

Л. М. Акулович<sup>1</sup>, Д. Б. Ермашкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ЛАКШМИ», Минск, Беларусь

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСКРОЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПРОФИЛЬНОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

Показана роль автоматизации технологической подготовки производства в обеспечении конкурентоспособности продукции машиностроения.

При изготовлении машиностроительной продукции определяющим в части снижения себестоимости является уменьшение расхода материалов прежде всего в заготовительном производстве (заготовки деталей машин должны иметь минимальные припуски для последующей механической обработки). Уменьшить расход металла можно также за счет максимального использования деловых отходов металлопроката. Технологические возможности современного оборудования термической резки листового материала значительно расширились. Опыт работы машиностроительных предприятий, эксплуатирующих оборудование для резки листа в комплекте со специализированными системами автоматизированного раскроя, которые привязаны к этому оборудованию, показывает, что при использовании автоматизированных систем раскроя коэффициент использования металла может быть увеличен в среднем на 22...28 %.

Анализ предлагаемых на рынке систем автоматизированного проектирования раскроя листового материала показывает, что указанные программные средства в целом соответствуют современному научно-техническому уровню разработок данного типа. Вместе с тем отмечены и некоторые их недостатки.

Рассмотрены особенности программного комплекса «Модуль раскроя». Описаны методики автоматизации технологии раскроя деталей из профильного металлопроката, расчета норм расхода материала и коэффициента его использования. Приведены алгоритмы линейной, прямоугольной и фигурной раскладки, реализованные в указанном программном комплексе.

*Ключевые слова:* раскрой металлопроката, маршрут резки, зона термического влияния, деловые отходы металлопроката, машина термической резки, карта раскроя, управляющая программа, сквозной технологический процесс.

L.M. Akulovich<sup>1</sup>, D.B. Yermashkevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>“LAKSHMI” Scientific and Production Ltd. Co, Minsk, Belarus

## AUTOMATION OF CUTTING OF BLANKS FROM PROFILED ROLLED METAL

The role of automation of technological preparation of production to ensure the competitiveness of engineering products. At manufacturing of engineering products the determining factor of cost reduction is to reduce material consumption, primarily in the blank production (billets of machine parts need to have minimal allowances for further machining). The Maximum use of business waste metal can also reduce the consumption of metal. The technological possibilities of modern equipment for nesting has increased considerably. Experience of machine-building enterprises, which use equipment for cutting sheets, including specialized computer-aided manufacturing (CAM) for nesting, which fit the equipment, proves, that the utilization ratio of metal can be increased in average by 22...28 % when the specialized CAM for nesting is using.

Analysis of specialized CAM for nesting, available on the market, shows that these software tools generally correspond to the modern scientific-technical level of developments of this type. However, they have some drawbacks.

The peculiarities of software package “Module nesting” are considered. The methods of automation technology cutting of parts made of profile rolled metal, calculation of norms of material consumption and utilization are described. Algorithms of linear, rectangular shaped layouts, which are implemented in the software package “Module nesting” are shown.

*Keywords:* cutting of metal, cutting the route, zone of thermal influence, business waste of metal, thermal cutting machine, card cutting, NC-program, thought technological process.

**Введение.** Изделия машиностроительных отраслей (автотракторостроение, сельхозмашиностроение, станкостроение) характеризуются многообразием по функциональному назначению, технологической сложностью, высокой металло- и трудоемкостью. Внедрение конкурентоспо-

собных технологий, обеспечивающих высокое качество и минимальную себестоимость продукции, неизбежно приводит к увеличению удельного веса работ по технологической подготовке производства и, как следствие, к необходимости ее автоматизации с целью снижения затрат и сокращения сроков освоения новых изделий [1–3].

При изготовлении машиностроительной продукции определяющим в части снижения себестоимости является уменьшение расхода материалов прежде всего в заготовительном производстве (заготовки деталей машин должны иметь минимальные припуски для последующей механической обработки). Уменьшить расход металла можно также за счет максимального использования деловых отходов металлопроката.

Структура производств машиностроительных предприятий отличается по составу имеющихся технологических переделов, однако типичными для всех предприятий являются: раскрой листового проката (на гильотинных ножницах, машинах термической резки, лазерных установках), раскрой круглого и профильного металлопроката (на ленточно-отрезных, абразивно-отрезных, фрезерно-отрезных станках), холодная штамповка, термическая и механическая обработка, лакокрасочные и гальванические покрытия, сборка. В таких производствах для решения задач технологической подготовки наиболее эффективным является компьютеризация проектирования технологических процессов [1, 4].

