



- 1) покер планирования с применением среднего гармонического;
- 2) покер планирования с применением среднего геометрического;
- 3) метод PERT (стандартный);
- 4) метод PERT (модифицированный);
- 5) покер планирования с применением среднего арифметического;
- 6) покер планирования с применением среднего квадратического.

### **Заключение**

Проведён вычислительный эксперимент, показавший, что самым точным из рассмотренных методов является покер планирования с применением среднего гармонического для нахождения итоговой оценки задачи (со средним отклонением оценок от фактического времени в 28,83%).

Покер планирования позволяет увеличить точность оценок временных ресурсов проектов на 20% по сравнению с методом PERT, применяемым при традиционном подходе.

Также по результатам вычислительного эксперимента выявлены методы, оценивающие сроки реализации задач с запасом времени (это покер планирования с применением среднего арифметического и среднего квадратического), и методы, оценивающие сроки задач с учётом существования благоприятных условий при реализации этих задач (это метод PERT).

### **Литература**

1. 2015 CHAOS Report // The Standish Group. URL: <https://www.standishgroup.com/store/chaos-report-2015-blue-pm2go-membership.html>.
2. Scrum Гибкая разработка ПО. Майк Кон. М.: Вильямс, 2011. — 576 с. : ил. — ISBN 978-5-8459-1731-7.
3. О применении гибких методологий при управлении разработкой программного обеспечения. / Пономарёва А.Н., Давлетбердина А.Р., Верхотурова Г.Н. // Конференция ITIDS: Труды V международной конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений». Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 16-19 мая, Уфа, Россия, 2017 – с. 100-102.

М.А. Верхотуров, Г.Н. Верхотурова,  
М.И. Айбулатов, Д.Р. Зарипов

**О ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ПУТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ РАСКРОЕ ПЛОСКОГО МАТЕРИАЛА**

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

### **Аннотация**

В работе рассматривается задача построения пути режущего инструмента с учётом термических воздействий на материал, возникающая в процессе



раскроя плоского материала с использованием лазерного, газового и т.д. оборудования. Приведена постановка задачи. Предложен подход к решению задачи моделирования изменения температуры раскраиваемого материала на базе дискретно - логического подхода. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

### **Введение**

Процесс создания любого изделия начинается с изготовления его элементарных конструктивных составляющих — деталей. Детали представляют основную массу объектов на любом производственном предприятии, поэтому этап их изготовления является одним из наиболее трудоемких и сложных во всем производственном цикле создания изделия. Трудоемкость и сложность подготовки и организации изготовления деталей усугубляется тем, что многие изделия выпускаются в настоящее время в условиях единичного и мелкосерийного производства. В связи с большой номенклатурой деталей при производстве заготовок возникают сложности по организации технологического проектирования раскройно-заготовительных операций.

В процессе раскроя листовых материалов на фигурные заготовки одним из важнейших этапов является построение пути режущего инструмента. Оптимизация пути режущего инструмента может значительно снизить стоимость раскроя и в некоторой степени повысить качество получаемых заготовок [1].

Для изготовления заготовок и деталей из листовых материалов используют машины фигурной резки с числовым программным управлением (ЧПУ). Особую популярность приобрела лазерная резка, в основе которой используется сфокусированный лазерный луч, который нагревает поверхность в указанной точке до температуры испарения материала. Передвигая лазерный луч программно по заданному маршруту, создается рез материала нужной формы.

Обычно оптимизация пути сводится к минимизации длины холостого хода станка и уменьшения точек врезок, однако данный маршрут не учитывает соблюдение температурного режима материала. В зависимости от порядка вырезания фигур температура раскраиваемого материала может сильно варьироваться на различных локальных участках и вызывать перегрев материала с последующей возможной его деформацией, что может привести к ухудшению качества получаемых заготовок [2].

В связи с этим появляется необходимость учитывать термический фактор, позволяющий повысить качество получаемых заготовок по сравнению с обычной минимизацией пути холостого хода.

### **Постановка задачи**

**Дано (см. Рис.1.):**

- $L(a \times b)$  – раскраиваемая прямоугольная область;
- Заготовки  $\{S_i\}$ , где  $i = 1 \div n$  – номер заготовки;



- Контуры заготовок  $\{C_{ij}\}$ , где  $i$  – номер заготовки,  $j$  – номер контура заготовки  $i$ ,  $j = 1 \div m_i$  ( $m_i \geq 1$  – кол-во внешних и внутренних контуров заготовки  $S_i$ );
- Точки врезки в контуры  $\{P_{ij}\}$  – где  $i$  – номер заготовки,  $j$  – номер контура заготовки  $S_i$ ;
- $P_{нач}$  – начальное положение режущего инструмента.

