

**Акулович Л.М.**

Белорусский государственный аграрный техни-  
ческий университет,  
г. Минск, Беларусь,  
E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

**Ермашкевич Д.Б.**

Научно-производственное общество с ограни-  
ченной ответственностью «ЛАКШМИ»,  
г. Минск, Беларусь  
E-mail: mitrich31@mail.ru

**МЕТОД СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ПРИ  
КОМПЬЮТЕРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
ИЗ МЕТАЛЛОПРОКАТА**

УДК 658.51:621.81

*Расширение номенклатуры изделий, выпускаемых машиностроительными пред-  
приятиями, и ограниченные сроки, отводимыми на технологическую подготовку прои-  
зводства, привели к увеличению доли металлопроката для изготовления заготовок, что  
обусловлено экономической целесообразностью. Вместе с тем, для резки листового ме-  
таллопроката появились новые высокоэффективные технологии и оборудование, тех-  
нологические возможности которого позволяют во многих случаях производить обра-  
ботку контуров деталей окончательно с обеспечением заданных чертежом требований  
точности и шероховатости поверхностей без дальнейшего использования операций об-  
работки резанием. Однако используемые в машиностроении системы автоматизиро-  
ванного проектирования технологических процессов (САПР ТП) не учитывают воз-  
можности современного оборудования для раскроя листового металлопроката, так как  
заложенные в них технологические решения не соответствуют техническому уровню  
современного оборудования.*

*Поэтому возникает необходимость в разработке новых технологических реше-  
ний, обеспечивающих выполнение принципа максимальной концентрации операций, и их  
реализации в САПР ТП путем совмещения операций термической резки и последующей  
механической обработки при автоматизированного проектировании технологий мето-  
дом структурного синтеза в рамках единой интегрированной системы.*

*В работе описан метод структурного синтеза, использованный в САПР ТП, при  
проектировании технологий изготовления деталей из металлопроката, основанный на  
использовании конструктивно-технологических элементов (КТЭ). Описана методика  
экспериментальных исследований, позволивших определить эти условия. Предложен  
метод определения предпочтительного варианта технологического маршрута, позво-  
ляющий выбирать при автоматизированном проектировании вариант технологии с ми-  
нимальной трудоемкостью изготовления деталей из металлопроката.*

**Ключевые слова:** *металлопрокат, автоматизация проектирования, технологи-  
ческий процесс, режимы проектирования, синтез маршрутов и операций, конструктор-  
ско-технологический элемент, раскрой листового металла, механическая обработка.*

**Введение.** Машины и устройства механизации сельскохозяйственных работ яв-  
ляются металлоемкими и технологически сложными, их изготовление требует значи-  
тельных материальных и трудовых затрат [1].

Расширение номенклатуры изделий, выпускаемых машиностроительными пред-  
приятиями, и ограниченные сроки, отводимыми на технологическую подготовку прои-  
зводства, привели к увеличению доли металлопроката для изготовления заготовок. В  
сельхоз- и станкостроении она достигает 80%, что обусловлено экономической целесо-  
образностью.

Структура производства машиностроительных и ремонтных предприятий сель-  
скохозяйственной техники, детали которой изготавливаются в основном из металло-

проката, различается по составу имеющихся технологических переделов, однако типичным для всех предприятий является: раскрой листового проката на гильотинных ножницах или на машинах термической резки, лазерных установках, раскрой круглого и профильного металлопроката на разрезных станках (ленточно-отрезных, абразивно-отрезных, фрезерно-отрезных станках), холодная штамповка, механическая обработка (в основном на универсальном оборудовании), сварка, лакокрасочные и гальванические покрытия [2,3].

Причем, операции механической обработки и раскроя (особенно фигурного, выполняемого на машинах термической резки) являются наиболее трудоемкими как при их выполнении, так и при проектировании в рамках технологической подготовки производства.

Сокращение трудоемкости выполнения этих операций сегодня успешно достигается за счет применения новейшего прогрессивного технологического оборудования. Для резки листового металлопроката появились новые высокоэффективные технологии и оборудование, технологические возможности которого позволяют во многих случаях производить обработку контуров деталей окончательно с обеспечением в ряде случаев заданных чертежом требований точности и шероховатости поверхностей без последующей механической обработки.

Для сокращения трудоемкости технологической подготовки механообрабатывающего и раскройного производств используются соответствующие системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) и так называемые nesting-системы.

Большинство известных [4-8] САПР ТП осуществляют проектирование в интерактивно-алгоритмическом режиме с большей или меньшей степенью автоматизации проектных процедур, а для обработки деталей сложной конфигурации (например, корпусных и т.п.) – в диалоговом режиме с незначительной степенью автоматизации, в том числе с использованием текстового редактора Word.

Современные САПР ТП реализуют следующие методы проектирования: автоматический, полуавтоматический, интерактивный (диалоговый), «по аналогу» [8, 9]. При раскрое заготовок деталей произвольной формы из листового металлопроката на машинах термической резки (МТР) с ЧПУ используются локальные nesting-системы, настройки к графическим пакетам для автоматического или ручного размещения контуров деталей на листах, а также специализированные программные комплексы, которые поставляются заказчикам совместно с машинами лазерной и плазменной резки [10].

Однако, в настоящее время развитие технологического оборудования несколько опережает развитие средств автоматизации проектирования технологии. В новейших образцах станков все чаще появляются новые функции, характерные для другого вида оборудования. Актуальной остается тенденция максимальной концентрации операций на одном рабочем месте.

Технологические возможности современного оборудования термической резки листового материала, оборудования для раскроя прямоугольных деталей на гильотинных ножницах, а также раскроя круглого и профильного проката на разрезных станках значительно расширились, что позволяет во многих случаях производить обработку отверстий, окон, контуров деталей окончательно с обеспечением заданных чертежом требований точности и шероховатости поверхностей. Отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал, возможность раскроя сложных контуров деталей из листового материала с обеспечением необходимой точности взаимного расположения вырезаемых контуров заготовки являются посылкой использования способов

термической резки совместно с операциями механической обработки в единых технологических процессах.

На предприятиях все еще принято разделять заготовительное и основное производства с использованием соответствующих видов технологического оборудования в зависимости от получаемых качества и точности обработанных поверхностей. В заготовительных цехах установлено оборудование и для черновой механической обработки, так называемых «обдирочных» операций. Как правило, это изношенные предшествующей длительной эксплуатацией в основном производстве станки, которые уже не обеспечивают паспортную точность и качество обрабатываемых на них поверхностей.

