

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЯЗКИ КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА**Билищук К.А., Ищенко А.Л.** *(кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)***Введение**

С развитием науки и техники появляется много новых материалов, которые обладают уникальными свойствами, что позволяет использовать детали машин, узлов и механизмов в условиях значительных динамических нагрузок, в агрессивных средах, в условиях высоких температур и так далее. Несмотря на большое разнообразие таких свойств, существует один объединяющий такие материалы фактор – низкая обрабатываемость резанием. В связи с этим, такие материалы получили название – труднообрабатываемые материалы.

Одним из представителей таких материалов является сталь Гадфильда. Она характеризуется высоким уровнем износостойкости и обуславливает ее способностью к чрезвычайно интенсивному упрочнению при пластической деформации, происходящей в зоне фрикционного контакта [1]. Обозначение марки стали — 110Г13Л.

Сталь Гадфильда предназначена для изготовления деталей работающих на износ в условиях трения, давления и ударных нагрузок, при которых происходит самоупрочнение стали, а её прочность и износостойкость значительно возрастают [2].

Одной из главных причин, которая ограничивает использование стали 110Г13Л для изготовления деталей машин, механизмов и оборудования, как описывалось выше, является чрезвычайно трудная ее обработка резанием. Сталь настолько вязкая и под действием силы резания P_z , склонная к образованию наклепа в точках контакта инструмента, что считается практически не пригодной для обработки резанием [3]. Поэтому практически все детали из этой стали изготавливаются литьем с последующим шлифованием.

Во время обработки шлифованием на поверхность детали действуют силы резания, что оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства детали, но отрицательное влияние на процесс обработки – образовывается дефектный слой на поверхности; температурное воздействие процесса шлифования на обрабатываемость резанием и эксплуатационные характеристики в литературе до настоящего времени описаны не были.

На практике при обработке труднообрабатываемых материалов физико-механическое состояние поверхностного слоя шлифованных деталей определяется не только контактной температурой, которую можно измерить экспериментально, а всем пространственно-временным температурным полем, что справедливо и для стали Гадфильда. В частности, важнейшее значение при формировании поверхностного слоя имеют градиенты температур и скорости изменения температуры. Все эти факторы имеют однозначные функциональные связи с кинематическими и динамическими параметрами режима обработки, свойствами материала, характеристикой шлифовального круга, режимами и способами охлаждения и многими другими параметрами. Управление качеством шлифованной поверхности в значительной мере сводится к установлению этих связей и воздействию через них на тепловой режим шлифования и физико-механические свойства поверхностного слоя [4].

Изучение определения температуры на поверхности шлифованной детали из стали Гадфильда рассматривается на примере зуба ковша роторного укладчика-заборщика, изготовленного на предприятии «Зуевский энергомеханический завод».

Цель исследования – влияние температуры в зоне резания на физико-механические свойства связки круга.

Основное содержание работы

Проанализируем напряжения и деформации, возникающие на поверхности связки шлифовального круга, для этого определим температуру в зоне резания по методике, предложенной В.А. Сипайловым. Как процесс резания рассмотрим плоское шлифование периферией круга. При плоском шлифовании зона контакта абразивного круга с деталью будет прямоугольником, длина которого равна высоте шлифовального круга, а ширина определяется глубиной шлифования и диаметром круга [5]. Таким образом, длина прямоугольника равна 80 мм, а ширина – на порядок меньше.

В нашем случае зону контакта целесообразно моделировать бесконечно длинной полосой, поскольку реальная ограниченность этой полосы никак не повлияет на распределение температуры на ее средних участках. Некоторые изменения могут наблюдаться на концах полосы, но их влияние незначительно.

При расчете температур по схеме сплошного источника возникает вопрос о законе распределения плотности теплового потока по ширине. Эта величина, в зависимости от

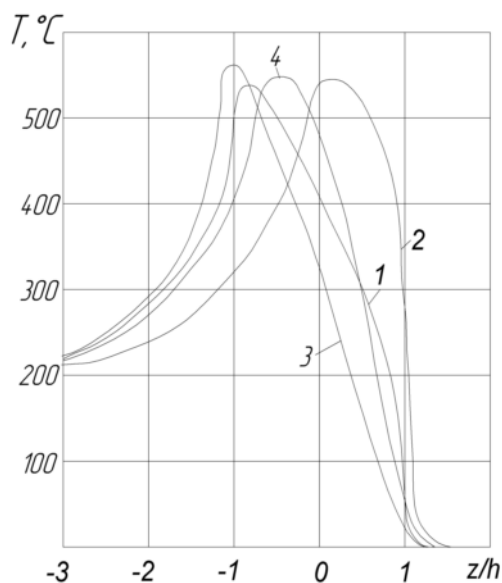


Рис. 1. Распределение температуры поверхности при различных законах изменения плотности теплового потока: 1 – $f(F')=I$ – постоянная плотность теплового потока; 2 – $f(F')=q_0 ((z'+h)/h)$ – линейная зависимость с максимумом на передней кромке источника и нулем на задней кромке; 3 – $f(F')=q_0 ((h-z')/h)$ – линейная зависимость с нулем на передней кромке и максимумом на задней кромке; 4 – $f(F')=q_0 ((h^2 - (z')^2)/2h^2)$ – параболическая зависимость.

определения даже этих простых граничных условий, необходим эксперимент. Сущест-

особенностей схемы шлифования, не обязательно равномерна, а подчиняется какому-либо непрерывному закону, однако, температуры, характерные для процесса шлифования, мало зависят от закона распределения плотности теплового потока (рис. 1) [4].

Разница проявляется при расчете температур от источников тепла, которые движутся медленно. Чем больше скорость источника, тем меньше влияние оказывает закон распределения q . При скоростях, характерных для шлифования, разница составляет 5-6%. Таким образом, можно принять равномерное распределение теплового потока по плоскости контакта.

Рассмотрим случай, когда шлифования ведется без охлаждения, при этом можно ограничиться заданием на всех поверхностях граничных условий второго рода. Под источником необходимо задать усредненный по зоне контакта тепловой поток, а на остальных поверхностях – нулевой тепловой поток. Для

вующие расчетные методы мало разработаны и не дают надежных результатов. Экспериментально плотность теплового потока обычно определяется по тангенциальной составляющей силы резания P_z .

Измерение сил при шлифовании проводятся давно и делаются попытки оформления результатов этих измерений в виде эмпирических формул типа:

$$P_z = C \cdot t^\alpha \cdot S^\beta \cdot V_u^\gamma \cdot V_k^\delta,$$

где $C, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ – экспериментально подобранные коэффициенты.

Эти коэффициенты дают большой разброс в численных значениях. Разброс достигает иногда почти 50%, что вызывает необходимость сдержанного отношения к этим формулам. Сравнительно небольшие изменения условий (влажность воздуха, износ круга и т. п.) вызывают большие изменения в результатах измерения сил P_z . Наиболее надежным является конкретный эксперимент. Измерив тангенциальную составляющую силы резания P_z и зная скорость периферии круга, можно определить общую тепловую мощность, выделяемую в зоне контакта: $N = P_z V_k$. Разделив эту величину на площадь зоны контакта, можно найти полную плотность теплового потока [4]:

$$q = \frac{P_z V_k}{S}$$

Исходные данные для расчета следующие: шлифовальный круг прямого профиля, наружный диаметр $D = 300$ мм, высота круга $B = 80$ мм. Выбор связки абразивного инструмента осуществляется после определения максимальной температуры на поверхности изделия при шлифовании.

Режим шлифования: скорость продольной подачи $v = 12$ м/мин, глубина шлифования $t = 0,1$ мм; материал – сталь 110Г13Л: температуропроводность $a = 0,05 \times 10^{-4}$ м²/с, теплопроводность $\lambda = 55$ Вт/(м×К).

Согласно [4], для выбранного режима шлифования, погонная тангенциальная сила, отнесенная на 1 мм длины зоны контакта составит: $P'_z = 1000$ Н/м. Таким образом, плотность теплового потока определяется:

$$q = \frac{P'_z \times B \times V_k}{B \times \sqrt{Dt}} = \frac{1000 \times 0,08 \times 35}{0,08 \times \sqrt{0,3 \times 0,1 \cdot 10^{-3}}} = 6,4 \text{ МВт} / \text{м}^2$$

Определим ширину зоны контакта вдоль направления движения по следующей зависимости:

$$2h = \sqrt{Dt} = \sqrt{0,3 \times 0,1 \cdot 10^{-3}} = 5,5 \text{ мм}$$

Следовательно, безразмерная полуширина контакта составляет:

$$H = \frac{v \cdot h}{2a} = \frac{0,2 \cdot 0,00275}{2 \cdot 0,05 \cdot 10^{-4}} = 54$$

Так как скорость источника велика ($H > 10$), для расчета поверхностных температур можно воспользоваться приближенным значением интеграла [4]:

$$J(u) = \sqrt{2\pi |u|} - 1$$

Температуру поверхности в этом случае можно определить по формуле:

$$T = \frac{2qa}{\pi\lambda v} \sqrt{2\pi} (\sqrt{H-Z} - \sqrt{|H+Z|}) \quad (1)$$

Графически распределение температуры на поверхности детали из стали Гадфильда изображено на рисунке 2. Для упрощения расчетов данный график был построен с использованием пакета Mathcad.

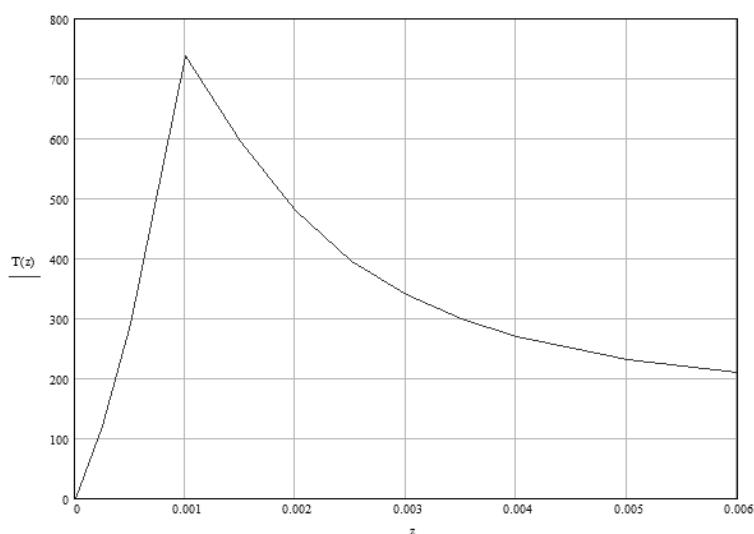


Рис. 2. Температура на поверхности детали от движущегося полосового источника

Средняя скорость нагрева будет выражена зависимостью [4]:

$$\tau = \frac{2 \cdot h}{v}$$

Из графика (рис. 2) можно получить некоторые сведения: максимум температуры на задней кромке полосового источника $z = h = 0,001$ м, это следствие значительной скорости продольной подачи. Максимальная температура на поверхности составила около 740°C ,

средняя скорость нагрева $\tau = 0,01$ с. Нетрудно заметить, что у графика функции отсутствует плавный переход - результат приближенного расчета по средствам зависимости (1).

В зависимости от области применения и особенностей связки, сталь Гадфильда можно обрабатывать кругом на керамической, бакелитовой или вулканитовой связке. Керамическая связка обладает высокой температурной стойкостью, поэтому подходит для шлифования стали Гадфильда с максимальной температурой в зоне резания 740°C . Бакелитовая связка разрушается при температуре выше 250°C , а вулканитовая – при температуре выше 150°C [6]. Следовательно, данные связки не подходят для обработки изделий из стали Гадфильда.

Выводы

Установлено, что максимальная температура на поверхности изделия из стали Гадфильда составила около 740°C при средней скорости нагрева $\tau = 0,01$ с.

Температура на поверхности изделия при шлифовании влияет на выбор связки абразивного инструмента. При высоких температурах в зоне резания происходит разрушение и выгорание бакелитовой и вулканитовой связки. Для обработки стали Гадфильда подходит керамическая связка, благодаря своей высокой температурной стойкости.

В дальнейшем планируется произвести имитационное моделирование поведения единичного зерна в связке шлифовального круга под действием контактных нагрузок.

Список литературы: 1. Иванов Ю.Ф., Алешина Е.А., Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Сизова О.В., Громов В.Е. Закономерности формирования структуры поверхностного слоя стали Гадфильда при трении // Физ. мезомех. – 2006. – Т. 9. – № 6. – С. 83-90. 2. Сталь 110Г13Л [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bila.ru> 3. Строшков А.Н. Обработка резанием труднообрабатываемых материалов с нагревом / Строшков А.Н., Кунин Н.С., Малинин И.П. – М.: Машиностроение, 1977. 4. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 5. Маслов Е.Н. Основы теории шлифования металлов. – М.: Машгиз, 1951. – 190 с. 6. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, – 1987. – 846 с.

**ОСОБЕННОСТИ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА БАЗЕ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

Лахин А.М., Михайлов А.Н., Тархов М.А. *(кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)*

Зубчатые колеса являются наиболее востребованными деталями силовых механизмов и устройств, поскольку зубчатые передачи в наибольшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к силовым передачам. Вместе с тем, для обеспечения конкурентоспособности данных изделий, к зубчатым колесам предъявляются постоянно увеличивающиеся требования, связанные с увеличением долговечности, снижению шума в работе, снижению габаритов при передаче высоких крутящих моментов, возможности работы в условиях сухого трения и пр. Поэтому в настоящий момент при конструировании и изготовлении зубчатых колес требуются новые подходы, заключающиеся как в совершенствовании конструкции, так и применении новых подходов в создании технологического обеспечения производства зубчатых способствующих повышению их эксплуатационных характеристик.

Одним из новых направлений при создании технологического обеспечения производства зубчатых колес, являются функционально-ориентированные технологии [1], целью которых является обеспечение свойств элементов изделия соответствующих условиям их эксплуатации в машине или технологической системе.

Одной из отличительных особенностей функционально-ориентированных технологий является обеспечение свойств элементам изделия в зависимости от условий эксплуатации на местном уровне, что предполагает реализацию местных технологических воздействий к различным элементам зубчатых колес в соответствие с выполняемыми функциями. В связи с этим для рассматриваемых колес производится деление элементов на функциональные зоны и элементы [2], разрабатываются классификации, а также определяются свойства для каждой группы функциональных элементов, которые требуется обеспечить для полного соответствия изделия условиям эксплуатации. Свойства функциональных элементов предполагает как физико-механические характеристики зон и участков зубчатых колес, которые могут отличаться от характеристик основного материала, так и обеспечения заданных параметров точности и качества поверхности элементов зубчатых колес. Требования по точности и качеству поверхности обеспечиваются различными методами предварительной, чистовой и отделочной обработки зубчатых колес, которые достаточно хорошо изучены ранее [3].

