

УДК 621.002

На правах рукописи

Золотарев Алексей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ РЕСУРСАМИ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук



Москва, 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Кондаков Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Долгов Виталий Анатольевич**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры технологий машиностроения, директор  
центра специальных машиностроительных  
технологий ФГБОУ ВО «Московский  
государственный технологический университет  
«СТАНКИН»

**Головин Дмитрий Леонидович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
технологического проектирования и управления  
качеством ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тульский государственный  
университет»**

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2017 г. \_\_\_\_\_ на заседании  
диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном  
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я  
Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,  
просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте  
[www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь совета  
д.т.н., доцент



В.П. Михайлов

**Актуальность работы.** В основном производстве металлургических предприятий в непрерывном режиме используется сложное, крупногабаритное технологическое оборудование. Поддержание его в работоспособном состоянии входит в обязанности ремонтных комплексов (РК) предприятий. Обеспечение надлежащего уровня эксплуатационных свойств (ЭС) деталей технологического оборудования основных цехов способствует получению высоких характеристик жизненного цикла продукции.

Крупногабаритные, массивные узлы и детали, поступающие на ремонт, создают значительные (в том числе – встречные) грузопотоки в РК, и требуют больших временных затрат на перемещение и установку на оборудование ремонтной группы из-за необходимости использования подъемно-транспортных средств. Высокие требования к качеству отремонтированных деталей (например, допуск диаметра бочки прокатных валков и отверстий под подшипники качения в опорных подушках по IT7, допуск соосности посадочных поверхностей прокатных валков не более 0,5 мм на длине 5000 мм и т.д.) сложно обеспечить на тяжелом и недостаточно автоматизированном оборудовании РК.

Возникновение ситуаций, требующих экстренного внепланового ремонта деталей, характерное для металлургического производства, ведет к срыву планов текущего ремонта, необходимости привлечения дополнительных производственных ресурсов, недостаточной загрузке, или, наоборот, перегрузке оборудования. Неэффективное использование имеющихся ресурсов резко увеличивает длительность и стоимость ремонта.

Попытки неавтоматизированного решения задачи эффективного использования ресурсов ремонтного производства не принесли желаемых результатов. Перспективы решения поставленной задачи возникли лишь с появлением автоматизированных систем управления производственными ресурсами (Enterprise Resource Planning, ERP).

Базовые версии модулей автоматизации поддержки ремонта как зарубежных, так и отечественных систем данного класса, ориентированы, в основном, на выполнение сервисных функций. Существующие модули ERP-систем, связанные с обеспечением распределения ресурсов при техническом обслуживании и ремонтах, лишь предоставляют возможности по составлению, и, отчасти, оптимизации планов ремонта. Разработка методологического аппарата, повышающего эффективность технологического обеспечения ремонта деталей металлургического оборудования при автоматизированном управлении производственными ресурсами является актуальной научной задачей, решение которой имеет важное значение для экономики РФ. Сказанное делает актуальной тему представленной диссертационной работы.

**Степень научной разработанности темы исследования.** Исследованием изнашивающих воздействий и дефектов деталей металлургического оборудования занимались Авдеев В.А., Гордиенко А.В., Друян В.М. Методы устранения дефектов, в частности наплавку, изучали Касаткин Н.Л., Кузнецов Н.Д., Тонн Г.А., Ульман И.Е. Разработкой теории направленного формирования эксплуатационных свойств деталей занимались Дальский А.М., Васильев А.С., Горленко О.А., Кондаков А.И. Проблемы планирования и ситуационного управления ресурсами ремонтного комплекса изучали Лунев В.Е., О'Лири Д., Поспелов Д.А.

**Цель работы.** Обеспечение качества ремонта деталей металлургического оборудования при минимальных затратах ресурсов инвариантно производственной ситуации.

**Основные задачи исследования:**

1. Разработка методики вариативного формирования и ситуационной реализации технологических решений (ТР) в РК.
2. Разработка критериев эффективности ремонта деталей металлургического оборудования.
3. Разработка методики ситуационного управления ресурсами РК и ее программная реализация.
4. Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности ремонта деталей металлургического оборудования при автоматизированном управлении производственными ресурсами.

**Научная новизна** исследования заключается в выявлении закономерностей формирования ТР при ремонте деталей металлургического оборудования в условиях автоматизированного ситуационного управления производственными ресурсами.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке алгоритмического и методического обеспечения ситуационного управления ресурсами ремонтного комплекса, а также критериального аппарата селекции альтернативных вариантов формируемых решений.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке рекомендаций по повышению эффективности ремонта деталей металлургического оборудования при автоматизированном управлении производственными ресурсами, программной реализации и производственной апробации методики ситуационного управления ресурсами РК. Внедрение на действующем предприятии пакета прикладных программ ситуационного управления ресурсами РК, и разработанных рекомендаций позволило повысить качество ремонта деталей металлургического оборудования (роликов установок непрерывной разливки стали (УНРС)) на 9 %, при снижении затрат на ремонт и повышении надежности технологического обеспечения ЭС роликов. Годовой экономический эффект составил 5,5 млн. руб.

**Методы исследования.** Использовались основные научные положения технологии машиностроения, проектирования технологических комплексов, научные основы металлургического (в частности, сталелитейного) производства, надежности технологического обеспечения ЭС, математическая статистика, теории принятия решений, ситуационного управления, и управления ресурсами предприятия.