Используемые сегодня на предприятиях САПР ТП также следуют этим традициям разделения производства на заготовительное, основное и т.д. Например, в САПР ТП Pramen, разработанной ОАО «Институт Белогрстанкинпром», (г. Минск, Республика Беларусь) заложены технологические алгоритмы, в которых использована упомянутая тенденция. В САПР ТП Pramen с использованием автоматического режима формируются технологические процессы с маршрутами последовательного прохождения стадий заготовительного и основного производств [8]. Доработка же полученных техпроцессов в диалоговом режиме под современные условия не дает полноценных результатов, так как САПР ТП является локальным модулем и не решает задач раскройного производства – получение оптимальной раскладки, формирование маршрутов резки и т.д. Для решения задач раскройного производства приходится использовать nesting-систему, которая в свою очередь также является локальным модулем, но предназначенным для решения задач раскройного производства. Таким образом получается многократный ручной ввод одинаковых данных, что ведет к возникновению ошибок, снижению качества проектирования, а также к все еще высокой трудоемкости, несмотря на автоматизацию процесса проектирования.

Однако, с развитием технического прогресса и появлением нового прогрессивного оборудования, грань между заготовительным и основным производствами постепенно стирается. Новые типы и виды технологического оборудования, которые ранее было принято использовать только в заготовительном производстве из-за низкой точности и качества получаемых поверхностей, уже сегодня могут заменить некоторое технологическое оборудование из основного производства.

Например, на современных установках для термической резки можно получить обработанные поверхности, идентичные по точности и качеству с поверхностями, получаемыми некоторыми видами механической обработки (точение, фрезерование и т.д.). Кроме того, такие установки могут оснащаться и дополнительными головками для приводных инструментов с целью выполнения операций термической резки и последующей механической обработки за одну установку заготовки. Т.е., используется принцип максимальной концентрации операций.

С другой стороны, оборудование для предварительной механической обработки развивается в сторону вытеснения шлифовального оборудования, традиционно применяемого для финишной обработки.

Таким образом, при использовании современного оборудования для термической резки, позволит отказаться от черновых, а в ряде случаев и от чистовых операций механической обработки. А поверхности, получаемые лазерной резкой, уже приближаются по качеству к поверхностям, полученным на шлифовальном оборудовании.

Отсюда следует, что технологические решения, заложенные в существующих САПР ТП уже морально устаревают и не соответствуют современным тенденциям развития технологического оборудования. Поэтому возникает необходимость в разра-

ботке и реализации в САПР методов принятия технологических решений, обеспечивающих выполнение принципа максимальной концентрации операций.

Для деталей, изготавливаемых из металлопроката, это может быть реализовано через совмещение автоматизированного проектирования технологий термической резки и последующей механической обработки в рамках единой интегрированной системы.

**Постановка проблемы.** Совмещение автоматизированного проектирования технологий термической резки и последующей механической обработки возможно реализовать посредством структурного синтеза технологических процессов изготовления деталей машин из металлопроката, который основан на использовании конструктивно-технологических элементов (КТЭ). КТЭ – это элементарная поверхность (плоскость, цилиндр и др.) или совокупность элементарных поверхностей, имеющих общее конструктивное назначение (фаска, канавка и т.п.) и характеризующихся общим маршрутом изготовления. Для каждого КТЭ должны быть определены геометрические параметры (геометрические размеры, шероховатость и т.д.), варианты технологии обработки (маршрут, операции, переходы), а также условия выбора требуемого варианта технологии обработки.

Любую деталь, изготавливаемую из металлопроката, можно представить в виде совокупности ее КТЭ (рис. 1). Соответственно, конструкторско-технологическая модель детали – это совокупность входящих в нее КТЭ. На основании фактических значений геометрических параметров для каждого КТЭ происходит выбор требуемого варианта технологии его обработки.

При автоматизированном проектировании формирование технологического процесса изготовления детали методом структурного синтеза происходит путем совмещения выбранных вариантов обработки всех КТЭ детали. Технологический процесс изготовления детали синтезируется из выбранных вариантов технологии обработки всех входящих в эту деталь КТЭ.

