический путь головки лазера (с учетом подготовительных и координатных перемещений) составил уже 19,12 м;
 - расчетное время производства 215 шайб лазером – $t = 138$ с;
 - вес остаточного полотна – 1,54 кг, то есть в 2,6 раза больше, чем в традиционной «технологии 1». Но это полотно имеет потребительскую (эстетическую) стоимость и не является отходом;
 - приведенный к площади раскроя расход энергии движения лазерной головки для получение 215 шайб заданной номенклатуры по предложенной «технологии 2» составил $11 \cdot 10^{-3}$ Н/м.
- Энергетические характеристики источников, используемых в данной системе, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Энергетические характеристики используемых источников

№ п/п	Источник энергии	Характеристика энергии	Производственный компонент	Отходный компонент
1	Лазерный луч*	Тепловая энергия, Дж	1000	1000
2	Лазерный луч	Тепловая энергия избирательного действия, Дж	950	950
3	Энергия перемещения инструмента	Механическое движение	100	150
4	Световая энергия	Сила света	-	10

* – в случае использования лазерной обработки заготовочного листа.

Увеличение значения e_1 / e_0 в 2,075 раза в результате увеличения пути движения головки лазера вдоль полотна свидетельствует о появлении явной термодинамической неравновесности энергетической системы в целом, что и следовало ожидать. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры термодинамической неравновесности для системы «полотно-шайбы»

№ п/п	Параметр	«Технология 1»		«Технология 2»	
		e_0	e_1	e_0	e_2
1	Приведенная к площади раскроя энергия для перемещения лазера, Н·м/м ²	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$
2	Опосредованная характеристика отношения приведенных энергий перемещения лазерной головки, ед.	$e_1 / e_0 = 13,25$		$e_2 / e_0 = 27,5$	
3	Приведенное изменение условной энтропии системы, $\pm \sigma$, $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{(\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{с})}$	-		$-2,075 \cdot 10^{-5}$	

Для локальной температуры $T = 293$ К изменение энтропии $\pm \sigma = \frac{1}{T} \Psi$ зависит от степени рассеяния затрачиваемой энергии и ее полезной части. В данном случае увеличение энергии, при помощи которой обрабатывается полотно двойного назначения – получение шайб нужного размера и номенклатуры и формирование запрограммированного художественного изображения на полотне в условиях сильной термодинамической неравновесности, дает нам процесс упорядочения остаточного полотна, а значит, связан с уменьшением энтропии в «технологии 2» по сравнению с ростом энтропии в «технологии 1».

Энергия перемещения головки лазера, от которой зависит наш результат: либо мы получим невозвратный отход в виде остатков полотна, либо – некоторое художественное произведе-

дение в виде организованного полотна; такая энергия является внешней для нашей системы. И правомочно выражение для негэнтропии (A) такой незамкнутой системы $de_i = A_i + ds_i$. В нашем случае негэнтропия, связанная с получением основной продукции (шайб), в точности будет соответствовать негэнтропии, связанной с получением художественного полотна, т. е. $A_1 = A_2$. Тогда векторное изменение энтропии во времени будет иметь вид

$$\pm\sigma = \frac{d(s_1 - s_2)}{dt} = \frac{1}{e_0} \frac{d(e_1 - e_2)}{Tdt} = -2,075 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{(\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{с})}. \quad (8)$$

Отрицательное изменение энтропии свидетельствует о том, что внешняя энергия в производственной системе полностью потрачена как на изготовление шайб, так и на второй вид полезной продукции – изготовление художественного полотна. Результатом такой технологии является получение двух видов продукции: шайбы нужных размеров и художественное полотно требуемого содержания, которое обладает потребительской стоимостью. Отходов в производственной системе нет. Исключая потери тепловой энергии в окружающую среду.

Отрицательное изменение энтропии и увеличение негэнтропии в результате управляемого процесса превращения отхода в товарную продукцию в рассматриваемой технологии зависит от эффективности использования энергии внешнего воздействия, а именно, энергии движения лазерной головки по поверхности полотна. Эта энергия определяется условиями программного обеспечения необходимого количества отверстий на единицу матрицы. Чем выше плотность заполнения такой матрицы отверстиями в заданной последовательности, тем значительнее условная термодинамическая неравновесность такой системы и тем меньше расход приведенной энергии на единицу площади такой матрицы. Тем меньше энтропия такой системы. И наоборот. В пределе: минимальное заполнение матрицы обеспечивается минимумом негэнтропии и максимальная часть внешней энергии будет рассеиваться, обеспечивая рост энтропии всей системы. Такие данные позволяют ориентироваться в параметрах, которые влияют на получение оптимального решения рассматриваемой задачи.

