

## РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГРАВИТАЦИОННЫХ ОРИЕНТАТОРОВ ДЛЯ ПРЕДМЕТОВ ОБРАБОТКИ ФОРМЫ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Астраханцев А.Г. (каф. ИП, ТулГУ, г. Тула, Россия)

Для ориентирования предметов обработки формы тел вращения, широко применяют механические гравитационные ориентаторы, реализующие активные контактные способы ориентирования предметов обработки с использованием геометрических ключей ориентации: асимметрии центра масс или геометрической формы [1].

Недостатком известных конструкций гравитационных ориентаторов, является их малая надёжность при ориентировании предметов обработки формы тел вращения типа стаканов с соотношением размеров  $l/d < 2$  дном вниз.

С целью расширения технологических возможностей разработан ориентатор, способный ориентировать равноразмерные предметы обработки типа стаканов, с соотношением размеров  $l/d < 1,5$  дном вниз, имеющий высокую надёжность, минимальное время ориентирования, простую конструкцию и отсутствие элементов привода (рис.1).

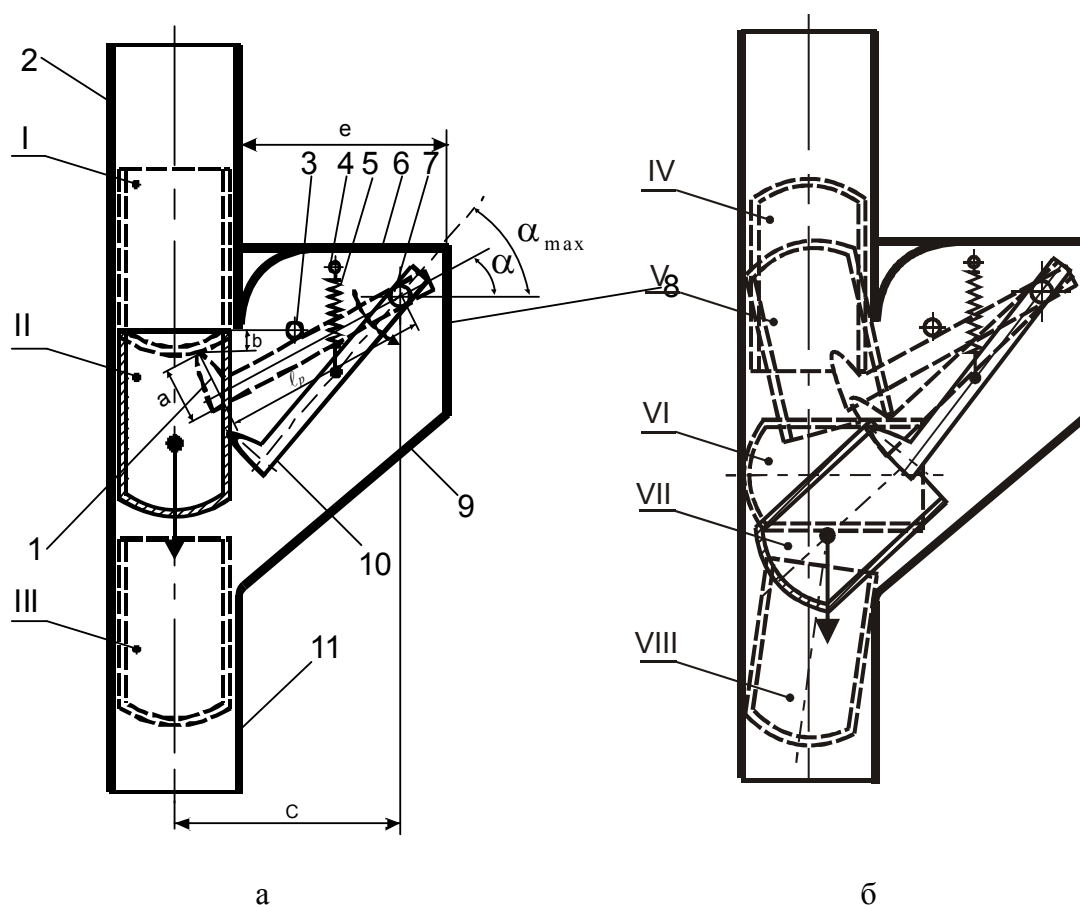


Рис. 1. Схема гравитационного ориентатора

Ориентатор (рис. 1, а) состоит из входного канала 2, приёмного канала 11, вертикальной 8, горизонтальной 6 и наклонной 9 стенок корпуса ориентатора. В корпусе установлен рычаг 10 с захватным концом 1, закреплённый на оси 7 с возможностью поворота, и подпружиненного пружиной 5. В исходном положении рычаг установлен под некоторым углом  $\alpha$  к горизонтали. Пружина закреплена на корпусе ориентатора 4, на котором смонтирован упор 3, фиксирующий верхнее положение рычага.

Если предмет обработки поступает вертикально вниз по входному каналу дном вниз (рис. 1, а), то он своим глухим торцом ударяется о захватный конец 1 рычага 10 (пол. I). Рычаг 10 под действием силы тяжести и кинетической энергии предмета обработки начинает отклоняться на угол  $\alpha_{max}$ , растягивая пружину 5, освобождая предмету проход по вертикальному каналу (пол. II). Предмет обработки поступает в приёмный канал 11 (пол. III), а рычаг под действием пружины возвращается в исходное положение, упираясь в упор 3, закреплённый на корпусе ориентатора.

При поступлении предмета обработки во входной канал дном вверх (рис. 1, б), он захватывается захватным концом рычага (пол. IV). Под действием силы тяжести и кинетической энергии предмета обработки рычаг начинает отклоняться, растягивая пружину, захватный конец рычага, зацепившись за внутреннюю стенку предмета обработки начинает его поворот (пол. V – VII). Форма захватного конца рычага, длина рычага, расположение наклонной стенки в корпусе ориентатора, угол отклонения рычага  $\alpha_{max}$  относительно его начального положения обеспечивает надёжное ориентирование предмета обработки в приёмный канал (пол. VIII).

Ось крепления рычага располагается на расстоянии  $c$  равном  $c = 2d$ .

Высота захватного конца рычага равна  $a = 0,5\sqrt{d_{вн}^2 + \frac{l^2}{4}}$ , где  $d_{вн}$  - внутренний диаметр предмета обработки.

Расстояние от вершины захватного конца рычага в его начальном положении до корпуса ориентатора  $b$  удовлетворяет неравенству  $b \leq 0,25l - a \cos \alpha$ , где  $a$  - высота захватного конца рычага;  $\alpha$  - начальный угол наклона рычага относительно горизонтальной оси.

Длина рычага зависит от размеров предмета обработки, начального угла наклона

$\alpha$  рычага и удовлетворяет неравенству  $l_p \geq \frac{2d - \frac{d_{вн}}{2}}{\cos \alpha}$ .

Расположение вертикальной стенки корпуса ориентатора относительно ближней стенки входного канала зависит от расположения оси крепления рычага и выбирается из условия  $e > 2d - \frac{d_{вн}}{2}$ .

Жесткость пружины  $C$  и величина предварительного натяжения  $X_{пр}$  пружины рычага определяется по формулам:

$$C = \frac{0,5 \cdot d \cdot mg \cdot \cos(\alpha_{max} - \alpha)}{R \cdot \sin(\alpha_{max} - \alpha) \cdot l_{пр} \cdot \cos \alpha_{max} \cdot \cos \alpha};$$

$$X_{\text{пр}} = \frac{R \cdot \sin(\alpha_{\text{max}} - \alpha) \cdot \cos \alpha_{\text{max}} \cdot (2l_p \cdot \cos \alpha + 1)}{d \cdot \cos(\alpha_{\text{max}} - \alpha)},$$

где  $m$  – масса предмета обработки;  $g$  – ускорение свободного падения;  $l_{\text{пр}}$  – длина пружины;  $l_p$  – длина рычага;  $h$  – высота, на которую отклонился конец захватного рычага относительно начального положения.

Высота, на которую отклонится конец захватного рычага относительно начального положения  $h = r \sin(\alpha_{\text{max}} - \alpha)$ , где  $r$  – расстояние от оси рычага до места крепления пружины на рычаге.