Вместе с тем для повышения срока службы ответственных деталей за последние годы созданы и внедряются в производство новые технологии термического упрочнения, плазменного и лазерного легирования, обеспечивающие формирование наноструктурированных поверхностных слоев высокой твердости. Технологические возможности современного оборудования термической резки листового материала значительно расширились, что позволяет во многих случаях производить окончательную обработку отверстий, проемов и сложных контуров деталей с обеспечением заданных чертежом требований точности и шероховатости поверхностей. Например, установки для лазерной и плазменной резки заготовок из листа обеспечивают точность позиционирования по осям  $\pm 0,01$  мм, а погрешность вырезаемых контуров составляет  $\pm 0,1$  мм. Высокая производительность резки (до 20 м/мин), малые ширина реза и зона термического влияния (диаметр луча составляет сотые доли миллиметра), высокая точность позиционирования, обеспечивающая адекватную точность взаимного расположения вырезаемых контуров заготовки, возможность раскроя сложных контуров деталей из листового материала, отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал дают возможность использовать способы термической резки взамен некоторых операций механической обработки в единых технологических процессах. Все это обуславливает создание систем автоматизированного проектирования (САПР) сквозных технологических процессов изготовления деталей машин, позволяющих разрабатывать как единые технологические процессы изготовления деталей, так и управляющие программы для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ).

Типовая структура машиностроительного производства в зависимости от серийности и объема выпускаемой продукции предусматривает организацию отдельно расположенного заготовительного цеха (участка), где производится раскрой металлопроката, черновая механическая обработка, холодная штамповка с выполнением отдельных предварительных операций механической обработки в заготовительном производстве. Доля трудоемкости производства заготовок на таких предприятиях составляет около 30 % от общей трудоемкости изготовления изделий.

В зависимости от формы заготовок различают задачи линейного, прямоугольного и фигурного раскроя. При раскрое листового проката для заготовок деталей прямоугольной формы, как правило, используют гильотинные ножницы, для деталей произвольной формы – машины термической резки или установки лазерной резки, а для круглого и профильного проката – разрезные станки (ленточно-, абразивно- и фрезерно-отрезные). При этом основным критерием рациональности служит максимальное использование исходного материала и минимизация отходов с учетом возможности их последующего использования. Опыт работы предприятий показывает, что отходы листового проката при ручной раскладке могут достигать до 30 %. Обобщенным параметром определения эффективности раскроя является коэффициент использования металла (КИМ), равный отношению суммы масс вырезанных заготовок деталей к массе исходного про-

ката. Очевидно, что основным путем повышения КИМ является автоматизация раскладки [5], которая позволяет в достаточно короткий срок перебрать большое количество вариантов с одновременным определением КИМ и из них выделить наиболее оптимальный с последующим редактированием (при необходимости) в интерактивном режиме.

Опыт работы машиностроительных предприятий, эксплуатирующих оборудование для резки листа в комплекте со специализированными системами автоматизированного раскроя, которые привязаны к этому оборудованию, показывает, что при использовании автоматизированных систем раскроя КИМ может быть увеличен в среднем на 22...28 %.

В области автоматизации раскроя металла известны локальные программные комплексы в основном для раскроя деталей произвольной формы на машинах термической резки (МТР) с ЧПУ, настройки к графическим пакетам для автоматического или ручного размещения контуров деталей на листах материала, а также специализированные программные комплексы, которые поставляются заказчиком совместно с машинами лазерной и плазменной резки. Прослеживается тенденция поставки из западных стран машин для резки металла совместно с программным обеспечением для раскладки деталей и подготовки управляющих программ для этих машин. Это программное обеспечение является узкоспециализированным для конкретных машин резки металла, и их отдельная поставка фирмами-производителями не производится. У некоторых производителей графических систем имеются настройки с математическим и программным аппаратом для размещения деталей на листе, которые могут быть поставлены только с их графическими пакетами.