Методы местного обеспечения физико-механических характеристик элементов зубчатых колес предполагают локальное управление свойствами основного материала зубчатых колес, что может быть выполнено на основе: термического упрочнения, механического воздействия методами ППД, а также путем создания дополнительного поверхностного слоя из материала, имеющего свойства, отличные от свойств основного материала детали. Местное термическое упрочнение позволяет значительно увеличить прочностные характеристики элементов зубчатых колес, однако приводит к нарушению размерной точности и качества поверхности вследствие термических деформаций и окисления, что в конечном итоге требует значительного объема механической обработки. Применение методов ППД также позволяет несколько повысить физико-механические характеристики и поверхностного слоя за счет сглаживания микронеровностей образующих рельеф поверхности, а также наклепа в поверхностном слое. Однако увеличение физико-механических свойств при этом незначительно, к тому же при-

водит к образованию в поверхностном слое значительных остаточных напряжений, которые в последствие могут привести к преждевременному износу зубчатых колес. Создание дополнительного поверхностного слоя материала, реализуемое за счет нанесения специальных покрытий, позволяет в широких пределах управлять физико-механическими характеристиками элементов зубчатых колес, поскольку свойства определяются составом и свойствами наносимого покрытия. При этом вид покрытия определяется решаемой технологической задачей, исходя из назначения конкретного элемента колеса. Однако достигаемые в данном случае свойства зависят от качества самого покрытия, которое выражается в его сцеплении с подложкой (основным материалом детали), толщине и равномерности толщины покрытия. Также следует учесть, что при нанесении покрытия происходит некоторое увеличение размеров элементов детали в связи с наличием дополнительного поверхностного слоя с покрытием. Поэтому на предыдущих этапах механической обработки должен быть предусмотрен съем дополнительного припуска с учетом наличия покрытия на элементы зубчатых колес.

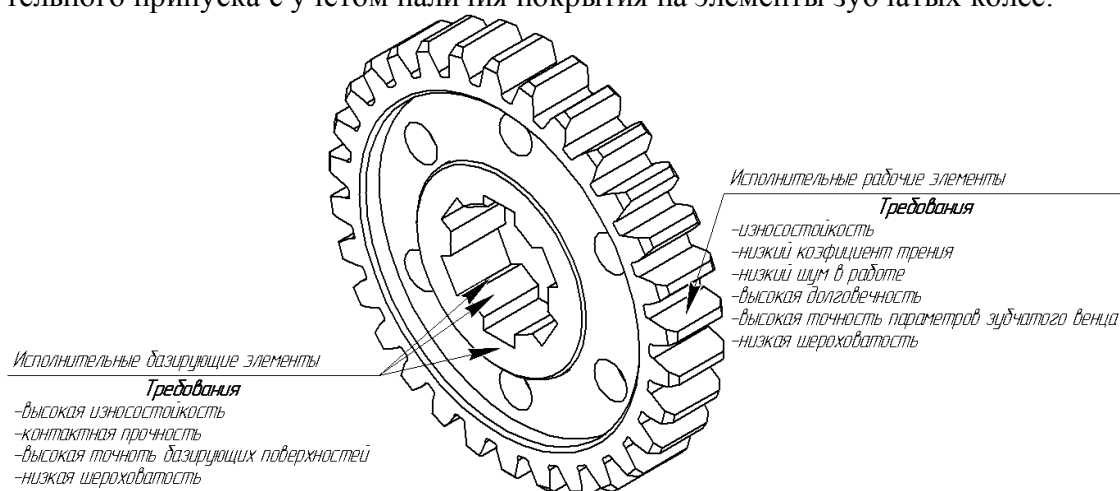


Рис. 1. Исполнительные элементы зубчатых колес и предъявляемые к ним требования

На рис. 1. представлены требования к исполнительным (рабочим и базисующим) элементам зубчатых колес. К остальным элементам предъявляются менее значительные требования, как правило, обеспечиваемые основным материалом детали и обычно не требующих специальной высокоточной обработки.

Требования к базисующим элементам предполагают: обеспечение высокой точности линейных и диаметральных размеров, высокую точность формы и взаимного расположения поверхностей; низкую шероховатость установочных поверхностей, высокой контактной прочности опорных поверхностей, а в некоторых случаях низкий коэффициент трения при необходимости осевого перемещения зубчатых колес в процессе работы узла. Данные требования могут быть обеспечены чистовой и отделочной обработкой методами лезвийной и абразивной обработки после закалки, а также ППД (калибрование, выглаживание, раскатывание). Для обеспечения возможности беспрепятственного перемещения на валу, на отверстия и торцы, прилегающие к ним, а также для избежания возможности заедания на элементы отверстия могут быть нанесены покрытия на основе нитридов и карбидов титана и других высокопрочных металлов, которые позволяют также повысить микротвердость и контактную прочность.

Требования к исполнительным рабочим элементам предполагают высокую износостойкость профиля зуба, низкий коэффициент трения к сопрягаемым зубьям, низкую шероховатость, высокую точность элементов зубчатого венца, точность взаимного

расположения относительно базирующих элементов, а также низкий шум в работе и высокую долговечность. Причем управление свойствами рабочих элементов зубчатых колес связаны с действием переменных эксплуатационных функций. Рассмотрим их действие на примере изменения скорости взаимного скольжения профилей в процессе зацепления, по высоте зуба (рис. 2).

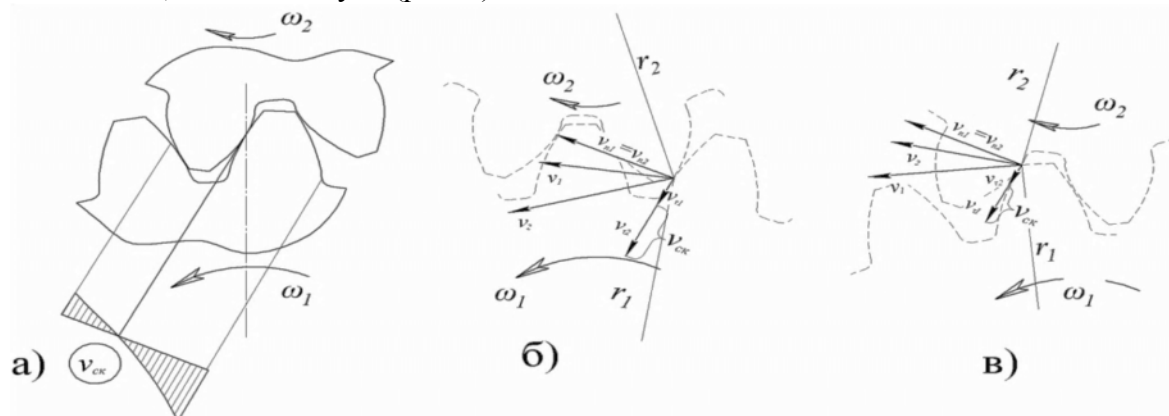


Рис. 2. Изменение скорости взаимного скольжения профилей в процессе зацепления: а) график изменения скорости взаимного скольжения; б) скорости в начале зацепления; в) скорости в конце зацепления

В процессе зацепления по высоте зуба действует взаимное скольжение в точках контакта зубьев, причем величина скорости взаимного скольжения определяется разницей касательных составляющих скоростей в зацеплении [3]:

$$v_{ск} = v_{t2} - v_{t1}.$$

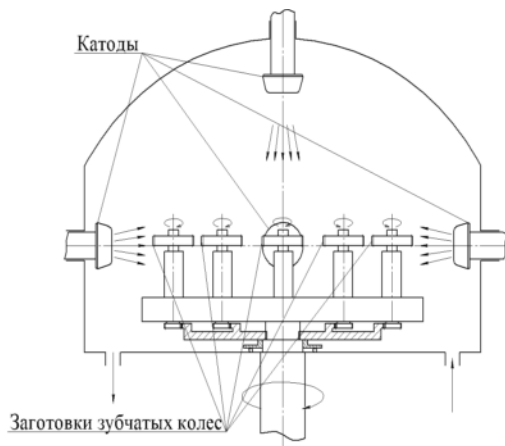


Рис. 3. Схема нанесения покрытий на рабочие элементы зубчатых колес

Ее величина непрерывно изменяется при перекатывании профилей сопряженных зубьев. При этом в верхней части зуба данная разность наибольшая, поэтому зоны у вершины зуба испытывают наибольший механический износ в результате трения профилей сопряженной пары зубьев. Различие скоростей взаимного скольжения изменяются непрерывно, и равны 0 при контакте зубьев в полюсе зацепления, при этом максимальные значения зависят от разности чисел зубьев шестерни и колеса.

Нанесение износостойких вакуумных ионно-плазменных покрытий на исполнительные рабочие поверхности (зубья), позволяют обеспечить износостойкость данных поверхностей, а также при комбинаций материалов наносимых на зубья шестерни и колеса, наносить покрытия со специальными свойствами (на основе Ti, TiN), обеспечивающие минимальный коэффициент трения рассматриваемой пары зубьев. Данные свойства особенно актуальны для открытых зубчатых передач, работающих в условиях сухого трения.

Экспериментальные исследования, производимые для прямозубых колес с модулем $m=2.5$ мм и числом зубьев 22-27, позволяют выделить некоторые закономерности изменения толщины покрытия и микротвердости по высоте зуба. Установка заготовок в камеру производилась на вращающийся стол с планетарным механизмом, позволяющий обеспечить движение заготовок в процессе нанесения покрытий для обеспечения равномерного доступа потока ионов, исходящих от катодов, к наносимым поверхностям зубчатых колес (рис. 3).

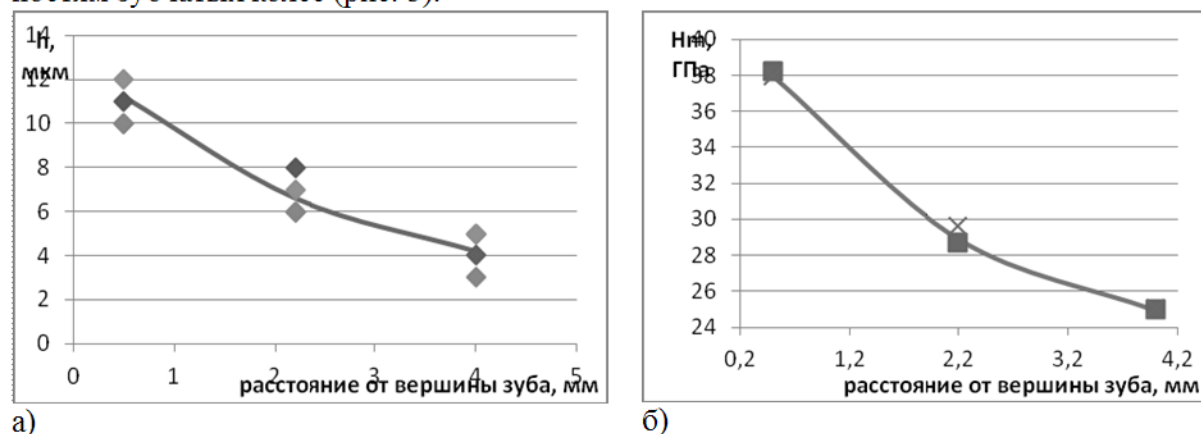


Рис. 4. Графики изменения толщины покрытия (а) и микротвердости (б) по высоте зуба

По результатам измерения толщины покрытия (рис. 4, а) и микротвердости, характеризующей износостойкость зубьев (рис. 4, б), можно заметить, что в зонах поверхностных слоев у вершин зуба толщина покрытия и микротвердость имеют наибольшие значения, и уменьшаются по мере удаления от окружности вершин к ножке зуба. Это свидетельствует о том, что при нанесении покрытий зоны у впадин зубьев имеют наибольшее сопротивление по перемещению ионов в процессе осаждения покрытия, а также возможностью образования теневых зон в результате перекрытия соседними зубьями. Однако, как видно из рис. 3, поскольку наибольшее трение испытывают участки у головки зуба, требования к их износостойкости наибольшие, и могут быть удовлетворены при реализации данной схемы.

Таким образом анализ, проведенный в работе позволил установить, что использование традиционных методов отделочной механической обработки, и термического упрочнения, не позволяет в полной мере обеспечить свойства элементов зубчатых колес в соответствии с условиями их эксплуатации. При этом использование комбинаций покрытий, наносимых на отдельные участки зубчатых колес в соответствии с выполняемыми эксплуатационными функциями, позволяет максимально адаптировать зубчатые колеса к условиям их эксплуатации в машине или технологической системе.

Список литературы: 1. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. - 346 с. 2. Лахин А.М., Михайлов А.Н., Зантур Сахби, Тарафа Аль-Судани Синтез схем технологического воздействия для функционально-ориентированных технологических процессов производства зубчатых колес // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. Вып. 38. С. 127-132. 3. Кудрявцев В.Н. Зубчатые передачи. - М.: «Машгис», 1957. – 263 с.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОЙ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ
МЕТЧИКОВ**

Меркулов М.В., Чегаев А.К. (*кафедра ТМ, ДонНТУ, Донецк, Украина*)

Функционально-ориентированная технология изготовления изделия машиностроения это специальная технология, которая базируется на функционально-ориентированных технологической системе и технологическом процессе. Она основана на точной, ориентированной топологически, реализации заданного множества алгоритмов технологического воздействия инструментов и принципов обработки в требуемые нано, микро, макро зоны и участки изделия, которые функционально соответствуют условиям их эксплуатации в каждой отдельной его зоне. [1] При этом их вид, тип, вариант, количество, качество и алгоритм технологического воздействия целенаправленно определяются, а также топологически, функционально и количественно ориентируются при их реализации в отдельные зоны изделия в зависимости от заданных функциональных особенностей их эксплуатации. Применение функционально-ориентированных технологий для изделий машиностроения позволяет максимально повысить их общие эксплуатационные параметры за счет местного увеличения технических возможностей и свойств отдельных элементов, поверхностей или зон изделия в зависимости от функциональных местных особенностей их эксплуатации. При этом изделия машиностроения, изготавливаемые по предлагаемым технологиям, максимально адаптируются по своим свойствам к особенностям их эксплуатации и проявляют свой полный потенциал возможностей при работе. [2]

Следует отметить, что предлагаемый новый класс технологий усложняет процесс изготовления изделий, но в целом обеспечивает качественно новую совокупность свойств и меру полезности изделий машиностроения при эксплуатации. Это дает возможность существенно повысить технико-экономические показатели эксплуатации и использования машин и технических систем.