Был разработан макет гравитационного ориентатора для ориентирования стального предмета обработки типа стакана с соотношением размеров  $l/d = 1,5$  ( $d = 10$  мм). Проведённые эксперименты в стационарном положении ориентатора с использованием съемки процесса ориентирования предмета обработки на цифровую видеокамеру показали надёжную работу ориентатора. Расшифровка экспериментальной кинограммы (рис. 2) позволила оценить время ориентирования предмета обработки, которое составило  $\approx 0,125$ - $0,13$  с.

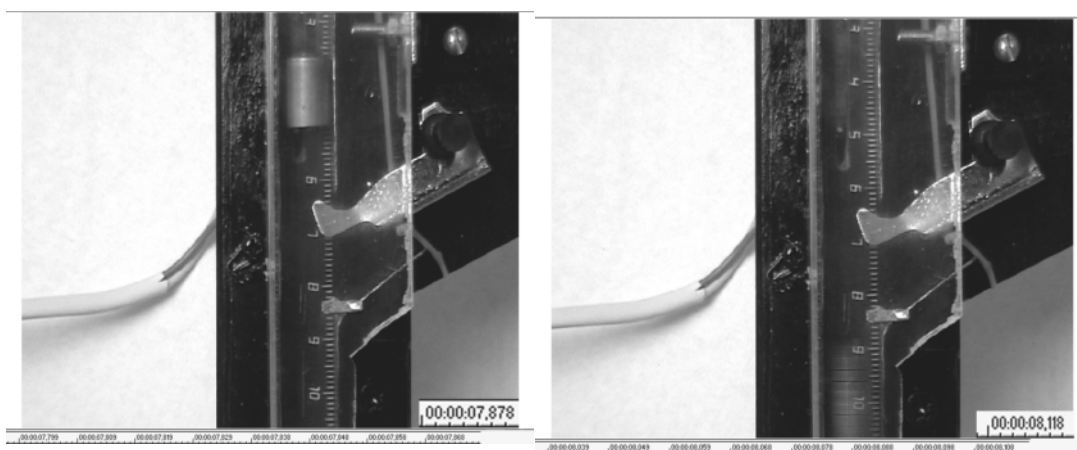


Рис. 2. Кинограммы процесса ориентирования предмета обработки в гравитационном ориентаторе

Сравнение времени ориентирования предмета обработки, полученного экспериментально, с теоретически рассчитанным временем свободного падения предмета обработки без учета трения предмета о стенки канала показало, что величины времени различаются не более чем на 25 %. Различие между экспериментальным временем вертикального движения предмета дном вниз (см. рис. 1, а) и временем ориентирования (см. рис. 1, б) составляет не более 15 %.

Таким образом, для предварительных расчетов времени ориентирования  $t_{\text{ор}}$  предмета обработки в данном гравитационном ориентаторе при его применении в структуре роторных САЗ можно использовать приближенную формулу

$t_{\text{ор}} = \sqrt{\frac{2H}{g - \mu\Omega^2 R}}$ , где  $H$  – величина перемещения предмета обработки;  $\mu$  – коэффициент трения;  $\Omega$  – частота вращения роторной САЗ;  $R$  – радиус расположения

ориентатора (расстояние от оси вращения САЗ до продольной оси входного канала ориентатора).

Результаты предварительных исследований показали, что разработанный ориентатор может эффективно использоваться в конструкциях многопозиционных роторных САЗ для ориентирования дном вниз равноразмерных предметов обработки типа стаканов с отношением  $l/d \leq 1,5$ .

**Список литературы:** 1. Прейс В.В. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в роторные и роторно-конвейерные линии // Вестник машиностроения. Вып. 12, 2002. С. 34-38. 2. Астраханцев А.Г. Анализ производительности способов активного ориентирования предметов обработки в роторных ориентирующих устройствах // Сб. трудов междунар. конф. «АПИР-10». Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. С.42-44.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАГРЕВ ДВУХКАМЕРНЫМ ПЛАЗМОТРОНОМ

**Гаврилюк Н.Н.** (*каф. механики, ТРТУ, г. Таганрог, Россия*)

Плазменный нагрев одним из наиболее эффективных и универсальных процессов термической обработки. Благодаря высокой температуре столба сжатой дуги обеспечиваются высокая производительность процесса, особенно при нагреве поверхностного слоя обрабатываемого металла на малые и средние толщины, малые размеры зоны термического влияния, незначительные напряжения и деформации.

К настоящему времени разработано несколько разновидностей плазмотронов, которые отличаются видом плазмообразующей среды, родом и полярностью тока и др [1].

Наиболее широкое распространение получил нагрев обрабатываемого материала плазмотронами с постоянным током прямой полярности, основными элементами которых являются плазмообразующее сопло и медный электрод с катодной вставкой из циркония или гафния (рис. 1).

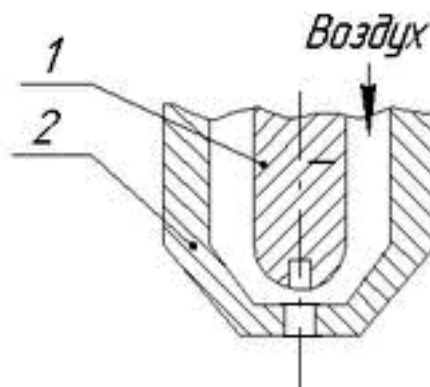


Рис. 1. Схема плазмотрона для предварительного нагрева током прямой полярности:  
1 – электрод; 2 – плазмообразующее сопло

Преимущество этого способа – возможность использования дешевого плазмообразующего газа – воздуха, а также других газов и их смеси. Однако наряду с

преимуществами этому способу присущ и недостаток – низкая стойкость катода в окислительной среде при частых включениях плазмотрона [1,2,3].

Использование в качестве плазмообразующей среды инертных газов, как правило, экономически нецелесообразно (расход газа может превышать 40 л/мин). Значительно снизить расход дорогостоящего инертного газа позволяют двухкамерные плазмотроны, обеспечивающие комбинированную подачу инертного и активного (воздуха) газов. В этом случае используется вольфрамовый катод, размещенный в камере, в которую подается небольшое количество инертного газа для защиты катода от окисления. Во вторую камеру подается воздух (рис. 2,а).

Такая конструкция плазмотрона обеспечивает высокое обжатие столба дуги и неограниченное количество повторных включений плазмотрона. Расход инертного газа в этом случае зависит от многих факторов: конструкции плазмотрона, расхода воздуха и др., и в ряде случаев, в результате попадания воздуха в плазмообразующую камеру происходит окисление вольфрамового электрода, что часто приводит к аварийным режимам – возникновению двойной дуги и разрушению сопел. Для избежания двойного дугообразования необходимо повышать расход инертного газа, что, в свою очередь, снижает экономическую эффективность процесса.

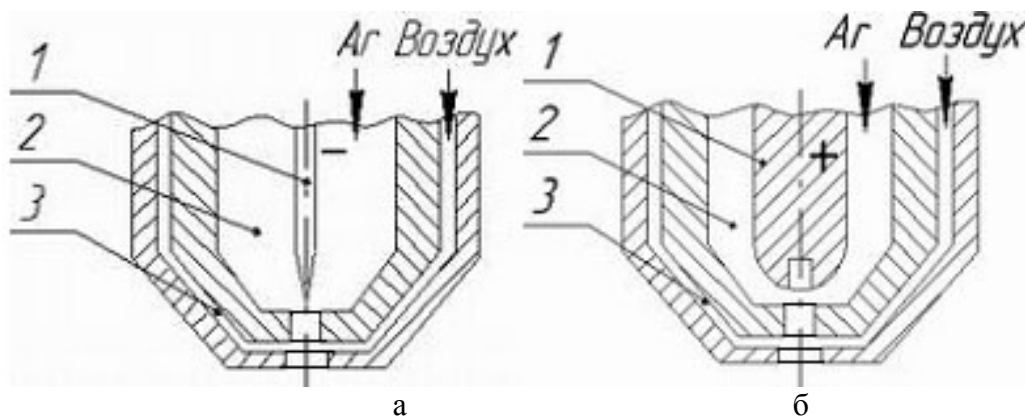


Рис. 2. Схемы двухкамерных плазмотронов

а – прямая и б – обратная полярности; 1 – электрод; 2 – плазмообразующая камера; 3 – стабилизирующая камера

Замена вольфрамового катода медным позволила бы избежать этих недостатков. Однако применение прямой полярности вызывает интенсивный износ медного электрода (катодное распыление), чего не происходит при работе на токе обратной полярности. Применение обратной полярности считается нецелесообразным, т.к. анод подвержен большей тепловой нагрузке, чем катод, но, благодаря выбору рациональной системы охлаждения электрода и всего плазмотрона удастся значительно повысить ресурс работы электрода на обратной полярности без снижения КПД процесса [3,4].