**Найти:**

Такое  $R^*$ , что

$T(Tr(R^*), L) \leq t_{max}$ , где:

- $R = (P_{нач}, \dots, P_{ij}, \dots, P_{нач})$  – последовательность точек врезки контуров, где  $i = 1 \div n$ ,  $j = 1 \div m_i$ ;
- $Tr(R)$  – путь режущего инструмента при движении по последовательности точек  $R$
- $T(Tr(\cdot), L)$  – функция определяющая максимальную температуру точки  $(x, y)$  ( $0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b$ ) раскраиваемого листа  $L$  во время резки по пути  $Tr(\cdot)$ .

**Дополнительные ограничения:**

Пусть  $Q_{ij}$  – порядковый номер осуществления вырезания контура  $C_{ij}$ , ( $Q_{ij} > 0, Q_{ij} \in Z$ ). При переходе от контура  $C_{ij}$  к контуру  $C_{kl}$ :  $Q_{kl} - Q_{ij} = 1$

**Ограничение 1:** При переходе между контурами одной и той же заготовки необходимо сначала вырезать все внутренние контуры, после чего внешний контур:

$$\forall C_{kj}, C_{k1} : Q_{k1} - Q_{kj} = 1, j > 1$$

должно соблюдаться следующее условие:

$$\forall C_{kb} : b > 1 \exists Q_{kb} : Q_{kb} \leq Q_{kj}, 0 < Q_{k1} - Q_{kb} < m_k$$

**Ограничение 2:** Пусть  $IN_{C_{il}} = \{D_k\}$  – множество всех заготовок, находящихся внутри контура  $C_{il}$  на первом уровне вложенности. Перед тем, как начать вырезать контур  $C_{il}$ , необходимо обязательно вырезать все заготовки, находящиеся во множестве  $IN_{C_{il}}$

$$\forall C_{k1} : D_k \in IN_{C_{il}}, l \in (1; m_i] \exists Q_{k1} : Q_{k1} < \min\{Q_{il}\}_{l=2}^{m_i}$$

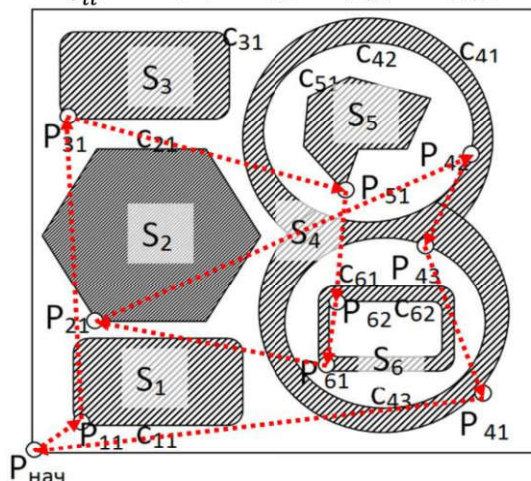


Рис. 1. Карта раскроя (заготовки  $S_i$ , контуры  $C_{ij}$ , точки врезки  $P_{ij}$ ) и путь режущего инструмента (пунктирные стрелки)



### Метод решения

Основная проблема при решении поставленной задачи заключается в сложности определения температуры любой точки листа в процессе его резки по тому или иному выбранному пути. Аналитически решить эту задачу не представляется возможным. В связи с этим был выбран подход, основанный на дискретно-логическом представлении информации, который был апробирован и показал хорошие результаты при решении задач двумерного и трёхмерного размещения объектов сложных геометрических форм [3,4].

#### **Нагрев области раскроя во время резки**

При движении режущего инструмента по пути  $Tr(\cdot)$  те точки области раскроя (листа  $L$ ), через которые он проходит во время резки контура  $C_{ij}$ , нагреваются до температуры плавления соответствующего материала.

#### **Распространение температуры**

Предложен следующий принцип распространения температуры в дискретном пространстве:

1) Для каждой области из 9 точек (при 8-связности) выбирается точка  $P$  с самой высокой температурой (Рис.2а).

2) Затем рассчитывается новая температура выбранной точки  $P$  в зависимости от:

$T$  – температура точки;

$\Delta T$  – кол-во тепла, передаваемое каждой соседней точке;

$Count$  – количество соседних точек;

$K_{m/проводности}$  – коэффициент распространения тепла ( $0 \leq K_{m/проводности} \leq 1$ );

$K_{m/потери}$  – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду ( $0 \leq K_{m/потери} \leq 1$ );

$\Delta T = P.T * K_{m/проводности}$ ;

$P.T = (P.T - \Delta T * count) * K_{теплопотери}$ .