Достоверность полученных научных результатов основывается на рационально выбранных и примененных методах научного исследования, подтверждается результатами статистического анализа экспериментальных данных, совпадением результатов производственного эксперимента с теоретически прогнозируемыми.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- методика вариативного формирования и ситуационной реализации ТР в РК;
- критерии эффективности ремонта деталей металлургического оборудования;
- методика ситуационного управления ресурсами РК и ее программная реализация;

- практические рекомендации по повышению эффективности ремонта деталей металлургического оборудования при автоматизированном управлении производственными ресурсами.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии» (Липецк, 2012), на 6-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее Машиностроения России 2013» (Москва, 2013), на 4-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» (Иркутск, 2014), на 8-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее Машиностроения России 2015» (Москва, 2015), на 9-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее Машиностроения России 2016» (Москва, 2016). Основные разделы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры технологий машиностроения МГТУ имени Н.Э. Баумана в 2011...2016 гг.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 11 печатных работах, из которых 6 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Общий объем публикаций 4,77 п.л. Список публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 191 страницу, в том числе 127 страниц текста, 37 рисунков, 38 таблиц, список литературы из 116 наименований и приложения на 64 страницах.

### Содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность решаемой в диссертационной работе научной задачи, формулируются основные идея и научная новизна работы.

**Первая глава** посвящена выявлению особенностей ремонта деталей металлургического оборудования: объектов ремонта, видов дефектов, основных ТР и методов их формирования, а также поиску известных (существующих) методов оценки и критериев эффективности РК.

Мировое производство стали превышает 1,2 млрд. тонн в год. При выплавке стали применяют УНРС производительностью 0,6...3 млн. тонн в год. По статистическим данным в металлургической промышленности процессы технического обслуживания и ремонта занимают долю в себестоимости продукции до 10...20 %, а по количеству занятого персонала до 30 %. Обеспечение надлежащего уровня ЭС деталей технологического оборудования основных цехов является гарантом получения высоких характеристик жизненного цикла продукции (Рис. 1).

При эксплуатации детали и узлы металлургического оборудования подвергаются комбинированному действию различных видов изнашивания (механического, термического, усталостного и др.). Процессы изнашивания и основные дефекты деталей рассмотрены в работах Л.А. Шапрана, Ф.Д. Кащенко, Р. Пасхольда и др.



Рис. 1. Жизненный цикл продукции металлургического производства и цикл ремонта технологического оборудования

При ремонте крупногабаритных, массивных деталей (например, валков станов горячей прокатки, достигающих в длину 5000 мм, диаметром 500...3000 мм, массой 1000...150000 кг.) применяют наплавочные проволоки мартенситно-аустенитной (Tubrodur ОК 15.73, Chromecore 414N-О и др.), или мартенситно-ферритной структур (ВЕЛТЕК Н470) с последующей обработкой резанием, что позволяет повысить ресурс рабочих поверхностей в 1,5...4 раза. Повышения ЭС достигают за счет применения в наплавочном материале легирующих элементов Al, Cr, Ni, Mo, Si, образующих на поверхности твердые пленки окислов. Исследованию процесса наплавки посвящены работы С.В. Мазура, В.А. Короткова, П.О. Марущака.

Маршрутные технологические процессы (МТП) ремонта проектируют, исходя из обеспечения заданных ЭС исполнительных поверхностей деталей (износостойкости, контактной жесткости, прочности посадок и др.), в свою очередь зависящих от условий эксплуатации, формы, материала и показателей качества рабочих поверхностей, а также последовательности применения технологических методов в МТП. Значительный вклад в исследования проблем надежности обеспечения ЭС, технологической наследственности внесли работы А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.С. Васильева и др.

В основе формирования ТР РК лежат: использование широкоуниверсального оборудования, технологически специализированных участков, высокая концентрация переходов и стремление к уменьшению общего числа операций. Особенностью РК является неизменность номенклатуры ремонтируемых деталей во времени, что дает возможность формирования базы ТР для выполнения повторяющихся задач ремонта. Вариативное формирование ТР часто невозможно из-за директивного применения типовых МТП для групп конструктивно-подобных

деталей без учета условий эксплуатации. Доля механизированных ремонтных работ составляет не более 23...25 %. Производительность труда рабочих РК в 4...5 раз ниже производительности труда рабочих основных цехов.

Для автоматизации планирования ремонтов на металлургических предприятиях применяют системы управления основными фондами (Enterprise Asset Management, EAM), входящие в состав ERP-систем. Опыт практического внедрения EAM-систем на отечественных предприятиях металлургической промышленности указывает во многих случаях на завышенные ожидания их эффективности, поскольку как недостаточный, так и избыточный уровни разработанности системы ведут к неоправданному росту затрат на ее приобретение и эксплуатацию. Выявлению закономерностей формирования информационной основы машиностроительных производств, автоматизированного управления производственными ресурсами и функционального моделирования ТР с применением стандарта IDEF0 посвящены работы Соломенцева Ю.М., Митрофанова В.Г., Феофанова А.Н. и др.

При выполнении внеплановых ремонтов возникает задача рационального перепланирования использования ресурсов и технологического оборудования РК между ремонтируемыми изделиями. Для оптимизации потока ремонтируемых изделий множество технико-экономических показателей их ремонтов должно быть формализовано, а так как оптимизация должна происходить постоянно в реальном времени, возникает задача ситуационного управления ресурсами РК. Модель распределения ресурсов РК - сложная для управления система, характеризующаяся уникальностью, невозможностью полной формализации объекта управления, нечетким заданием критериев целесообразности, отсутствием оптимальности, динамичностью.

