

УДК 621.793.7

КРИТЕРИИ ВЫБОРА СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО МАРШРУТА ТЕХНОЛОГИИ

Лузан С.А., д.т.н., профессор

(Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені П. Василенка)

Предложен метод выбора способа и оптимизации технологии восстановления деталей, обеспечивающий необходимое качество при наименьших затратах на свою реализацию.

Актуальность проблемы. В настоящее время существует три основных метода выбора способа восстановления деталей, отличающихся различной степенью учета технических и экономических показателей. Первый метод основан на определении полной себестоимости восстановления детали различными способами и сопоставлении их результатов. Согласно второму методу сравниваются между собой комплексные величины в виде отношений технологических затрат к ресурсу детали новой и восстановленной. В качестве базового показателя принимают такое отношение для новой детали. Третий метод учитывает значения комплексного показателя как функции трех критериев: применимости, долговечности и технико-экономического.

Недостатком первого метода является отсутствие учета технического состояния и послеремонтной наработки восстановленной детали и несопоставимость результатов расчетов. Второй и третий методы позволяют применять способы, которые при малой себестоимости восстановления обеспечивают и малую долговечность по сравнению с нормативной наработкой машины.

Исходя из вышесказанного, вопрос совершенствования метода выбора способов и рационального маршрута технологии восстановления деталей является актуальным.

Анализ публикаций по данной проблеме. Впервые проблема выбора способа восстановления деталей была поставлена и решена В.А. Шадричевым и в дальнейшем многократно видоизменялась другими авторами и решалась различными методами [1].

Критерии оценки процесса восстановления деталей имеют большое значение для ремонтного производства, поэтому непрерывно уточняются [1]. Так В.В. Ефремов предложил в качестве критерия выбора рационального способа восстановления деталей соотношение затрат и наработки машины. В.И. Казарцев определил условие рациональности выбора восстановления тем или другим способом в следующем виде:

$$\frac{C_{\text{в}} i_{\text{в}}}{I_{\text{в}}} \leq \frac{C_{\text{н}} i_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{в}}$ и $C_{\text{н}}$ – стоимость восстановления изношенной и изготовления новой детали соответственно;

$i_{\text{в}}$ и $i_{\text{н}}$ – интенсивность изнашивания восстановленной и новой детали;

$I_{\text{в}}$ и $I_{\text{н}}$ – величина предельного износа восстановленной и новой детали.

В.А. Шадричевым предложены для оценки выбираемого способа восстановления деталей частные критерии: применимости, долговечности и экономичности. Окончательный выбор способа проводится с помощью технико-экономического критерия, связывающего долговечность детали с экономикой её восстановления, по формуле

$$C_{\text{в}} \leq k_{\text{д}} C_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент долговечности восстановленной детали, равный отношению долговечности восстановленной и новой детали.

Критерии (1) и (2), по сути, схожи. Е.Л. Воловик ввел условие, согласно которому сумма приведенных затрат при восстановлении конструктивно-технологических параметров изношенных деталей до уровня новых должна быть минимальной.

Трудности применения комплексных стоимостных критериев вызвали необходимость применения частных критериев.

А.Н. Батищев ввел комбинированный критерий φ_{ki} , отражающий энерго-, трудоемкость, приведенные затраты и долговечность детали

$$\varphi_{ki} = \frac{K_{1i} K_{2i} K_{3i}}{k_{\text{д}i}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$K_{3i} = Z_{\text{в}i} / C_{\text{н}},$$

где K_{1i} , K_{2i} , K_{3i} – соответственно коэффициенты энерго-, трудоемкости и экономичности технологического процесса восстановления детали i -м способом;

$k_{\text{д}i}$ – коэффициент долговечности детали, восстановленной i -м способом;

$Z_{\text{в}i}$ – затраты на восстановление детали i -м способом;

$C_{\text{н}}$ – цена новой детали.

Коэффициент долговечности в выражении (3) определяется по отношению не к новой детали, а нормативному ресурсу отремонтированного агрегата.

Показатели долговечности, введенные составной частью в объем содержания критериев восстановления деталей, затрудняют их применение заводскими специалистами. Разработка технологических процессов восстановления детали с учетом величин послеремонтной наработки требует длительных исследований изменения размеров, зазоров и натягов в

сопряжениях, формы и взаимного расположения поверхностей и других параметров во время эксплуатации отремонтированных агрегатов. Только длительность таких исследований превышает приемлемые сроки технологической подготовки восстановительного производства [1].