Анализ предлагаемых на рынке САПР раскроя листового материала показывает, что указанные программные средства в целом соответствуют современному научно-техническому уровню разработок данного типа. Вместе с тем следует отметить следующие их недостатки:

большинство САПР не решают задачи раскладки и раскроя прямоугольных деталей на гильотинных ножницах, а также раскроя круглого и профильного проката на разрезных станках; не учитываются изменяющиеся условия заготовительных производств;

программное обеспечение не обеспечивает формирования сквозного технологического процесса с операциями механической обработки, штамповки и т. д.;

некоторые САПР ориентированы на использование графических пакетов других фирм производителей, причем стоимость графических пакетов превышает стоимость самих САПР во много раз;

узкоспециализированные САПР ориентированы только на конкретные машины резки.

**Материалы и методы исследования.** Многие из указанных недостатков нашли решение в программном комплексе автоматизированного раскроя деталей из профильного металлопроката «Модуль раскроя» (рис. 1). В частности, решены задачи расчета рациональных размеров деловых отходов при раскрое, их учета и использования в последующих раскладках. Существенным отличием «Модуля раскроя» от других систем является также наличие модуля раскладки деталей для резки на отрезных станках, полностью автоматическое формирование технологической документации, отсутствие жесткой привязки к используемому технологическому оборудованию.

Основные функции «Модуля раскроя»:

формирование и ведение архива изделий, узлов и деталей с поддержкой структуры изделия; формирование и ведение баз данных материалов и сортиментов профильного металлопроката, в том числе отходов с автоматическим обновлением по результатам раскроя;

формирование заказов на раскрой;

оптимальная (рациональная) автоматизированная раскладка в автоматическом и интерактивном режимах деталей с учетом особенностей технологии раскроя произвольной формы на машинах термической резки, прямоугольной формы на гильотинных ножницах, линейного раскроя на отрезных станках;

учет и использование деловых отходов;

автоматизированный расчет КИМ и норм расхода материалов при построении схем раскладки;

автоматизированное формирование параметров траектории движения режущего элемента на машинах термической резки;

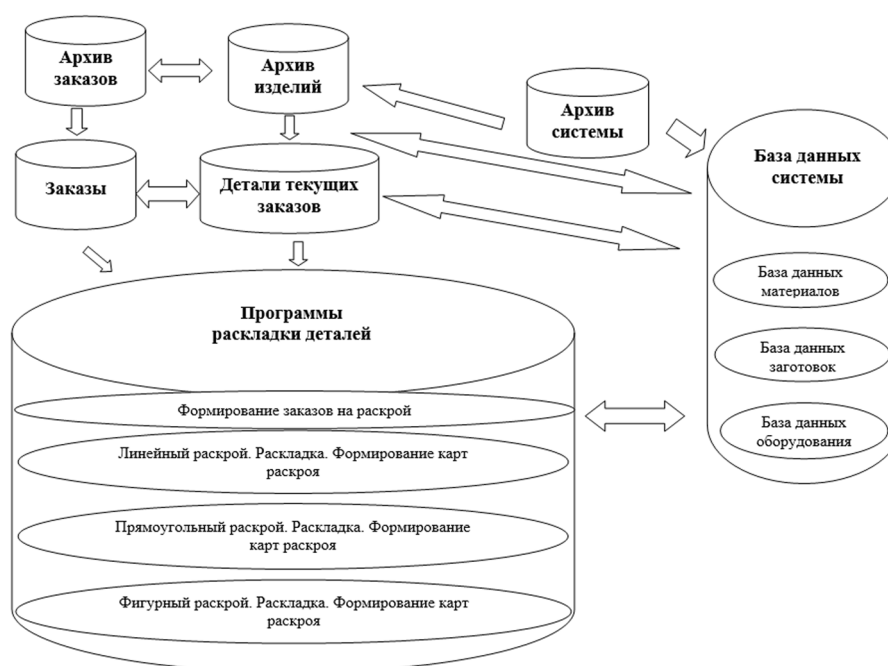


Рис. 1. Структурно-функциональная схема САПР «Модуль раскрой»

Fig. 1. Structural-functional scheme of CAM “Module nesting”

автоматизированное проектирование управляющих программ для устройств ЧПУ машин термической резки;

автоматизированное формирование выходных документов: карты раскроя, карты технологической информации и эскизов деталей;

формирование архива графических результатов раскладки по видам раскроя и показателей результатов раскладки;

возможность интеграции с информационными системами предприятий.