Выводы

Применение идеи термодинамического двуединства в технологическом процессе и целевое использование всех компонентов сырья, ориентированных на оптимальный источник энергии, позволяет достичь максимально возможного результата, а именно, преобразования всех компонентов исходного сырья в товарную продукцию и минимизировать отходообразование в технологическом процессе. Предложенная технология может относиться к производству некоторого многообразия штамповочных материалов самой различной конфигурации и размеров с одновременным приобретением еще одного товарного продукта – фрагментированного полотна с некоторым художественным изображением.

Список использованных источников:

1. Методы и технологии резки листового материала [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.promexcute.ru/metodyi-i-texnologii-rezki-listovogo-metalla.
2. Кавун И.И. Повышение эффективности способов раскроя листового материала / И.И. Кавун, В.Г. Гусев // *Master's Journal*. – 2016. – № 1. – С. 61-66.
3. Карташов А.В. Одна реализация метода последовательно-одиночного размещения для решения задачи оптимального размещения кругов различных радиусов в полосе / А.В. Карташов, Н.В. Лученцова // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2007. – № 2. – С. 90-94.
4. Гиль Н.И. Об одном алгоритме составления рациональных схем раскроя однотипных листов на многосвязные заготовки / Н.И. Гиль, В.М. Комяк, А.Б. Опанасюк // *Теория и методы автоматизированного проектирования / ИТК АН БССР*. – Минск, 1985. – Вып. 2. – С. 123-128.

References:

1. *Metody i tekhnologii rezki listovogo materiala* (Methods and technologies for cutting sheet material) Available at: www.promexcute.ru/metodyi-i-texnologii-rezki-listovogo-metalla (accessed 5 November 2015).
2. Kavun I.I., Gusev V.G. *Povyshenie effektivnosti sposobov raskroia listovogo materiala* [Improving the efficiency of cutting methods for sheet material]. *Master's Journal*, 2016, no. 1, pp. 61-66. (Rus.)

3. Kartashov A.V., Luchentsova N.V. Odnа realizatsiia metoda posledovatel'no-odinochnogo razmeshcheniia dlia resheniia zadachi optimal'nogo razmeshcheniia krugov razlichnykh radiusov v polose [One implementation of the method of sequentially-single placement to solve the problem of optimal placement of circles of different radii in the strip]. *Radioelektronnyye i komp'yuternyye sistemy – Radio-electronic and computer system*, 2007, no. 2, pp. 90-94. (Rus.)
4. Gil' N.I., Komiak V.M., Opanasiuk A.B. Ob odnom algoritme sostavleniia ratsional'nykh skhem raskroia odnotipnykh listov na mnogosviaznye zagotovki [About one algorithm for drawing up rational schemes for cutting the same type of sheets into multiply connected blanks]. *Teoriya i metody avtomatizirovannogo proektirovaniia – Theory and methods of computer-aided design*, 1985, vol. 2, pp. 123-128. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 28.08.2019

УДК 621.923

doi: 10.31498/2225-6733.39.2019.201063

© Лещенко О.І.¹, Андреев О.О.²

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ, НАДРУКОВАНИХ ЗАСОБАМИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, І ПОРІВНЯННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ З ДАНИМИ, ОТРИМАНИМИ ЗА ДОПОМОГОЮ САЕ-СИСТЕМИ

У роботі наведені результати експериментального дослідження зразків на вигин, надрукованих засобами адитивної технології за різними схемами заповнення комірок і побудови каркаса пластин, а також їх базування на столі принтера. Встановлено, що для збільшення міцності при вигині матеріалу надрукованого зразка комірки сітки з більшими властивостями міцності доцільно створювати в тому шарі, який під дією прикладеної сили відчуває розтягнення. Такий висновок відкриває можливість створення 3D-печаткою деталей зі змінними властивостями міцності за певними напрямками. В роботі отримало подальший розвиток наукове обґрунтування причини відмінності параметрів міцності надрукованого матеріалу в залежності від його внутрішньої структури і базування при виготовленні. За підсумками даної роботи можна зробити висновок, що моделювання міцності властивостей об'єктів, зроблених засобами 3D-друку, можливо за допомогою САЕ-систем (англ. Computer Aided Engineering) та бібліотеки коригувальних коефіцієнтів, створеної на підприємстві шляхом аналізу статистичної інформації.

Ключові слова: 3D-друк, адитивна технологія, параметри друку, 3D-принтер, міцність надрукованої деталі, якість друку.

Лещенко А.И., Андреев О.О. Исследование прочности материалов, напечатанных средствами аддитивной технологии и сопоставление их свойств с данными, полученными с помощью САЕ-системы. В работе приведены результаты экспериментального исследования образцов на изгиб, напечатанных средствами аддитивной технологии по различным схемам заполнения ячеек и построения каркаса пластин, а также их базирования на столе принтера. Установлено, что для увеличения прочности при изгибе материала напечатанного образца ячейки сетки с большими прочностными свойствами целесообразно создавать в том слое, кото-

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, aleshenko1954@gmail.com

² бакалавр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, educationpstu@gmail.com