Повышению эффективности применения EAM-систем для ситуационного управления ресурсами РК способствует их трансформация в системы интеллектуальной поддержки решений. Это требует создания необходимого алгоритмического и методического обеспечения ситуационного управления ресурсами РК, а также критериального аппарата селекции альтернативных вариантов формируемых решений. Диалог пользователя с системой и его вмешательство в процесс формирования решений должны быть минимальными. EAM-система должна формировать ТР, гарантированно обеспечивающие качество ремонта деталей металлургического оборудования при минимальном расходовании ресурсов РК инвариантно сложившейся производственной ситуации.

Научно обоснованного подхода к реализации указанного машиностроение в настоящее время не имеет. Таким образом, исследование, направленное на выявление основных закономерностей формирования ТР при ремонте деталей металлургического оборудования в условиях автоматизированного ситуационного управления производственными ресурсами, является актуальным. Это определяет и актуальность предлагаемой диссертационной работы.

Цель исследования – обеспечение качества ремонта деталей металлургического оборудования при минимальных затратах ресурсов инвариантно производственной ситуации.

Объект исследования – процесс формирования ТР при ремонте деталей металлургического оборудования и автоматизированном управлении производственными ресурсами.

Достижение поставленной цели исследования связано с решением приведенных выше основных задач.

**Во второй главе** изложена методика вариативного формирования и ситуационной реализации ТР в РК, определены экспертно и экспериментально критерии эффективности ремонта деталей металлургического оборудования.

В специализированном РК восстанавливают детали повторяющейся номенклатуры, представленные множеством  $\{D_l\} \equiv \{D_1, \dots, D_L\}$ , где  $D_1, \dots, D_L$  – наименования ремонтируемых деталей, и соответствующим множеством объемов их ремонта  $\{N_l^D\} \equiv \{N_1^D, \dots, N_L^D\}$ . Для каждой детали  $\{D_l\}$  существуют множества дефектов  $\{F_l\} \equiv \{F_1, \dots, F_L\}$ , где  $F_1, \dots, F_L$  – множества дефектов соответствующих деталей. Если детали множества  $\{D_l\}$  конструктивно подобны, то объединением множеств  $\{F_l\}$  может быть сформировано множество  $\{F\}$ , каждый элемент которого является уникальным типовым дефектом, возникающим при эксплуатации деталей  $\{D_l\}$ :

$$\{F\} \equiv \bigcup_{l=1}^{l=L} \{F_l\} \equiv \{F_1, F_2, \dots, F_W\}, \quad (1)$$

где  $F_1, \dots, F_W$  – уникальные наименования типовых дефектов ограниченного перечня.

Каждому элементу  $\{F\}$  может быть поставлена в соответствие совокупность технологических методов (в том числе альтернативных), реализация которых устраняет дефект. Путем их объединения, синтеза и модификации могут быть разработаны МТП устранения ряда дефектов, образующие множество  $\{P\} \equiv \{P_1, P_2, \dots, P_K\}$  мощностью не более  $K$ , и получена таблица решений для выбора МТП устранения дефектов (Таблица 1).

Возможно, что существует единственный МТП, устраняющий данный дефект ремонтируемой детали (безальтернативный выбор), например, для  $F_1$ :  $\exists P_K \rightarrow (F_1 \rightarrow 0)$ . Если МТП устраняет несколько дефектов, например, процесс  $P_4$  устраняет дефект  $F_2$  и  $F_W$ :  $\exists P_4 \rightarrow \{(F_2 \rightarrow 0) \cup (F_W \rightarrow 0)\}$  (см. Таблицу 1).

Для каждого сочетания дефектов  $\cup F_w$  деталей из множества  $\{D_l\}$ , если  $\cup F_w \neq \emptyset$ , существует множество (в том числе, альтернативных) МТП устранения дефектов данного сочетания:  $\cup F_w \rightarrow \{P_a, P_d, \dots, P_v\} \in \{P\}$ , где  $P_a, P_d, \dots, P_v$  – идентификаторы МТП устранения сочетания дефектов  $\cup F_w$ , представляющие собой ключ поиска процессов  $\{P_a, P_d, \dots, P_v\}$  в базе данных МТП ремонта (множестве  $\{P\}$ ).

Использование таблицы решений практически гарантирует ненулевой результат поиска указанных процессов (см. Таблицу 1). Возможно, что единственного процесса, обеспечивающего устранение сочетания дефектов  $\cup F_w$ , в результате поиска найдено не будет. В этом случае необходима структурно-параметрическая модификация найденных процессов.

Таблица решений для выбора МТП устранения дефектов

		Идентификаторы МТП устранения дефекта					
Идентификаторы дефектов		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	...	$P_K$
	$F_1$					...	+
	$F_2$		+		+	...	
	$F_3$			+		...	
	...	...	...	...	...	...	...
	$F_{W-1}$	+				...	
	$F_W$			+	+	...	

Выбор оптимального варианта размещения МТП ремонта детали в РК возможен на основании следующих критериев:

1. Путь минимальной длины перемещения ремонтируемой детали в РК:  $l_{(i-1)-i} \rightarrow \min$ , где  $i$  – порядковый номер используемой в МТП единицы оборудования.

2. Путь максимальной надежности  $H$ :

$$H = \min\{H_n\} = \min\left\{1 - \frac{l}{L}\right\} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $n$  – порядковый номер МТП  $P_n$  устранения дефектов детали,  $l$  – количество вышедших из строя до окончания межремонтного периода деталей, дефекты которых были устранены с помощью МТП  $P_n$ ;  $L$  – количество обработанных с помощью МТП  $P_n$  деталей. Оценки надежности технологического обеспечения ЭС деталей по устраняемым дефектам определяют экспертным методом, либо экспериментально.

