

УДК 631.3.004.67

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

В. П. ИВАНОВ

ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт», ул. Ленинградская 101, 211408 г. Полоцк, Беларусь.

*Приведена схема технологического процесса восстановления детали в виде связного графа типов и видов составляющих операций. Оптимизация процесса по критерию затрат на восстановление детали с учетом ограничений по производительности и точности параметров технических требований к детали выполнена с применением элементов динамического программирования. Предложенный метод оптимизации процесса восстановления детали иллюстрирован примером восстановления гильзы цилиндра двигателя.*

### Введение

Эффективность капитального ремонта машин заключается в восстановлении изношенных деталей за счет использования их доремонтных форм и материалов.

Суть восстановления изношенных деталей состоит в возвращении им утраченной части материала из-за изнашивания и значений свойств, изменившихся за время эксплуатации. К таким свойствам относятся: твердость и износостойкость трущихся поверхностей, сплошность материала, форма, размеры, взаимное расположение и шероховатость рабочих поверхностей, усталостная прочность, жесткость и распределение массы детали относительно оси вращения. Многократно повторяющийся процесс восстановления детали должен быть построен оптимальным образом по критерию расхода производственных ресурсов (материальных, трудовых и энергетических) при учете установленных ограничений.

Задача выбора способа восстановления детали впервые была решена проф. В. А. Шадричевым [1], а впоследствии многократно видоизменялась и решалась различными методами.

Существуют три основных способа выбора процесса восстановления детали, отличающиеся различной степенью учета технических и экономических показателей. Первый способ [2] основан на расчетах полной себестоимости восстановления детали различными способами и сопоставлении результатов. Второй способ [3] базируется на сравнении комплексных величин – отношений технологических затрат к ресурсу детали. В качестве базового показателя принимают такое отношение для новой детали. Третий – сопоставляет значения комплексного показателя как функции трех критериев: применимости, долговечности и технико-экономического [1].

Недостатки первого способа состоят в отсутствие учета технического состояния и послеремонтной наработки восстанавливаемой детали и несопоставимости результатов расчетов. Второй и третий способы при малой цене восстановления формируют и малую долговечность по сравнению с нормативной наработкой агрегата. Способы оценивают полученные результаты, но ни один из них не формирует сам процесс восстановления детали.

### Постановка задачи

Цель работы состоит в разработке способа проектирования технологического процесса восстановления детали на основе его структурного оптимизационного синтеза из множества составляющих операций.

### Содержание процесса восстановления детали

Изношенная деталь ремонтного фонда на пути своего превращения в годную деталь пребывает в состояниях исходной и ремонтной заготовок и восстановленной детали (рис. 1). Исходная заготовка в общем случае превращается в ремонтную заготовку путем создания припусков на восстанавливаемых поверхностях, а ремонтная заготовка в деталь – в результате механической и химико-термической обработки. Основные типы технологических операций на этом пути следующие.

Предварительная механическая обработка придает правильную геометрическую форму восстанавливаемым элементам перед нанесением покрытий или установкой дополнительной ремонтной детали (ДРД).

Восстановление геометрических параметров детали путем ее механической обработки требует создания припусков на восстанавливаемых поверхностях в виде закрепления ДРД, нанесения