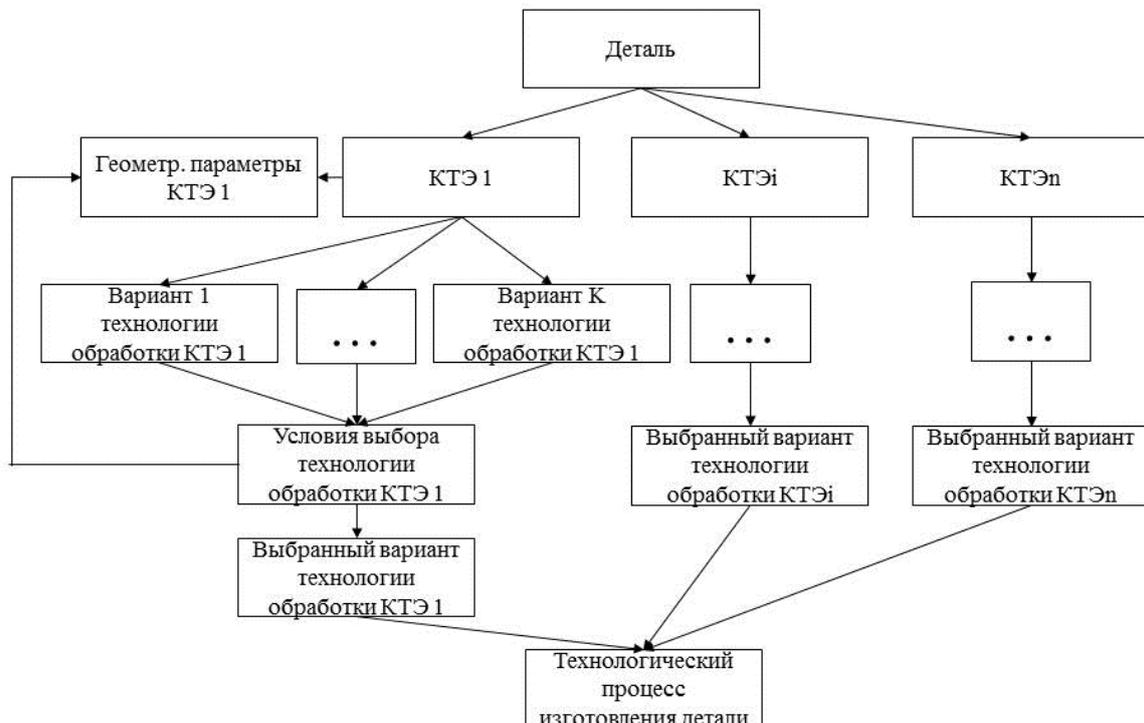
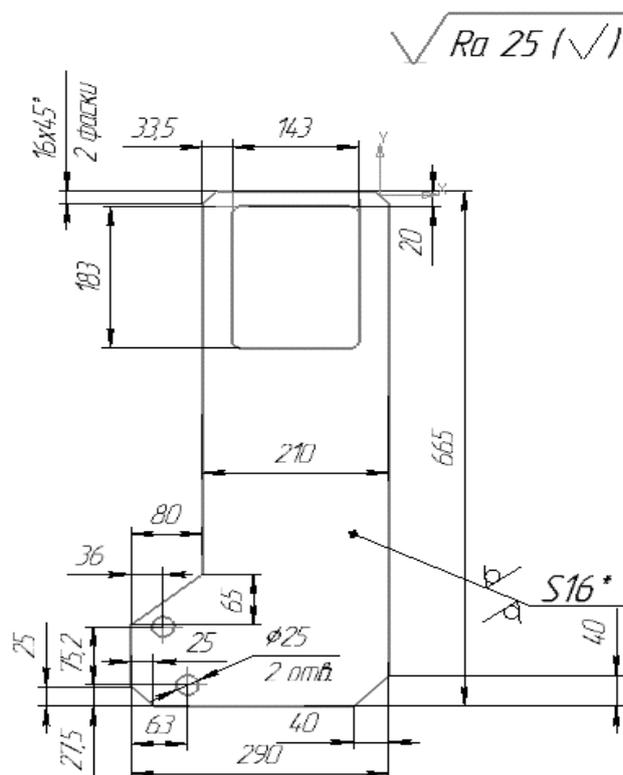


Рис. 1 – Схема формирования технологического процесса изготовления детали методом структурного синтеза

В качестве примера на рис. 2 приведен эскиз типовой детали Фланец, изготавливаемой из металлопроката.



- 1.\* Размеры для справок.
2. Общие допуски по ГОСТ 30893.1-т.
3. Остальные ТТ по СТБ 1014-95.

Рис. 2 – Эскиз детали «Фланец»

Конструкторско-технологическую модель такой детали можно представить в виде совокупности 7-ми КТЭ (рис. 3): КТЭ 1 – плоская поверхность с фасками (геометрические параметры: L1, Ф1, Ф2); КТЭ 2 – окно в сплошном материале на плоской поверхности (геометрические параметры: L1, L2, L3, L4, L5); КТЭ 3 – плоская поверхность со скосом (геометрические параметры: L1, L2); КТЭ 4 – плоская поверхность со скосом (геометрические параметры: L1, L2); КТЭ 5 (2 шт.) – отверстие цилиндрическое в сплошном материале на плоской поверхности (геометрические параметры: D1, L1); КТЭ 6 – плоская поверхность со скосом (геометрические параметры: L1, L2); КТЭ 7 (4 шт.) – плоская поверхность (геометрические параметры: L1).

Каждый из КТЭ, входящих в рассматриваемую деталь, имеет несколько вариантов технологии обработки в зависимости от геометрических параметров и шероховатости поверхности. Требуемый вариант технологии обработки КТЭ выбирается путем сравнения значений геометрических параметров КТЭ и шероховатости поверхностей, взятых из чертежа детали, с условиями выбора вариантов технологии обработки.

Использование метода структурного синтеза эффективно при наличии наработанной базы данных КТЭ [11].

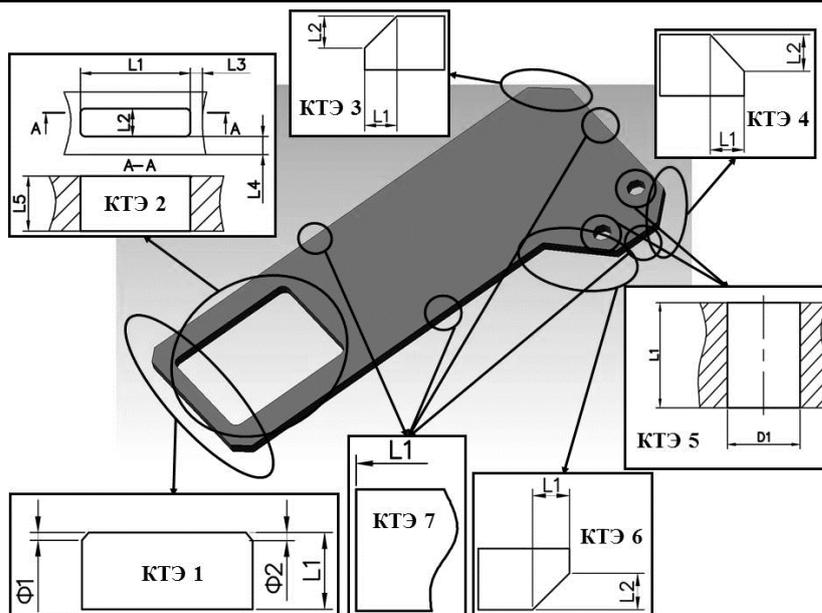


Рис. 3 – Схема конструкторско-технологической модели детали

Для реализации метода структурного синтеза в интегрированной САПР ТП разработана база данных КТЭ, в основу которой вошла библиотека КТЭ, содержащая 46 видов различных поверхностей (плоские, отверстия, пазы, канавки и т.д.) со схемами их обработки с операциями лазерной и плазменной резки, а также условиями выбора оптимальных схем обработки в зависимости от требуемой точности.

**Результаты исследований.** Для определения граничных условий назначения операций термической резки в технологические процессы изготовления деталей машин из металлопроката были проведены экспериментальные исследования.

Цель экспериментальных исследований – определить влияние современных способов термической резки металлопроката на геометрические параметры поверхности реза.