М.А. Масино, анализируя данные о фактических ресурсах восстановленных деталей, пришел к выводу, что в подавляющем большинстве случаев коэффициент долговечности определяется износостойкостью рабочих поверхностей деталей, их усталостной выносливостью и прочностью сцепления наращенного слоя с основным металлом [2]. Для получения его численного значения целесообразно выразить этот коэффициент в виде следующей функциональной зависимости:

$$K_d = f(K_u, K_e, K_{cy}), \quad (4)$$

где K_d – коэффициент долговечности;

K_u – коэффициент износостойкости;

K_e – коэффициент выносливости;

K_{cy} – коэффициент сцепляемости.

Поскольку понятие коэффициента долговечности введено для оценки межремонтного ресурса и межремонтного пробега восстановленных деталей, его численное значение должно соответствовать тому из коэффициентов правой части зависимости (4), который имеет минимальную величину. Коэффициент долговечности только в общем случае зависит от всех трех аргументов. В конкретных случаях применительно к группам деталей он может зависеть от двух и даже от одного из них.

Результаты исследований, представленные в работе [3] показали, что металлизационные покрытия, поскольку имеют низкую прочность сцепления с основой, при знакопеременных нагрузках не работают как единое целое с основным металлом. Поэтому неоднородность структуры металлизационного слоя, остаточные внутренние напряжения в нем и механическая обработка деталей не сказываются на снижении усталостной прочности. На основе изложенного можно предположить, что газопламенные покрытия также не оказывают влияние на усталостную прочность восстановленной детали.

Оценка качества сцепления наращенного слоя с основным металлом имеет практическое значение при восстановлении изношенных поверхностей деталей осталиванием и газотермическими методами нанесения покрытий. Однако, учитывая большое количество используемых методик определения прочности сцепления покрытия с основой, трудно сравнивать имеющиеся данные. В то же время, согласно накопленному опыту, несмотря на слабое сцепление (порядка 17–24 МПа), металлизационные покрытия, работающие в условиях жидкостного трения (коленчатые валы), а также защитные металлизационные покрытия надежно работают в эксплуатации. Поэтому за необходимый эталон сцепляемости можно принять сцепляемость равную

20 МПа [3]. Как свидетельствуют результаты исследований приведенные в разделе 5 покрытия, напыленные интегрированными газопламенными технологиями, имеют прочность сцепления превышающую 20 МПа. Применительно к способам восстановления, не связанным с наращиванием металла, например пластическое деформирование, понятие коэффициента сцепляемости не имеет смысла. Все распространенные виды наплавки поверхностей, а также электролитическое хромирование обеспечивают высокую прочность сцепления наращенного слоя с основным металлом (по В.А. Шадричеву от 500 МПа и более).

Таким образом, на основании проведенных рассуждений можно сделать вывод, что коэффициент долговечности K_D зависит от величины коэффициента износостойкости K_u .

Определение численных значений коэффициентов износостойкости может быть осуществлено на основании лабораторных исследований износостойкости образцов по своим параметрам соответствующим восстановленной и новой детали. При необходимости после лабораторных испытаний можно провести эксплуатационные с целью подтверждения полученных результатов.

Для вычисления коэффициента износостойкости используется зависимость:

$$K_u = \frac{V_v}{V_n}, \quad (5)$$

где V_v и V_n – скорость изнашивания соответственно восстановленной и новой деталей в весовых или линейных величинах, приходящаяся на машино-час или километр пробега.

Цель работы. Определение критерией выбора способа и рационального маршрута технологии восстановления деталей машин.

Изложение основного материала. На основе выполненного анализа критериев выбора способа и критериев оценки технологии восстановления деталей машин предлагается применять следующие критерии для оценки и выбора метода и рационального маршрута технологии восстановления деталей в такой последовательности: 1) экономической целесообразности восстановления, 2) технологический, 3) комплексный технико-экономический.

1. Отбор вариантов технологий восстановления по экономической целесообразности восстановления.