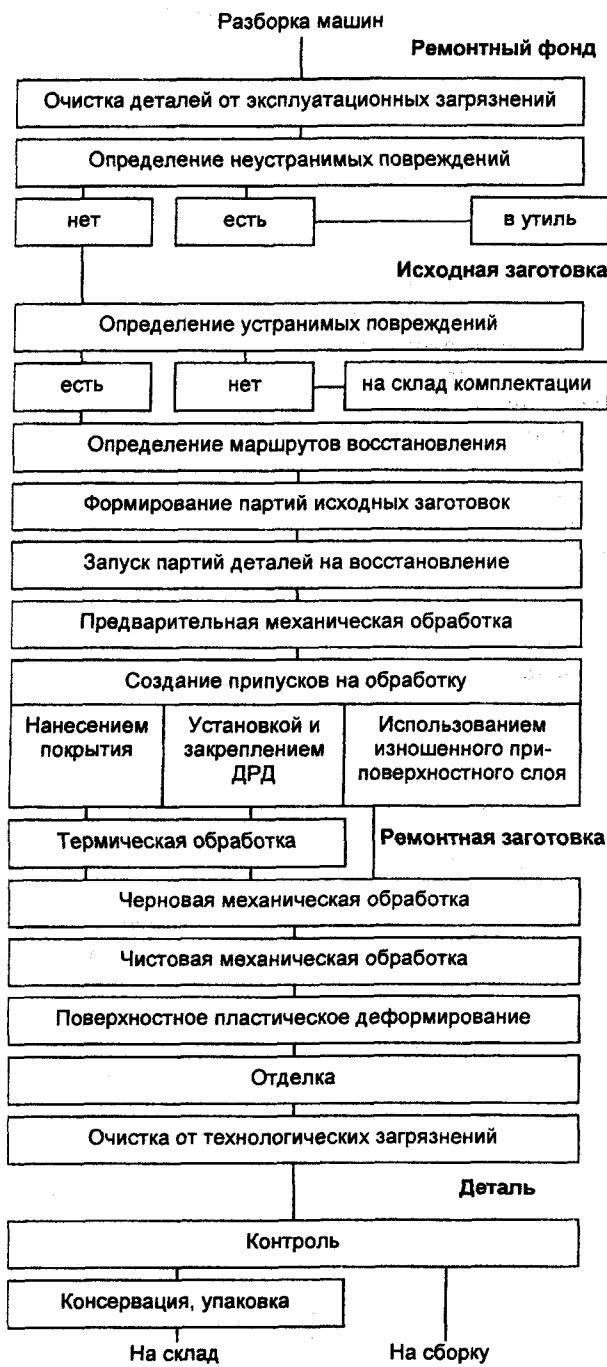


Рис. 1. Схема технологического процесса восстановления детали

различных покрытий или перемещения материала самой детали в результате ее пластического деформирования. Однако, эти трудоемкие операции выполняют только после полного использования ремонтных размеров детали.

На стадии создания ремонтной заготовки, в основном, формируют материал и структуру рабочих поверхностей детали, что определяет ее послеремонтную надежность. Необходимая износостойкость восстанавливаемых поверхностей достигается выбором материала покрытия и условий его нанесения.

Технологические операции, связанные с воз-

действием температуры на материал детали при нанесении покрытия, должны быть отделены от последующих операций «технологическим барьером» в виде термической обработки, назначение которой снятие внутренних напряжений, уменьшение размера зерна материала и стабилизация формы и размеров детали.

При черновой механической обработке снимают основную часть операционного припуска. Если условно разделить этот вид обработки на две части, то в первой части ее обеспечивают нужное взаимное расположение поверхностей детали, а во второй – форму ее геометрических элементов.

Термическая или химико-термическая обработка обеспечивает свойства поверхностных слоев элементов детали.

Заданную точность размеров и шероховатость поверхностей, близкую к нормативной, достигают в результате чистовой обработки. Чистовая обработка для шеек валов – это, в большинстве случаев, абразивная обработка, а для отверстий – тонкое растачивание и хонингование.

Детали, воспринимающие знакопеременную нагрузку, проходят после чистовой обработки операцию поверхностного пластического деформирования, назначение которой – закрыть микротрешины и создать наклепанный слой с внутренними напряжениями сжатия. Поверхностное пластическое деформирование реализуется механическими или термомеханическими способами.

Отделочные операции (полирование, суперфиниширование, хонингование) необходимы для снятия разупрочненного механической обработкой слоя и обеспечения требуемой шероховатости поверхностей.

Детали, направляемые на сборку, должны быть тщательно очищены от технологических загрязнений (стружки, зерен абразивного инструмента, остатков СОЖ, полировальных паст и др.), которые способны в течение нескольких часов работы вывести из строя систему смазки отремонтированного агрегата или агрегат в целом.

Операция контроля устанавливает соответствие состояния восстановленной детали требованиям технической документации (чертежа, карты технического контроля). Операция оснащена средствами для измерения геометрических параметров, значений физико-геометрических свойств и других характеристик.

Технологические операции указанных типов выполняются на любом ремонтном предприятии, однако, число освоенных видов операций каждого типа зависит от мощности и технического уровня отдельного завода.

### Решение задачи

Задача решается путем составления на основе классификаций множеств различных частей технологического процесса восстановления детали без пропусков и повторений и поиска такого связ-

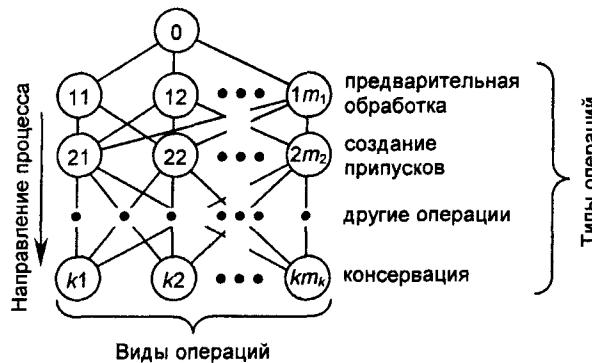


Рис. 2. Граф вариантов технологического процесса восстановления детали:  $1, 2, \dots, k$  – коды операций;  $m_1, m_2, \dots, m_k$  – количество видов операций

ногого подмножества разнотипных технологических операций, которое представляет процесс восстановления как целое и обеспечивает установленные ограничения по производительности и качеству восстановления с наименьшими затратами.

