

УДК 621.923.75

Понамарёва Е. А.¹, ведущий инженер, Попович С. А.¹, ст. науч. сотрудник,
Пешко В. А.¹, ст. науч. сотрудник, Анастасьев А. В.², аспирант,

¹ ГБУ «Научно-технический центр инноваций и технологий», ДНР,

² Донецкий национальный технический университет, ДНР,

Тел./Факс: +7(949)3723781; E-mail: lab@ntcdnr.ru

СИНТЕЗ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОБРАБОТКИ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В статье приведена метода применения метода морфологического анализа с привлечением теории графов для синтеза новых технологических схем отделки поверхностей деталей машин посредством свободного абразива. Произведен разбор технологических схем обработки по базовым характеристикам, необходимый для последующего вывода структурной формулы и описания различных вариантов реализации. Использован алгоритм Дейкстры для аргументированного перебора комплекса вариантов.

Ключевые слова: *отделка, поверхность, свободный абразив, морфологический анализ, синтез.*

E.A. Ponomaryova, S.A. Popovich, V.A. Peshko, A.V. Anastasyev

SYNTHESIS OF NEW TECHNOLOGICAL SCHEMES OF PROCESSING WITH A FREE ABRASIVE USING THE METHOD OF MORPHOLOGICAL ANALYSIS

The article presents a method for applying the method of morphological analysis with the involvement of graph theory for the synthesis of new technological schemes for finishing the surfaces of machine parts using a free abrasive. The analysis of technologies according to the basic characteristics is carried out, which is necessary for the subsequent derivation of the structural formula and description of various options for the implementation of technological processing schemes. Dijkstra's algorithm is used for reasoned enumeration of a set of options.

Keywords: *finishing, surface, free abrasive, morphological analysis, synthesis.*

1. Введение

Незаслуженно игнорируемым направлением отделочной обработки в машиностроении следует назвать обработку поверхностей свободным абразивом. Эти технологии используют для зачистки и финишной доводки деталей в машиностроении. Частным случаем применения выступает также подготовка подложек под нанесение защитных и декоративных покрытий.

Здесь инструментом выступает гибкая среда абразивного порошка – сухая, в пасте или связанная жидкостью. Процесс взаимодействия между средой абразива и поверхностью заготовки подразумевает сложный комплекс скольжения с истиранием, срезом и соударением, причем все указанные явления происходят на микроуровне. В результате в значительной мере снижается шероховатость. В зависимости от схемы реализации и задействованных сил можно говорить о снятии определенного слоя материала, ничтожно малого по сравнению с лезвийной обработкой и намного меньше, чем достигается даже при чистовом шлифовании, и в большинстве случаев отделочные операции с привлечением технологий свободного абразива относят к категории безразмерной обработки.

За счет своих характерных черт – нежесткости импровизированного инструмента, низкого тепловыделения, способности воздействовать на микрорельеф поверхности минимальным силовым фактором – технология обработки свободным абразивом может стать весьма перспективной для доводки сложных поверхностей, в том числе – в отно-

шении деталей из промышленных сплавов, механическая обработка которых традиционными методами затруднена.

2. Морфологический анализ методов обработки свободным абразивом

Синтез новых решений на основе морфологического анализа позволяет в достаточно сжатые сроки получить целый комплекс различных вариантов, в том числе – неочевидных при поверхностном подходе. С его помощью также достаточно удобно исследовать базовые взаимосвязи и зависимости внутри рассматриваемой системы.

Для пошагового исследования и вывода структурной формулы технологической схемы обработки свободным абразивом следует установить несколько базовых характеристик. Назначаем кодировку каждому возможному варианту в таблице 1.