Объектом наблюдений при экспериментальных исследованиях геометрической точности обработанных поверхностей выбрана величина действительного диаметрального размера. Качество обработанных поверхностей оценивалось по параметру  $Ra$  шероховатости поверхности (среднее арифметическое отклонение профиля) реза.

Из листового металлопроката 345-09Г2С-св-2 ГОСТ 19281-89 различной толщины плазменной и лазерной резкой вырезали заготовки деталей круглой формы определенных диаметров (по 5 штук на определенный диаметр из листов каждой толщины), на которых измеряли диаметральный ( $D\Phi$ ) размер и параметр  $Ra$  шероховатости поверхности реза. Варьируемые факторы: толщина листа  $S$ , мм и радиус реза  $R$ , мм. По фактической величине диаметров вычисляли отклонения  $\Delta$  от номинальных размеров (мм), после чего определяли квалитеты по ГОСТ 25346-89. Измерение действительных диаметральных размеров производили по ГОСТ 26433.1-89 с использованием штангенциркуля электронного ШЦЦ-1-300 (цена деления 0,01мм). Шероховатость поверхности измеряли профилометром MITUTOYO SJ-201P.

При проведении экспериментальных исследований для вырезки заготовок использовали оборудование плазменной и лазерной резки:

– портальный станок для плазменной и газовой резки VanadProxima (Portal) HDSeries;

– консольный станок для лазерной резки VANAD MIRON LASER (Fiber).

В результате обработки полученных экспериментальных данных методами математической статистики [12-14] были определены уравнения регрессии второго порядка,

построены графические зависимости влияния варьируемых факторов на величины отклонений от номинальных размеров и параметры шероховатости  $Ra$  поверхностей, полученных плазменной и лазерной резкой.

Уравнения регрессии второго порядка, отражающие зависимость величин отклонений от номинальных размеров ( $\Delta$ ) и параметров шероховатости  $Ra$  и от варьируемых факторов при плазменной резке:

$$\Delta = 0,588 + 0,230 \cdot S - 0,020 \cdot R - 0,020 \cdot S \cdot R - 0,012 \cdot S^2 + 0,010 \cdot R^2, \quad (1)$$

$$Ra = 22,607 + 17,825 \cdot S - 2,189 \cdot R - 0,450 \cdot S \cdot R + 5,208 \cdot S^2 + 2,006 \cdot R^2. \quad (2)$$

Уравнения регрессии второго порядка, отражающие зависимость величин отклонений от номинальных размеров ( $\Delta$ ) и параметров шероховатости  $Ra$  и от варьируемых факторов при лазерной резке:

$$\Delta = 0,152 + 0,055 \cdot S + 0,023 \cdot R + 0,015 \cdot S^2 + 0,002 \cdot R^2, \quad (3)$$

$$Ra = 6,241 + 1,932 \cdot S - 0,334 \cdot R + 0,0002 \cdot S \cdot R - 0,007 \cdot S^2 + 0,0002 \cdot R^2. \quad (4)$$

Графическое представление уравнений (1) – (4) приведено на рис. 4.

Все полученные статистические модели оценивались на адекватность по критерию Фишера и являются адекватными при 95%-м уровне значимости.

С учетом результатов экспериментальных исследований установлены величины параметров точности и шероховатости ( $Ra$ ) поверхностей заготовок: при плазменной резке 10-14-й квалитеты точности,  $Ra$  (8 – 63) мкм, при лазерной резке 10-12-й квалитеты точности,  $Ra$  (2,5 – 10,0) мкм.

Результаты исследований позволили разработать рациональные схемы обработки и установить технологические условия назначения операций термической резки, создать базу данных и библиотеку КТЭ, необходимую при проектировании технологических процессов изготовления деталей машин из металлопроката методом структурного синтеза.

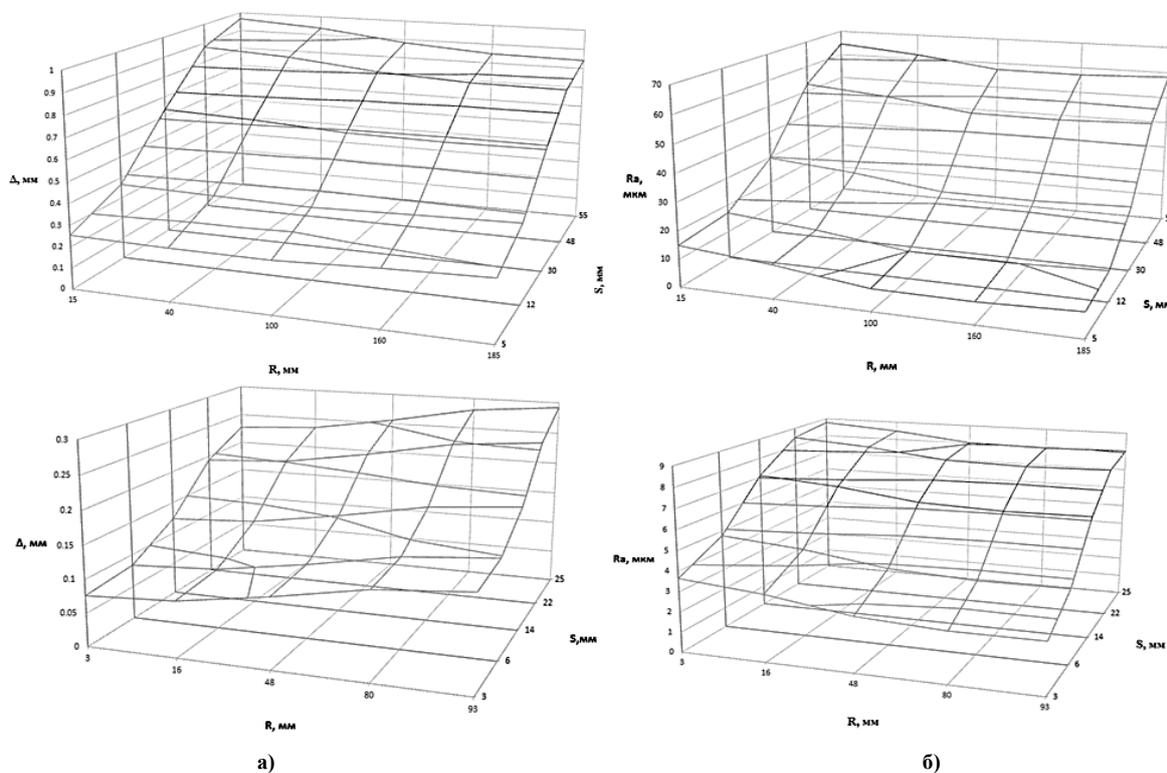


Рис. 4 – Графическое представление статистических моделей процессов:  
 а – плазменной резки; б – лазерной резки

Структура и фрагмент библиотеки КТЭ приведены соответственно на рис. 5 и рис. 6.