3) Для каждой из соседних точек  $S$  рассчитывается температура с учетом приращения  $\Delta T$  в зависимости от коэффициента теплопроводности  $K_{m/проводности}$  и теплопотери во внешнюю среду  $K_{теплопотери}$ :

$$S.T = (S.T + \Delta T) * K_{m/потери}$$

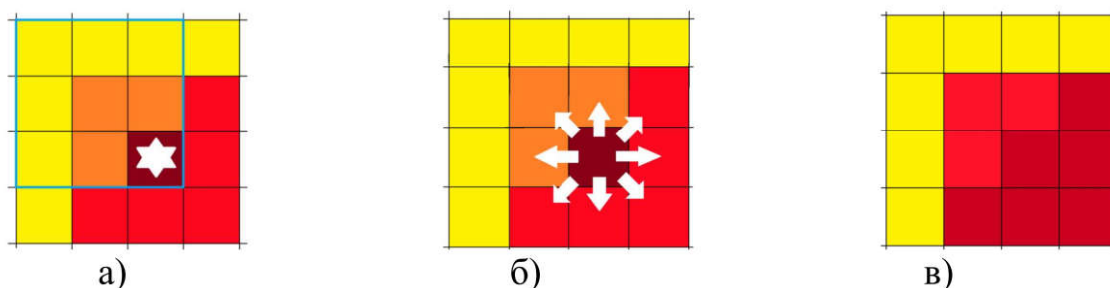


Рис. 2. Выбор точки с самой высокой температурой (а), направления распространение тепла (б) и результат распространения (в)



### Вычислительный эксперимент

Для апробации разработанных методов и алгоритмов был проведен вычислительный эксперимент на базе примера из [5]. В роли показателя при моделировании процесса раскроя с учетом термических воздействий было выбрано количество локальных перегревов материала. Сравнивались три алгоритма: «кратчайшего пути», «случайные переходы» и «*Realtime*», разработанный в данной работе и основанный на определении температуры в масштабе реального времени. Результаты экспериментов представлены ниже:

Таблица 1

Алгоритм построения пути режущего инструмента	Колич. локальных перегревов	Длина пути холостого хода
Минимизация длины пути	92	1891
Со случайными переходами	90	6968
« <i>Realtime</i> », разработанный в данной работе	68	4524

### Заключение

В работе был рассмотрен подход, включающий в себя математическую модель, методы, алгоритмы и программное обеспечение, к решению задачи построения пути режущего инструмента с учетом термических воздействий при раскрое плоского материала, основанный на дискретно-логическом представлении информации. По результатам проведенного эксперимента алгоритм «*Realtime*», разработанный в данной работе, показал эффективность на 26% выше алгоритма «кратчайшего пути». Длина пути холостого хода при использовании разработанного алгоритма возросла в 2.4 раза, по сравнению с алгоритмом кратчайшего пути. Пример карты раскроя с визуализацией нагрева в процессе резки показан на Рис.3.

В дальнейшем предполагается реализовать учет возможной деформации материала, описанный в [2].





Рис. 3. Карта раскроя, путь режущего инструмента и  $T$  точек листа

### Литература

1. Таваева А.Ф., Петунин А.А. Точное вычисление стоимости резки заготовок из листового материала на машине лазерной резки с числовым программным управлением в задаче оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента // Моделирование, оптимизация и информационные технологии: электрон. науч. журн. 2018. № 4 (23). URL: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2018/10/TavaevaPetunin\\_4\\_18\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2018/10/TavaevaPetunin_4_18_1.pdf)
2. Петунин А.А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ для машин термической резки материала // Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 280–286.
3. Мухачева Э.А., Верхотуров М.А., Мартынов В.В. Модели и методы расчета раскроя – упаковки геометрических объектов. - УГАТУ, Уфа: 1998.- 217с.
4. Verkhoturov M., Petunin A., Verkhoturova G., Danilov K., Kurennov D. The 3D Object Packing Problem into a Parallelepiped Container Based on Discrete-Logical Representation. IFAC-PapersOnLine 49 (12), 2016, 1-5.
5. Верхотуров М.А. Задача нерегулярного раскроя фигурных заготовок: оптимизация размещения и пути режущего инструмента // Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2007. Т. 9, № 2 (20). С. 106–118.