Известно, что на сегодняшний день ресурс отремонтированной транспортной техники по сравнению с новой составляет не более 50% (хотя по ГОСТ 23.465-79 должен быть не ниже 80%), скорость изнашивания деталей после ремонта возрастает в 1,6-2,0 раза. Поэтому, непрерывно проводятся работы по совершенствованию технологий восстановления деталей с целью получения их коэффициента долговечности не менее единицы. В связи в этом для обеспечения экономической целесообразности восстановления деталей

необходимо, чтобы себестоимость их восстановления C_v не превышала произведения себестоимости изготовления новых C_n , на коэффициент износостойкости, т.е. должно выполняться условие:

$$C_v \leq K_u C_n. \quad (6)$$

Например, метод газопламенного напыления, позволяет многократно повышать ресурс деталей путем нанесения покрытий, например, из порошковых материалов системы Ni-Cr-B-Si и обеспечить выполнение выражения (6).

2. Выбор вариантов по технологическому критерию.

Критерий применимости или технологический критерий, предложенный, В.А. Шадричевым, позволяет определить применимость способов восстановления к конкретным деталям. Выбор способов восстановления зависит от конструктивно-технологических особенностей и условий работы деталей, величины их износов, эксплуатационных свойств самих способов, определяющих долговечность отремонтированных деталей, и стоимости их восстановления [1]. Конструктивно-технологические особенности деталей определяются: их структурными характеристиками – геометрической формой и размерами, материалом и термообработкой, поверхностной твердостью, точностью изготовления и шероховатостью поверхности; характером сопряжения (типом посадки); условиями работы – характером нагрузки, родом и видом трения, величиной износа за эксплуатационный период. Знание структурных характеристик деталей, условий работы и эксплуатационных свойств способов позволяет в первом приближении решить вопрос о применимости того или иного из них для восстановления конкретной детали. Такой анализ позволяет установить, какие из деталей могут восстанавливаться всеми или несколькими способами и какие по своим структурным характеристикам допускают только один способ восстановления. По мнению В.А. Шадричева критерий применимости не может быть выражен числом и является по существу предварительным, поскольку при его помощи нельзя решить вопрос выбора рационального способа восстановления деталей, в случае, когда способов может быть несколько. Критерий применимости позволяет классифицировать детали по способам восстановления и выявить перечень деталей, восстановление которых возможно разными способами.

М.А. Масино предложил методику определения применимости способов восстановления деталей с определением численных значений коэффициента применимости для конкретных групп деталей [2]. Однако, как отмечает автор, установить численные значения коэффициента применимости на основе каких-либо математических вычислений едва ли возможно и целесообразно. В данном случае рекомендуется прибегнуть к некоторой аналогии с основными понятиями теории вероятностей. В том случае, если тот или иной способ восстановления может быть применен к деталям данной группы по аналогии с достоверным событием, можно присвоить коэффициенту применимости численное значение,

равное 1. В том случае, если этот способ к деталям данной группы неприменим по аналогии с невозможным событием, можно присвоить коэффициенту применимости численное значение, равное 0. В случае, если не имеется данных, опровергающих возможность применения способа, а также подтверждающих его применимость, можно предложить равную вероятность того и другого и на основании этого условно присвоить коэффициенту применимости численное значение, равное 1/2.

Из изложенного видно, что на этом этапе определяется только принципиальная возможность применения способов восстановления без учета ресурса восстановленных деталей и экономической эффективности восстановления.

3. Обеспечение выбранной интегрированной технологией требуемой скорости изнашивания и удельных затрат по напылению

Выбор оптимального способа восстановления деталей с учетом их ресурса и экономической целесообразности предлагается производить по комплексному технико-экономическому критерию (K_k), который представляет собой произведение скорости изнашивания (V) восстановительного покрытия на удельные затраты по его напылению ($Z_{об.уд}$):

$$K_k = V \cdot Z_{об.уд}. \quad (7)$$

Критерий экономической эффективности технологического процесса нанесения восстановительного покрытия удобно представить как удельные затраты на напыление единицы объема покрытия. Это позволяет сравнивать различные способы нанесения покрытий с экономической точки зрения.

Годовые затраты по нанесению покрытия составляют

$$Z_i = E_n K_i + C_i, \quad (8)$$

где E_n – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений;
 K_i – капитальные затраты (стоимость технологического оборудования, оснастки);

C_i – затраты на материал покрытия, технологические материалы и электроэнергию;

i – номер варианта способа нанесения покрытия.