Применение комбинированной функционально-ориентированной технологии при производстве металлорежущих инструментов происходит в несколько этапов. [3] Рассмотрим эти этапы, взяв в качестве примера функционально-ориентированную технологию производства метчиков.

1. Формообразование металлорежущего инструмента по уже существую-



Рис.1. Специальные метчики до нанесения покрытия

щим технологиям с получением всей необходимой геометрии но без окончательной заточки режущей кромки.

2. Подготовка поверхности к нанесению покрытия: происходит шлифовка и полировка режущих кромок инструмента (рис.1).

3. Ориентированная пневмоструйная обработка: на установке УЗГ 4-1 (рис.2) происходит бомбардирование порошком черного кремния (рис.3) режущих кромок инструмента, поверхностно упрочняя их.



Рис.2. Установка УЗГ 4-1 для пневмоструйной ориентированной обработки

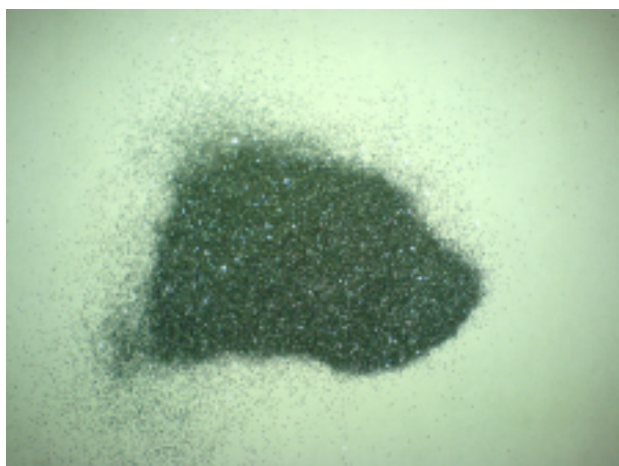


Рис.3. Порошок карбида кремния черного

4. Ультразвуковая обработка поверхности: в специальном оборудовании в специальном растворе происходит очистка поверхностей инструмента (рис.4).



Рис.4. Оборудование для ультразвуковой очистки

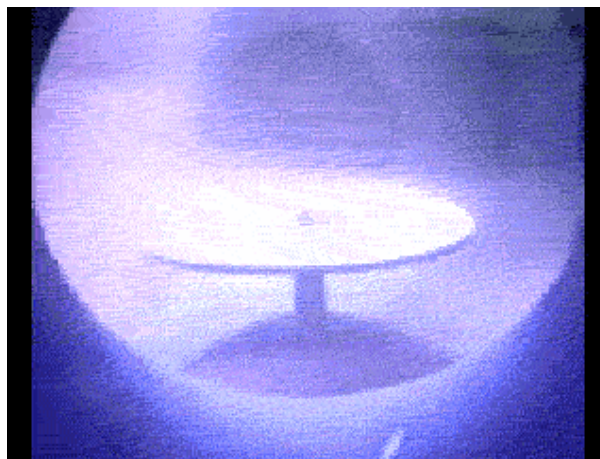


Рис.5. Металлизация изделий в вакуумной камере

5. Обезжиривание химической обработкой поверхности: инструмент обрабатывается бензином, ацетоном и спиртом.

6. Очистка тлеющим разрядом в вакуумной камере под давлением 7×10^{-3} Па в течение 10 мин.

7. Ионная бомбардировка в вакуумной камере инструмента в течение 5 мин под давлением 5×10^{-3} Па.

8. Прогрев инструмента в вакуумной камере в течение 5 мин под давлением 5×10^{-3} Па.
9. Металлизация поверхностного слоя инструмента на глубину 0,1 мкм в вакуумной камере в течение 2 мин под давлением 3×10^{-3} Па (рис.5).
10. Нанесение покрытия на инструмент толщиной 0,7 мкм в вакуумной камере в течение 10 мин под давлением 4×10^{-3} Па.
11. Охлаждение инструмента в вакуумной камере в течение 10 мин.

На выходе получаем металлорежущий инструмент с совершенно новыми качественными свойствами (рис.6). Износостойкость инструмента повышается в 3-4 раза. [4]



Рис.6 Метчики после нанесения покрытия

Список литературы: 1. Методы поиска новых технических решений / Под ред. А.И. Половинкина. – Йошкар-Ола: Мар. кн. изд-во, 1976. 2. Митрофанов С. П. Групповая технология машиностроительного производства. – Л.: Машиностроение, 1983. 3. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / Михайлов А.Н. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. 4. Михайлов А.Н. Основные принципы и особенности синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-16 сентября 2006 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2006. Т. 3. С. 61-77.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЕСНО-РЕЕЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ БСП

Мирошниченко О.А., Горобец И.А. (кафедра ТМ, ДонНТУ, Донецк, Украина)

Анализ современного мирового состояния производства угля, а так же его потребления показывает, что уголь был и остается основным энергетическим ресурсом, а его роль в мировом топливно-энергетическом комплексе постоянно растет [1]. По данным обзора мировой энергетики Statistical Review of World Energy в июне 2011 г. [2] Украина находится в первой десятке стран по уровню угольного потенциала, при этом

доказанные запасы угля в Украине насчитывают 33,873 млрд. т, что составляет 3,9% мирового запаса угля. Однако при таком высоком потенциале природных ресурсов удельный вес добычи угля составляет лишь 1% (73,3 млн. т).

Поэтому для повышения производительности горно-шахтных работ и успешного использования природного богатства необходимо применение высокопроизводительного и автоматизированного горно-шахтного оборудования, которое обладает высокой надежностью и обеспечивает меньшие простои в работе, связанные с износом или поломкой деталей.

Основным элементом технологической цепочки шахтной угледобычи в составе механизированного комплекса является очистной комбайн. Практически все современные отечественные и зарубежные очистные механизированные комплексы оснащаются комбайнами с бесцепной системой подачи (БСП), которая состоит из зубчатого колеса (звездочки) перекатывающегося по зубчатой (цевочной) рейке [3].

Особенностью современного развития угольной промышленности Украины является интенсификация добычи угля, в связи с чем происходит значительное увеличение нагруженности на весь механизированный комплекс очистных забоев приводит к повышению удельной нагрузки в бесцепных системах подачи в 1,9...2 раза [4], а следовательно, к резкому ужесточению требований к качеству его элементов. Поэтому в оценке работоспособности движителей системы подачи очистного комбайна большое значение имеет качество изготовления пары «колесо-рейка», так как очень важно обеспечить плавность хода комбайна и минимальный износ элементов движителя.

В движителях традиционной конструкции для шахт Украины используется цевочное зацепление. При этом зуб имеет эвольвентный профиль и зацепляется с цилиндрической цевкой (рис. 1а). Основание и рама рейки изготавливаются из стальной прокатной полосы, в которых с помощью плазменной резки получают наружные поверхности и отверстия под цевки и для крепежа. Цилиндрические пальцы (цевки), свариваемые в отверстия основания и рамы, изготовлены из круглого проката, прошедшего токарную обработку. В настоящее время используются и литые рейки, что позволяет применять и другие формы зуба рейки (рис. 1б). При этом используется циклоидальное зацепление пары «колесо-рейка», у которого профили зубьев колеса очерчены по циклическим кривым: ножка зуба – по гипоциклоиде, а головка – по эпициклоиде. Изготовление такой зубчатой рейки предусматривает минимум операций механической обработки резанием, связанных лишь с получением отверстий для крепления рейки к ставу скребкового конвейера и фрезерованием двух призонных поверхностей по длине детали и двух торцов рейки. Зубообработка колеса движителя БСП состоит из черновой послойной обработки резцом в резцовой оправке по контуру с последующей чистовой обработкой концевой фрезой.

При исследовании погрешности изготовления элементов колесно-реечного движителя достаточный объем экспериментального материала определялся из условия необходимой точности данных статистической обработки фактического материала, т.е. объем информации должен быть достаточен для того, чтобы с гарантированной вероятностью погрешность оценки величины не превышала назначенной или допустимой [5].

Объем экспериментального материала для дискретных величин оценивались зависимостью:

$$\begin{cases} P_T = 2\Phi(t) \\ \varepsilon = tS_x \sqrt{\frac{1}{n}} \end{cases}, \quad (1)$$

где P_T – доверительная вероятность, $\Phi(t)$ – интегральная функция Лапласа, S_x – оценка среднеквадратического отклонения результата измерения, ε – максимальное отклонение выборочной средней от генеральной, n – число опытов.

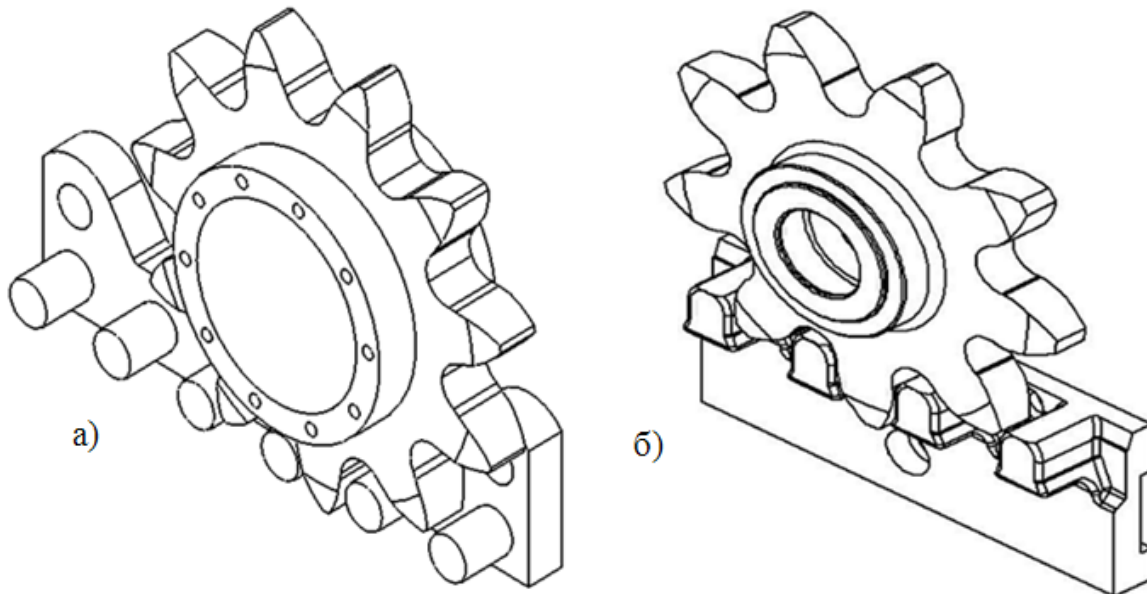


Рис. 1. Виды конструкций движителей БСП механизма подачи очистного комбайна

Определение погрешностей изготовления литого зубчатого реечного става движителя БСП заключалось в измерении толщины прямолинейного и криволинейного участков зуба и шага зубьев рейки. Для исследования точности изготовления цевочной рейки был измерен шаг рейки и определено отклонение величины шага цевочной рейки от ее номинального значения. Определение погрешностей изготовления зубьев зубчатого колеса движителя БСП заключалось в измерении ширины зубьев по постоянной хорде на $3x$ высотах.

Согласно предварительно определенного объема выборки был сформирован массив данных, в результате статистической обработки получены результаты, анализ которых позволил сделать следующие заключения, табл. 1.

Таким образом, погрешности взаимного расположения элементов колесно-реечного движителя, связанные с погрешностями в изготовлении, в ходе работы очистного комбайна непрерывно изменяются в пределах максимального интервала. Это и приводит к дополнительным изменениям кинематических и силовых характеристик зацепления колесно-реечного зацепления, накладывающих свой отпечаток на динамическую нагруженность машины в целом, а так же надежность всего механизированного комплекса.

**ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

Таблица 1. Результаты исследования погрешности изготовления элементов колесно-реечного движителя

Исследуемый параметр	Место наибольшей погрешности		
	Номинальный размер, мм	Математическое ожидание, мм	Относительная ошибка, %
Толщина зуба литой зубчатой рейки	43,86	41,71	9,3
Ширина зуба зубчатого колеса	9,18	9,50	18
Шаг зубьев литой зубчатой рейки	126	125,98	4,4
Шаг цевок цевочного реечного става	100	99,98	5,5

Список литературы: 1. Трушина Г.С., Щипачев М.С. «Значение угольной промышленности в развитии мировой энергетики»//Ежемесячный научно-технический и производственно-экономический журнал «Уголь №10» - 2011г. – с. 42-48. 2. BP Statistical Review of World Energy - «Статистический обзор мировой энергетики», June 2011 3. Горобец И. А., Бабенко М. О. "Влияние погрешности профиля зубьев на характеристики колесно-реечных движителей" в сборнике трудов XIII Международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-16 сентября 2006г. В 5-х томах. - Донецк: ДонНТУ, 2006. Т1 - с. 26-27. 4. Бреннер В. А., Лукиенко Л. В Повышение ресурса бесцепных систем подачи угледобывающих комбайнов. РХТУ им. Д. И. Менделеева. Новомосковский институт, Новомосковск, 2004. – 204 с. 5. Болтян А.В., Горобец И.А. «Теория инженерных исследований»: Учебное пособие. – Донецк, - ДонНТУ, 2001. – 139 с.

**НОВЫЙ КЛАСС ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ФОРМЫ
ТЕХНОЛОГИЙ - ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Михайлов А.Н., Михайлова Е.А., Соосар В.А.
(кафедры ТМ и ГЗТЛ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

С развитием научно-технического прогресса непрерывно повышаются требования к качеству, возможностям и эстетической красоте создаваемых машин, технических систем и оборудования. Это особенно проявляется в современных условиях с постоянно изменяющимися особенностями конъюнктуры международных рынков сбыта товаров. Поэтому выпускаемые изделия должны непрерывно совершенствоваться и при этом обеспечиваться их качественно новая совокупность свойств и мера полезности. Для решения этих вопросов необходимо постоянно обновлять и технологическое обеспечение по изготовлению изделий.