Для заводского технолога ограничения по качеству восстановления детали выражены геометрическими параметрами поверхностей (шероховатостью, точностью размеров, формы и взаимного расположения поверхностей), чистотой поверхностей и физико-механических свойствами поверхностей и объемов. Эти ограничения должны быть неукоснительно выполнены, т.к. они обеспечивают работоспособность детали в течение заданной (обычно, 80%-ной от новой детали) наработки. Ограничения по производительности выдерживаются применением только тех средств ремонта, которые способны ее обеспечить.

Техническое решение, положенное в основу технологического процесса восстановления детали, определяется из графа ( $\Gamma$ ) (рис. 2), множество вершин которого ( $p_{ij}$ ) соответствует множеству составляющих операций, а множество дуг ( $l_{i...i+1}$ ) – связям между последующими и предыдущими операциями:

$$\Gamma = (p_{ij}, l_{i...i+1}). \quad (1)$$

Горизонтальные ряды вершин графа соответствуют подмножеству видов  $j = (1, m)$  операций  $i$ -го типа. Описание технологического процесса начинается с операции второго сверху яруса графа и заканчивается операцией нижнего его яруса. Виды однотипных технологических операций устанавливают на основании производственного опыта, научных рекомендаций и исходя из современных представлений о способах преобразования энергии, материалов и информации.

Связное подмножество вершин, взятых по одной из каждого ряда графа, определяет один вариант технологического процесса. Если имеются связи между любой предыдущей операцией верхнего яруса графа с каждой последующей операцией в нижнем его ярусе, то число вариантов технологического процесса равно произведению числа вершин в каждом ярусе. Несовместимость неко-

торых операций между собой сокращает количество этих вариантов. Среди рассмотренных вариантов процесса может оказаться патентоохранное решение, отличающееся новым сочетанием технологических признаков.

Длину каждой дуги графа определяют как затраты  $Q$  на подготовку и выполнение последующей операции, отнесенные к затратам по восстановлению одной детали. Величина  $Q$  выражается суммой:

$$Q = M + O + \mathcal{E} + P + A + Z + H, \quad (2)$$

где  $M, O, \mathcal{E}, P, A, Z$  и  $H$  – соответственно, составляющие затраты на материалы, утилизацию отходов, энергию, создание средств ремонта, поддержание и восстановление их ресурса, амортизацию, заработную плату (основную и дополнительную) и накладные расходы.

Кратчайший путь из вершины  $O$  в одну из вершин нижнего яруса графа и, соответственно, подмножество вершин на этом пути определяет оптимальный состав операций технологического процесса.

Кратчайший путь между указанными вершинами можно определить, например, с помощью принципа оптимальности Р. Беллмана [4], используя свойство аддитивности целевой функции по составляющим частям процесса, для чего находят направления движения из каждой вершины графа решением рекуррентного уравнения:

$$Q_{i+1} = \min[Q_{(i+1)-1} + Q_i], \quad (3)$$

по всем вершинам графа, где  $Q_{(i+1)}$  – затраты, отнесенные к  $i+1$  операциям;  $Q_{(i+1)-1}$  – затраты, отнесенные к присоединению  $(i+1)$ -той операции процесса к  $i$  его операциям;  $Q_i$  – затраты на выполнение  $i$  операций при условии, что соответствующая часть технологического процесса выбрана оптимальным образом.

Выбранные на графе направления движения из его вершин обозначают стрелками. Эти связи обуславливают оптимальные сочетания операций на предыдущих шагах с операцией на последующем шаге. Расчеты при этом ведутся от вершин нижнего их ряда к вершине  $O$ . В вершины графа вписывают значения  $Q_{i+1}$ .

Если двигаться в найденных направлениях из вершины  $O$  графа через одну из вершин каждого яруса графа, то будет найдено сочетание операций, которое при прочих равных условиях, обеспечивает наименьшие затраты на восстановление одной детали. Соответствующее значение целевой функции читают в верхней вершине графа. Полученное решение оптимально для конкретного производства.