Тогда затраты при нанесении покрытия на одну деталь составляют

$$z_{удi} = \frac{Z_i}{N_i} = \frac{E_n K_i + C_i}{N_i}, \quad (9)$$

где N_i – количество деталей, восстанавливаемых в течение года.

$$N_i = \frac{\Phi_i}{T_{ni}}, \quad (10)$$

где Φ_i – действительный годовой фонд времени работы оборудования с учетом потерь времени по организационным причинам, на простои, осмотры и ремонты;

T_{ni} – время нанесения покрытия.

Подставляя выражение (10) в (9) получаем следующую формулу

$$z_{yoi} = \frac{T_{ni}(E_n K_i + C_i)}{\Phi_i} = T_{ni} \left(\frac{E_n K_i}{\Phi_i} + \frac{C_i}{\Phi_i} \right). \quad (11)$$

Анализируя выражение (11) делаем вывод, что первое слагаемое в скобках представляет собой капитальные затраты, отнесенные к одному часу действительного фонда работы оборудования, другими словами – удельные капитальные вложения. Второе слагаемое является технологической себестоимостью часа работы оборудования, т.е. удельные затраты на нанесение покрытия.

Если представить время нанесения покрытия T_{ni} в следующем виде

$$T_{ni} = \frac{F_i h_i}{Q_i}, \quad (12)$$

где F_i – суммарная площадь восстанавливаемой поверхности, см²;

h_i – толщина покрытия, см;

Q_i – производительность нанесения покрытия, см³/мин.

Тогда выражение для определения затрат при нанесении покрытия на одну деталь (11) примет вид

$$z_{yoi} = \frac{F_i h_i}{60 Q_i} \left(\frac{E_n K_i}{\Phi_i} + C_{mi} \right), \quad (13)$$

где $C_{mi} = \frac{C_i}{\Phi_i}$ – технологическая себестоимость часа работы оборудования.

Полученное выражение (13) позволяет определить затраты на нанесение покрытия требуемой толщины на заданную площадь восстанавливаемой поверхности или, другими словами, технологическую себестоимость нанесения покрытия.

Для удобства сравнительной оценки различных способов нанесения восстановительного покрытия получим выражение без учета геометрических характеристик покрытия (площади и толщины), т.е. разделим затраты по

нанесению покрытия на его объем, т.е. $V_i = F_i h_i$

$$Z_{об.уді} = \frac{1}{60Q_i} \left(\frac{E_n K_i}{\Phi_i} + C_{mi} \right). \quad (14)$$

Формула (14) представляет собой многопараметрическую технико-экономическую модель, позволяющую определить затраты по напылению единицы объема восстановительного покрытия, что и является критерием экономической эффективности технологического процесса.

Минимум $Z_{об.уді}$ будет свидетельствовать о высокой экономической эффективности технологического процесса восстановления деталей. В то же время минимальный уровень затрат не всегда может соответствовать требуемой износостойкости детали. Поэтому выбор оптимального технологического процесса восстановления деталей следует производить по комплексному технико-экономическому критерию K_6 (5), учитывающему скорость изнашивания нанесенного покрытия:

$$V = \frac{I}{\Delta T}, \quad (15)$$

где I – линейный износ детали (образца);

ΔT – интервал времени, в течение которого возник износ.

Задачу выбора способа восстановления детали, отвечающего комплексному технико-экономическому критерию, и структуры технологического процесса решаем на основе графового представления возможных вариантов сочетания технологических операций, обеспечивающих минимальное значение целевой функции.

Морфологическая матрица основных операций и соответствующий граф вариантов технологического процесса восстановления деталей представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1 – Морфологическая матрица основных операций технологического процесса восстановления деталей машин

№ эта-па	Операция		Коорди-наты вершин
	Тип	Вид	
1	Определение номенклатуры способов восстановления деталей	1. Газопламенное напыление.	1–1
		2. Интегрированное газопламенное напыление.	1–2
		3. Плазменное напыление.	1–3
		4. Детонационное напыление.	1–4
		5. Металлизация электродуговая.	1–5
		6. Осталивание.	1–6
		7. Вибродуговая наплавка.	1–7
		8. Наплавка под слоем флюса.	1–8