На основании этого в данной работе приводятся данные по созданию специальных технологий, обеспечивающих реализацию качественно новой совокупности свойств и меры полезности изделий машиностроения при эксплуатации на всех этапах комплексного технологического процесса. Здесь эти технологии именуются функционально-ориентированными технологиями (ФОТ) [1, 2].

Можно отметить, что в настоящее время в машиностроении широко используются различные организационно-технологические формы технологических процессов,

а именно: единичные технологические процессы, типовые технологические процессы, групповые технологические процессы, модульные технологические процессы.

Анализируя эти технологические процессы можно усмотреть, что в целом методология их проектирования состоит из двух этапов проектирования (рис. 1):

1. Деление изделия на исполнительные поверхности и выполнение их классификации.
2. Формирование структуры или маршрута технологического процесса.

Заметим, что методика проектирования этих технологических процессов характеризуются лавинообразным процессом. Во многих компаниях и фирмах такую схему проектирования технологических процессов рассматривают как незыблемую. Однако, не смотря на силу традиций, анализ процесса проектирования технологий в машиностроении показывает следующие недостатки этой схемы: непригодность для разработки сложных технологий, состоящих из большого числа подсистем и автономных модулей, образующих сетевые структуры; обязательно последовательное выполнение всех

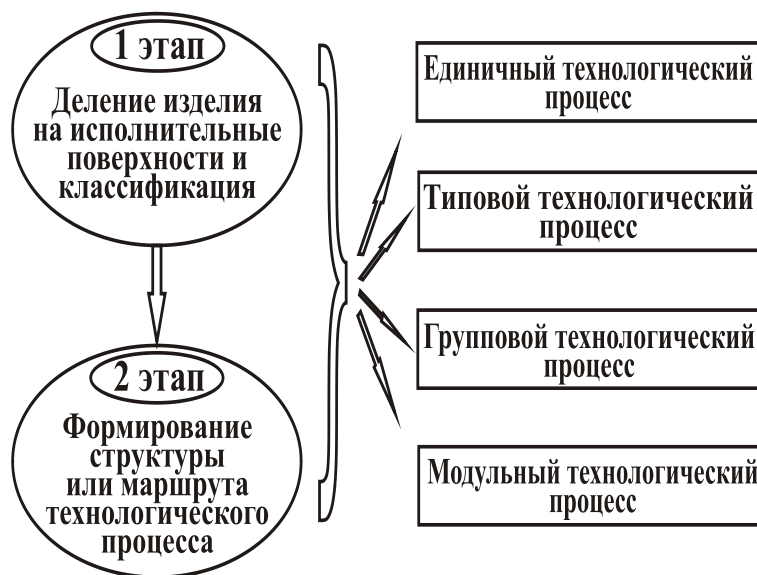


Рис. 1. Основные этапы синтеза традиционных технологий

этапов проектирования технологий; несовместимость с эволюционным подходом и с перспективными методами управления процессами проектирования технологических процессов.

Поэтому, для создания прогрессивных технологических процессов машиностроения, традиционные методы не подходят. На рис. 2 показаны основные этапы синтеза ФОТ. Здесь методика проектирования ФОТ не является отдельным монолитным этапом. Она представляет собой один из шагов на пути последовательной итеративной разработки технологического процесса.

При этом последовательность

и методология базируется на замкнутой рекуррентной структуре. Основные этапы синтеза ФОТ следующие:

1. Анализ эксплуатационных особенностей изделия и составление структуры эксплуатационных функций.
2. Деление изделия на функциональные элементы по уровням «глубины технологии» и их классификация.

3. Формирование структуры или маршрута технологического процесса на базе особых принципов ориентации.

ФОТ изготовления изделия машиностроения это специальная технология, которая основана на точной топологически ориентированной реализации необходимого множества алгоритмов технологического воздействия орудий и средств обработки в необходимые микро, макро зоны и участки изделия, которые функционально соответствуют условиям их эксплуатации в каждой отдельной его зоне. При этом их вид, тип,



Рис. 2. Основные этапы синтеза ФОТ

вариант, количество, качество и алгоритм технологического воздействия целенаправленно определяются, а также топологически, функционально и количественно ориентируются при их реализации в отдельные зоны изделия в зависимости от заданных функциональных особенностей их эксплуатации.

Основными особенностями ФОТ является то, что технологические воздействия орудий обработки на изделия и процесс обеспечения заданных и требуемых свойств изделий выполняется на следующих уровнях: на уровне всего изделия в целом; на уровне участков; на уровне составляющих; на уровне зон; на уровне макрозон; на уровне микрозон; на уровне нанозон.

При этом заданные, требуемые и предельные свойства изделий обеспечиваются за счет ориентации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на базе следующих восьми особых принципов [2]: 1. Функционального соответствия. 2. Топологического соответствия. 3. Количественного соответствия. 4. Адекват-

ной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации. 5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации. 6. Структурного соответствия действия множества элементарных функций. 7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени функционального элемента. 8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени.

На основе разработанных принципов выполняется синтез ФОТ и изготовление изделий, которые обеспечивают полную адаптацию изделия и его элементов по эксплуатационным свойствам к условиям эксплуатации. Изготовление изделий на основе ФОТ обеспечивает возможность реализации их полного потенциала функциональных возможностей при эксплуатации. Это существенно повышает технико-экономические показатели изготовления и эксплуатации изделий.

В заключение можно отметить, что в данной работе разработан общий подход создания ФОТ. Он основывается на целом комплексе новых принципов их проектирования, которые предложены в данной работе. Для реализации ФОТ приведена общая методология и методика их выполнения. Эти технологии относятся к новому классу организационно-технологической формы технологий [2].

Список литературы: 1. Михайлов А.Н. Общий подход в создании функционально-ориентированных и интегрированных технологий машиностроения // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2005 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2005. Т. 2. С. 261-275. 2. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Михайлова Е.А., Михайлов А.Н., Мазур И.Ю.
(кафедры ГЗТЛ и ТМ, ДонНТУ, Донецк, Украина)

Введение. В настоящее время в машиностроении широко используются различные методы повышения эксплуатационных свойств инструментов [1, 2] из быстрорежущей стали. Особенно эффективным для решения этих вопросов является применение вакуумных ионно-плазменных покрытий поверхностей инструментов. Однако нанесение покрытий на поверхности инструмента является сложным процессом. Решению этого вопроса посвящен ряд работ [3]. Вместе с тем, эти вопросы требуют дальнейшего исследования и изучения особенностей.

Цель данной работы заключается в повышение производительности технологических систем для напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на осевые инструменты из быстрорежущей стали за счет обеспечения рациональной концентрации и структуры рабочих позиций установки. В соответствии с поставленной целью в работе планируется решить следующие задачи: разработать структурно-логические выражения по определению основных параметров производительности в зависимости от структуры технологической системы, исследовать особенности структурных вариантов техно-

логической системы и определить их влияние на параметры производительности, представить зависимости параметров производительности от особенностей процесса нанесения покрытий осевых инструментов из быстрорежущей стали.

Результаты и обсуждения. Можно отметить, что проблема повышения производительности выполняется особенно эффективно за счет широкого применения принципа концентрации рабочих позиций в технологической системе. Однако использование этого принципа должно базироваться на основных особенностях структуры рабочих позиций в вакуумной камере и параллелизме реализации технологических воздействий на предметы обработки. В этом случае общее количество рабочих позиций определяется по следующей формуле:

$$v_i = \prod_{k=1}^p v_{ik}, \quad (1)$$

где v_i - общее количество рабочих позиций технологической системы;

v_{ik} - количество позиций в подсистемах k -го класса установки;

p - количество классов подсистем установки.

Количество классов подсистем и количество позиций в подсистемах установки оказывает существенное влияние на общее количество рабочих позиций. Поэтому на базе этих параметров, возможно, вести решение вопросов обеспечения заданной производительности технологической системы.

Для обеспечения принципа параллелизма при нанесении покрытий на осевые инструменты (фрезы) в вакуумной камере необходимо определенным образом расположить рабочие позиции и реализовать их необходимую кинематику движений в технологической системе. Эти вопросы решаются с помощью обеспечения параллельно действующей структуры рабочих позиций в вакуумной камере.

Принцип концентрации изделий в технологической зоне обеспечивает возможность параллельного нанесения покрытий на осевые инструменты из быстрорежущей стали.

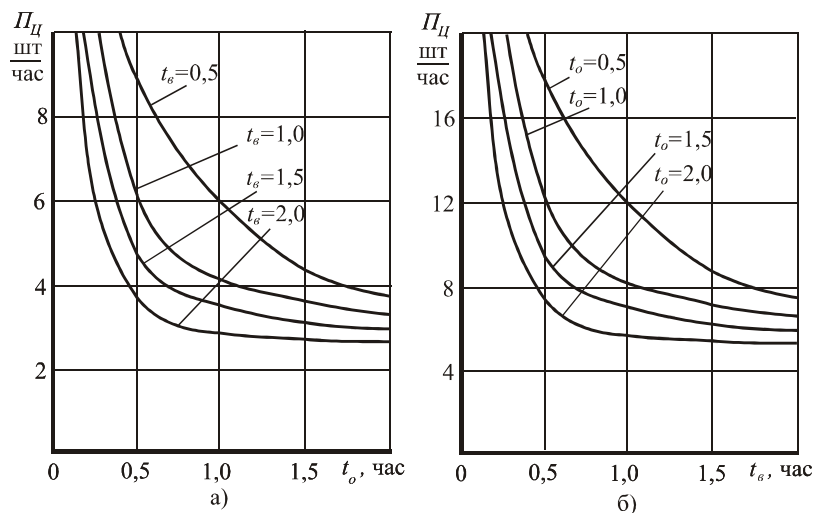


Рис. 1. Зависимость цикловой производительности от параметров длительности полного технологического цикла нанесения покрытий: а – основного времени, б – вспомогательного времени

Следует отметить, что для реализации принципа концентрации, обеспечения заданной структуры рабочих позиций и выполнения процесса напыления, вакуумных ионно-плазменных покрытий необходимо реализовать необходимую кинематику движения рабочих позиций, подсистем и всего поворотного устройства. Выполнение этих движений необходимо для осуществления равномерности нанесения покрытий на поверхности для всех изделий в процессе и исключения влияния эффекта «теневая зона», так как в вакуумной камере располагается боль-

шинности нанесения покрытий на поверхности для всех изделий в процессе и исключения влияния эффекта «теневая зона», так как в вакуумной камере располагается боль-

шое количество изделий. А так же это потребно для выполнения стабильности других параметров технологического процесса.

Можно отметить, что состав структуры рабочих позиций оказывает существенное влияние на цикловую производительность технологической системы. Она находится в функциональной зависимости от числа классов подсистем и от количества позиций в каждой подсистеме. Однако при формировании структуры элементов и подсистем поворотного устройства следует учитывать компактность рабочих позиций в технологической зоне. От этого критерия зависит общая производительность всей технологической системы. Поэтому процесс проектирования поворотного устройства следует вести с учетом компактности на базе принципов пространственной ориентации и функциональной ориентации рабочих позиций в вакуумной камере.

Заметим, что на цикловую производительность оказывает существенное влияние длительность полного технологического цикла нанесения покрытий на осевые инструменты. К примеру, для установок типа Булат (Булат – 3, Булат – 6, ННВ 6.6-И1), длительность полного технологического цикла может достигать от одного до двух часов. Общая длительность полного технологического цикла зависит от двух составляющих, а именно основного и вспомогательного времени технологического воздействия [3]. Эти параметры на практике могут быть различны. Это зависит от особенностей оборудования, параметров его эксплуатации и обслуживания.

На рис. 1 представлена зависимость цикловой производительности установки от параметров длительности полного технологического цикла нанесения покрытий. Здесь, на рис. 1,а показана зависимость цикловой производительности от основного времени технологического воздействия для структурного варианта, представленного вариантом

структуры $Str_4 = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^3 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^3 y_i(\eta_{i2}, \eta_{i1})$, для различных значений вспомогательного вре-

мени. На рис. 1,б показана зависимость цикловой производительности от вспомога-

тельного времени технологического воздействия для структурного варианта, представленного вариантом структуры $Str_3 = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^3 y_i(\eta_{i2}, \eta_{i1})$, для различных значений ос-

новного времени. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить зависимость скорости напыления нитрид титанового покрытия на осевой инструмент из быстрорежущей стали от некоторых параметров, а именно: в зависимости от тока дуги I_D для фиксированных значений углов наклона продольных осей изделий; и от угла наклона продольной оси изделия для фиксированных значений тока дуги I_D . Эти данные были получены на установке Булат – 6 со специально модернизированным поворотным устройством [2]. Они дают возможность определять параметры нанесения покрытий от технологических параметров установки.

Для определения влияния скорости напыления покрытия поверхностей осевого инструмента на цикловую производительность установки проведены специальные исследования. Эти исследования выполнялись при следующих параметрах процесса: $v_i = 8$, $t_{o1} = 0$ с, $t_{o2} = 600$ с, $t_{o4} = 900$ с, $t_e = 1500$ с. Они позволили определить зависимость цикловой производительности вакуумной ионно-плазменной установки от скорости напыления покрытия на осевой инструмент для нескольких вариантов толщин покрытий, а также зависимость толщины напыляемого покрытия на осевой инструмент от уг-

ла наклона оси изделия к направлению потока плазмы. Данные исследования выполнены для следующих параметров процесса: $t_{o1} = 0$ с, $t_{o2} = 600$ с, $t_{o4} = 900$ с, $v_k = 0,3 \cdot 10^{-2}$ мкм, $t_{\theta} = 1500$ с, а также при фиксированных параметрах тока дуги.

Выводы. В заключении можно отметить, что выполненные исследования позволили разработать структурно-логические выражения по определению основных параметров производительности в зависимости от структуры технологической системы. А это дает возможность выявлять наиболее рациональные структурные варианты компоновки рабочих позиций в вакуумной камере технологической системы. А также в данной работе исследованы особенности структурных вариантов технологической системы и определено их влияние на параметры производительности. При этом полученные зависимости параметров производительности от особенностей процесса нанесения покрытий на осевой инструмент из быстрорежущей стали позволяют производить направленный поиск структурных вариантов технологической системы для определенных конкретных практических условий нанесения покрытий на различные изделия.