При плазменной обработке на постоянном токе обратной полярности двухкамерным плазмотроном обеспечивается стабильный процесс и длительный ресурс работы теплонагруженных элементов плазмотрона. Высокие скорости нагрева достигаются при меньшей мощности сжатой дуги, чем при традиционных способах воздушно-плазменной обработки, что, в свою очередь, снижает зону термического влияния, деформации и напряжения. Значительно меньшее влияние оказывает изменение длины дуги. Длина дуги может достигать 50 мм и более. Тепловые потери в плазмотроне не превышают 25–30 %.

Известно, что на обратной полярности катодное пятно (на детали), в отличие от анодного пятна (при обработке на обратной полярности), перемещается по всей толщине детали. В этом случае тепловой поток распределяется по фронту плавления детали равномернее (рис. 3).



Рис.3. Процесс плазменного нагрева током обратной полярности двухкамерным плазмотроном

Соотношение расходов аргона и воздуха составляет 1/5–1/8. Напряжение холостого хода источника питания с крутопадающей внешней характеристикой 300 В.

Диаметр канала плазмообразующего сопла  $d_n$ , его высота  $h_n$ ; диаметр канала стабилизирующего сопла  $d_c$ , его высота  $h_c$ ; расстояние между соплами  $h_{nc}$ , расстояние от электрода до плазмообразующего сопла  $h_{эп}$  (рис. 4).

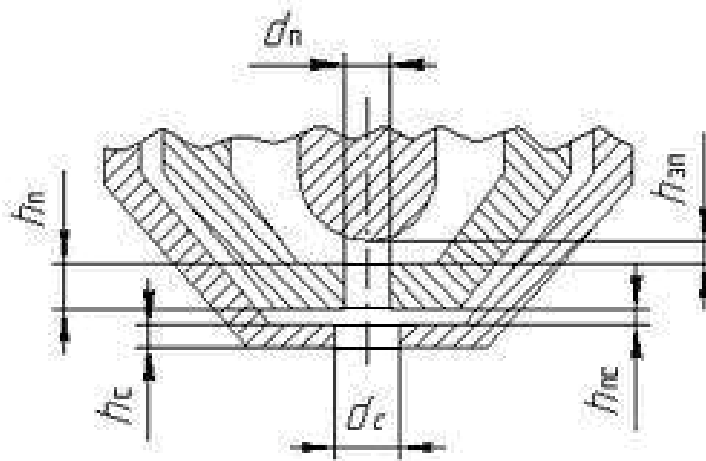


Рис. 4. Конструктивные параметры плазмотрона

Производительность и качество плазменной обработки деталей из алюминиевых сплавов током обратной полярности повышаются за счет эффективного разрушения тугоплавкой оксидной пленки (катодного распыления) [3,5,6].

Высокий экономический эффект достигается благодаря экономии электроэнергии, низкому расходу инертного газа и воздуха, высокому ресурсу работы электрода как в непрерывном режиме, так и при частых включениях плазмотрона.

Максимальный экономический эффект достигается при использовании данного процесса для предварительного нагрева и последующей обработки резанием легированных сталей, цветных металлов и сплавов.

**Список литературы:** 1. Николаев В.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П. Свариваемые алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1990. 296 с. 2. Плазменно-дуговая сварка алюминиевых сплавов без формирующих подкладок М.П. Орлов, Н.В. Жиганов, Е.Н. Кузнецов и др. // Сварочное производство. 1975. N11. С. 23-24. 3. Martinez H.P., Marques R.E., Mecture J.C., Nunes A.C. Front side 'L' keyhole detection in aluminum alloys. // Welding journal. 1992. N5. P.49-52. 4. Тыткин Ю.М., Вицын Ю.Д., Хмелевский О.В. Сварка проникающей дугой алюминиевых сплавов на подкладке. // Сб., «Актуальные проблемы сварки цветных металлов». Киев. Наукова думка. 1985. с. 113 — 114. 5. Plasma - MJY boots tank trailer output. Welding Design and Fabrication, 1983, Vol.56.N2, P.54-55,59. 6. Щицын Ю.Д., Тыткин Ю.М., Щицын В.Ю., Косолапов О.А., Восстановительный ремонт изделий из алюминиевых сплавов с использованием плазменных технологий. // Наука производству. 2000. N5 (30). С. 48 — 49. 7. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1981. - 279с.

## ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

**Демьянцева Л.А., Кислинская Е.А.**

*(ЦК механических дисциплин, ММТ, г. Макеевка, Украина)*

Механизм, предназначенный для нарезания вращательного движения от одного вала к другому с помощью находящихся в зацеплении зубчатых колес, называются зубчатой передачей.

Зубчатые передачи классифицируются:

- а) по конструктивному оформлению: открытые, закрытые;
- б) по окружной скорости: тихоходные, среднескоростные, высокосортные;
- в) по взаимному расположению осей валов: с параллельными осями (цилиндрические, конические, шевронные); с пересекающимися осями (конические)

По применению и распространению в различных областях народного хозяйства зубчатые передачи по праву занимают первое место. В любой отрасли машиностроения зубчатые передачи находят широкое применение: автомобили, тракторы, самолеты, трубоэлектроходы, станки и т.д.

Поэтому так важно создание новых прогрессивных методов изготовления зубчатых колес.

Анализ различных технологических схем изготовления цилиндрических зубчатых колес малого модуля ( $m = 2...5$ ) показал, что наибольшее распространение в машиностроительном производстве получила традиционная технология с использованием таких процессов зубонарезания как фрезерование червячными фрезами и долбление дисковыми долбками.

При этом формообразование зубчатых венцов осуществляется за две операции: предварительного зубонарезания и отделочно-чистовой обработки зубьев колеса. На этапе предварительного вырезания впадин зубчатого колеса обеспечивается необходимая точность для успешного осуществления процесса отделочно-чистовой зубообработки, для которой в основном, используется традиционный процесс шевингования дисковыми шеверами.

Попытки внедрения в производство цилиндрических зубчатых колес прогрессивных заготовок с оформленными зубьями, как правило, были неудачными, так как структурно-технологическая система зубообработки при этом оставалась прежней, количество операций зубообработки не сокращалось, а экономия металла не покрывала дополнительных затрат на изготовление точных заготовок с оформленным зубчатым венцом.

Из этого следует, что необходим переход к новой структурно-технологической схеме зубообработки, по которой предварительное формообразование зубчатого венца осуществляется на стадии получения заготовки, а процесс однократной отделочно-чистовой зубообработки обеспечивает требуемую точность зубьев за счет высокой исправляющей способности в пределах 4...5 степеней точности по ГОСТ 1643-81.

Реализовать такую технологическую схему зубообработки можно лишь при условии создания принципиально нового процесса чистовой обработки, обеспечивающего высокую производительность и стабильную точность обработки зубчатых венцов, полученных высокопроизводительными процессами объемного формообразования: литьем, штамповкой, порошковой металлургией, независимо от степени точности предварительно оформленного зубчатого венца заготовки.

Повышение точности обработки зубчатых заготовок обеспечивается непосредственным получением одного из наиболее важных параметров нарезаемого зубчатого венца – размера длины общей нормали. Для этого в зуборезном инструменте в качестве основного конструктивного параметра необходимо иметь рабочий регулируемый размер, соответствующий длине общей нормами обрабатываемого зубчатого колеса.

Важной задачей, возникающей при создании новой технологической схемы изготовления цилиндрических зубчатых колес из прогрессивных заготовок с оформленными зубьями, является обработка прерывистых наружных поверхностей зубчатого венца заготовки. При токарной обработке таких поверхностей возникают цилиндрические ударные нагрузки переменной величины, что приводит к интенсивному износу режущей кромки резца и возможности его поломки.