		9. Хромирование. 10. Наплавка в углекислом газе. 11. Ручная наплавка.	1–9 1–10 1–11
2	Выбор способов восстановления детали по критерию применимости	1. Газопламенное напыление. 2. Интегрированное газопламенное напыление. 3. Плазменное напыление. 4. Детонационное напыление. 5. Металлизация электродуговая. 7. Вибродуговая наплавка. 10. Наплавка в углекислом газе.	2–1 2–2 2–3 2–4 2–5 2–7 2–10
3	Выбор способа восстановления детали по комплексному технико-экономическому критерию	2. Интегрированное газопламенное напыление.	3–6
4	Формирование ремонтного контура	1. Удаление поверхностного слоя на технологически максимальную или минимально необходимую глубину. 2. Разделка и удаление дефектов.	4–4 4–8
5	Подготовка восстанавливаемой поверхности	1. Струйно-абразивная. 2. Механические способы: –нарезание рваной резьбы; – фрезерование насечки, канавок клиновидной формы; – нарезание кольцевых канавок; – щеточная обработка. 3. Химическое травление. 4. Электроискровая обработка.	5–3 5–5 5–7 5–9
6	Формирование восстановительного покрытия (слоя)	2. Интегрированное газопламенное напыление.	6–6
7	Обработка покрытия	1. Точение. 2. Фрезерование. 3. Шлифование. 4. Полирование.	7–2 7–4 7–6 7–8

Множество вершин графа соответствует множеству составляющих операций. Горизонтальные ряды вершин графа соответствуют подмножеству видов $i = n$ операции j - го типа. Выбранное подмножество вершин, взятых по одной из каждого ряда графа, определяет один из вариантов технологического процесса.

Кратчайший путь L_{i+1} между указанными вершинами определяется путем решения рекуррентного уравнения в каждой вершине графа [4].

$$L_{i+1} = \min(\text{по всем } i, \text{ по всем } n)[L_{(i+1)-1} + L_i], \quad (16)$$

где i – шаги решения;

n – число видов технологической операции j -го типа;

L_i – затраты на выполнение i -й операции при условии, что соответствующий участок графа выбран оптимальным образом;

L_{i+1} – затраты, отнесенные к $i+1$ операциям; $L_{(i+1)-1}$ – затраты, отнесенные к присоединению $(i+1)$ -й операции процесса к i его операциям.