Список литературы: 1. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков, А.А. Марков, Л.В. Лаврова, Н.Ю. Бердышев. – К.: Тэхніка, 1992. – 143 с. 2. Михайлов В.А., Михайлова Е.А. Специальные ионно-плазменные вакуумные покрытия изделий машиностроения // Инженер. Студенческий научно-технический журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2004. №5. С. 12 – 16. 3. Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Михайлова Е.А. Основы формообразования и повышения производительности при напылении вакуумных ионно-плазменных покрытий изделий машиностроения // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. Вип. 29. С. 132-147

СТРУКТУРНОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОАППАРАТУРЫ

Пономаренко А.А. (кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Главной целью развития производственной техники, относящейся ко всем производствам, является повышение важнейшего экономического показателя, который характеризует отношение суммарной отдачи за определенное время использования данной техники к суммарным затратам за то же время. Уменьшение данных затрат возможно за счет максимального развития важнейших характеристик технологических машин, а именно автоматизма и непрерывности.

Обеспечение высоких показателей данных характеристик непосредственно связано с широким внедрением принципиально новых машин, так называемых роторных и роторно-конвейерных машин в которых транспортное движение предметов обработки непрерывно и не ограничивается технологическими факторами. Технологические системы непрерывного действия, выполненные на базе роторных и роторно-конвейерных машин, особенно эффективны при массовом производстве, что относит их в разряд одних из наиболее перспективных форм организации производства изделий, а значит

разработка структурного и технологического обеспечения для данных машин является очень актуальной задачей.

В настоящее время в промышленности широко используются различные элементы гидроаппаратуры, такие как: гидрораспределители, гидроклапаны, гидроцилиндры, гидрозамки (рис. 1).

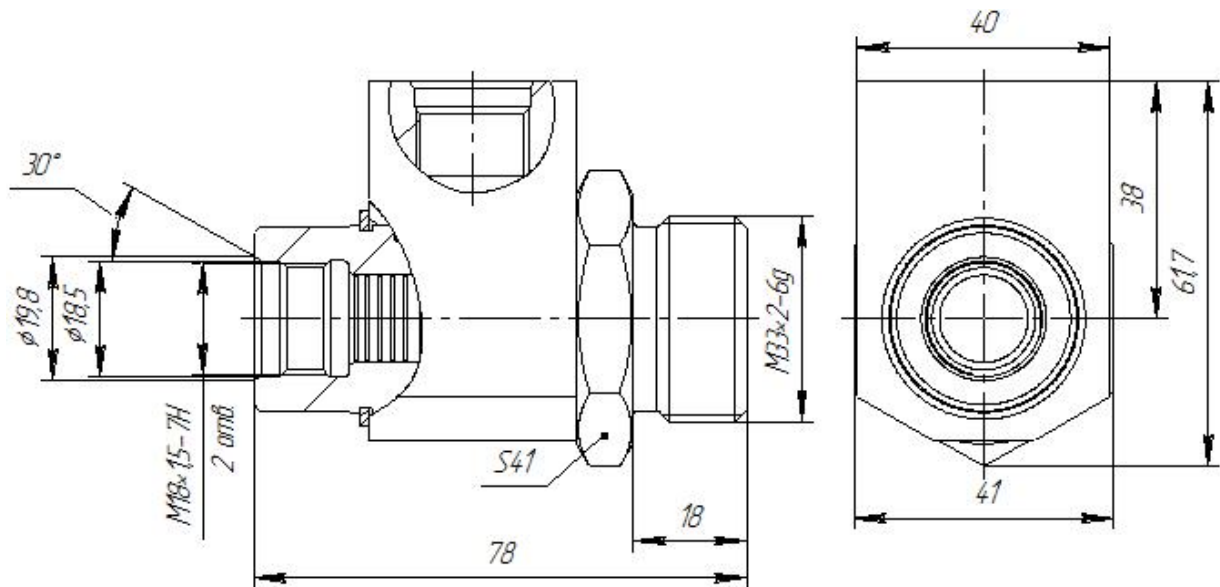


Рис. 1. Гидрозамок ГЗ 8.3-ДА 01 УХЛ1

Эксплуатационными показателями качества рабочих поверхностей, которые определяют эксплуатационные свойства деталей гидравлического оборудования, являются следующие характеристики: характер шероховатости и микропрофиля в зоне контакта; микротвердость; глубина микроуглублений. Эти параметры поверхностного слоя деталей гидроаппаратуры определяют такие эксплуатационные свойства, как момент срабатывания контактирующих поверхностей и ресурс работоспособности (количество срабатываний до отказа – число циклов полного хода в двух направлениях). Для получения этих показателей необходимо обеспечивать равномерность физико-механических свойств поверхностных слоев материала и минимальное искажение геометрии, что может быть достигнуто различными методами отделочной обработки (доводка, полирование, хонингование, суперфиниширование, тонкое точение, растачивание и фрезерование).

Применение данных методов отделочной обработки, а также использование автоматической роторной линии, как средства комплексной автоматизации производства, позволят получить требуемые характеристики поверхности изделий, а также автоматизировать технологический процесс, что сведет время изготовления деталей гидроаппаратуры к минимуму.

Заданный процесс обработки, в зависимости от номенклатуры производства, возможно реализовать с помощью следующих конструктивных схем исполнения рабочих роторов [1]:

- с помощью группы одинаковых блоков рабочего инструмента воздействующего на предметы обработки одного вида (рис. 2)

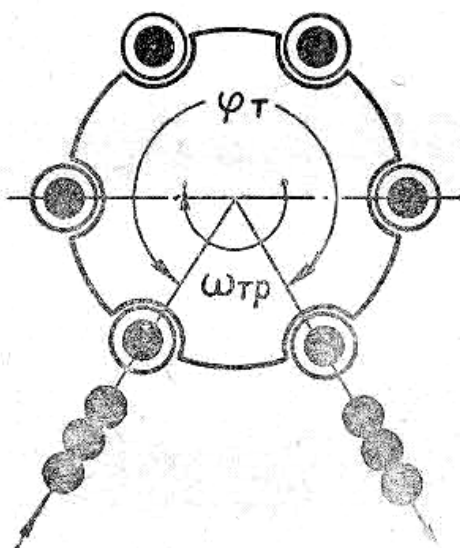


Рис. 2. Схема однопоточных однономенклатурного ротора

- с помощью группы различных блоков рабочего инструмента воздействующего на предметы обработки различных видов (рис. 3)

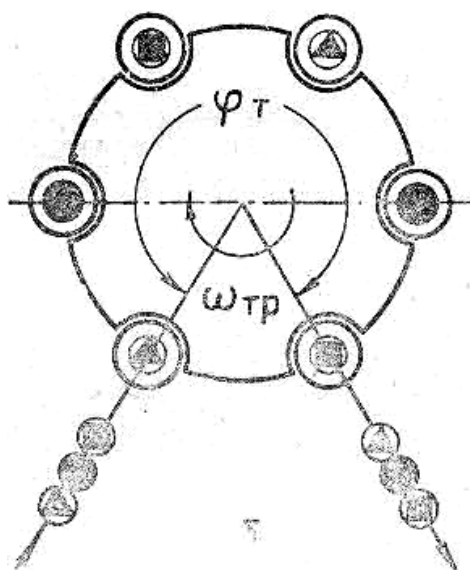


Рис. 3. Схема однопоточного многономенклатурного ротора

Как в первом, так и во втором случае конструктивного оформления рабочих роторов производительность их будет зависит от количества предметов обработки, одновременно находящихся в одном блоке рабочего инструмента. Такие роторные машины называются однопоточными [1].

Также заданный технологический процесс можно реализовать, используя многопоточные роторы (рис. 4)

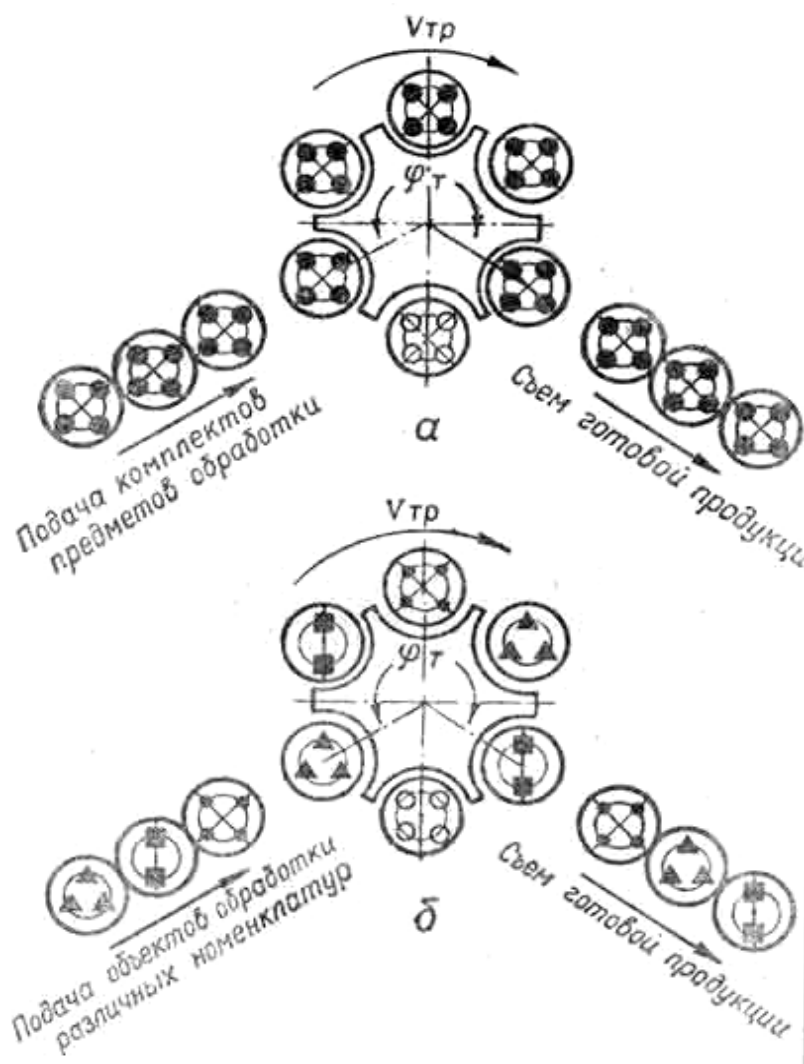


Рис. 4. Схемы многопоточных роторов: а – однономенклатурного, б – многономенклатурного

Рабочие роторы, выполненные по представленным выше схемам, предназначены для одновременной обработки нескольких изделий одного или различных видов. Такие роторы называются многопоточными. В них предметы обработки подаются в один блок рабочего инструмента комплектно, сразу по несколько штук [2, 3].

Инструмент, как правило, монтируется комплектно в предварительно настраиваемых (вне рабочих машин) блоках, сопрягаемых с исполнительными органами ротора преимущественно только осевой связью, что обеспечивает возможность быстрой замены блоков.

Принципиальная схема многономенклатурной автоматической роторной линии для отделочной обработки элементов гидроаппаратуры представлена на рис. 5 [4].

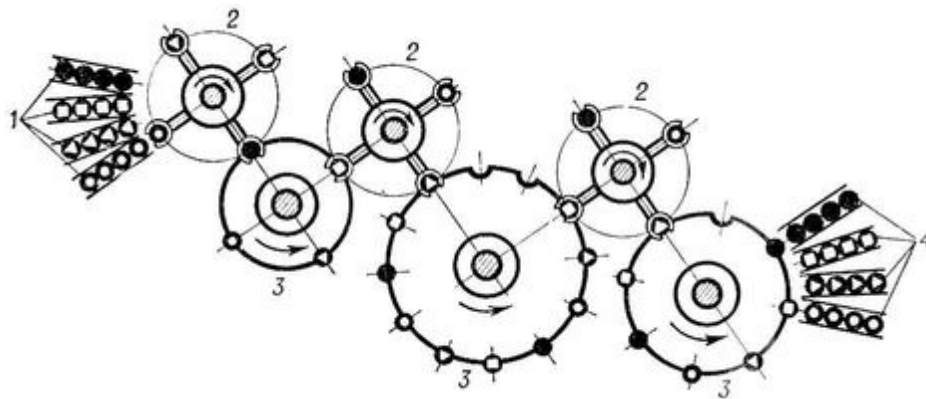


Рис. 5. Принципиальная схема многономенклатурной роторной линии: 1 – питающие устройства; 2 – транспортный ротор; 3 – рабочий ротор; 4 – приемные устройства

Рабочий ротор представляет собой жесткую систему, на которой монтируется группа орудий, равномерно расположенных вокруг общего вращающего систему вала. Необходимые рабочие движения сообщаются этим орудиям исполнительными органами, для малых усилий применяются механические исполнительные органы, для больших — гидравлические (например, штоки гидравлических силовых цилиндров).

Транспортные роторы принимают, транспортируют и передают изделия. Они представляют собой барабаны или диски, оснащенные несущими органами. Чаще применяются простые транспортные роторы, имеющие одинаковую транспортную скорость, общую плоскость транспортирования и одинаковую ориентацию предметов обработки. Для передачи изделий между рабочими роторами с различными шаговыми расстояниями или различным положением предметов обработки предназначены транспортные роторы, которые могут изменять угловую скорость и положение в пространстве

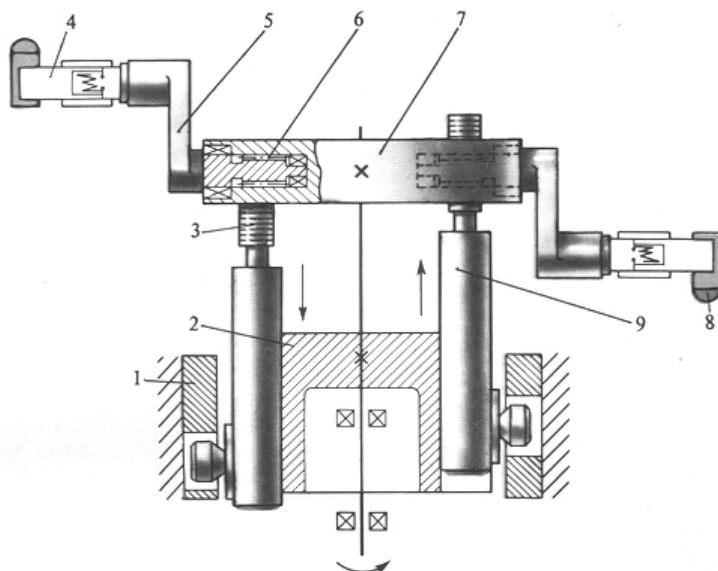


Рис. 6. Транспортный ротор с изменением ориентации предметов обработки и высоты траектории их потока

транспортимых предметов (рис. 6). Рабочие и транспортные роторы соединяются в линии общим синхронным приводом, перемещающим каждый ротор на один шаг за время, соответствующее темпу линии [2, 3].