В связи с этим целесообразно рассмотреть возможности других процессов и из них выбрать такие, которые могли бы обеспечить необходимую жесткость и виброустойчивость при обработке указанных прерывистых поверхностей. Достаточно высокую жесткость и виброустойчивость технологической системы обеспечивают фрезерные станки, поэтому одним из возможных вариантов обработки является ротационное фрезерование. Этот вид обработки позволяет использовать прогрессивные конструкции режущего инструмента, оснащенного современными инструментальными материалами, что обуславливает высокую производительность и требуемое качество обрабатываемых поверхностей зубчатых заготовок.

Переход от традиционной токарной обработки к процессу ротационного фрезерования наружных поверхностей заготовок с предварительно оформленным зубчатым венцом позволяет успешно решить важную задачу в комплексе мероприятий по реализации новой технологической схемы изготовления цилиндрических зубчатых колес, представленной на рисунке.

В итоге изложенные соображения о перспективном направлении дальнейшего совершенствования производства цилиндрических зубчатых колес позволяют сформулировать следующие основные положения по созданию новой прогрессивной технологии изготовления из исходных заготовок с оформленными зубьями:



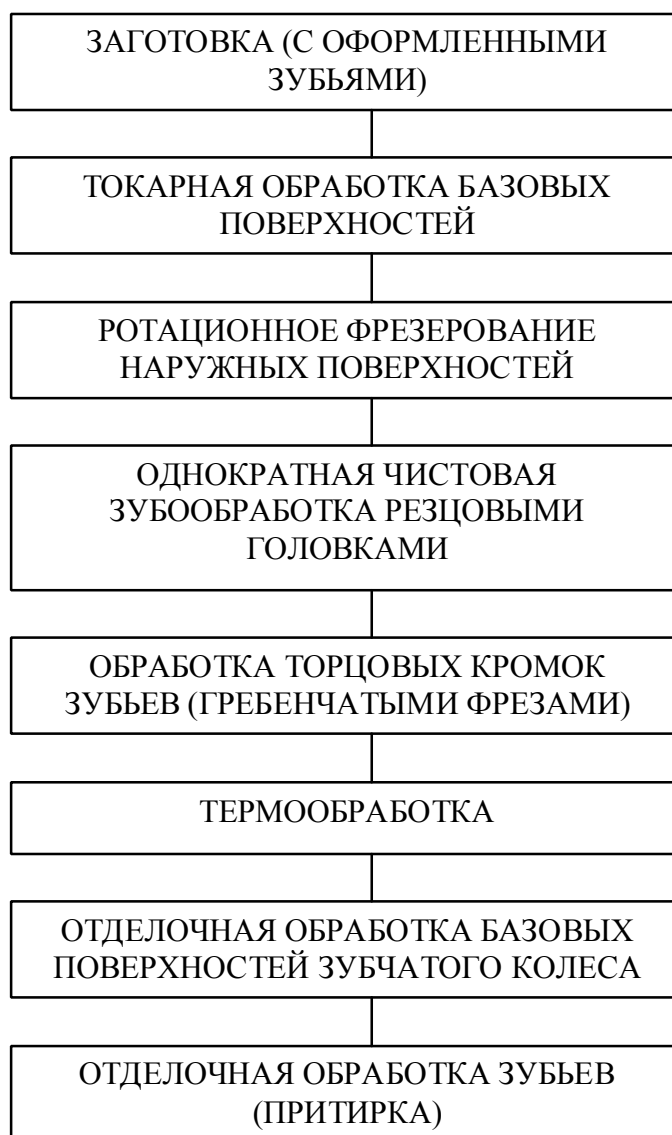


Рис. 1. Технологическая схема изготовления цилиндрических колес малого модуля

- для эффективной обработки таких заготовок необходимо сокращение длительности производственного цикла изготовления зубчатого колеса путем исключения операции предварительного зубонарезания;
- сокращение указанного цикла должно учитываться за счет создания процесса зубообработки, позволяющего производить однократную чистовую обработку впадин зубчатой заготовки в пределах заданных норм точности при соответствующем качестве зубчатых поверхностей колеса;
- используемый в новой технологии способ чистовой зубообработки должен быть высокопроизводительным и обладать высокой исправляющей способностью в пределах 4...5 степеней точности ГОСТ 1643-81;
- для стабилизации точности процесса чистовой зубообработки необходимо предусматривать возможность периодически или непрерывного регулирования соответствующих рабочих параметров инструмента;

- обработка прерывистых наружных поверхностей зубчатого венца заготовки должна осуществляться способом, обеспечивающим необходимую жесткость и виброустойчивость технологической системы, например, ротационным фрезерованием;

- все процессы формообразования поверхностей зубчатого колеса должны способствовать эффективной автоматизации технологических операций на основе внедрения современной техники с широким применением промышленных роботов и манипуляторов.

Изложенные принципы построения новой высокопроизводительной малоотходной технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес обуславливают необходимость сочетания наиболее эффективных процессов обработки различных поверхностей и прогрессивных заготовок с предварительно оформленными зубьями.

В данной статье изложен принцип структуры – технологической схемы зубообработки, но которой предварительное формообразование зубчатого венца осуществляется на стадии получения заготовки.

**Список литературы:** 1. Устюгов И.И. Детали машин М.: Высшая школа. 1981, 394 с. 2. Ивашин М.Н. Детали машин. М.: 1976, 324 с. 3. Ямников А.С. Федоров Ю.Н. Анализ технологических схем изготовления цилиндрических зубчатых колес. // Международная сб. научных трудов. Донецк ДонНТУ, 2000, стр. 67 – 69.

## **ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ НА ТЕМПЕРАТУРУ АНОДНОГО НАГРЕВА В ВОДНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ**

**Комаров А.О.** (каф. общей физики КГУ им. Н. А. Некрасова, г. Кострома, Россия)

**Аннотация.** Рассматривается распределение температуры по поверхности нагреваемой детали в зависимости от диаметра рабочей камеры, скорости подачи электролита и напряжения.

**Введение.** Во всех опытно-промышленных установках анодного нагрева рабочая камера представляет собой цилиндрический сосуд диаметром 100–150 мм и длиной 150–200 мм, через дно которого подаётся электролит с последующим переливом через верхний край. Известно, что увеличение диаметра обрабатываемой детали вызывает уменьшение её температуры, при этом максимальное значение температуры в нижней части детали будет наблюдаться при меньших напряжениях. Недостатком применяемых камер является неравномерный нагрев деталей по их высоте.

**Постановка задачи.** В данной работе рассматривается влияние диаметра рабочей камеры на характеристики нагрева стальных деталей при различных напряжениях и скоростях течения электролита. В качестве электролита использовался 10 %-ный водный раствор хлорида аммония, величина расхода электролита при продольном обтекании нагреваемых цилиндрических образцов из стали 45 измерялась поплавковым ротаметром, температура нагрева образца контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, помещённой в глухое осевое отверстие.

**Результаты.** Уменьшение диаметра камеры, одновременно являющейся катодом, приводит к заметному повышению температуры нагреваемого образца, (рис. 1). По нашему мнению при уменьшении межэлектродного зазора путем уменьшения диа-

метра рабочей камеры увеличивается скорость движения перегретых масс электролита, контактирующих с поверхностью анодной парогазовой оболочки. На смену им приходят более холодные массы электролита. Это вызывает увеличение теплового потока из оболочки в электролит, что приводит к уменьшению толщины оболочки, и, как следствие, увеличению температуры детали. Средний прирост температуры образца при уменьшении диаметра рабочей камеры на 40 мм составляет 61°C. Величина прироста зависит от изменения направления движения электролита в верхней части рабочей камеры, что приводит к его перемешиванию и уменьшению теплового потока в электролит. Поэтому в верхней части рабочей камеры зона термического влияния имеет наибольшую толщину.

Кроме того, с уменьшением диаметра рабочей камеры увеличивается значение среднего по длине образца градиента температуры. По этой причине выбор диаметра рабочей камеры зависит от решаемой в конкретном случае технологической задачи. Если после обработки необходимо получить наиболее однородный с точки зрения физико-механических и химических свойств модифицированный слой, то диаметр рабочей камеры не следует уменьшать ниже определённой величины, соответствующей зазору между камерой и деталью 35 мм.