Основные компоненты «Модуля раскроя»:

архив изделий;

архив заказов;

база данных;

САПР раскроя деталей на машинах термической резки («Модуль фигурного раскроя»);

САПР раскроя деталей на гильотинных ножницах («Модуль прямоугольного раскроя»);

САПР раскроя деталей на отрезных станках («Модуль линейного раскроя»).

В системе «Модуль раскроя» использованы не только математические алгоритмы для оптимизации раскладки, но и эвристические методы раскладки (раскладка в одностипную полосу), учитывающие опыт технологов предприятий.

Линейная, прямоугольная и фигурная раскладки в «Модуле раскроя» выполняются по отдельным алгоритмам.

Линейная раскладка деталей осуществляется методом последовательно-одиночного размещения. При этом соблюдается принцип: от меньшего размера материала к большему и от большей детали к меньшей. То есть выбирается материал с минимальной длиной и проверяется, какая максимальная деталь может быть на нем разложена, затем после раскладки текущей детали на остатке выбирается следующая максимальная деталь, которая может быть разложена на остатке, и т. д. После автоматической раскладки предоставляется возможность пользователю скорректировать результаты раскладки в ручном режиме.

Указанная раскладка выполняется по методу последовательно-одиночного размещения. Сущность метода состоит в последовательном решении задач размещения очередного объекта относительно ранее установленных. В основе этого метода лежит естественный способ размеще-

ния всех геометрических объектов, устанавливая их по одному в области размещения с учетом условий взаимных непересечений с каждым ранее установленным объектом. При этом параметры размещения каждого устанавливаемого объекта выбираются так, чтобы оптимизировать некоторую функцию цели, адекватную функции цели основной задачи.

Метод носит приближенный характер и является детерминированным, то есть каждой последовательности перебора групп переменных соответствует одно решение.

Линейная раскладка выполняется по следующему алгоритму:

1. Выбираем материал с минимальными размерами:

$$\min(L_i), \text{ где } \forall_i = \overline{1, m}.$$

Устанавливаем длину материала с учетом расстояния от края материала  $RKL$ :

$$L_i = L_i - 2RKL.$$

2. Выбираем деталь с максимальным размером и с учетом припуска на деталь  $Pr_{ip_j}$ , укладываемую на этот материал:

$$l_j = \max(l_j + Pr_{ip_j}) \text{ при условии: } l_j < L_i, \forall_j = \overline{1, n}.$$

3. Определяем остаток материала  $L_{\text{ост}}$ :

$$L_{\text{ост}} = L_i - l_j.$$

4. Далее повторяем пункты 2–3 для  $L_{\text{ост}}$ . Если нет детали, укладываемой на остатке  $L_{\text{ост}}$ , то переходим к выбору следующего материала, то есть к пункту 1.

Прямоугольная и фигурная раскладки деталей выполняются по алгоритму, сущность которого состоит в следующем. Задан комплект, состоящий из  $n$  заготовок различных наименований, причем заготовок  $i$ -го наименования в него входит  $k_i$  штук,  $i = 1, n$ . Заготовки имеют сложную геометрическую форму с возможными внутренними вырезами. Имеется набор прямоугольных листов  $m$  типоразмеров, известно количество листов  $l_i$  каждого типоразмера. Необходимо заданный комплект заготовок разместить на листах из заданного ассортимента таким образом, чтобы коэффициент использования материала был максимальным. При этом должно выдерживаться минимально допустимое расстояние между заготовками. Необходимым условием решения этой задачи является то, что суммарное количество листов должно быть достаточным для размещения всех заготовок комплекта.

Представим заготовки в общем случае в виде многосвязных геометрических объектов  $S_i$ , границы которых заданы участками прямых и дуг окружностей. Для каждого объекта  $S_i$  определим его полюс  $\Omega_i$ .

Пусть  $K = \{S_i\}$ ,  $i = 1, n$  – множество таких объектов. Каждому элементу этого множества соответствует число  $k_i$ , определяющее количество заготовок  $i$ -го типа в комплекте.

Пусть  $S = \{S_i\}$ ,  $i = 1, N$  – мультимножество, порожденное множеством  $K$  с показателями повторений  $k_i$ :

$$N = \sum_{i=1}^n k_i.$$

Множество  $S$  содержит столько элементов  $S_i$  множества  $K$ , сколько их определено показателем  $k_i$ .