В роторе, представленном выше захватные органы 5 выполнены в виде кривошипных рычагов, один конец которых снабжен подпружиненными губками 4 для удержания предмета обработки 8, а другой — зубчатым колесом 6. Захватные органы установлены в диске 7, причем их зубчатые колеса сопрягаются с зубчатыми рей-

ками 3, установленными на подвижных ползунах 9. Ползуны размещены в осевых пазах барабана 2, а ролики ползунуов взаимодействуют с неподвижным цилиндрическим пазовым кулачком 1. При вращении ротора ползуны совершают возвратно-поступательные движения, преобразуемые посредством зубчато-речного зацепления во вращательные движения захватных органов. Таким образом, при приеме предмета обработки, например, на более высокой траектории потока плечо захватного органа устанавливается в верхнем положении. При последующем вращении ротора захватный орган повернется и его плечо окажется в нижнем положении, т.е. высота траектории потока изменится, при этом предмет обработки будет повернут на 180° относительно своей поперечной оси, т.е. изменит и свою ориентацию. Если в данной конструкции ротора захватные органы выполнить асимметричными, без кривошипного колена, то такой транспортный ротор будет осуществлять только переориентацию предметов обработки без изменения высоты траектории их потока [6,7].

Проектирование роторных линий для отделочной обработки элементов гидроаппаратуры на основе приведенных принципиальных схем, а также внедрение их в производство дает возможность во много раз повысить технико-экономические показатели: увеличить производительность, уменьшить себестоимость. Становится возможным реализовать комплексную автоматизацию производства, что позволит сэкономить материальные и человеческие ресурсы. Очень перспективным является дальнейшее изучение данных систем, а также их практическая их реализация.

Список литературы: 1. Клусов И.А. Проектирование роторных машин и линий: Учеб. пособие для студентов машиностроит. спец. вузов - М.: Машиностроение, 1990 - 320 с. 2. Кошкин Л.Н. Роторные и роторно-конвейерные линии - М.: Машиностроение, 1982 - 236 с. 3. Прейс В.В. Технологические роторные машины вчера, сегодня, завтра - М.: Машиностроение, 1986 - 128 с. 4. Клусов И.А. и др. Автоматизация сборочных процессов на роторных линиях - Киев, 1967 - 408 с. 5. Кошкин Л.Н. Комплексная автоматизация производства на базе роторных линий - М.: Машиностроение, 1972 - 258 с. 6. Клусов И.А. и др. Автоматические роторные линии - М.: Машиностроение, 1987 - 256 с. 7. Кошкин Л.Н. Автоматические линии роторного типа: Конструкции, расчёт и проектирование/ А.Н. Кошкин, И.А. Клуcов, В.В. Прейс - Тула, ЦБТИ, 1961 - 198 с. 8. Михайлов А. Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем. - Донецк: ДонНТУ, 2002. - 379 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА АВТОМОБИЛЯ

Полуянович Н.К., Соловьёв М.А. (кафедра ЭиМ ТТИ ЮФУ, г. Таганрог, Россия)

Кондиционирование обеспечивает автоматическое поддержание необходимых кондиций воздушной среды в салоне автомобиля. Кондиция воздуха включает в себя следующие параметры: температуру, влажность, скорость движения, чистоту, содержание запахов, давление, газовый состав и ионный состав. При проектировании в зависимости от назначения выбирают требуемые кондиции воздушной среды, наиболее важные для конкретных условий их применения [1].

Кондиционирование воздуха обеспечивается применением специальных систем [1]. Под термином системы кондиционирования воздуха (СКВ) подразумевается ком-

плекс устройств, предназначенных для создания и автоматического поддержания в салоне автомобиля величин параметров воздушной среды.

Проектируемые автомобильные СКВ являются комфортными, они должны обеспечить наиболее благоприятные условия для водителя и пассажиров. Работоспособность и самочувствие человека в значительной мере определяются тепловым балансом его организма и наиболее оптимальны в условиях окружающей воздушной среды на уровне теплового комфорта.

Выбор программы и разработка алгоритма. Важной задачей проектирования является исследование процесса охлаждения (нагрева) салона автомобиля и влияния происходящих процессов на человека, в работе, была использовано программа STAR-CCM+, рис.1.

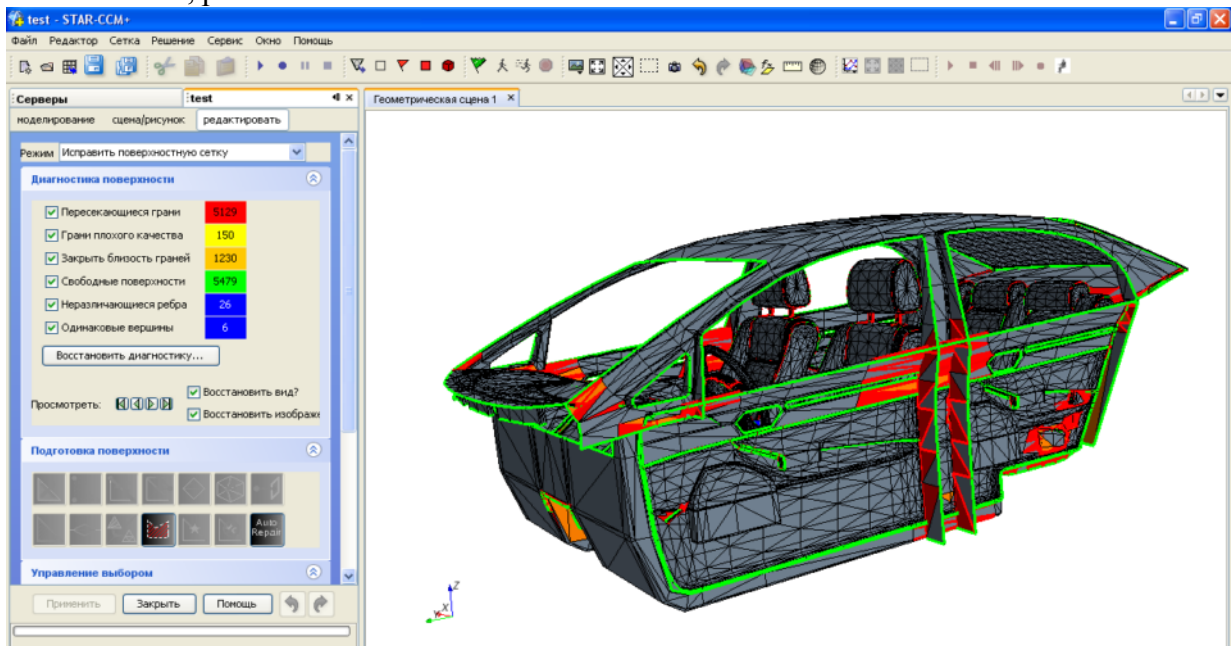


Рис.1. Демонстрация пересечений свободных граней

Комплекс предназначен для решения задач механики сплошных сред и обеспечивает небывалую точность, надежность и гибкость при решении задач вычислительной механики сплошных сред.

В качестве исходного материала была использована высокополигональная трехмерная модель HondaCivic созданная в 3D StudioMax, которая в процессе была доработана до требований программы моделирования. 3D модель имела исходный тип файлов *.max для импортирования в программу STAR-CCM+, была конвертирована в тип поверхностной сетки *.stl. Модель для расчета имеет вид рис.1. Для выбора физической модели процессов, которые будут происходить в салоне автомобиля задаются начальные условия для области и границ (рис.1).

В программе STAR-CCM+ области и границы имеют свои свойства в зависимости от того какой способ начальных параметров задан[2].

Используемые уравнения. Для моделирования движения воздуха используем уравнение Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\nabla \cdot) \vec{V} = - \frac{1}{\rho} \Delta P + (\nu_m + \nu_t) \Delta \vec{V} - \vec{g} \quad (1)$$

где \vec{V} – вектор скоростей; P – давление; t – время; $\nu_{\text{м}}$ – молярная вязкость; ν_t – турбулентная вязкость; ρ – плотность воздуха; \vec{g} – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения воздуха.

Алгоритм работы система автоматического кондиционирования. Степень открытия заслонки воздушного смесителя устанавливается по заданным характеристикам. По ним определяется степень открытия, соответствующая вычисленной температуре воздуха на выпуске, рис.2. Регулирование температуры воздуха (от холодного до теплого) обеспечивается изменением состава смеси из охлажденного и нагретого потоков воздуха.

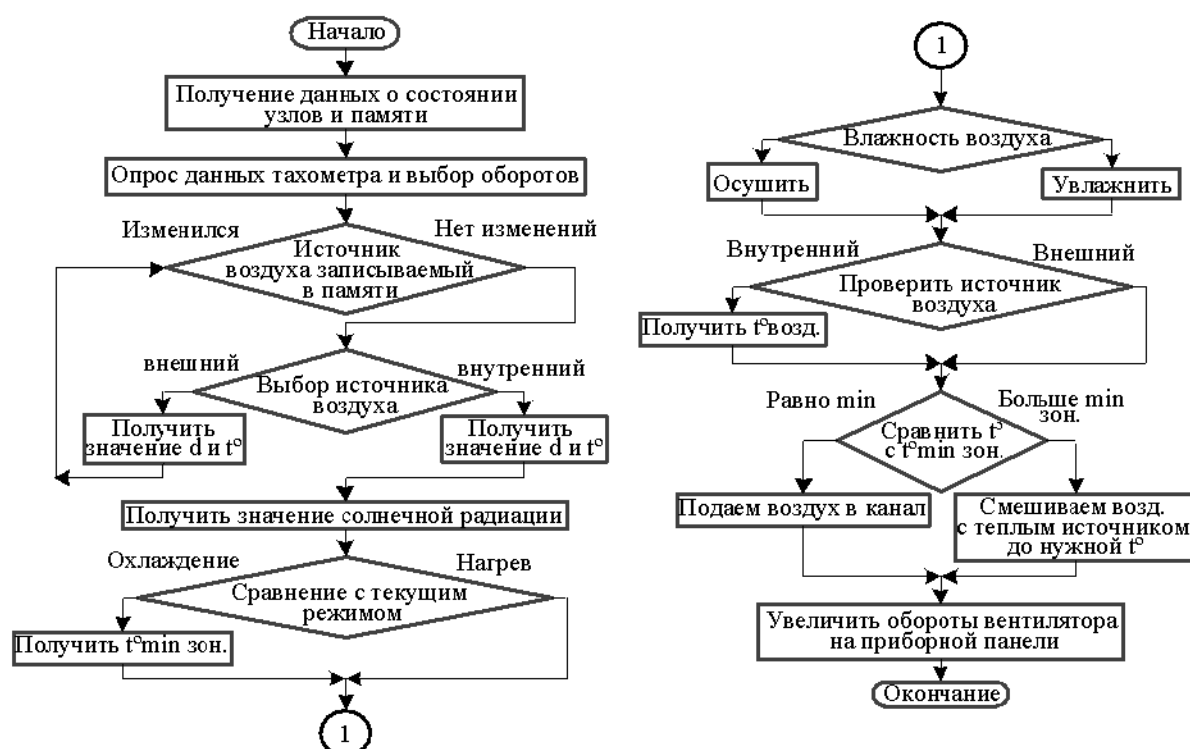


Рис.2. Алгоритм управления климат - контролем автомобиля

Положение заслонки воздушного смесителя плавно регулируется от полностью открытого состояния до полностью закрытого мембраной сервомеханизма, приводимой в действие разрежением. Сервомеханизм связан с потенциометром, сигнал которого пропорционален степени открытия заслонки. В результате образуется сигнал обратной связи, позволяющий сделать близкими реальную и вычисленную степени открытия заслонки рис.2. Спроектирована система управления системой кондиционирования воздуха автомобиля, структурная схема которой представлена на рис.3. Создана программа реализующая описанный алгоритм, рис.2.

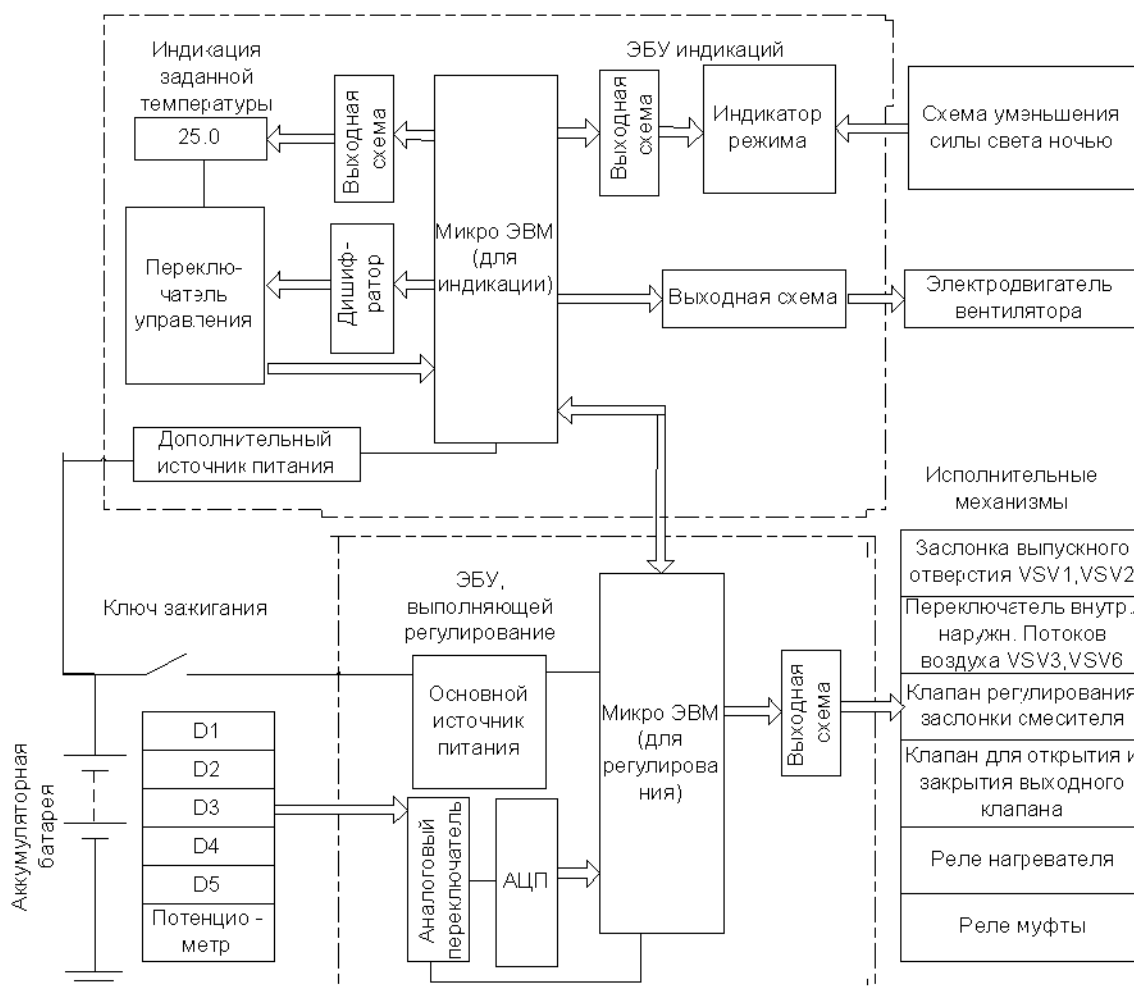


Рис.3. Структура ЭБУ автоматического кондиционирования

Заключение. Спроектирована СУ системой кондиционирования воздуха автомобиля. Разработан алгоритм решения уравнений модели. Создана программа реализующая описанный алгоритм. Предложена модель, описывающая движение воздуха в салоне автомобиля, учитывающая влияние тепла на движение потоков воздуха.