3. Путь минимальных затрат на ремонт  $S_p$ :

$$S_p = S_{уд} + S_{тр} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $S_{уд}$  – затраты на непосредственное устранение дефектов,  $S_{тр}$  – затраты на транспортировку по РК.

4. Оптимальный путь по интегральному критерию качества  $K$ :

$$K = \frac{H}{S_{уд} + S_{тр}} \cdot 10^6 \rightarrow \max, \quad (3)$$

где  $10^6$  – масштабный множитель.

Надежность технологического обеспечения ремонта детали при реализации заданного МТП  $H$  – вероятность того, что не произойдет отказ детали по причине устраняемых дефектов в заданный период эксплуатации или межремонтный период. Обычно для детали определяют предельную надежность  $[H]$ , требуемую для технологического обеспечения заданных ЭС и безотказной работы в межремонтный период:

$$H \geq [H]. \quad (4)$$

Надежность различных МТП устранения отдельных дефектов варьируется не только в зависимости от технологических методов, используемых в МТП, но и от условий эксплуатации конкретных ремонтируемых деталей и их рабочих поверхностей.

Исследование надежности МТП устранения типовых дефектов проводили в производственных условиях для деталей BR09 «Бандаж ролика Ø300, L=601». Детали используются на горизонтальном участке ручья УНРС, температура охлаждаемого сляба на котором достигает 250°C, присутствует ферростатическое давление столба жидкого металла и знакопеременные напряжения от крутящего момента тянущих роликов.

Результаты исследования дефектов бандажей роликов, наружная цилиндрическая поверхность SF01 которых обработана по МТП P01, приведены в Таблице 2. Глубину изнашивания  $hf_i$   $i$ -го ролика определяли по формуле:

$$hf_i = \frac{D_{\text{ном}} - D_i}{2}, \quad (5)$$

где  $D_{\text{ном}}$  – номинальный диаметр исследуемых роликов,  $D_{\text{ном}} = 300$  мм;  $D_i$  – диаметр  $i$ -го ролика по результатам измерения, мм. Глубину трещин определяли с помощью дефектоскопа-трещиномера ГАЛС ВД-103.

Таблица 2.

Результаты исследования дефектов поверхности SF01 бандажей роликов

МТП	Глубина изнашивания					Глубина трещин					brak	$H_{\text{И}}$
	$\overline{hf}$ , мм	$\sigma_n$	$hf_{\text{min}}$ , мм	$hf_{\text{max}}$ , мм	def	$\overline{hf}$ , мм	$\sigma_n$	$hf_{\text{min}}$ , мм	$hf_{\text{max}}$ , мм	def		
P01	0,25	0,08	0,10	0,43	4	0,24	0,07	0,15	0,42	3	2	0,55
P02	0,20	0,05	0,12	0,32	1	0,22	0,10	0,04	0,39	4	1	0,70
P03	0,26	0,08	0,11	0,42	5	0,25	0,07	0,09	0,39	4	2	0,50
P04	0,24	0,09	0,10	0,43	5	0,20	0,08	0,08	0,34	3	1	0,65

Примечания:  $\sigma_n$  – среднеквадратичное отклонение исследуемого параметра;  $hf_{\text{min}}$ ,  $hf_{\text{max}}$  – минимальное и максимальное значения исследуемого параметра соответственно;  $def$  – количество дефектных деталей по исследуемому параметру;  $brak$  – количество деталей, не отработавших межремонтный период;  $H_{\text{И}}$  – надежность обеспечения ЭС при реализации исследуемых МТП.

Среднее значение исследуемого параметра (в случае поверхности SF01 – глубина изнашивания/трещин  $hf_i$ ), обозначаемое как  $\overline{hf}$ , определяли по формуле:

$$\overline{hf} = \sum_{i=0}^n \frac{hf_i}{n}, \quad (6)$$

где  $i$  – порядковый номер измерения,  $i = 1, \dots, n$ .

Исследование повторили для поверхностей SF02...SF05 бандажей роликов. В выборку по поверхности SF01 включали каждую пятую деталь (20 деталей для каждого МТП), для остальных поверхностей ввиду нетехнологичности измерений – каждую 10-ю деталь (10 деталей для каждого МТП).

Групповую экспертизу надежности для каждого МТП устранения каждого из дефектов проводили для получения оценок с привлечением семи экспертов. После голосования экспертов определяли среднее значение экспертной оценки надежности  $H_{\text{Э}}$  по каждому из МТП:

$$H_{\text{Э}} = \frac{\sum_{j=1}^J a_j}{J \cdot 100}, \quad (7)$$

где  $a_j$  - оценка надежности  $j$ -м экспертом;  $J$  - количество экспертов, участвующих в оценке надежности. Средние оценки надежности  $H$  для каждого МТП устранения каждого из дефектов рассматриваемых поверхностей определяли по формуле (8). В Таблице 3 приведено определение средней оценки надежности для поверхности SF01.

$$H = \frac{H_{И} + H_{Э}}{2}. \quad (8)$$

Исследование повторили для определения средних оценок надежности МТП устранения дефектов деталей типа «Корпус» и «Ось» BR10...BR18.

Таблица 3.