С другой стороны, если целью обработки является только локальное изменение свойств обрабатываемой детали, например, увеличение износостойкости трущейся части вала, то в этом случае необходима максимальная температуры нагрева детали. Для решения этой задачи целесообразно применение рабочей камеры с минимальным зазором. Применение зазора менее 10 мм сопряжено со сложностью позиционирования детали при погружении и может привести к пробоев в системе. Кроме того, для повышения температуры нагрева детали следует увеличивать скорость расхода электролита, (рис. 2 и рис. 3).

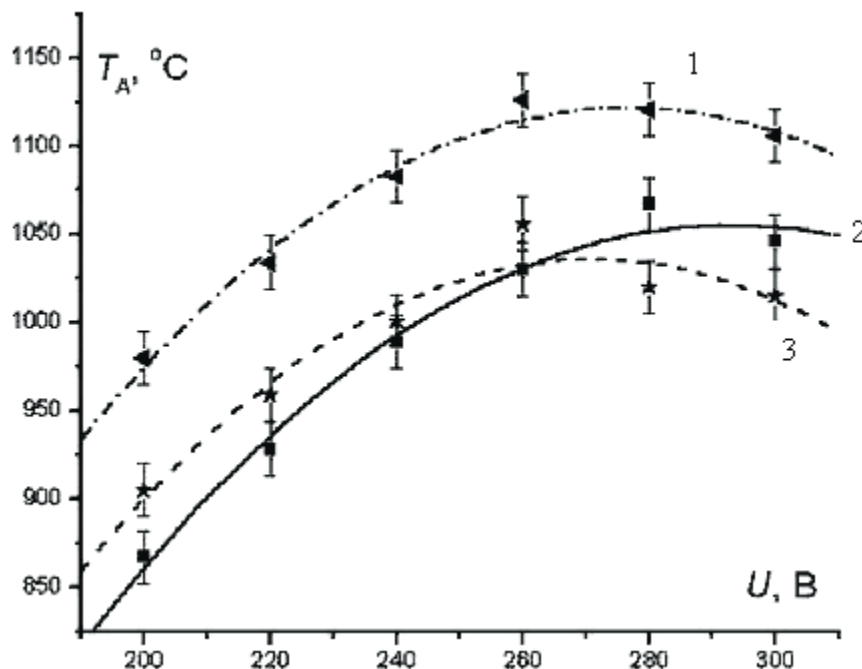


Рис. 1. Зависимость температуры нижней точки обрабатываемой детали от диаметра рабочей камеры: 1 – 50 мм, 2 – 70 мм, 3 – 90 мм. Напряжение нагрева 260 В, скорость расхода электролита 4 л/мин, диаметр детали 10 мм

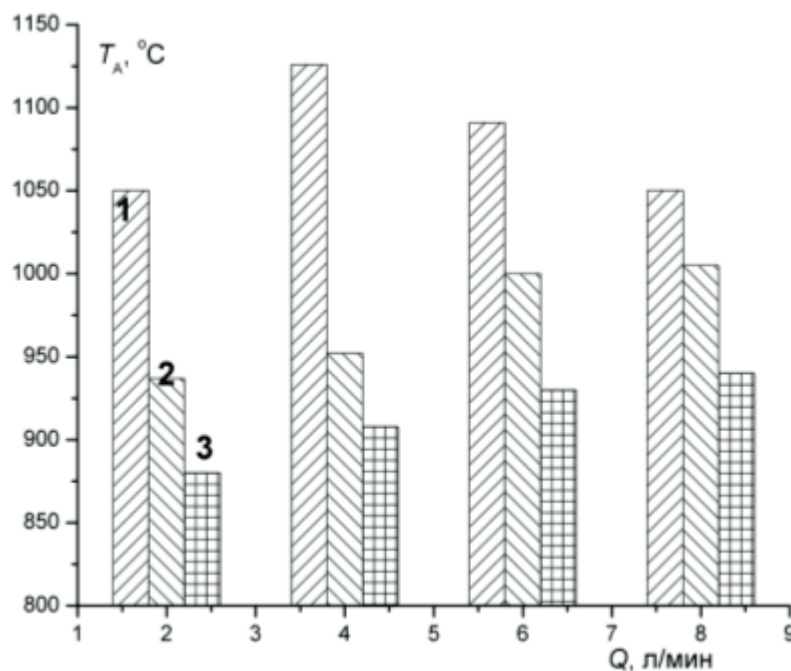


Рис. 2. Зависимость температуры нижней точки образцов различного диаметра (1 – 10 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм) при увеличении расхода электролита. Диаметр рабочей камеры 50 мм, напряжение нагрева 280 В

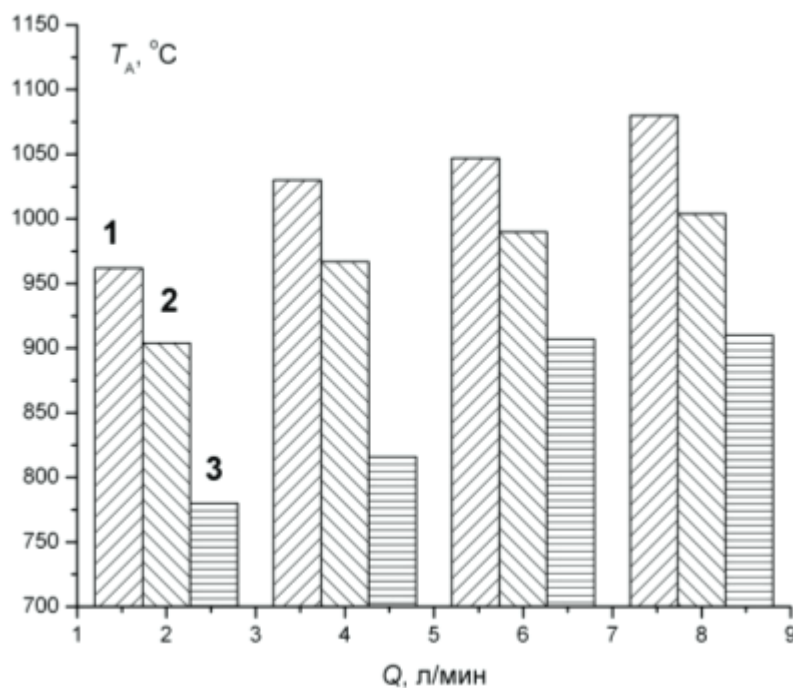


Рис. 3. Зависимость температуры нижней точки образцов различного диаметра (1 – 10 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм) при увеличении расхода электролита. Диаметр рабочей камеры 50 мм, напряжение нагрева 280 В

В общем случае расход электролита оказывает двойное влияние на систему: помимо увлечения перегретых масс электролита из прианодной зоны движение жидкости сжимает парогазовую оболочку за счет механического действия. В нижней части детали, где зона термического влияния только начинает формироваться, основным является механическое воздействие. В верхних слоях перегретого электролита из-за изменения профиля скоростей движения жидкости при переливе раствора через край рабочей камеры наибольшее влияние оказывает теплофизическое воздействие – охлаждение электролита с последующим утонением парогазовой оболочки. При обработке больших деталей или при малых расходах электролита это приводит к «растяжению» вертикального градиента температуры.

### Выводы

1. Уменьшение значения среднего градиента температуры обрабатываемой детали по высоте достигается увеличением радиуса рабочей камеры до 90 мм при обработке деталей диаметром до 30 мм. Уменьшение диаметра рабочей камеры приводит к возрастанию максимально достигаемой температуры цилиндрического образца в нижней части.
2. Увеличение расхода электролита способствует росту температуры образца по всей длине обрабатываемой поверхности.
3. Среднее значение градиента уменьшается при увеличении диаметра обрабатываемой детали от 10 до 30 мм за счет увеличения теплового потока внутри детали в вертикальном направлении.

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРЕССИВНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ

**Лахин А.М., Нагимзянов Д.Ш.** (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Чистовая и отделочная обработка поверхностей зубьев является одним из основных этапов производства зубчатых колес, поскольку качество поверхностей зубьев во многом определяет работоспособность зубчатой передачи, ее эксплуатационные характеристики и КПД передачи. Также качество отделочной обработки определяет длительность обкаточного периода, который проходит, как правило, при низких режимах работы.