Список литературы: 1. Ясинский Ф.Н., Кокорин А.С. Математическое моделирование процессов вентиляции и отопления в больших производственных, культурных и спортивных помещениях. - Вестник ИГЭУ, вып. 3, 2010. 2. Аверкова О.А. Вычислительный эксперимент в аэродинамике вентиляции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011, 110 с. 3. Числительные методы и параллельные вычисления для задач механики, газа и плазмы: Учеб. Пособие/Э.Ф. Балаев, Н.В. Нуждин, В.В. Пекунов и др.; ИГЭУ – 2003

ПЛАСТМАССОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Попов А.С., Рыбинская Т.А. (кафедра механики, ТИ ЮФУ, г. Таганрог, Россия)

Пластмассовый двигатель. Еще не реальность, уже не фантастика.

В 1984 году, желающих понаблюдать за одним из этапов гоночной серии IMSA Camel GT, собралось необычайно много. Их интерес объяснялся не столько спортивным азартом, сколько самым обычным человеческим любопытством. Широкой публике стало известно, что мотор одного из участников заезда – белого Polimotor Lola T616, почти полностью выполнен из пластика. Рационализации подвергся обычный мотор Cosworth BDA, после чего он стал весить 76 кг, вместо 150.

Болид с пластиковым мотором участвовал в шести гонках в 1984 и 1985 годах. И только однажды, из-за отказа шатунов, команду постигла серьезная неудача.

За судьбу необычного болида, как никто, болел Матти Хольцберг. По-другому и не могло быть. Ведь именно он был тем человеком, который разработал и воплотил в жизнь пластиковый мотор.

Как всё началось.

Матти Хольцберг был хозяином автомастерской. Из титана и магниевых сплавов изготавливал различные детали для заряженных гоночных агрегатов, что приносило ему неплохой и стабильный доход. Наличие конкурентов подталкивало Хольцберга на поиски новых решений. В 1969 году, в одном из научных журналов, он прочел статью, рассказывающую о полиамид-имидной смоле Torlon (торлон) (рис. 1). Это материал, который весит почти в два раза меньше титана, был создан учеными корпорации Amoco Chemicals. Торлон имеет необычайно высокую твердость и способен выдерживать просто фантастические для пластика температуры.

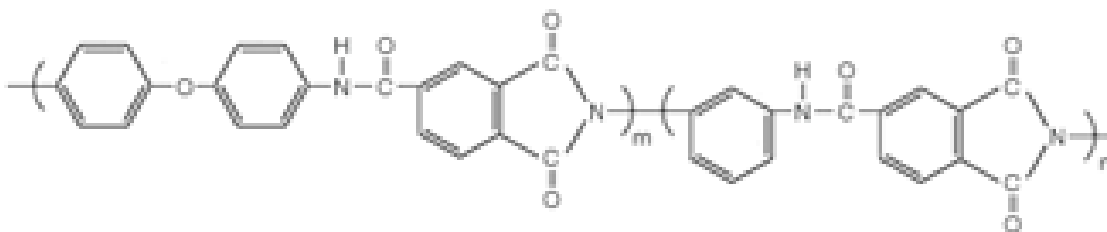


Рис. 1. Строение молекулы торлона

В скором времени Матти Хольцберг сделал из торлона поршень для двигателя Austin Mini. Работа мотора была безукоризненной в течение 20 минут. Позже выяснилось, что поршень разрушился из-за чрезмерного нагревания его верхней части. Поэтому на поршень была изготовлена тонкая коронка из алюминия. В результате, поршень из торлона ни в чем не уступал стальному. Новый эксперимент с торлоновым шатуном порадовал Хольцберга еще больше: предельные обороты двигателя (рис. 2) поднялись с 5 до 7 тысяч, а уровень максимальной мощности вырос почти втрое! Такие успехи вдохновили Хольцберга, и он приступил к изготовлению штанг толкателей клапанов, тарелок клапанных пружин и самих пружин. Испытанный на стенде мотор превзошел все ожидания: время его работы составило 600 часов, по сравнению с 300 часами работы традиционного двигателя.

Поскольку метод традиционной обработки заготовок оказался неподходящим в случае с пластиком, Хольцберг разработал новый метод точного отливания готовых изделий. Будучи непрофессионалом, в домашних условиях, он добился полного

удаления из отливки микроскопических воздушных пузырьков, а также нужной ему ориентации армирующих волокон внутри заливки. Для получения такого же результата на стальных деталях, нужно было прибегнуть к сложной закалке.

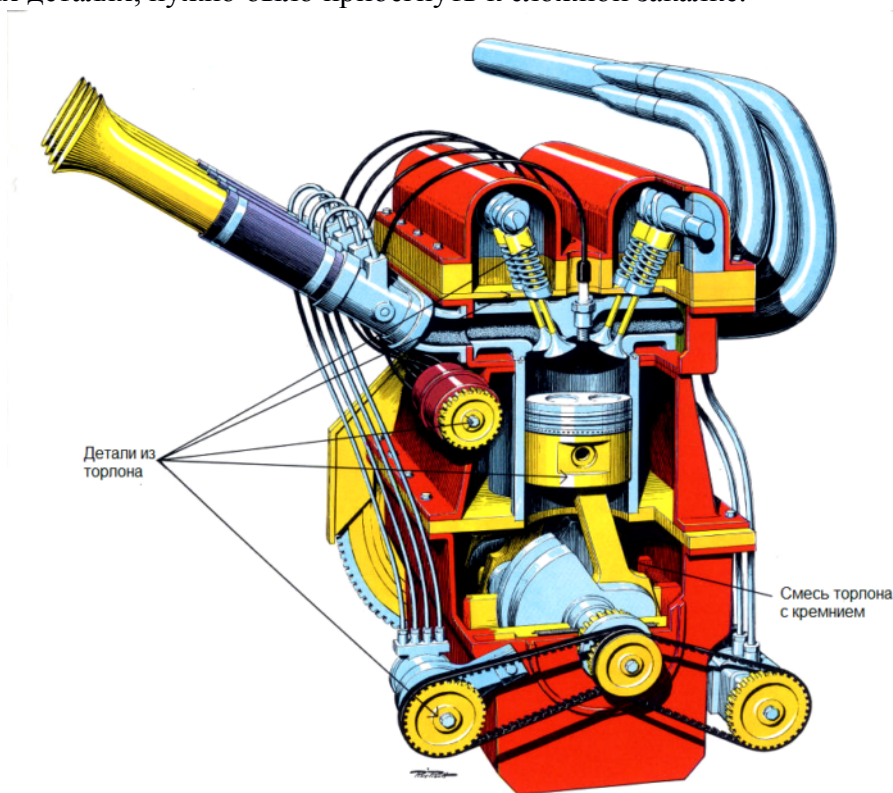


Рис. 2. Двигатель с торлоновыми деталями

Сотрудничество с Ford: новые горизонты.

В 1979 корпорация Ford заключила контракт с Матти Хольцбергом. Специально для Хольцберга была создана компания Polimotor Research, в штат которой вошли 8 инженеров. Группу разработчиков, возглавляемую Матти Хольцбергом, обеспечили всем необходимым для работы: материалами, аппаратурой, технической документацией и чертежами. Согласно контракту, Матти и его группе нужно было за год создать пластиковый прототип-модель четырехцилиндрового мотора Ford Pinto 2.3. Через 4 месяца группа разработчиков заказанную пластиковую модель. В сводной таблице значилось: 69 кг массы против 188 кг стального двигателя, 318 л.с против 88 у стального, 9200 об/мин (максимальное значение 14 тыс.) против 5500 стального.

В прототипе мотора, представленного Хольцбергом и его группой, стальными пока так и остались: коленвал, распредвал, коронки поршней, инжекторы, гильзы цилиндров и клапанные пружины. Новый двигатель, кроме уже перечисленных преимуществ, отличался и поразительно тихим звучанием. Испытания на стенде подтвердили и высокую прочность всей пластиковой конструкции.

Вскоре по распоряжению высшего менеджмента Ford Motor Company проект был закрыт, а его финансирование полностью прекращено.

Сейчас современный автомобиль содержит примерно 150 кг пластика. Но все основные элементы конструкции все равно производятся из металла: двигатель, трансмиссия, ходовая часть. Объясняется это довольно просто: нагрузка и жесткие

температурные условия накладывают повышенные требования к прочности материалов. Но потенциал пластмассового двигателя огромен.

Применение пластмасс в автомобилестроении

Из миллиона тонн пластмасс, используемых ежегодно европейскими конструкторами в автомобилестроении, 15% идет на детали, расположенные под крышкой моторного отсека, где тепло, механические нагрузки и химические воздействия создают особо тяжелые условия работы. Несмотря на то, что здесь опыт использования пластмасс у конструкторов ограничен по сравнению с опытом использования металлов, в некоторых частях, например, в системе охлаждения, пластик утвердился прочно. На более чем 80% европейских автомобилей устанавливаются бачки радиатора из нейлона, армированного стекловолокном.

Кроме того, при такой конкуренции в снижении затрат, как в автомобилестроении, возможность соединять секцию радиатора с бачком только давлением, не прибегая к алюминиевой спайке, представляет бесспорное преимущество. Вентиляторы радиатора обычно изготавливают из термореактивных полимеров, потому, что они весят меньше, чем вентиляторы из алюминия. Кроме того, они делаются за одну операцию штамповки, после чего их не надо балансировать и подвергать механической обработке, а в настоящее время корпуса насоса, внутренние детали и суппорт термостата также делаются из армированных фенопластов. Таким образом, после штамповки получаются готовые детали, которые не требуется просверливать механически и на которые не действуют охлаждающие жидкости. Воздуховоды, полученные одной операцией штамповки из фенопластов, весят меньше литых деталей из алюминия, имеют очень гладкие внутренние поверхности и, следовательно, увеличивают поток воздуха, лучше работают и более экономичны.

В целом, преимущества термореактопласта можно сформулировать так:

- высокая химическая устойчивость, особенно к бензинам, маслам, воде и гликолю, соленой воде;
- низкая водопоглощаемость;
- высокая поверхностная твердость;
- низкая плотность (1.4-2.1 кг/дм³);
- очень низкий коэффициент линейного термического расширения (15-35 х 10⁻⁶ V⁰C);
- превосходная пространственная стабильность;
- очень высокое сопротивление сжатию (200-300 МПа);
- высокий модуль сопротивления изгибу (10.000-20.000 МПа) даже при температурах выше 200° C.

Недостатки пластмассового двигателя:

- дороговизна производства;
- трудность при серийном производстве;
- не поддается традиционной обработке.

Таким образом, на сегодняшний день торлон является самым твердым термореактивным пластиком в мире, обладающим при этом беспрецедентной термоустойчивостью: торлоновые детали могут работать без потери свойств при температурах до 290°С. Торлон легкий и имеет низкий коэффициент трения. Он негорюч и отлично противостоит воздействию многих агрессивных химических веществ. Имеет высокую размерную стабильность, рекомендуется для точного литья. В промышленности применяется более 20 рецептов композитов на основе торлона. Конечно, использование торлона в автомобилестроении делает очень трудным

серийный выпуск автомобилей с двигателем из полиамид-имида. Но, он находит широкое применение для гоночных автомобилей, в производстве деталей электродвигателей, теплостойких деталей автомобилей, в сепараторах подшипников, уплотнении, из торлона делают качественное оборудование для нефтяной и газовой промышленности, в авиационной и космической технике, в тяжёлом машиностроении и энергетике (лопатки вращающегося компрессора), а также для производства оправки для металлических банок, гнезда и панели для печатных плат, подставка для приваривания на стаканчиках.

Список литературы: 1. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя. – Л.: Приборостроение, 1979. 2. Хачиян А.С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. – М.: Транспорт, 1985. 3. <http://avtosweet.ru/2011/03/plastmassovyj-dvigatel/>

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Пугачёв А.Д. (ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

1. Цитратный метод (метод Туркевича)

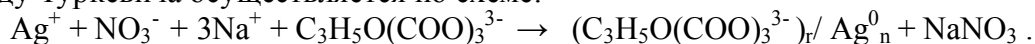
Впервые цитратный метод Туркевич с коллегами применил в 1951 г. для получения наночастиц (НЧ) золота [1]. Суть метода в восстановлении золотохлороводородной кислоты в водном растворе цитратом натрия при кипячении. По данным электронной микроскопии полученные НЧ имели сферическую форму, узкое распределение по размерам и средний диаметр 18.5-21.5 нм. В дальнейшем П.С. Ли и Д. Мейзель применили метод Туркевича для синтеза НЧ серебра [2]. В отличие от НЧ золота частицы серебра характеризовались широким распределением по размерам (60-200 нм) [3].

В цитратном методе растворителем, как правило, является вода [4], реже водно-органические среды [5]. Лимонная кислота и ее анион (цитрат-анион) в методе Туркевича выступают не только в роли восстановителя, но также стабилизирующим агентом, что осложняет экспериментальный подбор оптимальных концентраций реагентов (их изменение влияет одновременно на скорость восстановления и на скорость формирования коллоидных частиц [3]). Поэтому для получения золей серебра с узким и воспроизводимым распределением НЧ по размерам требуются дополнительные исследования.