Результаты определения средней оценки надежности поверхности SF01

Поверхность-носитель дефекта	МТП	$H_{И}$	$H_{Э}$	$H$
SF01	P01	0,55	0,83	0,69
	P02	0,70	0,87	0,79
	P03	0,50	0,91	0,71
	P04	0,65	0,89	0,77

**В третьей главе** изложена методика ситуационного управления ресурсами РК, подготовлено информационное обеспечение, необходимое для ее программной реализации.

На рис. 2 представлена структурная диаграмма вариативно-ситуационного формирования МТП ремонта деталей, выполненная с использованием методологии функционального моделирования IDEF0. Реализация рассмотрена на примере формирования МТП ремонта деталей BR09 «Бандаж ролика Ø300, L=601» и выбора маршрута их движения по РК. В производственных условиях при ремонте таких используют универсальный МТП изготовления деталей «Бандаж ролика» различных диаметров и длины.

Исходной информацией для активации модуля A1 (см. Рис. 2) являются данные о дефектах поступивших на ремонт деталей (Таблица 4). Детали выбирают из заранее определенного множества ремонтируемых в РК, дефекты – из множества типовых. Значения параметров, характеризующих дефекты, вводят по результатам дефектации деталей. Формируют уникальный набор типовых дефектов  $\{F\} = \{F03, F04, F07, F15, F16\}$ , встречающихся у поступивших на ремонт деталей. Набор  $\{F\}$  выступает ключом для поиска альтернативных МТП устранения каждого из дефектов в соответствующей таблице решений (см. Таблицу 1).

Таблица 4.

Данные о дефектах поступивших на ремонт деталей

Деталь	Дефект	Поверхность	Характеризующий параметр, мм		
			Глубина	Длина	Раскрытие
D1	F03 Износ	SF01 Наружная цилиндрическая	0,5		
	F04 Местная коррозия		0,2		
	F07 Трещины разгара		0,1	10,0	1,0
	F15 Замятие торца	SF03 Плоскость левого торца	0,3		
	F16 Замятие шпоночного паза	SF05 Боковые поверхности шпоночного паза	1,7		

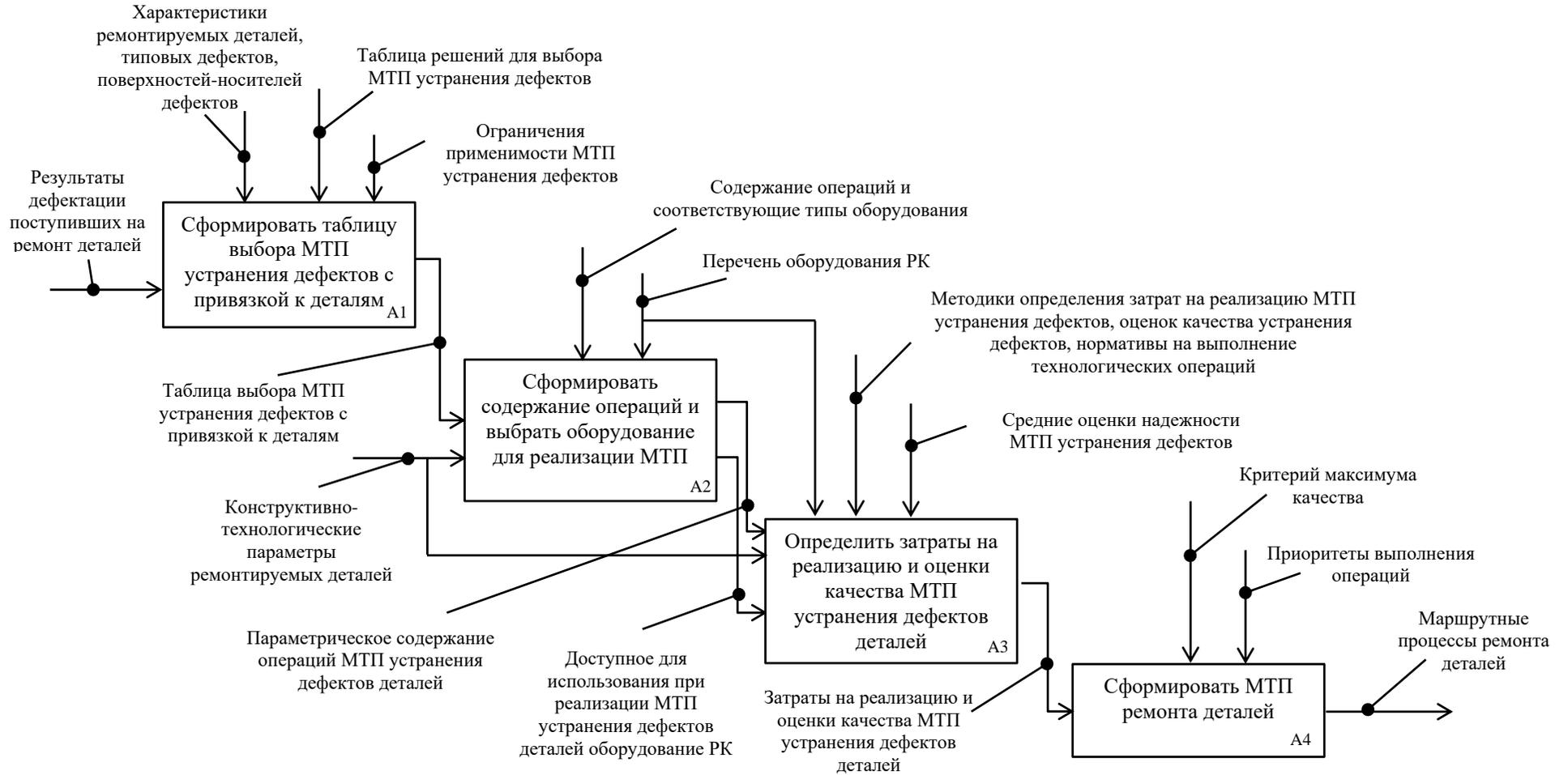


Рис. 2. Структурная диаграмма вариативно-ситуационного формирования МТП ремонта деталей