Таблица 1. – Описание базовых характеристик для структурного анализа

№	Базовая характеристика	Варианты реализации	Код
А	Состояние абразивной среды	Сухое свободное	А1
		Связанное жидкостью	А2
		Связанное пастой	А3
		Струйно-воздушное	А4
		Струйно-жидкостное	А5
В	Число источников силового воздействия	Один (традиционная схема)	В1
		Два (гибридная схема)	В2
		Три и более (композиционная схема)	В3
С	Источник силового воздействия	Механический прижим	С1
		Центробежные силы	С2
		Струйная подача под давлением	С3
		Магнитные силы	С4
		Вибрационные силы	С5
		Иные силы	С6
D	Степень подвижности системы	Заготовка неподвижна, абразив подвижен	D1
		Заготовка подвижна, абразив неподвижен	D2
		Заготовка подвижна, абразив подвижен	D3
Е	Число задействованных относительных перемещений между заготовкой и абразивом	Одно (одинарная схема)	E1
		Два (парная схема)	E2
		Три и более (сложная схема)	E3
F	Характер относительного перемещения между заготовкой и абразивом	Линейное	F1
		Вращательное	F2
		Планетарное	F3
		Качение	F4
		Хаотичное	F5
		Комбинированное	F6
G	Направленность относительного перемещения между заготовкой и абразивом	Нереверсивное (возможно перемещение лишь в одном направлении)	G1
		Реверсивное (возможна смена направления)	G2

Описывая технологическую схему обработки как набор вариантов базовых характеристик, можно вывести структурную формулу вида:

$$A_p - B_r - C_s - D_t - E_u - F_x - G_y$$

Если число источников силового воздействия насчитывает два и более варианта:

$$A_p - B_r - (C_s - C_s - \dots) - D_t - E_u - F_x - G_y$$

Если при обработке реализовано два и более относительных перемещения между абразивной средой и поверхностью заготовки:

$$A_p - B_r - (C_s - C_s) - D_t - E_u - (F_x - F_x - \dots) - G_y$$

Такой подход позволяет описать практически любую существующую технологическую схему обработки свободным абразивом, отраженную в технической литературе или запатентованную как изобретение. Некоторые схемы проиллюстрированы на рис. 1.

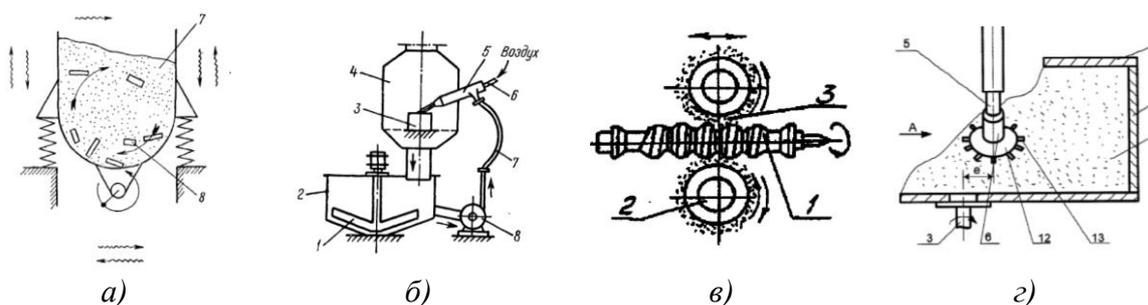


Рисунок 1. Варианты разных технологических схем обработки свободным абразивом

На первой схеме (рис. 1а) приведен вариант классической вибрационной обработки в среде свободного абразива, при которой хаотичное перемещение деталей внутри емкости корректируется дополнительным вращением, которое заставляет массу порошка непрерывно перемещаться [1].

Вторая схема (рис. 1б) демонстрирует классическое применение принципа струйно-абразивной обработки, при котором абразив, связанный потоком воздуха под высоким давлением, подается на поверхность детали. Сама деталь при этом остается неподвижной, а подаваемый абразивный порошок падает в нижнюю емкость [2].

Третья схема (рис. 1в) отражает особенности магнитно-абразивной обработки витков червячного вала. Два облака ферромагнитного абразивного порошка вращаются, симметрично расположенные по обе стороны от заготовки. Самому валу также сообщают вращение, увязанное с движением порошка. При этом источники магнитного воздействия, вокруг которых удерживается абразив, перемещаются параллельно оси заготовки [3].

Четвертая схема (рис. 1з) соответствует центробежно-ротационному методу обработки в среде свободного абразива. Диск с радиально закрепленными на нем деталя-

ми установлен на оправке эксцентрично относительно ротора с абразивным порошком и зафиксирован неподвижно. При вращении формируется центробежно-уплотненный поток абразива, непрерывно омывающий каждую из деталей, причем каждая заготовка последовательно погружается в поток в зависимости от степени наклона оправки и радиального положения на диске [4].

Для аргументированного описания каждой приведенной технологической схемы в кодированном виде путем отражения вариаций базовых характеристик используем таблицу 2.