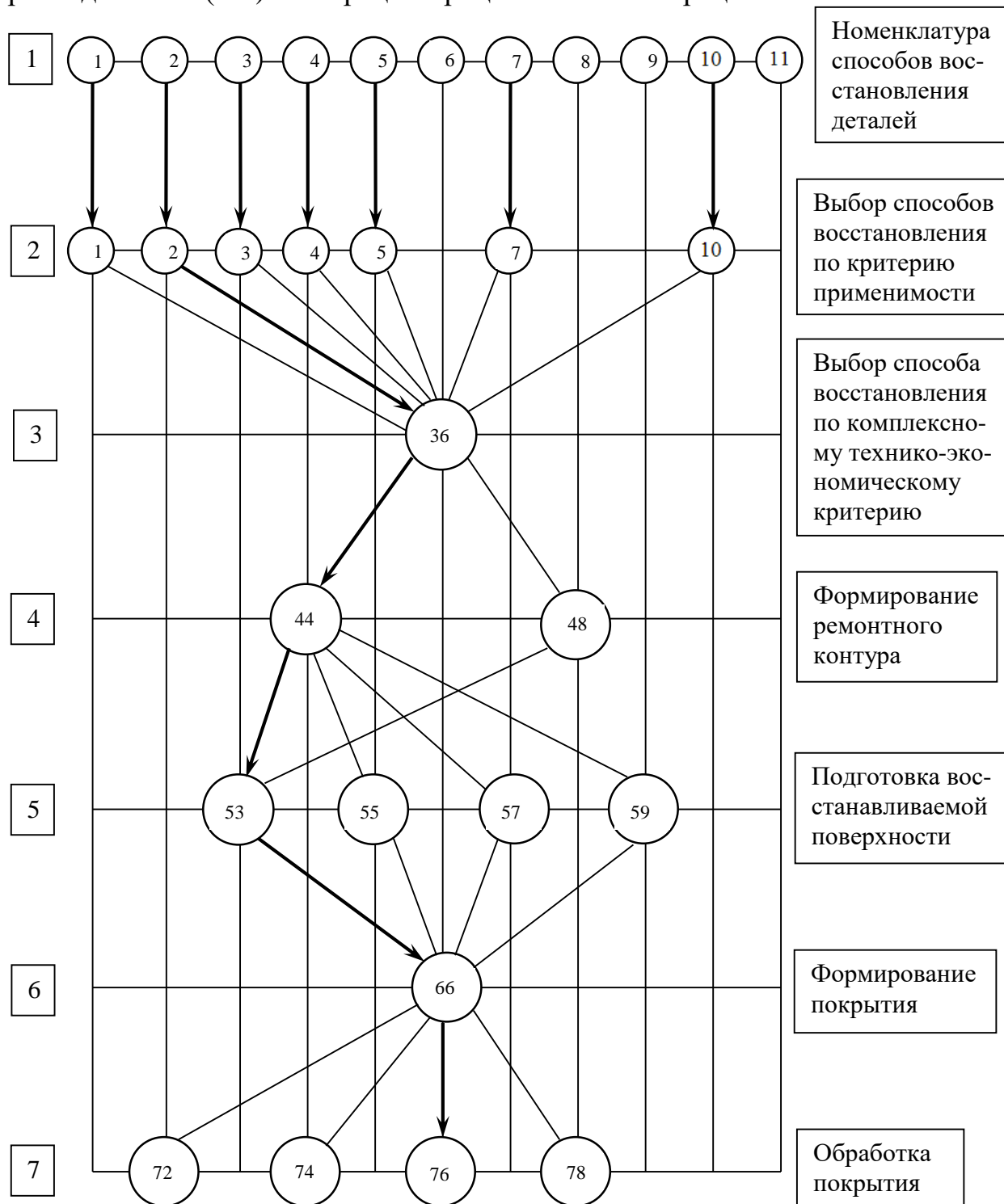


Рисунок 1 - Граф вариантов технологического процесса восстановления деталей

Выбранные на графе направления движения из его вершин обозначаются стрелками.

Выбор оптимального способа восстановления (вершина 36) производится в направлении от 1-го ряда ко 2-му по критерию применимости и от 2-го к 3-му ряду по комплексному технико-экономическому критерию.

Далее направление расчетов осуществляется от вершин нижнего ряда 7 к вершине 36 ряда 3, выполняя условие оптимального сочетания операций на предыдущих шагах с операциями на последующем шаге, другими словами обеспечивая минимальные затраты на предыдущую операцию. Таким образом, двигаясь от последующего типа операции к предыдущему в направлении к вершине 36 обеспечивается получение наименьших затрат на восстановление детали. Длину каждого ребра графа рассматриваем как затраты на выполнение последующей операции.

Оптимизация задачи заключается в поиске кратчайшего пути из вершины 36 в одну из вершин нижнего ряда 7 графа и соответственно подмножество вершин на этом пути определяет оптимальный состав операций технологического процесса. Значение целевой функции проставляется в верхней вершине графа 36.

Выводы. На основании изложенного можно сделать вывод, что предложенный метод выбора способа и оптимизации технологии восстановления детали обеспечивает необходимое качество детали при наименьших затратах на свою реализацию.

В случае, если технологические возможности предприятия не позволяют освоить наиболее оптимальный технологический процесс восстановления детали, то путем исключения невыполнимых операций этого техпроцесса можно выбрать другой, наиболее близкий к оптимальному.

Список литературы:

1. Шадричев В. А. Основы технологии автостроения и ремонта автомобилей / Шадричев В. А. – Л. : Машиностроение, 1976. – 560 с.
2. Масино М. А. Повышение долговечности автомобильных деталей при ремонте / Масино М. А. – М. : Транспорт, 1972. – 148 с.
3. Шадричев В. А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлопокрытиями / Шадричев В. А. - М. – Л. : Машгиз, 1962. – 269 с.
4. Восстановление деталей машин : [справочник] / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

Анотація**Критерії вибору способу відновлення деталей машин і визначення раціонального маршруту технології**

Лузан С.О.

Запропоновано метод вибору способу та оптимізації технології відновлення деталей, що забезпечує необхідну якість при найменших витратах на свою реалізацію.

Abstract**Selection criteria a method of restoring parts of machines and the definition of a rational route technology**

A. Luzan

The method of choice of method and optimization technology to restore details to ensure the required quality at the lowest cost for its implementation.