Пусть  $P = \{L_i\}$ ,  $i = 1, m$  – множество типоразмеров листов. Каждому элементу этого множества соответствует число  $l_i$ , определяющее количество листов данного типоразмера.

Пусть  $L = \{L_i\}$ ,  $i = 1, M$  – мультимножество, порожденное множеством  $P$  с показателями повторений  $l_i$ :

$$M = \sum_{i=1}^m l_i.$$



Построить раскройный план – это значит, что каждой заготовке из множества  $S$  необходимо поставить в соответствие некоторый лист из множества  $L$  и определить ее местоположение на этом листе. Другими словами, определить отображение:

$$\frac{F}{S} \rightarrow UxL,$$

где  $U = XY\Theta$  – пространство параметров размещения  $x, y, \theta_i$  объектов  $S, i = 1, N, L$  – множество прямоугольных областей размещения.

Отображение  $F$ , задающее размещение набора объектов на множестве областей, можно представить в виде суперпозиции двух отображений:

$$F = (f, z).$$

Отображение  $Z$  задает разбиение множества объектов  $S$  по областям  $L, \frac{Z}{S} \rightarrow L$ . Отображение  $f$  осуществляет размещение заготовок на листах,  $\frac{f}{S} \rightarrow U$ . Зададим отображение  $f$  вектором:

$$\vec{U} = (u_1, u_2, \dots, u_N),$$

где  $u_i = (x_i, y_i, \theta_i)$  – параметры размещения объекта  $S_i, i = 1, N$  в одной из областей множества  $L$ . Отображение  $Z$  зададим матрицей разбиения  $\|Z\|$ , элементы которой определяются следующим образом:

$$Z_{ij} = 1, \text{ если } S_i \in L_j;$$

$$Z_{ij} = 0, \text{ если } S_i \notin L_j,$$

и удовлетворяют условию:

$$\sum_{j=1} Z_{ij} = 1, \quad i = 1, N. \tag{1}$$

Матрица  $\|Z\|$  задает допустимое разбиение, если существует вектор  $\vec{U}$ , компоненты которого удовлетворяют условиям:

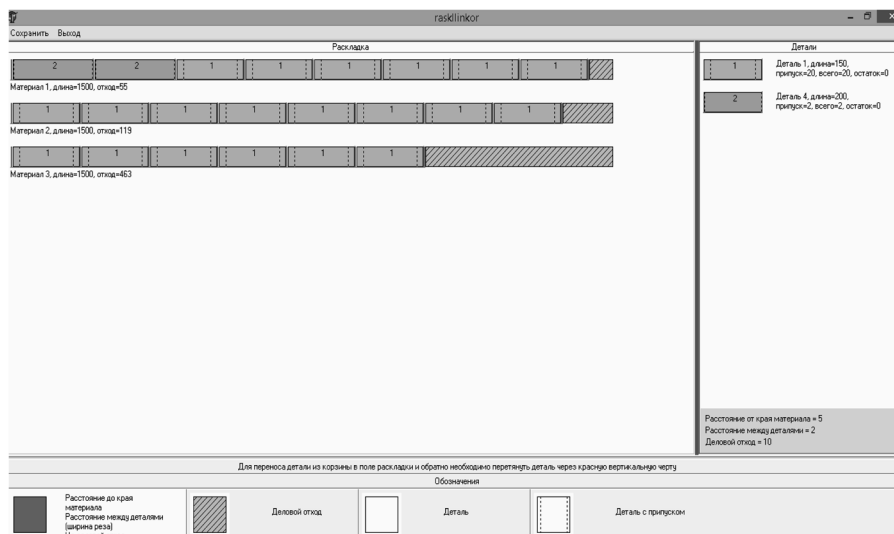


Рис. 2. Результат линейной раскладки в «Модуле линейного раскроя»

Fig. 2. The result of linear layout in the “Module of linear cutting”