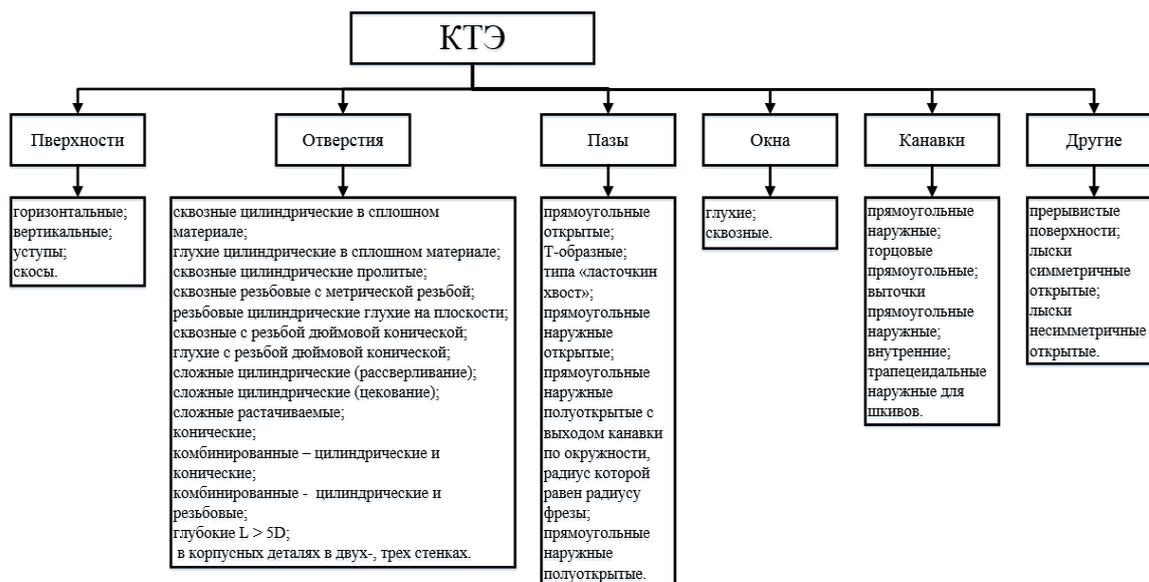


Рис. 5 – Структура библиотеки КТЭ

<p><b>КТЭ - окно в сплошном материале на плоской поверхности</b></p>	<p>Шероховатость поверхности окна <math>Ra \geq 3.2</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– фрезерование концевой фрезой или долбление (сквозные)</li> <li>– фрезерование концевой фрезой</li> </ul>
	<p>Шероховатость поверхности окна <math>Ra \geq 10.0</math>  <math>S \leq 25</math> мм                  Квалитет Н12 и ниже</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– фрезерование концевой фрезой или долбление (сквозные)</li> <li>– фрезерование концевой фрезой</li> <li>– лазерная резка</li> <li>– фрезерование концевой фрезой</li> </ul>
	<p>Шероховатость поверхности окна <math>Ra \geq 16.0</math>  <math>25 \text{ мм} &lt; S \leq 55 \text{ мм}</math>                  Квалитет Н14 и ниже</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– фрезерование концевой фрезой или долбление (сквозные)</li> <li>– фрезерование концевой фрезой</li> <li>– плазменная резка</li> <li>– фрезерование концевой фрезой</li> </ul>

Рис. 6 – Фрагмент библиотеки КТЭ

Требуемые варианты технологии обработки КТЭ можно выбрать сравнением настоящих значений геометрических параметров КТЭ с чертежа детали с условиями выбора вариантов технологии обработки.

Таким образом, после проверки геометрических параметров КТЭ с чертежа детали с условиями выбора требуемого варианта технологии обработки, окончательная технология изготовления детали имеет 3 варианта:

*Вариант 1:* лазерная резка наружных поверхностей и внутренних поверхностей (отверстия, окно); зенкование фасок в отверстиях.

*Вариант 2:* плазменная резка наружных поверхностей и внутренних поверхностей (отверстия, окно); фрезерование чистовое наружных поверхностей и окна; - расверливание двух отверстий; зенкование фасок в отверстиях.

*Вариант 3:* фрезерование черновое наружных поверхностей и окна; фрезерование чистовое наружных поверхностей и окна; сверление двух отверстий; расверливание двух отверстий; зенкование фасок в отверстиях.

В случае, когда после работы базы данных КТЭ, предлагается несколько вариантов маршрута обработки, для определения предпочтительного варианта технологии обработки целесообразно воспользоваться предложенным методом выбора предпочтительного варианта технологии обработки, который основан на теории графов [15].

Для каждого из вариантов технологии обработки необходимо построить по ориентированному графу (орграфу), отражающему связи КТЭ, из которых состоит рассматриваемая деталь, и технологические операции ее обработки.

Перед построением орграфов необходимо составить матрицу допустимых сочетаний КТЭ и технологических операций их обработки, а каждой технологической операции присвоить порядковый номер для удобства отображения в орграфе.

Ребра орграфов – движение заготовки по техпроцессу в соответствии с вариантом маршрута обработки.

Определив пути (маршруты) построенных орграфов, можно определить предпочтительный вариант маршрута обработки.

Предпочтительный вариант маршрута обработки выбирается исходя из двух условий:

1) орграф предпочтительного варианта маршрута обработки имеет наименьший путь (маршрут). Данное условие отражает необходимость максимальной концентрации обработки на одном рабочем месте;

2) за предпочтительный принимаем вариант маршрута обработки с минимальной трудоемкостью входящих в него технологических операций.