Таблица 2. Примеры описания технологической схемы обработки структурной формулой

Схема	Расшифровка вариации характеристик	Структурная формула
<i>1a</i>	Состояние среды – сухая несвязанная	<i>A1-B2-(C2-C5)-D3-E1-F5-G2</i>
	Два источника силового воздействия	
	Силовое воздействие – вибрации и центробежная сила	
	Заготовка и абразив подвижны	
	Одно перемещение при контакте	
	Характер контакта – хаотичный	
	Возможно реверсивное движение	
<i>1б</i>	Состояние среды – струйно-воздушная	<i>A4-B1-C3-D1-E1-F1-G1</i>
	Один источник силового воздействия	
	Силовое воздействие – струя под давлением	
	Заготовка неподвижна, абразив подвижен	
	Одно перемещение при контакте	
	Характер перемещения – линейный	
Реверсивное движение невозможно		
<i>1в</i>	Состояние среды – сухая несвязанная	<i>A1-B1-C4-D3-E1-F2-G2</i>
	Один источник силового воздействия	
	Силовое воздействие – магнитные силы	
	Заготовка и абразив подвижны	
	Одно перемещение при контакте	
	Характер контакта - вращательный	
Возможно реверсивное движение		
<i>1г</i>	Состояние среды – сухая несвязанная	<i>A1-B1-C2-D1-E1-F6-G2</i>
	Один источник силового воздействия	
	Силовое воздействие – центробежные силы	
	Заготовка неподвижна, абразив подвижен	
	Одно перемещение при контакте	
	Характер контакта – комбинированный	
	Возможно реверсивное движение	

3. Определение числа всех доступных вариантов

Для иллюстрации предложенного структурного построения также удобно использовать теорию графов, где каждая базовая характеристика становится еще одним уровнем [5]. Отобразим полученный граф на рисунке 2.

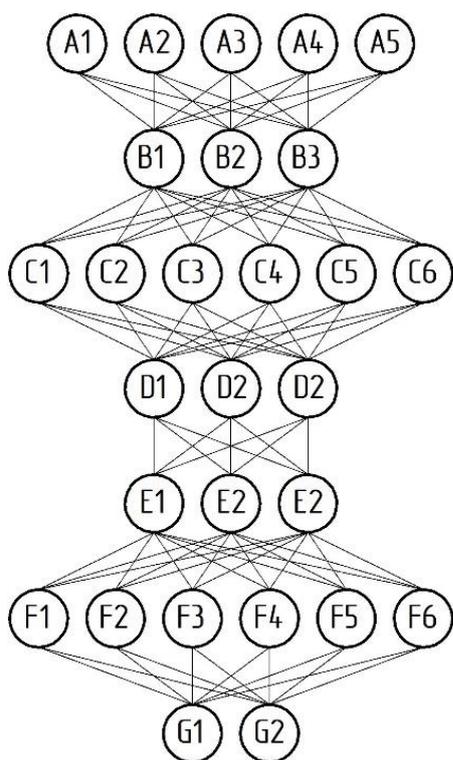


Рисунок 2. Граф структуры технологических схем обработки свободным абразивом

Рассчитаем общее число всех возможных вариантов, образующееся суммой вариаций в пределах указанных базовых характеристик. Для этого используем классический метод расчета числа путей ориентированного графа:

$$G_{\text{общ}} = \prod_{i=1}^n K_i = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$$

где K_i – число значений i -ого параметра;

n – число уровней графа.

Для рассматриваемого графа число путей или число доступных вариантов технологических схем составит:

при $n = 7$

$$G_{\text{общ}} = 5 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 2 = 9\,720 \text{ (вариантов)}$$

Но такой расчет не учитывает, что мы можем одновременно использовать два, три и более силовых источников, а также два, три и более относительных перемещений между заготовкой и абразивом. Вместе с этим число возможных вариантов для этих двух уровней графа закономерно увеличится.

Принимаем, что более трех компонентов в комбинации для уровней С и F мы использовать не будем ради упрощения кинематики процесса.