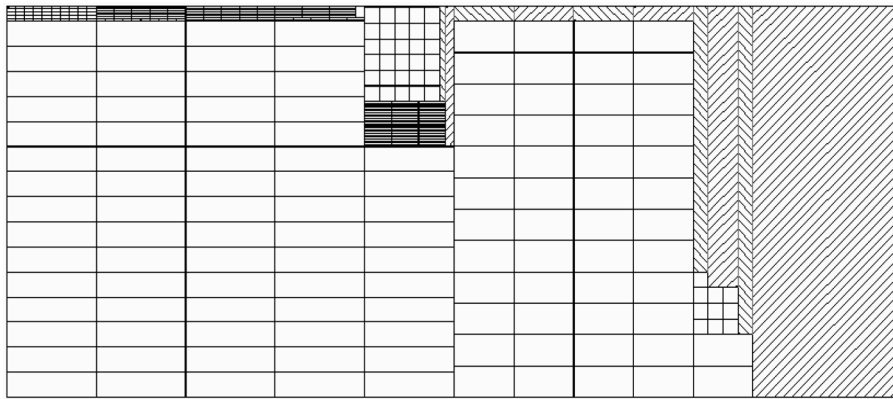


Рис. 3. Результат прямоугольной раскладки в «Модуле прямоугольного раскроя»  
 Fig. 3. The result of rectangular layout in the “Module of rectangular cutting”

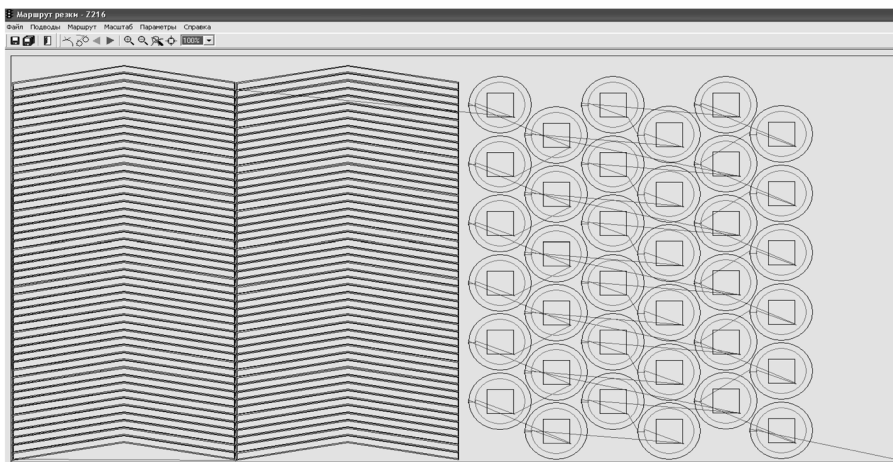


Рис. 4. Результат фигурной раскладки и построенный маршрут резки в «Модуле фигурного раскроя»  
 Fig. 4. The result of shaped layout and built cutting path in the “True shape nesting module”

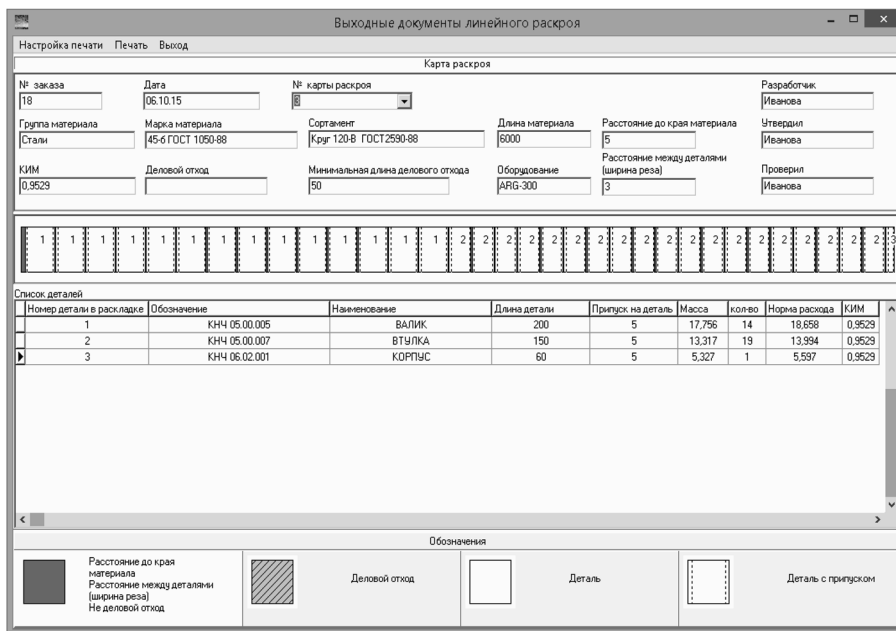


Рис. 5. Пример выходного документа (карта раскроя), спроектированного в программном комплексе «Модуль раскроя»  
 Fig. 5. An example of the output document (card cutting), designed in software package “Module nesting”