Из известных способов отделочной и чистовой обработки зубчатых колес к основным можно отнести обкатку, шевингование, приработка, шлифование, притирка, полирование и зубохонингование.

При обкатке снижение микронеровностей и повышение механических свойств зубьев достигается за счет пластической деформации поверхностных слоев металла калеными эталонными колесами-обкатками при обкатывании ими под давлением обрабатываемого колеса. [1] Зубошевингование реализуется при сопряжении зубьев обрабатываемого зубчатого колеса с зубьями инструмента – шевера. Оси обрабатываемого колеса и шевера – пересекаются, что создает взаимное скольжение профилей зубчатого колеса и инструмента. Зубошлифование может осуществляться как методом копирования, как и методом обкатки. Зубошлифование устраняет все виды погрешностей параметров зубьев. Притирка, как способ отделочной обработки зубчатых колес, является искусственный и регулируемый по величине износ зубьев. Полирование зубьев при различных способах, значительно улучшает микрогеометрию боковых поверхностей зубьев и переходных поверхностей у их ножек. Однако этот способ обычно немеханизирован, и реализуется рабочим, обеспечивая крайне низкую производительность метода. [1]

Наиболее прогрессивным и универсальным методом отделочной обработки зубчатых колес в настоящее время является зубохонингование. Этот способ позволяет повысить класс чистоты поверхностей зубьев до 7-8-го и значительно снизить шум передачи. При зубохонинговании с боковых поверхностей зубьев эффективно удаляются забоины, заусеницы, следы окалины и другие дефекты. Кинематика процесса зубохонингования аналогична зубошевингованию, однако в качестве

инструмента выступает абразивный зубчатый хон, представляющий собой зубчатое колесо, венец которого содержит в большом количестве зерна абразивных материалов. При этом может быть использована одна из двух схем зубохонингования: с радиальным и с тангенциальным нагружением. В первом случае обрабатываемое зубчатое колесо находится в беззазорном (плотном) зацеплении с инструментом (хоном). Это позволяет производить одновременную обработку двух профилей зубьев, то есть всей впадины. При выполнении обработки для обеспечения равномерного износа инструмента с обеих сторон целесообразно периодически менять направление вращения хона, а также для более эффективной обработки, зубчатому хону помимо вращательного движения, сообщают возвратно-поступательное, с небольшой амплитудой.[2] Схема с тангенциальным нагружением предусматривает сообщение тормозного момента заготовке при постоянном межосевом расстоянии между заготовкой и хонем. При данном способе производится последовательная обработка каждой стороны профиля зуба отдельно, после которой меняется направление вращения зона и заготовки, что менее эффективно по сравнению с первым способом.

В качестве инструмента при зубохонинговании применяются абразивные зубчатые хоны. Наибольшее распространение в промышленности получили хоны, зубчатые венцы которых состоят из абразивного порошка (электрокорунда нормального зернистостью 32-4, электрокорунда белого зернистостью M28-M14, карбида кремния черного и зеленого зернистостью 32-M14, монокорунда зернистостью 2-8) и связки – эпоксидных смол. В качестве связки применяют также фенольно-формальдегидные термоактивные смолы марки НР-30 с большим (до 30%) содержанием каучука и другие эластичные массы (полиуритановые смолы и т.д.) В качестве наполнителя для придания зубьям хона достаточной прочности, иногда используют пресс композиции со стекловолокном. Твердость хонов зернистостью 5 и крупнее должна быть в пределах СТ5-Т2. Хоны зернистостью 4 и менее должны иметь твердость СТ1-СТ2. [1]

В машиностроении процесс зубохонингования используется в производстве закаленных зубчатых колес с модулем 0,5...6 мм.

Таким образом процесс зубохонингования в большинстве случаев может увеличить производительность и снизить трудоемкость операций зубообработки, поскольку позволяет избежать длительных и малоэффективных чистовых и отделочных операций по обработке зубчатых колес.

**Список литературы:** 1. Гулида Э. Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических зубчатых колес. – Львов: «Вища школа», 1977. – 168с. 2. Тайц Б.А. Производство зубчатых колес. М.: «Машиностроение» 1975 г.- 512с.

## **ОСОБЕННОСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ В РАЗВЕТВЛЯЮЩИХСЯ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Михайлов А.Н., Кардыбанский О.С., Гитуни Ахмед**  
(каф. ТМ, ДонГТУ, г. Донецк, Украина)

Функционирование поточно-пространственной технологической системы [1] представляет собой сложный процесс, который задается ее структурой и определяется как множество последовательных во времени состояний множества блоков технологи-

ческого воздействия (элементов). Их функционирование – это стабильная способность к целенаправленным технологическим воздействиям орудий и средств обработки (блоков технологического воздействия) на изделия, выполняемых в соответствии со структурой технологической системы по заданному алгоритму.

Поточно-пространственная технологическая система непрерывного действия [1] обычно состоит из большого числа подсистем и технологических элементов (блоков технологического воздействия), структура которой строится на базе многомерных супергрупп (рис.1). Это вызывает сложный процесс функционирования такой технологической системы, который проявляется возникновением сложной структуры маршрутов движения изделий по позициям и подсистемам технологической системы. При этом определение и управление показателями качества функционирования поточно-пространственной технологической системы невозможно без исследования параметров маршрутизации изделий. Поэтому в данной работе выполняются исследования, связанные с определением основных параметров маршрутизации изделий в поточно-пространственных технологических системах с разветвляющимися потоками и имеющих многомерную структуру блоков технологического воздействия.

В работе [1,2,3] решены вопросы определения параметров маршрутизации изделий в поточно-пространственной технологической системе, структура которой описывается многомерной супергруппой и имеющей один входной и выходной поток изделий. Можно заметить, что определение параметров маршрутизации изделий для поточно-пространственной технологической системы с помощью обычной алгебры групп [4] не

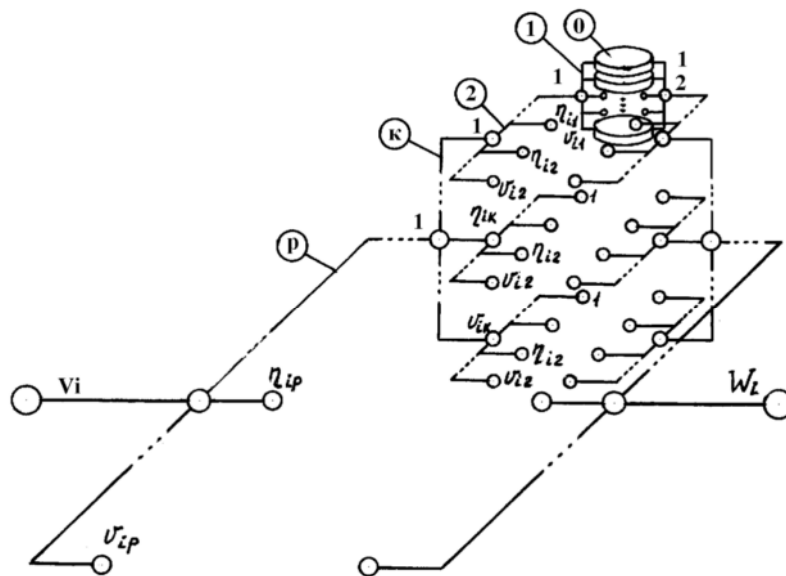


Рис.1. Структура многомерной супергруппы

представляется возможным. Потому в работе [1] разработана многомерная алгебра группы, позволяющая определить параметры маршрутизации изделий, проходящих по многомерным супергруппам и представляющих собой замкнутые рекуррентные многомерные группы.

Супергруппа (рис.1) множества  $A_i$  элементов (блоков технологического воздействия) порядка  $v_i$  состоит из множества  $p$ -го класса подсистем  $A_{ip}$  порядка  $v_{ip}$ , каждая из которых

также состоит из множества  $(p-1)$ -го класса подсистем  $A_{i(p-1)}$  порядка  $v_{i(p-1)}$  (более низкого класса), которые также состоят из множества подсистем еще более низкого класса, и так далее, причем последние подсистемы состоят уже из элементов (блоков технологического воздействия). Здесь следует отметить, что множество подсистем каждого класса в поточно-пространственной технологической системе является замкнутой рекуррентной циклической группой, каждая из подсистем которой в свою очередь является замкнутой рекуррентной циклической группой, и так далее. То есть в

супергруппе существует многомерность построения элементов. Порядок подсистем многомерной супергруппы определяется множеством:

$$V_i = \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{ip}\},$$

где  $V_{ik}$  порядок подсистемы  $k$ -го класса;

$p$  - число классов подсистем супергруппы.