### Пример выбора процесса восстановления детали

Рассмотрим процесс восстановления гильзы цилиндра автомобильного двигателя ЗМЗ-53.

Материал детали – чугун СЧ-18 или ИЧГ-33М.

## Морфологическая матрица составляющих операций технологического процесса восстановления гильзы цилиндра

Тип и вид операции	Координаты вершин	Затраты, тыс. руб
Создание припуска на обработку зеркала цилиндра:		
использование приповерхностного слоя	2а	0
установка листовой ДРД	2б	61,7
термопластическое обжатие	2в	17,4
напекание	2г	104,7
железнение	2д	67,3
центрирующего пояска:		
электродуговое напыление	3б	11,3
железнение	3г	23,4
Черновая обработка зеркала цилиндра:		
растачивание	5б	24,0
хонингование	5в	26,8
шлифование	5г	31,5
центрирующего пояска – точение	4г	8,1
Чистовая обработка зеркала цилиндра – хонингование	6в	23,2
центрирующего пояска:		
шлифование	7б	12,7
точение резцами из сверхтвердых материалов	7г	7,4

Устранимые повреждения: износы зеркала цилиндра и наружной цилиндрической поверхности пояска.

Требования к восстановлению: твердость поверхности – 170...240 НВ, допуски на диаметр цилиндра  $+0,06$  мм и диаметр пояска  $-0,02$  мм, биение поверхности пояска относительно поверхности цилиндра –  $0,08$  мм.

Морфологическая матрица [5] и соответствующий граф вариантов технологического про-

цесса с затратами на подготовку и выполнение операций приведены в таблице и на рис. 3. Значения длин дуг графа приведены в их разрывах. Это значения затрат  $Q_{(i+1)-1}$ , которые входят составной частью в уравнение (3).

Расчеты начинают с определения минимального значения функции  $Q_{i+1}$  в вершинах предпоследнего 6-го яруса графа, потому что значения затрат  $Q_i$  ниже 7-го яруса графа равны нулю.

Сравнение между собой длин дуг 6в–7б и 6в–7г дает основание выбрать направление движения вдоль первой дуги и ее ориентировать стрелкой в вершину 7г, а в вершину 6в вписывать минимальное значение функции 7,4 тыс. руб.

Рассмотрим вершины 5-го яруса. Вариантов движения из вершин 5б, 5в и 5г нет, поскольку из каждой вершины исходит по одной дуге. Все дуги помечаем стрелками, а в вершины вписываем сумму 30,6 тыс. руб.

Из вершины 4в возможно три пути движения, но выбран путь 4в–5б–6в–7г, потому что он дает минимальное значение  $Q_{i+1} = 54$  тыс. руб. Дуга 4в–5в помечается стрелкой.

Результаты рассмотрения значений функции  $Q_{i+1}$  в вершинах 3б и 3г аналогичны полученным ранее результатам рассмотрения вершин 5-го яруса.

Из каждой вершины 2-го яруса возможно движение в одну из двух вершин 3-го яруса. Определим возможные пути движения из вершин 2а, 2б, 2в, 2г и 2д парным сопоставлением сумм длин дуг, исходящих из этих вершин, со значениями функции  $Q_{i+1}$  в вершинах 3в и 3г. Все ориентированные дуги сходятся в вершине 3б.

Из вершины 1в возможно пять путей движения в вершины 2-го яруса, однако, самый короткий путь в вершину последнего яруса проходит через вершину 2а. Минимальное значение функции  $Q_{i+1} = 74$  тыс. руб, определяет стоимость восстановления детали с применением технологиче-