$$\begin{aligned}
 S_i(u_i) \subset Lk \forall Z_{ik} = 1, i = 1, N, k = 1, M, \\
 \text{int } S_i(u_i) \cap \text{int } S_j(u_j) = \emptyset \forall Z_{ik} = 1, Z_{jk} = 1, \\
 i, j = 1, N, k = 1, M.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Условия (2) задают область  $\hat{U}$  допустимых значений вектора  $\vec{U}$  и являются необходимыми условиями размещения объектов.

**Результаты и их обсуждение.** Результат линейной раскладки в «Модуле линейного раскроя» приведен на рис. 2.

Результаты прямоугольной и фигурной раскладок в «Модуле прямоугольного раскроя» и «Модуле фигурного раскроя» представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Пример выходного документа (карта раскроя), спроектированного в САПР «Модуль раскроя», приведен на рис. 5.

**Заключение.** Приведенные алгоритмы и методики реализованы в «Модуле раскроя», разработанном ОАО «Институт БЕЛОРГСТАНКИНПРОМ», который функционирует на ряде предприятий Республики Беларусь.

Экономический эффект от внедрения системы по сравнению с неавтоматизированным способом раскладки достигается за счет повышения коэффициента использования металла при автоматизированной раскладке на заготовке, в том числе за счет использования отходов; снижения трудоемкости раскладки деталей, а также подготовки управляющих программ для машин термической резки металла.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность М. М. Жадовичу за помощь при подготовке введения, Б. М. Штейн – за помощь в оформлении.

### Acknowledgement

The authors are thankful to M.M. Jadovich for helping in preparing the Introduction, to B.M. Shtein for assistance in typography.

### Список использованных источников

1. Аверченков, В. И. Автоматизация проектирования технологических процессов / В. И. Аверченков, Ю. М. Казаков. – Брянск: БГТУ, 2004. – 228 с.
2. Акулович, Л. М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении / Л. М. Акулович, В. К. Шелег. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. – 488 с.
3. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 430 с.
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.
5. 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.

### References

1. Averchenkov V.I., Kazakov Yu.M. *Design automation of technological processes*. Bryansk, Bryansk State Technical University, 2004. 228 p. (In Russian).
2. Akulovich L.M., Sheleg V.K. *Fundamentals of the automated designing of technological processes in mechanical engineering*. Minsk, Novoe znanie Publ.; Moscow, INFRA-M Publ., 2012. 488 p. (In Russian).
3. Norenkov I.P. *Fundamentals of the automated designing*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2009, 430 p. (In Russian).
4. Gil' N.I., Komyak V.M. On one algorithm of drawing up of rational schemes of cutting the same type of sheets into multiply workpieces. *Teoriya i metody avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Theory and methods of computer-aided design], Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the Academy of Sciences of the BSSR, 1985, iss. 2, pp. 123–128. (In Russian).
5. Kartashov A.V., Luchentsova N.V. One implementation of the method of series and single accommodation for the solution of the problem of optimal placement of circles of different radii in a band. *Radioelektronnyye i komp'yuternyye sistemy* [Radio Electronic and Computer Systems], 2007, no. 2, pp. 90–94. (In Russian).



### Информация об авторах

*Акулович Леонид Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов», Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

*Ермашкевич Дмитрий Брониславович* – заместитель директора, Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ЛАКШМИ» (ул. Академика Купревича, 1, корп. 1, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mitrich31@mail.ru

### Для цитирования

Акулович, Л. М. Автоматизация раскроя заготовок деталей из профильного металлопроката / Л. М. Акулович, Д. Б. Ермашкевич // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 1. – С. 76–84.

### Information about the authors

*Akulovich Leonid Mikhailovich* – D. Sc. (Engineering), Professor at the Department of “Metal Technology”, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

*Yermashkevich Dmitry Bronislavovich* – Deputy Director, “LAKSHMI” Scientific and Production Ltd. Co (1/1, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mitrich31@mail.ru

### For citation

Akulovich L.M., Yermashkevich D.B. Automation of cutting of blanks from profiled rolled metal. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnych navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 1, pp. 76–84. (In Russian).