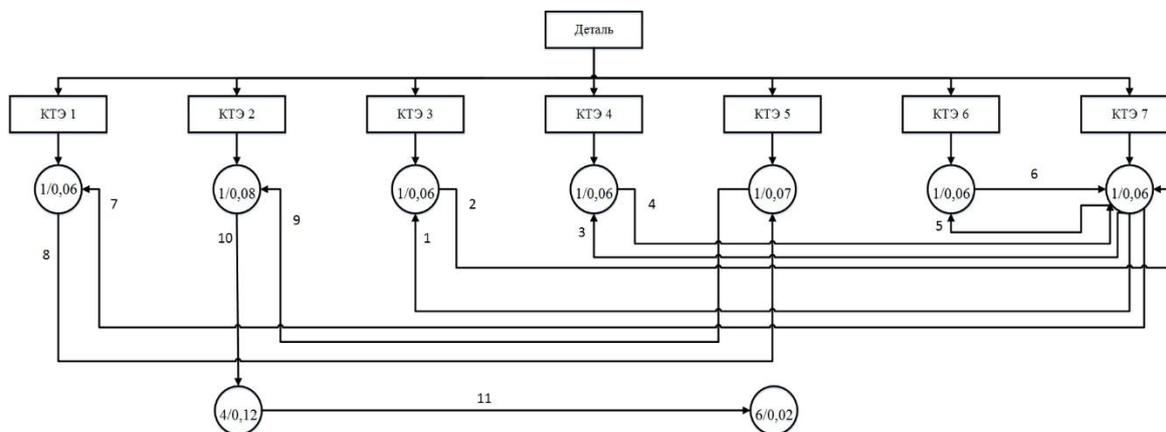
В случаях, когда одному из этих условий удовлетворяет один вариант маршрута обработки, а второму условию – другой, предпочтительный вариант из двух следует выбирать, учитывая производственные условия в данный момент (загрузку требуемого технологического оборудования и т.д.).

Матрица допустимых сочетаний КТЭ и технологических операций их обработки детали Фланец приведена на рис. 7.

Техн. операции		КТЭ	КТЭ1	КТЭ2	КТЭ3	КТЭ4	КТЭ5	КТЭ6	КТЭ7
№ опер.	Наименование операции								
1	Лазерная резка	X(0,06)	X(0,08)	X(0,06)	X(0,06)	X(0,07)	X(0,06)	X(0,06)	X(0,06)
2	Плазменная резка	X(0,04)	X(0,07)	X(0,04)	X(0,04)	X(0,05)	X(0,04)	X(0,04)	X(0,04)
3	Фрезерная 1 (черновая)	X(0,1)	X(0,12)	X(0,1)	X(0,1)		X(0,1)	X(0,1)	X(0,1)
4	Фрезерная 2 (чистовая)	X(0,1)	X(0,12)	X(0,1)	X(0,1)		X(0,1)	X(0,1)	X(0,1)
5	Сверлильная 1 (сверление, рассверливание)					X(0,04)			
6	Сверлильная 2 (зенкование фасок)					X(0,02)			

**Рис. 7 – Матрица допустимых сочетаний КТЭ и технологических операций их обработки**

Орграфы связей КТЭ, из которых состоит рассматриваемая деталь, и технологических операций ее обработки по вариантам 1-3 приведены соответственно на рис. 8-10.



**Рис. 8 – Орграф связей КТЭ, из которых состоит рассматриваемая деталь, и технологических операций ее обработки по варианту 1**

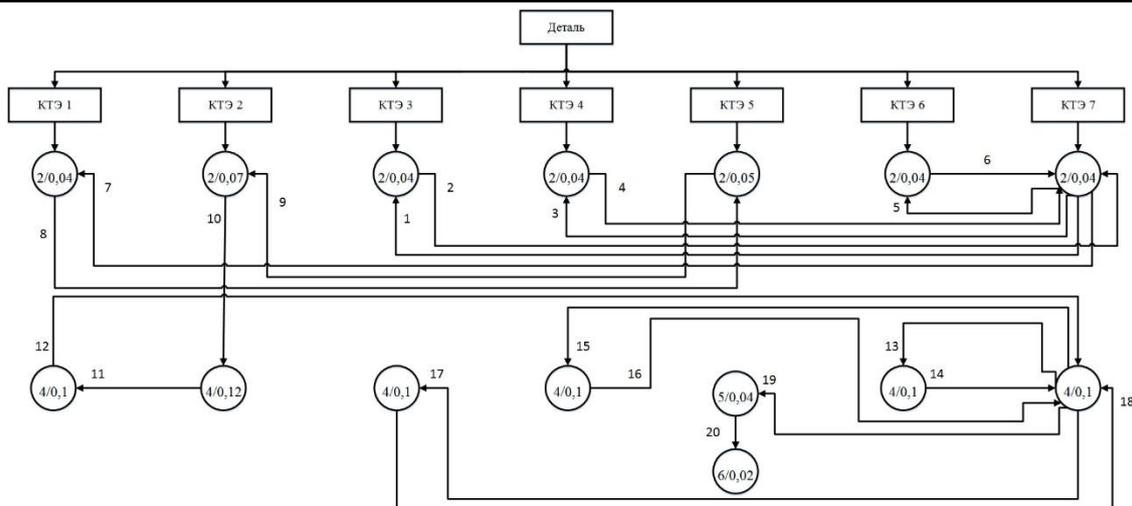


Рис. 9 – Орграф связей КТЭ, из которых состоит рассматриваемая деталь, и технологических операций ее обработки по варианту 2