Для расчета числа возможных вариантов при делении набора из шести составляющих на пары и тройки воспользуемся формулой сочетаний из комбинаторики:

$$V_{6/2} = \frac{6!}{2! \cdot (6-2)!} = \frac{720}{2 \cdot 24} = 15 \text{ (вариантов)}$$

$$V_{6/3} = \frac{6!}{3! \cdot (6-3)!} = \frac{720}{6 \cdot 6} = 20 \text{ (вариантов)}$$

Тогда уровни графа, соответствующие выбранным источникам силового воздействия (С) и характеру относительного перемещения между заготовкой и абразивом (F) расширяются до иного количества вершин, определяемого как сумма исходных вершин, а также сумма парных и тройных вариантов:

$$K_{C,F} = V_{\text{исх}} + V_{6/2} + V_{6/3} = 6 + 15 + 20 = 41 \text{ (вариант)}$$

Покажем расширенный вид графа, в котором схематично показана возможность использования сочетаний двух и трех вершин на уровнях С и F, на рисунке 3.

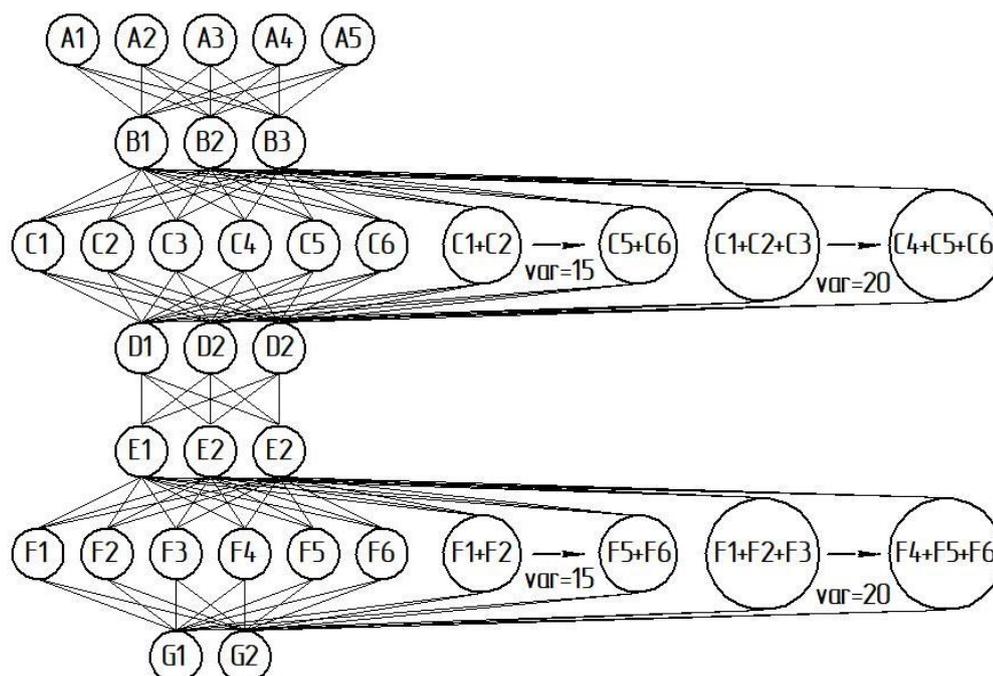


Рисунок 5. Расширенный вид графа с учетом добавочных вариантов на уровнях С и F

Общее число возможных вариантов технологических схем обработки для сформированного графа в этом случае будет равно:

$$G_{\text{общ}} = 5 \cdot 3 \cdot 41 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 41 \cdot 2 = 453\,870$$

Последовательная проработка такого количества вариантов практически невозможна. Даже при привлечении команды опытных специалистов-исследователей это заняло бы месяцы, если не годы аналитической работы. Поэтому разумным будет ввести некоторые обоснованные ограничения, чтобы на стартовом этапе в существенной мере сократить перечень интересующих вариантов структуры.

4. Использование результатов морфологического анализа для синтеза новых технологических схем обработки

В качестве ограничений используем набор критериев, способных охарактеризовать технологическую схему обработки с точки зрения ее эффективности и удобства в реализации. Это будут:

- 1) Критерии, определяющие непосредственное влияние на результат обработки:
 - достижение низкой шероховатости;
 - отсутствие значимого изменения размеров и формы поверхностей;
 - минимальная силовая нагрузка на поверхностные слои;
 - отсутствие термического воздействия на металл.
- 2) Критерии, определяющие адаптацию технологической схемы обработки с учетом состава операции как единицы технологического процесса:
 - возможность повышения производительности;
 - отсутствие сложной наладки;

- возможность гибкой настройки на разные размеры;
- возможность корректировки режимов;
- возможность полной автоматизации процесса;
- безопасность для обслуживающего персонала.