На результаты поиска МТП устранения дефектов накладывают ограничения применимости того или иного МТП, в зависимости от поверхностей-носителей дефектов и значений характеризующих параметров. Итогом работы модуля А1 выступает таблица решений МТП устранения дефектов с привязкой к деталям (Таблица 5), где  $\{P\} = \{P01, \dots, P15\}$  – набор МТП устранения типовых дефектов из таблицы решений (см. Таблицу 1).

Таблица 5.

Таблица решений МТП устранения дефектов с привязкой к деталям

Деталь	Дефект	Идентификаторы МТП устранения дефектов											
		P01	P02	P03	P04	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15
D1	F03	+	+										
	F04	+	+										
	F07	+	+										
	F15						+		+				+
	F16										+		+

В модуле А2 диаграммы (см. Рис. 2) формируют таблицу с параметрическим содержанием операций МТП устранения дефектов. Параметры, доступные для ввода, определены заранее для каждой из операций. Затем определяют доступное для использования оборудование РК. Критериями выбора выступают: соответствие операции и типа оборудования, габариты детали и технологические параметры станка, доступность оборудования. Итогом работы модуля А2 являются таблицы параметрического содержания операций и доступного для использования при реализации МТП оборудования РК.

В модуле А3 диаграммы (см. Рис. 2) оценивают затраты на реализацию МТП устранения дефектов деталей  $S_p$  по (2). При вычислении затрат на транспортировку по РК  $S_{TR}$  расстояние  $l_{(i-1)-i}$  между рабочими местами операций  $(i-1)$  и  $i$  определяют из условия ортогонального перемещения детали. Например, при перемещении детали между рабочими местами единиц оборудования C001 и C002:

$$l_{C001 \rightarrow C002} = \frac{|x_{C002} - x_{C001}| + |y_{C002} - y_{C001}|}{1000}, \quad (11)$$

где  $x_{C001}$  и  $x_{C002}$  – координаты по оси  $x$  станков C001 и C002 соответственно, м;  $y_{C001}$  и  $y_{C002}$  – координаты по оси  $y$  станков C001 и C002 соответственно, мм. Для каждого МТП определяют оценку качества  $K$  по (3). Итогом работы модуля А3 выступает таблица затрат на реализацию и оценок качества МТП устранения дефектов (Таблица 6).

Таблица 6

Затраты на реализацию и оценки качества МТП устранения дефектов

Деталь (дефекты)	МТП	Маршрут	Затраты, руб	Оценка надежности	Оценка качества
D1 (F03,F04,F07)	P01	C028;C067;C070;C024;C024;C024	64825	0,69	10,6
	P02	C028;C067;C070;C053;C053	90566	0,79	8,7
D1 (F15)	P09	C024	1669	0,78	467,3
	P11	C081	2396	0,91	379,8
	P15	C087	3074	0,83	269,9
D1 (F16)	P13	C093	3110	0,84	270,1
	P15	C087	3074	0,73	237,4

В таблицу выводят маршрут движения по цеху для каждого МТП устранения дефектов, обеспечивающий минимальные затраты, в виде последовательности идентификаторов единиц оборудования.

В модуле А4 (см. Рис. 2) выбирают единственный МТП устранения каждого дефекта по интегральному критерию максимума качества (3). МТП ремонта деталей формируют, руководствуясь известными методиками синтеза технологических процессов. Итогом работы модуля А4 являются маршрутные процессы ремонта деталей (Таблица 7).

Таблица 7.

Маршрутные процессы ремонта деталей

Деталь	Операция	Оборудование	Затраты, руб	Оценка надежности	Оценка качества
D1	005 Токарная	C028	73359	0,69	9,4
	010 Наплавочная	C067			
	015 Термическая	C070			
	020 Токарная черновая	C024			
	025 Токарная чистовая	C024			
	030 Токарная тонкая	C024			
	035Токарная	C024			
040 Долбежная	C093				

**Четвертая глава** посвящена изложению результатов тестирования пакета прикладных программ, реализующего разработанную методику. По результатам тестирования сделано заключение о его работоспособности. Выполнено имитационное моделирование и практическое исследование процесса автоматизированного управления ресурсами ПК.

Программная реализация методики ситуационного управления ресурсами ПК выполнена на базе Windows-приложения «МТР.exe» (далее – пакет прикладных программ), разработанного на языке программирования Pascal в среде Borland Delphi 7. Системные требования: операционная система Windows XP и новее, оперативная память от 256 Мб. В качестве системы управления базами данных использована Firebird 2.5. На Рис. 4 приведено экранное окно формирования МТП устранения дефектов и ремонта деталей.

Контроль качества пакета прикладных программ выполняли с помощью динамической верификации (тестирования) (Таблица 8). При проведении тестирования и подготовке тестовых сценариев руководствовались стандартом IEEE 1012.

Таблица 8.