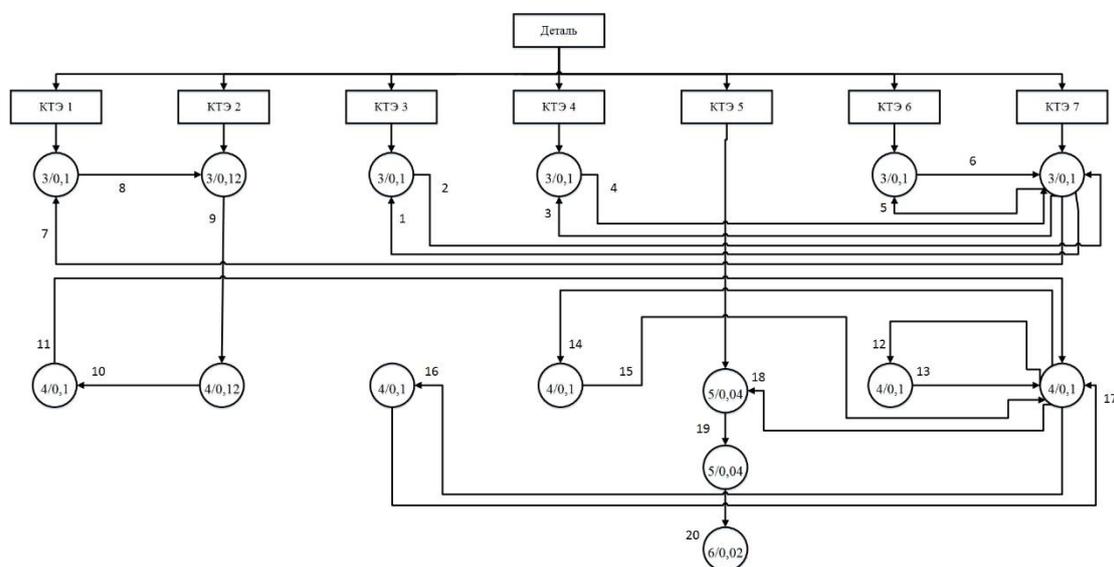


Рис. 10 – Орграф связей КТЭ, из которых состоит рассматриваемая деталь, и технологических операций ее обработки по варианту 3

Таким образом, путь (маршрут) орграфа, приведенного на рис. 8 равен  $K_1=11$  (при суммарном основном времени  $T_{\text{сумм1}}=0,59$  ч.), а орграфов, приведенных на рис. 9 и 10, соответственно  $K_2=20$  (при  $T_{\text{сумм2}}=1,0$  ч.) и  $K_3=20$  ( $T_{\text{сумм3}}=1,34$  ч.). Отсюда следует, что предпочтительный вариант маршрута обработки рассматриваемой детали является вариант № 1.

#### Выводы:

1. Экспериментальными исследованиями параметров геометрической точности и шероховатости поверхностей заготовок, изготавливаемых из листового проката современными методами термической резки, определены граничные условия назначения технологических операций термической резки в технологические процессы их изготовления:

- при плазменной резке 14-й квалитет точности (для любой толщины листа), шероховатость: не более  $Ra16.0$  мкм (для листов толщиной не более 12 мм),  $Ra32.0$  мкм (для листов толщиной более 12 и не более 30 мм),  $Ra50.0$  (для листов толщиной более 30 мм и не более 48 мм),  $Ra63.0$  (для листов толщиной более 48 мм и не более 55 мм);

- при лазерной резке 12-й квалитет точности, шероховатость не более  $Ra10.0$  мкм.

Результаты исследований позволили разработать рациональные схемы обработки и установить технологические условия назначения операций термической резки, создать базу данных и библиотеку конструктивно-технологических элементов, содержащую массивы параметризованных функциональных модулей с операциями механической обработки и термической резки и необходимую при проектировании технологических процессов изготовления деталей машин из металлопроката методом структурного синтеза.

2. Разработан метод структурного синтеза технологических процессов изготовления деталей машин из металлопроката, основанный на использовании 46-ти конструктивно-технологических элементов для операций термической резки и механической обработки, каждый из которых обладает иерархической структурой и представляет собой самостоятельный объект с набором рациональных типовых технологических маршрутов обработки, учитывающих возможности современного технологического оборудования для механической обработки и термической резки, что позволило обосновать и впервые автоматизировать проектирование технологических процессов изготовления деталей машин из металлопроката сочетанием операций термической резки и механической обработки.

3. Разработан метод определения предпочтительного варианта технологического маршрута изготовления деталей машин из металлопроката при сквозном компьютерном проектировании технологических процессов, основанный на матричном представлении каждого варианта и поиске на орграфах наименьшего пути (маршрута), отражающего связи конструктивно-технологических элементов, из которых состоит рассматриваемая деталь и технологические операции ее обработки. Предложенный метод позволяет выбирать вариант технологии с минимальной трудоемкостью изготовления деталей из металлопроката.

### **Литература:**

1. Черепанов, С.С. Использование земледельческих агрегатов / Часть 1,2 – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2000. – 668 с.
2. Филонов, И.П. Проектирование технологических процессов в машиностроении : учеб. пособие для вузов / И.П. Филонов [и др.]; под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт. 2003. – 910 с.
3. Жолобов, А.А. Технология автоматизированного производства: Учебник для вузов / А.А. Жолобов. – Минск: ДизайнПРО. 2000. – 623 с.
4. Хармац И. Компас-Автопроект – технологическая подготовка производства в едином информационном пространстве САПР и графика. №9. 2002. – С. 23-30.
5. Попок, Н.Н. Система автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей на станкостроительных предприятиях Витебской области / Н.Н. Попок, Н.В. Беляков, В.И. Ольшанский, Ю.Е. Махаринский, М.М. Жадович, Д.Б. Ермашкевич, А.В. Белецкий, В.В. Величко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиностроение, технологии. 2011. №11. – С. 2-11.
6. Куликов, Д.Д. Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства / Часть 7. Системы проектирования технологических процессов / Куликов Д. Д., Яблочников Е.И, Бабанин В.С. Учебно-методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 136 с.
7. Проектирование технологического процесса механической обработки в САПР ТП ВЕРТИКАЛЬ. Методические указания. ФГОУВПО «Сибирский федеральный университет». Хакасский технический институт. – Абакан, 2010. – 49 с.

8. Система автоматизированного проектирования технологических процессов механической обработки деталей PRAMEN. Руководство пользователя. ОРГС 4664.013.ИЗ. – Минск : ОАО «Институт Белоргстанкинпром», 2005. – 135 с.
9. Гривачевский, А.Г. Функциональная структура системы автоматизированного проектирования технологических процессов для машиностроительных предприятий / А.Г. Гривачевский, Д.Б. Ермашкевич, Р.Л. Кулик, Б.М. Штейн // Проблемы создания информационных технологий : сб. научных трудов / Под ред. Маньшина Г.Г. – Москва : ООО «Техполиграфцентр», 2014. Вып. 25. – С. 39-44.
10. Лазерные комплексы [Электронный ресурс] : Серия ПРО / Сайт производителя. Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://www.lasercomp.ru/> – Дата доступа: 12.12.2016.
11. Акулович, Л.М. Комбинированный метод автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления деталей машин / Л.М. Акулович, Д.Б. Ермашкевич // Вестник Белорусско-российского университета. – 2017. - №2 (55). – С. 5-15.
12. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 236 с.
13. Аверченков, В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб, пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. – Брянск: БГТУ, 2004. – 271 с.
14. Хейфец, М.Л. Математическое моделирование технологических процессов / М.Л. Хейфец. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 104 с.
15. Мурыгин В.Е. Основы функционирования технологических процессов швейного производства / В.Е. Мурыгин, Е.А. Чаленко. – Москва: Компания Спутник, 2001. – 285 с.