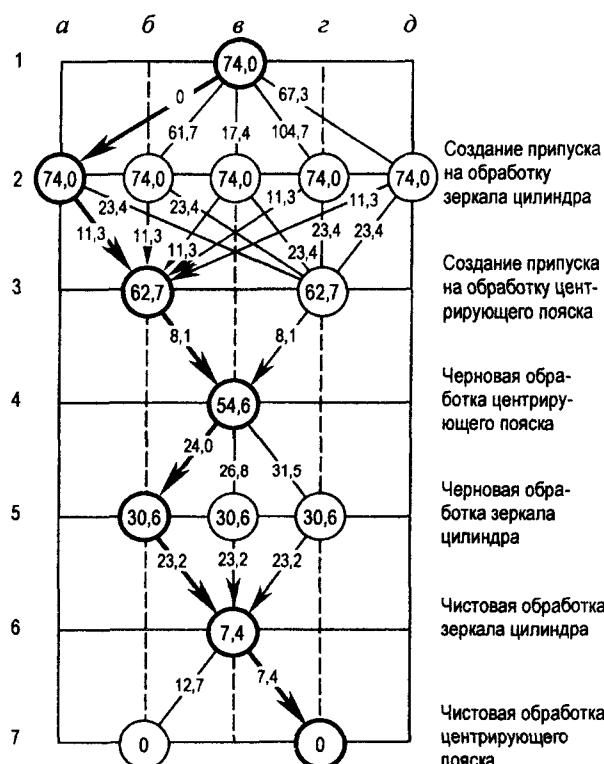


Рис. 3. Граф вариантов технологического процесса восстановления гильзы цилиндра

ского процесса, который описывается сочетанием операций 1<sub>в</sub>-2<sub>а</sub>-3<sub>б</sub>-4<sub>в</sub>-5<sub>б</sub>-6<sub>в</sub>-7<sub>б</sub> и состоит из электродугового напыления и точения пояска, растачивания под ремонтный размер и хонингования зеркала цилиндра и точения пояска резцами из сверхтвердых материалов.

Припуск на механическую обработку зеркала цилиндра за счет использования приповерхностного изношенного слоя металла имеется лишь на заготовках, которые не исчерпали ремонтных размеров. В другом случае необходимо создавать припуск нанесением покрытия или пластическим деформированием материала заготовки.

Исключим из графа вершину 2<sub>а</sub> и связанные с ней дуги. Если повторить расчет сначала, то для графа нового содержания оптимальный технологический процесс описывается признаками 1<sub>в</sub>-2<sub>в</sub>-3<sub>б</sub>-4<sub>в</sub>-5<sub>б</sub>-6<sub>в</sub>-7<sub>б</sub> и состоит из термопластического обжатия заготовки, электродугового напыления и точения пояска, растачивания под номинальный размер, и хонингования зеркала цилиндра и точения пояска резцами из сверхтвердых материалов. Стоимость восстановления гильзы цилиндра в этом случае составит 91,4 тыс. руб.

## Выводы

Предложенный метод выбора технологического процесса восстановления детали учитывает многообразие освоенных и гипотетически возможных составляющих способов создания ремонтных заготовок, их обработки и упрочнения. Инженерная разработка полученного процесса удовлетворяет установленным ограничениям по качеству и производительности и обеспечивает наименьшие затраты на свою реализацию. Если производственные возможности предприятия не

позволяют внедрить предложенный процесс, то путем исключения признаков этого процесса можно найти другой процесс, наиболее близкий к оптимальному.

## Обозначения

$\Gamma$  – граф операций;  $p_{ij}$  – множество вершин графа;  $i = (1, n)$ ;  $j = (1, m)$ ;  $l_{i \dots i+1}$  – множество дуг графа;  $Q$  – затраты на подготовку и выполнение операции, отнесенные к восстановлению одной детали; М, О, Э, Р, А, З и Н – затраты на материалы, утилизацию отходов, энергию, создание средств ремонта, поддержание и восстановление их ресурса, амортизацию, заработную плату (основную и дополнительную) и накладные расходы соответственно;  $Q_{i+1}$  – затраты, отнесенные к  $i+1$ -ой операции;  $Q_{(i+1)-1}$  – затраты, отнесенные к присоединению  $(i+1)$ -ой операции процесса к  $i$  его операциям;  $Q_i$  – затраты на выполнение  $i$  операций при условии, что соответствующая часть технологического процесса выбрана оптимальным образом.

## Литература

1. Шадричев В. А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлокорытиями. Москва–Ленинград: Машгиз (1962)
2. Дехтеринский Л. В., Акмаев К. Х., Апсин В. П. и др. Ремонт автомобилей: учебник для ВУЗов / Под ред. Л. В. Дехтеринского. Москва: Транспорт (1992)
3. Соловьев О. О. Выбор рациональной технологии восстановления детали // Автомобильный транспорт (1988), № 4, 40–41
4. Zwick F. Entdecken, Erfinden, Torschen im morphologischen Wettbild. Munchen–Zurich, Knaur (1966)
5. Беллман Р. Динамическое программирование. Москва: Иностранная литература (1960)

Ivanov V. P.

Optimization of a machine part restoration.

A scheme of the technological process for a machine part restoration is presented as a coherent graph of operational types and kinds. At the process optimization performed using the elements of dynamic programming the restoration expenditure, productivity limitations and the part accuracy were considered. The suggested method for optimizing the machine part restoration process is illustrated by an example of the engine cylinder bushing.

Поступила в редакцию 24.11.98.

© В. П. Иванов, 1999.