Сравнение выбранных в автоматизированном режиме вариантов размещения МТП ремонта с результатами, полученными в неавтоматизированном режиме

Критерий	Кол-во тестов		Доля результатов, соответствующих неавтоматизированному расчету, %	
	Тест № 1	Тест № 2	Тест № 1	Тест № 2
$l_{(i-1)-i} \rightarrow \min$	60	180	63	88
$H \rightarrow \max$	60	180	85	99
$S_p \rightarrow \min$	60	180	66	89
$K \rightarrow \max$	60	180	74	96
Итого / среднее:	240	720	72	93

МТП устранения дефектов

Затраты на реализацию и оценки качества МТП устранения дефектов

Деталь	Дефекты	МТП	Маршрут	Оценка надежности	Затраты на вып.	Затраты на трансп.	Затраты	Оценка качества
D1	F03,F04,F07,F08	P01	C28,C67,C70,C24,C24,C24	0,69	107509	2676	110185	6,26
D1	F03,F04,F07,F08	P02	C28,C67,C70,C53,C53	0,79	133362	2564	135926	5,81

Маршрутные процессы ремонта

Деталь	Операция	Оборудование	Оценка надежности	Затраты на вып.	Затраты на трансп.	Затраты, руб	Оценка качества
D1	Токарная	C28	0,69	107509	4962	112471	6,13
	Наплавочная	C67					
	Термическая	C70					
	Токарная черновая	C24					
	Токарная чистовая	C24					
	Токарная тонкая	C24					

Экспортировать в CSV

Рис. 4. Экранное окно формирования МТП устранения дефектов и ремонта деталей

Имитационное моделирование проводили для двух РК металлургического предприятия, а также одного РК, спроектированного искусственно и предназначенного для изготовления и ремонта деталей УНРС. Практическую апробацию методики ситуационного управления ресурсами РК и пакета прикладных программ выполняли в июле 2016 г. в условиях РК ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Сравнивали результаты, полученные при имитационном моделировании и практической апробации. По сравнению с типовым МТП при практической апробации улучшение средних оценок качества  $\bar{K}$  составило от 15 % для бандажей до 29 % для корпусов, в рамках имитационного моделирования – от 8 % для бандажей в РК № 3 до 90 % для осей в РК № 2. Имитационное моделирование не всегда учитывает особенности реального производства, однако построенные в пакете прикладных программ по интегральному критерию максимального качества (3) МТП ремонта наглядно иллюстрируют пути повышения эффективности ремонта деталей роликов УНРС в РК.

В рамках практической апробации при использовании варианта размещения МТП в РК, построенного, по критерию  $K \rightarrow \max$ , получили оценки  $\bar{K}$  лучшие, нежели при использовании типового МТП ремонта. Улучшение составило от 1 до 22 %. Колебания оценок  $\bar{K}$  объяснили нестабильностью показателя средней надежности  $\bar{N}$  из-за изменения производственной ситуации в РК в режиме реального времени. Тренд к уменьшению оценок  $\bar{K}$ , полученных и по типовому МТП, и по критерию  $K \rightarrow \max$ , объясняется ростом затрат на ремонт  $S_p$  и увеличением в них доли  $S_{Tr}$  из-за роста массы деталей. Оценка эффективности применения методики в рамках практической апробации приведена в Таблице 9.

Таблица 9.

Оценка эффективности применения методики ситуационного управления ресурсами РК при ремонте деталей роликов УНРС в РК с помощью пакета прикладных программ по итогам практической апробации

№	Средние значения оценки по критерию	Ед. измерения	Типовой МТП	МТП по критерию $K \rightarrow \max$	Оценка эффективности
Бандаж					
1	$\bar{l}$	м.	364	327	↘ на 10 %
2	$\bar{S}_p$	тыс. руб.	164	148	↘ на 10 %
3	$\bar{H}$	-	0,74	0,85	↗ на 12 %
4	$\bar{K}$	-	4,7	5,4	↗ на 15 %
5	$\bar{T}_T$	ч.	7,1	5,7	↘ на 19 %
Корпус					
6	$\bar{l}$	м.	275	207	↘ на 25 %
7	$\bar{S}_p$	тыс. руб.	34	31	↘ на 9 %
8	$\bar{H}$	-	0,72	0,85	↗ на 18 %
9	$\bar{K}$	-	21,2	27,4	↗ на 29 %
10	$\bar{T}_T$	ч.	2,5	1,8	↘ на 28 %
Ось					
11	$\bar{l}$	м.	186	119	↘ на 36 %
12	$\bar{S}_p$	тыс. руб.	15	14	↘ на 7 %
13	$\bar{H}$	-	0,69	0,77	↗ на 12 %
14	$\bar{K}$	-	46,0	55,0	↗ на 20 %
15	$\bar{T}_T$	ч.	3,9	2,4	↘ на 38 %
16	Затраты на ремонт годовой программы	млн. руб.	62,4	56,9	↘ на 9 %

### Общие выводы и заключение по диссертации

1. Существует актуальная научная задача выявления и исследования основных закономерностей формирования технологических решений при ремонте деталей металлургического оборудования и автоматизированном управлении производственными ресурсами, имеющая важное значение для машиностроения Российской Федерации.

2. Эффективное управление ресурсами ремонтного комплекса автоматизированной ЕАМ-системой возможно лишь при интеллектуализации функций поддержки формируемых ею решений, что требует разработки необходимого алгоритмического, методического обеспечения и критериального аппарата селекции альтернативных вариантов решений, минимизирующего вмешательство пользователя в процесс их формирования.