Технологическую схему, полностью удовлетворяющую указанным критериям, следует признать наиболее удобной для обработки свободным абразивом с чисто практической точки зрения. Для ее поиска инструментами структурного анализа используем ограничения, соответствующие следующим утверждениям:

- отказываемся от связывания абразивной среды пастой и применения струйной системы подачи, отдавая предпочтение сухому состоянию ($A1$) и нахождению в жидкостной среде ($A2$);
- выбираем использование исключительно центробежных сил в качестве единственного источника силового воздействия ($B1$ и $C2$) как наиболее предсказуемых и простых в реализации средствами механического оборудования;
- учитываем, что при применении центробежных сил перемещение абразивной среды относительно поверхности заготовки не может быть хаотичным и качающимся (исключены варианты $F4$ и $F5$);
- чтобы максимально упростить оценку, придерживаемся утверждения, что в схеме реализовано одно-единственное движение взаимодействия абразива и заготовки ($E1$);
- устанавливаем, что реверсивное движение невозможно или не имеет значения ($G1$).

Отразим преобразованный граф на рис. 3.

Тогда общее число вариантов, удовлетворяющих всем указанным выше критериям и ограничениям, составит:

$$G_{\text{крит}} = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 1 = 24$$

Для дальнейшего перебора вариантов используем алгоритм Дейкстры [6]. Он решает задачу о кратчайших путях из одной вершины для взвешенного ориентированного графа, в котором веса всех рёбер неотрицательны. Дугам, соединяющим соседние графы, присваивается численный вес, а путь из одного начального графа в конечный определяется суммой пройденных дуг.

В нашем случае используем алгоритм Дейкстры, но присваиваем числовую оценку сложности реализации тому или иному варианту базовой характеристики. Поскольку первичное сокращение дерева графа привело к условию, что мы на некоторых уровнях мы используем только один вариант ($B1$, $C2$, $E1$ и $G1$), то сумму этих вершин определяем как «0».

При назначении веса исходим из субъективной оценки сложности реализации тех или иных вариантов базовых характеристик.

Принимаем:

1. Отказ от применения жидкости как носителя абразивной среды позволит в значительной мере упростить загрузку оборудования и уменьшит усилие, необходимое для реализации перемещений. Так $A1 = 1$, $A2 = 2$.

2. Схема, при которой заготовка остается неподвижной, а абразиву сообщают постоянное движение, будет оптимальной с точки зрения условий обработки, пусть даже это потребует усложнения механики реализации. Пусть $D1 = 1$.

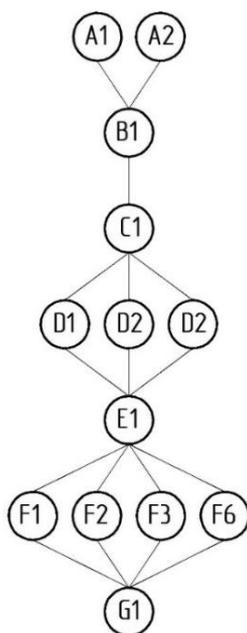


Рисунок 3. Граф структуры технологической схемы с учетом критериев

3. Конструктивно проще обеспечить движение заготовки относительно абразивной среды, но такая мера не позволяет эффективно использовать весь объем порошка и задействовать постоянное перемешивание. Поэтому $D2 = 1$.

4. При привлечении центробежных сил в качестве источника силового воздействия наиболее характерным типом контакта между поверхностью заготовки и потоком абразива будет скольжение по дуговой траектории, что наиболее близко к вращательному движению. Тогда $F2 = 1$.

5. Реализация линейного перемещения путем возбуждения центробежных сил повлечет за собой скольжение по касательной на весьма коротком расстоянии, что менее желательно и потребует вспомогательных перемещений для покрытия всей площади обрабатываемой поверхности. Поэтому $F1 = 2$.

6. Реализация планетарного и вихревого перемещения потребует значительного конструктивного усложнения оборудования. Таким образом $F3 = 3, F6 = 3$.

Сводим расчет веса вариантов в таблицу 3.

Таблица 3. – Расчет веса вариантов.