Можно заметить, что отображение одномерных групп, например  $A_i$  на  $A_{i+1}$  может быть трех типов [5] (рис.2):

- инъективное отображение (рис.2, а);
- биективное отображение (рис.2, б);
- сюръективное отображение (рис.2, в).

Основные параметры этих отображений для одномерных циклических рекуррентных групп могут быть найдены с помощью алгебры групп [4]. С точки зрения маршрутизации изделий в технологических системах непрерывного действия, выполненных на базе роторных или роторно-конвейерных линий [6], отображения

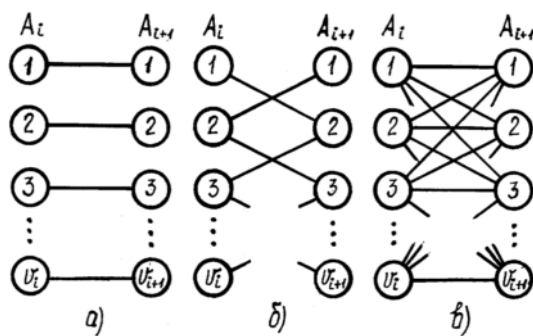


Рис.2. Отображения множества  $A_i$  в  $A_{i+1}$ :

а – инъективное, б – биективное, в – сюръективное

множеств (рис.2) можно выразить с помощью следующих видов маршрутизации изделий:

- простая маршрутизация (рис.2, а);
- неполная маршрутизация (рис. 2,б);
- сложная маршрутизация (рис.2, в).

Если множества  $A_i$  и  $A_{i+1}$

представляют собой многомерные рекуррентные супергруппы [1], то между каждым классом подсистем может действовать одно из трех типов отображений, число которых будет равно количеству классов подсистем супергруппы. Общее число возможных различных композиций отображений в

супергруппе по классам подсистем определяется по формуле:

$$S = 3^{p_i},$$

где  $p_i$  - число классов подсистем  $i$  - й супергруппы поточно-пространственного технологического модуля.

Можно отметить, что когда взаимодействующие соседние поточно-пространственные технологические модули имеют только один входной и выходной потоки изделий, то здесь параметры отображений определяются на основании методики приведенной в работах [1,2,3]. Однако на практике возможны случаи, когда поточно-пространственная технологическая система имеет сложную структуру, выполненную в виде супергрупп, содержит несколько входных или выходных потоков изделий. Это особенно часто встречается на многономенклатурных и сборочных технологических системах. Заметим, что для технологических систем состоящих из одноциклических групп и имеющих несколько входных или выходных потоков изделий параметры отображений элементов групп (параметры маршрутизации) определены в работе [7]. При этом определение параметров маршрутизации изделий в поточно-



пространственных технологических системах, с разветвляющимися потоками изделий, является крайне необходимой задачей для изучения и управления их процессом функционирования. Поэтому далее приводится решение этой проблемы на базе разработанной в работе [1] многомерной алгебры групп.

На рис.3 показана гипотетическая модель поточно-пространственной технологической системы с разветвляющимися потоками изделий. Здесь представлено:  $V$  - вход изделий,  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$  - обобщенный выход изделий,  $A$  - входной поточно-пространственный технологический модуль (входная многомерная замкнутая рекуррентная супергруппа элементов (блоков технологического воздействия)),  $B_i$  -  $i$ -й

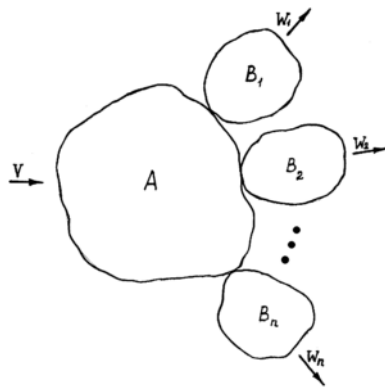


Рис.3. Гипотетическая модель поточно-пространственной технологической системы с несколькими входными или выходными потоками изделий

выходной поточно-пространственный технологический модуль ( $i$ -я выходная многомерная замкнутая рекуррентная супергруппа элементов (блоков технологического воздействия)),  $n$  - общее число выходных технологических модулей.

Зададим многомерную структуру блоков технологического воздействия входного технологического модуля следующим множеством:

$$A = \{A_p, A_{p-1}, \dots, A_k, \dots, A_2, A_1\}. \quad (1)$$

Здесь:

$$\left. \begin{aligned} A_p &= \{A_{(p-1)1}, A_{(p-1)2}, \dots, A_{(p-1)u_p}\}; \\ A_{p-1} &= \{A_{(p-2)1}, A_{(p-2)2}, \dots, A_{(p-2)u_{(p-1)}}\}; \\ &\bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \\ A_k &= \{A_{(k-1)1}, A_{(k-1)2}, \dots, A_{(k-1)u_k}\}; \\ &\bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \bullet \\ A_2 &= \{A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1u_2}\}; \\ A_1 &= \{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1u_1}\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $A_k$  - множество подсистем  $(k-1)$ -го класса в подсистеме  $k$ -го класса;

$A_{(k-1)\eta}$  -  $\eta$ -я подсистема  $(k-1)$ -го класса в подсистеме  $k$ -го класса;

$u_k$  - порядок множества  $A_k$ ;

$a_{lm}$  -  $m$ -й элемент множества  $A_l$ .

**Множество  $B$  содержит следующие подсистемы**

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}. \quad (3)$$

Здесь:

$$B_i = \{B_{ip_i}, B_{i(p_i-1)}, \dots, B_{ik_i}, \dots, B_{i2}, B_{i1}\}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{ip_i} &= \{B_{i(p_i-1)1}, B_{i(p_i-1)2}, \dots, B_{i(p_i-1)v_{p_i}}\}; \\ B_{i(p_i-1)} &= \{B_{i(p_i-2)1}, B_{i(p_i-2)2}, \dots, B_{i(p_i-2)v_{(p_i-1)}}\}; \\ &\bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \\ B_{ik_i} &= \{B_{i(k_i-1)1}, B_{i(k_i-1)2}, \dots, B_{i(k_i-1)v_{k_i}}\}; \\ &\bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \\ B_{i2} &= \{B_{i11}, B_{i12}, \dots, B_{i1v_{k_i}}\}; \\ B_{i1} &= \{b_{i11}, b_{i12}, \dots, b_{i1v_i}\}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $B_i$  -  $i$ -я подсистема множества  $B$ ;

$n$  - число выходных технологических модулей;

$B_{i(k-1)\eta}$  -  $\eta$ -я - подсистема  $(k-1)$ -го класса в подсистеме  $k$ -го класса множества  $i$ -го выходного технологического модуля;

$v_{ki}$ - порядок множества  $B_{ik}$ ;

$b_{i|m}$  -  $m$ -й элемент множества  $B_{i|}$ ;

$p_i$  - число классов подсистем множества  $B_i$ ;

В системах уравнений (2) и (5) общий порядок блоков технологического воздействия множеств  $A$  и  $B_j$  определяется выражениями:

$$u = \prod_{k=1}^p u_k, \quad (6)$$

$$v_1 = \prod_{k_{i-1}}^p v_{ki} . \quad (7)$$

Можно отметить, что в случае, когда один из поточно-пространственных технологических модулей технологической системы имеет одномерную замкнутую структуру, то выражения (1) и (4) принимают следующие значения:

$$A = \{A_1\},$$

$$B_i = \{B_{i1}\}.$$

Для решения данной задачи зададимся начальными условиями:

1. Поточно-пространственная технологическая система состоит из одного входного технологического модуля и  $n$  выходных, структура которых определяется множествами (1), (2) и (3), (4), (5) или (1), (2), (3), (4), (5) и частично (6), (7).