## Summary

**Akulovich L.M., Yermashkevich D.B.** The method of structural synthesis for computer design of technological processes of manufacturing of machine parts of rolled metal

*Found that the technological capabilities of modern equipment thermal cutting sheet material, equipment for cutting rectangular parts on the guillotine shears and cutting round and profile rolling machines to split greatly enhanced. This allows in many cases to machine holes, windows, paths details conclusively drawing with a certain level of accuracy and surface roughness. No mechanical impact on the processed material, the possibility of cutting complex contours of parts from sheet material with the required accuracy the mutual arrangement of the cut-out circuits are sending a blank using the methods in conjunction with thermal cutting machining operations in a single process.*

*Therefore there is a need to develop new technological solutions that ensure compliance with the principle of maximum concentration of operations. And their implementation in CALS-technologies by combining operations thermal cutting and subsequent machining with computer aided design technology method of structural synthesis in a single integrated system.*

*The aim of this work was to develop a method of structural synthesis for computer design of technological processes of manufacturing of machine parts of rolled metal.*

*The paper describes a method of structural synthesis used in CALS-technologies in the design of technology of making parts from metal, based on the use of design-technological elements (DTE). DTE is the elementary surface (plane, cylinder, etc.) or a set of elementary surfaces having a common, constructive purpose (chamfer, notch, etc.) and*

*characterized by common route of manufacture. For each DTE geometric parameters (geometrical dimensions, roughness, etc.), processing technologies (routing, operations, transitions) and conditions select the required option processing technology. Any item made of metal, can be represented as a set of its DTE. Design-engineering part model is a collection of its constituent DTE. On the basis of actual values of geometric parameters for each DTE there is a choice of the required variant of the technology of its processing.*

*The article presents the boundary conditions of the select operations in tehnologicheskie thermal cutting processes, the technique of experimental researches allowed to determine these conditions. Given a statistical model of the thermal cutting operations.*

*The article proposed a method of determining a preferred variant of technological route based on graph theory.*

*The method allows to choose the rational option of manufacturing technology of parts made of metal with a minimum of complexity with the maximum concentration of operations at one workplace.*

**Keywords:** *production planning, technological process, interactive mode, synthesis routes and operations, design-technological element, DTE, cutting sheet material, tooling*

### References

1. Cherepanov S.S. Ispolzovanie zemledelcheskih agregatov / Part 1,2. M.: FGUN «Rosinformagroteh», 2000. 668 p.
2. Filonov I.P. Proektirovanie tehnologicheskikh processov v mashinostroenii: uchebnoe posobie dlya vuzov / I.P. Filonov [i dr.] ; pod red. I.P. Filonova. – Minsk: Tehnoprint, 2003. – 910 p.
3. Jlobov A.A. Tehnologiya avtomatizirovannogo proizvodstva: Uchebnik dlya vuzov / A.A. Jlobov. – Minsk: DizainPRO. 2000. – 623 p.
4. Harmac I. Kompas-Avtoproekt – tehnologicheskaya podgotovka proizvodstva v edinom informatsionnom prostranstve, SAPR i grafika. №9. 2002. – pp. 23 – 30.
5. Popok, N.N. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya tehnologicheskikh processov izgotovleniya korpusnykh detaley na stankostroitelnykh predpriyatiyah Vitebskoy oblasti / N.N. Popok, N.V. Belyakov, V.I. Olshanskiy, U.E. Maharinskiy, M.M. Jadovich, D.B. Yermashkevich, A.V. Beletskiy, V.V. Velichko // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost. Prikladnye nauki. Mashinostroenie, tehnologii. 2011. № 11. – pp. 2-11.
6. Kulikov, D.D. Intellektualnye programmnye komplekсы dlya tehnicheckoy I tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva / Part 7. Sistemy proektirovaniya tehnologicheskikh processov / Kulikov D.D., Yablochnikov E.I., Babanin V.S. Uchebno-metodicheskoe posobie. -SPb: SPbGU ITMO, 2011. – 136 p.
7. Proektirovanie tehnologicheskogo processa mehanicheskoy obrabotki v SAPR TP VERTIKAL. Metodicheskie ukazaniya. FGOUBPO «Sibirskiy federalnyi universitet». Hakasskiy tehnicheckiy institute. – Abakan, 2010. – 49 p.
8. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya tehnologicheskikh processov mehanicheskoy obrabotki detaley PRAMEN. Rukovodstvo polzovatelya. ORGS 4664.013.I3. – Minsk, OAO «Institute Belorgstankinprom», 2014, 135 p.
9. Grivachevskiy A. G, Yermashkevich D. B, Kulik R. L, Shtein B. M. Functional structure of the automated design system of technological processes of machine-building enterprises. Problemy sozdaniya informacionnykh tehnologiy: sb. nauchnykh trudov. Moscow, OOO «Tehpoligrafcentr», 2014, issue 25, pp. 39 – 44.

10. Lazernye komplexy [Lazer complexes]. Available at: <http://www.lasercomp.ru/> accessed: 12.12.2016.
11. Akulovich L. M., Yermashkevich D. B. The combined method of automated designing of technological processes of manufacturing of details of machines from profile rolled metal. Vestnik Belorussko-rossiiskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University]. 2017, no. 2 (55), pp. 5-15.
12. Yascheritsyn, P.I. Planirovanie eksperimenta v mashinostroenii / P.I. Yascheritsyn, E.I. Maharinsky – Minsk: Vysheyshaya shkola, 1985. – 236 p.
13. Averchenkov, V.I. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tehniceskikh system: ucheb. posobie / V.I. Averchenkov, V.P. Fedorov, M.L. Heyfec. – Bryansk: BGTU, 2004. – 271 p.
14. Heyfec, M.L. Matematicheskoe modelirovanie tehnologicheskikh processov / M.L. Heyfec. – Novopolotsk: PGU, 1999.- 104 p.
15. Murygin, V.E. Osnovy funkcionirovaniya tehnologicheskikh processov shveynogo proizvodstva / V.E. Murygin, E.A. Chalenko. – Moskva: Kompaniya Sputnik, 2001. – 285 p.