Формула	Вес			Σ	Формула	Вес			Σ
	A	D	F			A	D	F	
$A1-B1-C2-D1-E1-F1-G1$	1	1	2	4	$A2-B1-C2-D1-E1-F1-G1$	2	1	2	5
$A1-B1-C2-D1-E1-F2-G1$	1	1	1	3	$A2-B1-C2-D1-E1-F2-G1$	2	1	1	4
$A1-B1-C2-D1-E1-F3-G1$	1	1	3	5	$A2-B1-C2-D1-E1-F3-G1$	2	1	3	6
$A1-B1-C2-D1-E1-F6-G1$	1	1	3	5	$A2-B1-C2-D1-E1-F6-G1$	2	1	3	6
$A1-B1-C2-D2-E1-F1-G1$	1	1	2	4	$A2-B1-C2-D2-E1-F1-G1$	2	1	2	5
$A1-B1-C2-D2-E1-F2-G1$	1	1	1	3	$A2-B1-C2-D2-E1-F2-G1$	2	1	1	4
$A1-B1-C2-D2-E1-F3-G1$	1	1	3	5	$A2-B1-C2-D2-E1-F3-G1$	2	1	3	6
$A1-B1-C2-D2-E1-F6-G1$	1	1	3	5	$A2-B1-C2-D2-E1-F6-G1$	2	1	3	6
$A1-B1-C2-D3-E1-F1-G1$	1	1	2	4	$A2-B1-C2-D3-E1-F1-G1$	2	2	2	6
$A1-B1-C2-D3-E1-F2-G1$	1	2	1	4	$A2-B1-C2-D3-E1-F2-G1$	2	2	1	5
$A1-B1-C2-D3-E1-F3-G1$	1	2	3	6	$A2-B1-C2-D3-E1-F3-G1$	2	2	3	7
$A1-B1-C2-D3-E1-F6-G1$	1	2	3	6	$A2-B1-C2-D3-E1-F6-G1$	2	2	3	7

С позиции наименьшего суммарного веса и, соответственно, наибольшей простоты в реализации следует выделить варианты $A1-B1-C2-D1-E1-F2-G1$ и $A1-B1-C2-D2-E1-F2-G1$, расчет веса которых равен 3. Самыми сложными в реализации необходимо признать варианты $A2-B1-C2-D3-E1-F3-G1$ и $A2-B1-C2-D3-E1-F6-G1$, чей вес равен 7 и

для которых потребуется воссоздать планетарное или комбинированное перемещение абразива относительно поверхности заготовки и использовать жидкостную среду для связывания порошка абразива.

На рис. 4 изобразим возможные технологические схемы, соответствующие указанным выше структурным формулам.

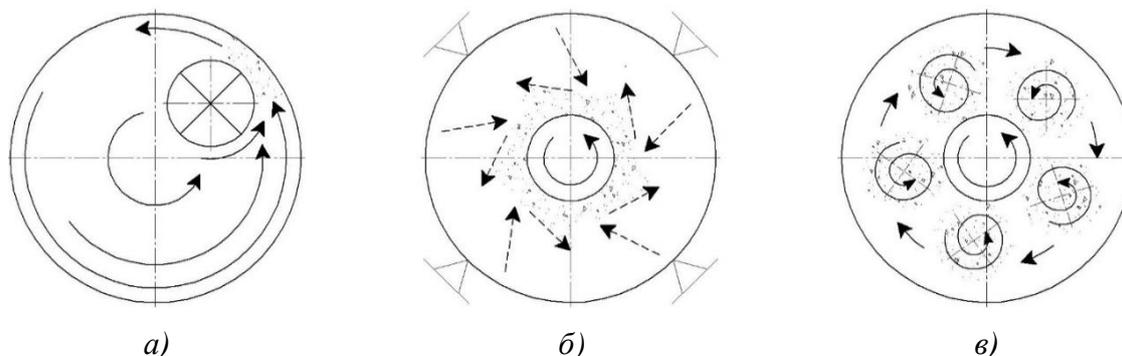


Рисунок 4. Варианты технологических схем обработки:

- а) при неподвижной заготовке, подвижной среде и вращательном перемещении;
- б) при вращающейся заготовке и условно неподвижной среде;
- в) при подвижной заготовке и абразивной среде и планетарном перемещении вихря абразива

Для структурной формулы $A1-B1-C2-D1-E1-F2-G1$, которую по итогам перебора при помощи алгоритма Дейкстры мы признаем наименее сложной в реализации (вес 3), может соответствовать схема обработки, отображенная на рис. 4а. Здесь емкости с абразивным материалом, находящемся в сухом состоянии, сообщают вращательное движение, вызывающее возникновение центробежных сил, наиболее выраженных к наружной части емкости. Поток попадает в зазор между стенкой емкости и поверхностью эксцентрично размещенной неподвижной заготовки, где происходит обработка ее тыловой части по дуге. Кроме того, срединные потоки, встречаясь с неподвижно закрепленной заготовкой, устремляются в тот же зазор, интенсифицируя резание дополнительным уплотнением за счет увеличения массы абразива, попадающего в зазор. Но при этой схеме непосредственный контакт абразива с поверхностью заготовки носит ограниченный характер, близкий к дуге. Это подходит для изделий, где обработке подлежит ограниченная тыловая часть.