2. Пронумеруем элементы и подсистемы входного технологического модуля: в подсистеме  $A_1$  1-го класса позиции элементов  $1, 2, \dots, \eta_1, \dots, u_1$ ; в подсистеме  $A_2$  2-го класса позиции подсистем 1-го класса  $1, 2, \dots, \eta_2, \dots, u_2; \dots$ ; в подсистеме  $A_k$ -го класса позиции подсистем  $(k-1)$ -го класса  $1, 2, \dots, \eta_k, \dots, u_k; \dots$ ; в подсистеме  $A_p$   $p$ -го класса позиции подсистем  $(p-1)$ -го класса  $1, 2, \dots, \eta_p, \dots, u_p$ .

3. Пронумеруем выходные технологические модули обозначаемые множеством  $B$  следующими позициями  $1, 2, \dots, i, \dots, n$ .

4. Пронумеруем элементы и подсистемы  $i$ -го выходного технологического модуля: в подсистеме  $B_{i1}$  1-го класса позиции элементов  $1, 2, \dots, \eta_1, \dots, \nu_1$ ; в подсистеме  $B_{i2}$  2-

го класса позиции подсистем 1-го класса  $1, 2, \dots, \eta_2, \dots, v_2; \dots$ ; в подсистеме  $B_{ik_i}$   $k_i$ -го класса позиции подсистем  $(k_i-1)$ -го класса  $1, 2, \dots, \eta_k, \dots, v_k; \dots$ ; в подсистеме  $B_{ip_i}$   $p_i$ -го класса позиции подсистем  $(p_i-1)$ -го класса  $1, 2, \dots, \eta_{p_i}, \dots, v_{p_i}$ .

5. Зададимся тем, что первый маршрут проходит по первым позициям элементов и подсистем каждого класса.

6. Позиции и подсистемы каждого класса являются замкнутыми рекуррентными последовательностями.

7. Изделия с входного технологического модуля последовательно поочередно поступают в  $1, 2, \dots, i, \dots, n$  выходные технологические модули, затем циклы повторяются.

Для нахождения параметров маршрутизации изделий в поточно-пространственных технологических системах с разветвляющимися потоками изделий в работе предусматривается выполнить следующее:

- найти общее число различных маршрутов движения изделий по позициям технологической системы;

- установить число изделий, после прохождения которых в технологической системе завершается полный кинематический цикл движения ее элементов и подсистем, то есть случай когда все позиции и подсистемы технологической системы возвращаются в исходное положение;

- определить номера позиций элементов и подсистем технологической системы по которым проходит маршрут любого номера изделия;

- определить число позиций элементов подсистемы 1-го класса входного технологического модуля, с которыми взаимодействует фиксированная позиция элементов подсистемы 1-го класса  $i$ -го выходного технологического модуля системы.

Решение этих задач является основой определения параметров маршрутизации изделий в разветвляющихся поточно-пространственных технологических системах, без знаний которых не представляется возможным ведение управления показателей качества выпускаемых изделий.

Используя предложения, теоремы и формулы многомерной алгебры групп [1] общее число различных маршрутов движения изделия по позициям технологической системы с разветвляющимися потоками будет определяться на основании следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \sum_{i=1}^n HOK \left( G, \prod_{k_i=1}^{p_i} v_{k_i} \right); \\ G &= \frac{HOK \left( \prod_{k=1}^p u, n \right)}{n}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де –  $N_1$  общее число различных маршрутов движения изделий по позициям технологической системы;

$$HOK \left( G, \prod_{k_i=1}^{p_i} v_{k_i} \right) - \text{наименьшее общее кратное двух чисел.}$$

При этом количество изделий, после прохождения которых, в технологической системе завершается полный кинематический цикл движений ее элементов и подсистем, определяется по следующей форме:

$$N_2 = nHOK \left[ G, HOK \left( \prod_{k_1=1}^{p_1} v_{k_1}, \prod_{k_2=1}^{p_2} v_{k_2}, \dots, \prod_{k_n=1}^{p_n} v_{k_n} \right) \right], \quad (9)$$

В полученной формуле (9) величина  $G$  вычисляется на основании выражения (8).

Номера позиций элементов и подсистем технологической системы, по которым проходит маршрут  $S_i$  любого изделия определяется на основании следующих систем уравнений:

- для входного технологического модуля

$$\left. \begin{aligned} S_t &= m_p u_p + r_p; \\ m_{p-1} + \frac{r_p}{\xi_p} &= m_{(p-1)} u_{(p-1)} + r_{(p-1)}; \\ m_{p-1} + \frac{r_{p-1}}{\xi_{p-1}} &= m_{(p-2)} u_{(p-2)} + r_{(p-1)}; \\ &\bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \\ m_2 + \frac{r_2}{\xi_2} &= m_1 u_1 + r_1, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

- для  $i$ -го выходного технологического модуля

$$\left. \begin{aligned} S_t &= m_n n + i; \\ m_n + \frac{i}{\xi} &= m_{p_i} v_{p_i} + r_{p_i}; \\ m_{p_i} + \frac{r_{p_i}}{\xi_{p_i}} &= m_{(p_i-1)} v_{(p_i-1)} + r_{(p_i-1)}; \\ &\bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \quad \bullet \\ m_2 + \frac{r_2}{\xi_2} &= m_1 v_1 + r_1, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $S_t$  – номер изделия поступающего в технологическую систему;

$m_k, m_{ki}$  – целые числа, представляющие повторяемость циклов позиций подсистем  $(k-1)$ -го или  $(k_i-1)$ -го класса в подсистеме  $k$ -го или  $k_i$ -го класса входного или  $i$ -го выходного технологического модуля;

$r_k, r_{ki}$  – номер позиции подсистемы  $k$ -го или  $k_i$ -го класса входного или  $i$ -го выходного технологического модуля, составляющий маршрут движения  $S_i$  изделия.

Следует иметь ввиду, что при вычислении параметров по системе уравнений (10) необходимо чтобы выполнялись следующие условия:

- для правой части уравнений

- если  $r_k = 0$ , то  $r_k = u_k$ ;
- для левой части уравнений
 
$$\left. \begin{array}{l} \text{если } r_k = 0, \text{ то } \xi_k = u_k; \\ \text{если } r_k = 0 \text{ то } \xi_k = a. \end{array} \right\}$$

Для системы уравнений (11) необходимо, чтобы также выполнялись следующие условия:

- для правой части уравнений
 
$$\left. \begin{array}{l} \text{если } i = 0, \text{ то } i = n; \\ \text{если } r_{k_i} = 0, \text{ то } r_{k_i} = v_{k_i}; \end{array} \right\}$$
- для левой части уравнений
 
$$\left. \begin{array}{l} \text{если } i = 0, \text{ то } \xi = n; \\ \text{если } i = b, \text{ то } \xi = b; \\ \text{если } r_{k_i} = 0, \text{ то } \xi_{k_i} = v_{k_i}; \\ \text{если } r_{k_i} = c, \text{ то } \xi_{k_i} = c. \end{array} \right\}$$

Число позиций элементов подсистемы 1-го класса входного технологического модуля с которыми взаимодействует фиксированная позиция элементов подсистемы 1-го класса  $i$ -го выходного технологического модуля определяется на основании нахождения порядка нормального делителя [1] и выражается следующими формулами:

$$\left. \begin{array}{l} R_1 = \frac{HOK\left(\prod_{k=1}^P u_k, n\right)}{n}; \\ R_2 = \frac{HOK\left(R_1, \prod_{k_i=1}^{P_i} v_{k_i}\right)}{\prod_{k_i=1}^{P_i} v_{k_i}}, \end{array} \right\}$$

где  $R_1$ – число позиций элементов подсистемы 1-го класса входного технологического модуля с которым взаимодействует один выходной технологический модуль;

$R_2$ -число позиций элементов подсистемы 1-го класса входного технологического модуля с которыми взаимодействует фиксированная позиция элементов подсистемы 1-го класса  $i$ -го выходного технологического модуля.

Таким образом, разработанный подход и предлагаемые формулы, полученные на основе многомерной алгебры групп [1], позволяют определить основные параметры маршрутизации изделий в разветвляющихся поточно-пространственных технологических системах. А это дает возможность управлять показателями качества изготовления изделий и функционирования технологических систем, повысить уровень автоматизации производственных процессов на базе технологических систем непрерывного действия.