3. Единичный технологический процесс ремонта должен формироваться на основе оценки фактического состояния ремонтируемой детали, с учетом производственной ситуации в ремонтном комплексе и базироваться на возможных вариантах технологического устранения отдельных дефектов, подвергающихся селекции и взаимной модификации, для выполнения которой разработан формальный аппарат.

4. Для определения оценок качества используемых при ремонте технологических решений предложена система частных и интегральных критериев, учитывающих надежность технологического обеспечения эксплуатационных

свойств отремонтированной детали и связанные с этим затраты. Система критериальных оценок качества решений, разработанная методика определения затрат на ремонт деталей в сочетании с техническими возможностями ЕАМ-систем позволяют корректно решать задачу вариативного формирования и ситуационной реализации технологических решений в ремонтном комплексе.

5. Ситуационное управление ресурсами ремонтного комплекса должно формировать для каждой ремонтируемой детали с уникальным набором типовых дефектов единичный маршрутный технологический процесс ремонта, обеспечивающий устранение всех выявленных дефектов с заданной надежностью и наиболее предпочтительный среди возможных процессов ремонта по заданному критерию качества.

6. Эффективность ситуационного управления ресурсами ремонтного комплекса прямо зависит от уровня разработанности его информационного обеспечения. Входящие в состав последнего базы данных, необходимая структура которых определена в ходе исследования, должны отражать состояние и изменение ресурсов ремонтного комплекса в режиме реального времени.

7. Разработанный на базе предложенной методики и прошедший практическую апробацию пакет прикладных программ устойчиво обеспечивает формирование технологических процессов ремонта деталей инвариантно их классу и ситуационное управление ресурсами ремонтного комплекса, соответствующие масштабам реального металлургического производства.

8. Разработанная и программно реализованная методика ситуационного управления ресурсами ремонтного комплекса позволяет по сравнению с использованием типовых процессов ремонта:

- снизить расстояния транспортировки тяжеловесных и крупногабаритных деталей металлургического оборудования до 36 %;
- уменьшить затраты на ремонт на 7...10 %;
- повысить надежность технологического обеспечения эксплуатационных свойств ремонтируемых деталей на 12...18 %.

9. Качество технологических решений, формируемых с использованием программно реализованной методики ситуационного управления ресурсами ремонтного комплекса, по критерию «полезный эффект / затраты» в сравнении с использованием типовых решений повышается на 15...29 %.

10. Годовой экономический эффект от использования разработанных методики и пакета прикладных программ в ремонтном комплексе металлургического оборудования для ремонта деталей установок непрерывной разливки стали, подтвержденный документально, составил 5,5 млн. руб.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** заключаются в применении методики ситуационного управления ресурсами ремонтного комплекса и пакета прикладных программ для изготовления деталей металлургического оборудования, наполнении и универсализации баз данных альтернативных технологических решений, а также формализации методики определения надежности технологического обеспечения эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей.

### **Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. Кондаков А.И., Золотарев А.В. Модификация маршрутных технологических процессов изготовления деталей // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2010. № 9. С. 8 – 12. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.)
2. Золотарев А.В. Технологическое обеспечение ремонта деталей металлургического оборудования при автоматизации управления производственными ресурсами // Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии: сб. тр. науч.-техн. конференции. Липецк: ЛГТУ, 2012. Ч. 2. С. 167 – 171. (0,25 п.л.)
3. Золотарев А.В. Технологическое обеспечение ремонта деталей металлургического оборудования при автоматизации управления производственными ресурсами // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2012. № 7. С. 37 – 40. (0,5 п.л.)
4. Кондаков А.И., Золотарев А.В. Автоматизация управления ресурсами при ремонте деталей металлургического оборудования // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2013. № 7. С. 35 – 39. (0,7 п.л. / 0,35 п.л.)
5. Золотарев А.В., Кондаков А.И. Характерные дефекты деталей металлургического оборудования и технологическое обеспечение их ремонта на примере машин непрерывной разливки стали // Будущее машиностроения России: сб. тр. шестой всеросс. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С. 46. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)
6. Золотарев А.В., Кондаков А.И. Характерные дефекты деталей металлургического оборудования и технологическое обеспечение их ремонта на примере машин непрерывной разливки стали // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2013. № 11. С. 34 – 38. (0,8 п.л. / 0,4 п.л.)
7. Золотарев А.В. Прогнозирование эксплуатационных свойств наружных цилиндрических поверхностей роликов установок непрерывной разливки стали // Жизненный цикл конструкционных материалов: сб. тр. четвертой всеросс. науч.-техн. конф. с международным участием. Иркутск: ИрГТУ. 2014. С. 326 – 334. (0,75 п.л.)
8. Золотарев А.В. Научно-методическая база технологического обеспечения эксплуатационных свойств роликов установок непрерывной разливки стали при их ремонте // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 12. С. 39 – 45. (0,9 п.л.)
9. Золотарев А.В., Кондаков А.И. Реализация алгоритма вариативно-ситуационного формирования маршрутных процессов ремонта деталей // Будущее машиностроения России: сб. тр. восьмой всеросс. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 65 – 67. (0,25 п.л. / 0,12 п.л.)
10. Золотарев А.В. Моделирование автоматизированного управления ресурсами ремонтного комплекса // Будущее машиностроения России: сб. тр. шестой всеросс. конф. молодых ученых и специалистов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 61 – 64. (0,25 п.л.)
11. Золотарев А.В. Программная реализация методики ситуационного управления ресурсами при ремонте деталей металлургического оборудования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 12. С. 35 – 42. (0,75 п.л.)