Структурную формулу $A1-B1-C2-D2-E1-F2-G1$, обладающую таким же весом (3), можно представить схемой, отраженной на рис. 4б. Ключевым отличием здесь будет то, что возникающие центробежные силы непосредственно связаны с движением заготовки, тогда как абразивная среда сохраняет условную неподвижность и некоторые перемещения потоков связаны исключительно с энергией, приобретенной вследствие контакта абразива с вращающейся заготовкой. При этом определенная масса абразива отталкивается к стенкам емкости, но возвращается к заготовке в том же объеме. Обработка ведется по всей поверхности заготовки, но в этом случае достаточно сложно обеспечить ее эффективность в связи с очень низкими деформационными усилиями, ведь в первую очередь частицы абразива стараются отойти от поверхности заготовки к стенкам емкости, а микрорезание – лишь вторичный процесс.

Исходя из результатов расчета по алгоритму Дейкстры вариант $A2-B1-C2-D3-E1-F3-G1$ следует признать наиболее сложным – ему присуща оценка веса в 7 единиц. Ил-

люстрация схемы реализации обработки с планетарным перемещением абразива приведена на рис. 4в. Заготовка размещена по центру емкости и вращается вокруг своей оси. Вместе с тем создается вихрь абразива, непосредственно контактирующий с поверхностью заготовки и перемещающийся по окружности вдоль всей линии емкости. Постоянное перемещение и перемешивание потоков абразива создает наилучшие условия для обработки всей поверхности заготовки, но конструкция оборудования, способного реализовать подобную технологическую схему, будет весьма сложной.

5. Выводы

Морфологический анализ структуры технологических схем обработки свободным абразивом на основе базовых характеристик может стать удобным инструментом для поиска новых схем отделки различного рода поверхностей.

Метод морфологического анализа для генерации новых структур особенно эффективен в сочетании с теорией графов, наглядно иллюстрирующей структурные взаимосвязи и влияние тех или иных базовых характеристик на технологическую схему в целом, и алгоритмом Дейкстры, который позволяет вести численно аргументируемый просчет оптимальных вариантов, исходя из некоторых ограничений и оценок.

Предложенный в статье метод поиска новых технологических схем обработки свободным абразивом найдет применение в опытном машиностроительном производстве, где присутствует потребность в поиске нестандартных решений в отношении изделий со сложной геометрией поверхностей, нуждающихся в отделочной обработке.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Отделочно-абразивные методы обработки: Справочное пособие. / Л. М. Кожуро, А. А. Панов, Э. Б. Пономарева, П. С. Чистосердов. Под общ. ред. П. С. Чистосердова. – М.: Выш. Школа, 1983. – 287 с. : ил.
2. Ящерицын, П. И. Чистовая обработка деталей в машиностроении: Учеб. пособие. / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов. – Мн.: Высшая школа, 1983. – 191 с. : ил.
3. Хомич, Н. С. Магнито-абразивная обработка изделий: монография. / Н. С. Хомич. – Мн.: БНТУ, 2006. – 218. : ил.
4. Патент №2310553С2 Российская Федерация, МПК В24В 31/104 (2006.01). Устройство для обработки деталей в центробежно-уплотненном потоке свободного абразива / Ильин М. И., Портнов С. В., Ефремов Б. В. – №2005123411/02; заявл. 14.07.2005 : опубл. 20.11.2007. – 6 с.
5. Оре, О. Теория графов. 2-е изд. / О. Оре. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 336 с. : ил.
6. Землянухина, Л. Н. Алгоритмы оптимизации на графах: Учебное пособие. / Л. Н. Землянухина. – Ростов-на-Дону, 2008. – 87 с. : ил.

Поступила в редколлегию 24.03.2023 г.