Подобные золи находят применение в метрологии наночастиц для приготовления стандартных образцов, производство которых в России ограничено, а поставки импортных препаратов не покрывают потребностей отечественных нанопроизводителей и экономически не всегда обоснованы. Проблема актуальна для стандартных препаратов наносеребра с размерами частиц менее 20 нм, число которых на мировом рынке исчисляется единицами, а стабильность и воспроизводимость размеров оставляет желать лучшего.

Целью проведенных исследований ставилась отработка методики синтеза, подбор и оптимизация условий для получения стабильных коллоидных растворов с узким распределением НЧ серебра по размеру – от 1 до 100 нм.

В водных растворах синтез НЧ серебра из нитрата серебра и цитрата натрия по методу Туркевича осуществляется по схеме:



Формирование коллоидных частиц серебра и их агломератов показано на рис. 1.

Поскольку скорость химической реакции зависит в общем случае от концентраций реагирующих веществ и температуры, размер получающихся в методе Туркевича НЧ зависит от величин и соотношения концентраций реагентов, температурных условий синтеза, интенсивности и времени перемешивания, других факторов.

Ключевым результатом проведенной работы является: разработка методики получения раствора НЧ серебра цитратным методом с унимодальным распределением частиц диапазоне до 100-150 нм, что в дальнейшем позволит адаптировать данный метод для приготовления калибровочных растворов.

Типовая методика заключалась в том, что 25 мл раствора AgNO_3 и 100 мл раствора $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ нагревались до нужной температуры. Горячие растворы смешивались прикапыванием нитрата серебра к лимоннокислому натрию при непрерывном перемешивании, с последующим кипячением в течение 15 минут и охлаждением. В результате получался золь для последующего анализа. В ходе реакции раствор приобретал светло-желтый цвет, затем цвет менялся от оливкового до грязно-серого или коричневого, а при высоких концентрациях растворов наблюдалось интенсивное оседание частиц на стеклянной поверхности стакана, а жидкость становилась прозрачной.

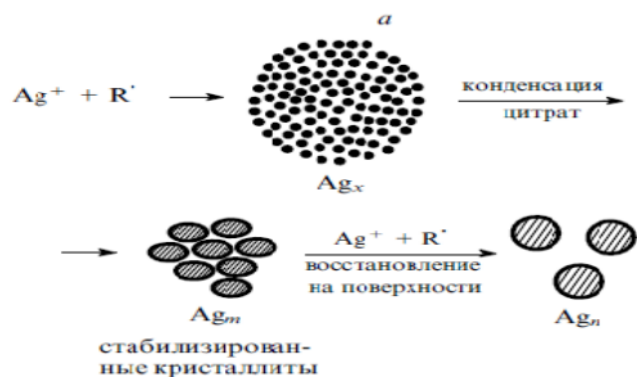


Рис.1. Принципиальная схема эволюции ионов Ag^+ в кластеры Ag_m и наночастицы Ag_n

При соотношении компонентов $[\text{AgNO}_3]/[\text{Cit}]=1/4$ раствор начинал желтеть после 10 минут нагревания; «серебряного зеркала» почти не наблюдалось.

Результаты седиментационного анализа полученного образца (рис. 2, а) свидетельствуют о том, что средний размер НЧ уменьшается на 25 % с 40 до 30 нм при уменьшении концентраций исходных растворов на порядок. Результаты спектрофотометрии подтверждают результаты седиментационного анализа (рис. 2, б): поглощение с $\lambda_{\text{max}} = 420$ нм соответствует НЧ серебра с размерами около 30 нм (см. рис 3).

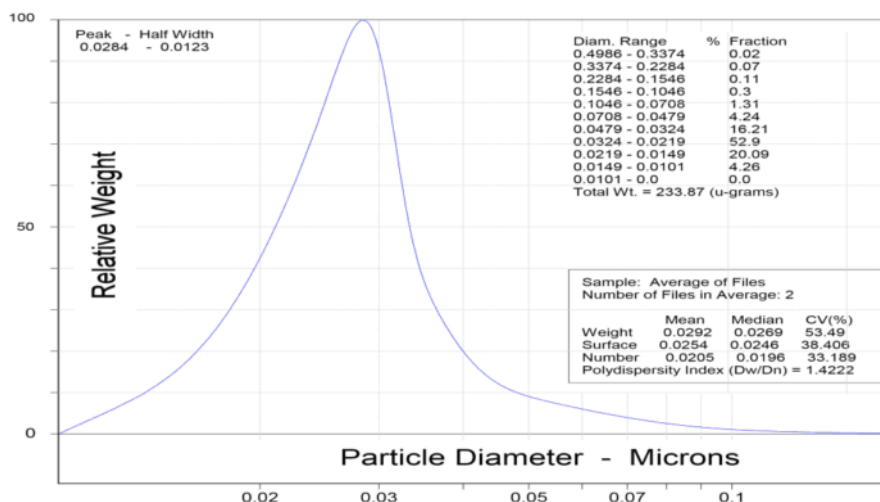


Рис. 2, а. Результаты седиментационного анализа образца с соотношением концентраций $[\text{AgNO}_3]/[\text{Cit}]=1/4$. На графике представлено распределение НЧ по массе в зависимости от размеров. Большинство частиц имеют размер 28 нм

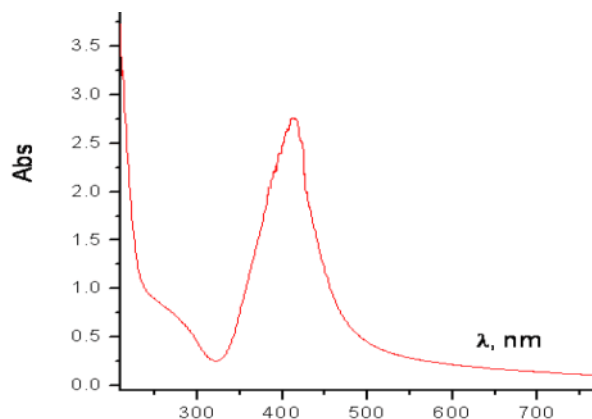


Рис. 2, б. Результаты спектрофотометрии образца с соотношением концентраций $[AgNO_3]/[Cit]=1/4$. Пик поглощения $\lambda = 420$ нм

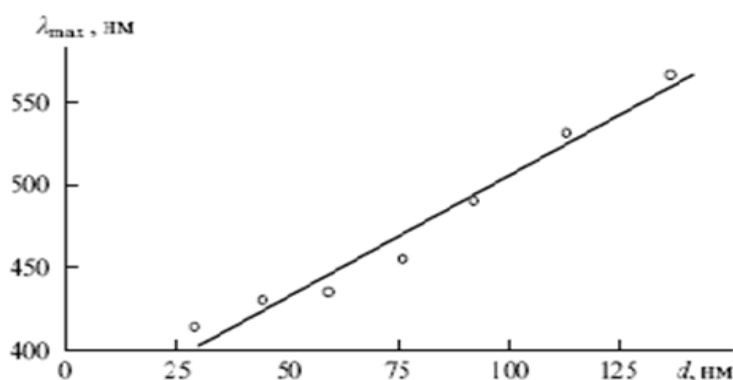


Рис. 3. Зависимость максимума полосы поглощения от диаметра частиц серебра

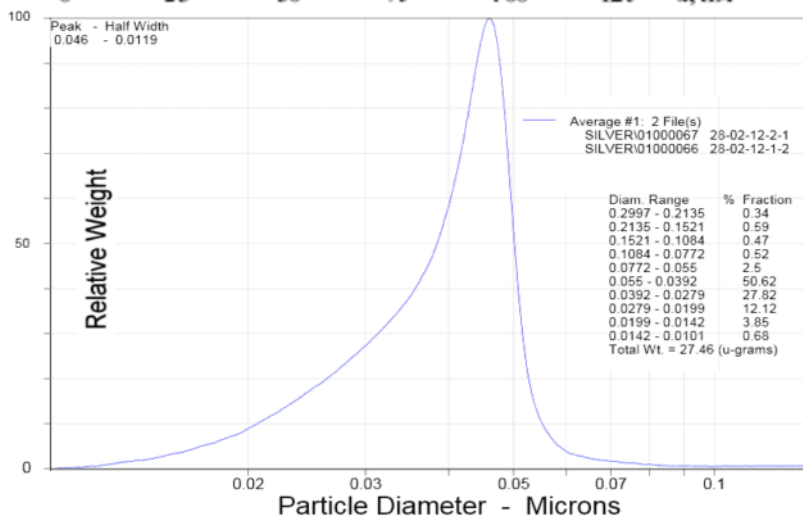


Рис. 4. Результаты седиментационного образца с соотношением концентраций $[AgNO_3]/[Cit]=1/5$. Видно, что частицы распределены равномерно в диапазоне от 1 до 100 нм. Пик составляет примерно 46 нм

Ключевым результатом проведенной работы является разработка методики получения раствора НЧ серебра цитратным методом с равномерным распределением частиц диапазоне до 100-150 нм, что в дальнейшем позволит адаптировать данный метод для приготовления калибровочных растворов.

Также стоит отметить, что себестоимость данного образца достаточно низкая (примерно 1 руб. за 75 мл), что обеспечивает его конкурентоспособность. Для сравнения, 300 мл калибровочного раствора на основе ПВХ от импортного производителя стоит порядка 1000 USD.

2. Боргидридный метод

Синтез НЧ боргидридным методом проводился как в водной среде, так и водно-органической (этанол – вода). Суть метода в водной среде заключалась в следующем: к охлажденному ($t \approx 0^\circ\text{C}$) раствору NaBH_4 при интенсивном перемешивании по каплям добавлялся раствор AgNO_3 ($[\text{NaBH}_4]/[\text{AgNO}_3] = 6/1$). Далее посредством седиментационного анализа определялась зависимость распределения частиц по размерам от их массы. Такую методику также реально адаптировать для получения стандартных образцов, т.к. при добавлении одной капли раствора эмульгатора 3646/51 (1 моль эмульгатора на 10 молей воды) полученная золь проявляла стабильность на протяжении нескольких недель. Результаты седиментационного анализа одного из образцов, полученных таким методом, приведены на рис. 5.

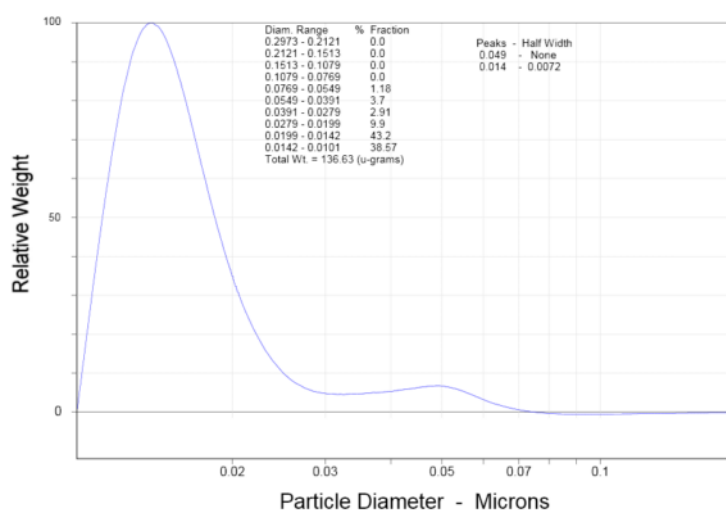


Рис. 5. Результаты седиментационного анализа золи серебра, полученного боргидридным методом в водной среде ($[\text{NaBH}_4]/[\text{AgNO}_3]=6/1$). Большинство частиц имеют размеры 6-14 нм, также присутствуют частицы с размерами около 40-50 нм.

Синтез в водно-органической среде проводился похожим образом. Отличие заключалось лишь в том, что NaBH_4 был растворен в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, а отношение концентраций составило $[\text{NaBH}_4]/[\text{AgNO}_3] = 10/1$. Результаты седиментационного анализа образца, полученного таким методом, приведены на рис. 6.

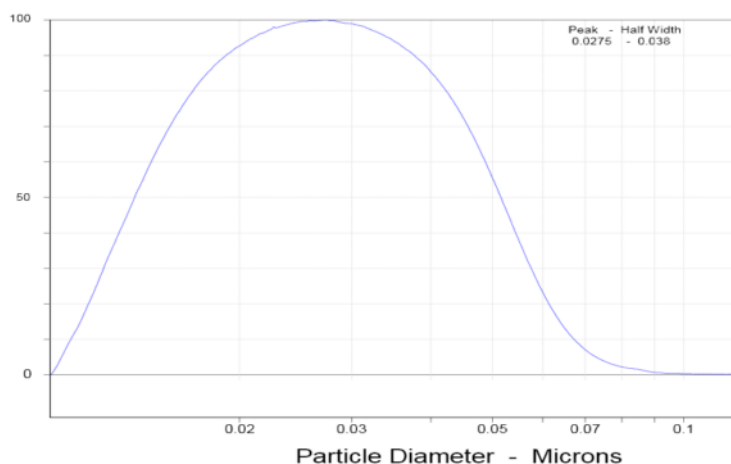


Рис.6. Результаты седиментационного анализа образца, полученного синтезом в водно-органической среде. Частицы равномерно распределены по массе в диапазоне от 1 до 100 нм.

Золи, синтезированные таким методом, имеют применение в разработке новых химических носителей информации, где НЧ серебра могут служить носителей фотохромных молекул, например, спиропиранов – фотохромных переключателей [7].

Список литературы: 1. J. Turkevic, P.C. Stevenson, J. Hiller. Discuss. Faraday Soc., (11), 55 (1951). 2. P.C. Lee, D. Meisel, J. Phys. Chem., 86, 3391 (1982). 3. Ю.А. Крютяков, А.А. Кудринский, А.Ю. Оленин, Г.В. Лисичкин «Синтез и свойства НЧ серебра: достижения и перспективы», Хим. Фак МГУ, 2008. 4. R.Jin, Y.W.Cao, C.A. Mirkin, K.L. Kelly, G.S. Schatz, J.G. Zheng, Science, 294, 1901 (2001). 5. I. Pastoriza-Santos, Luis M. Liz-Marzan, Reduction of silver nanoparticles in DMF. Formation of monolayers and stable colloids / Pure Appl. Chem. (2000). 72, 83–90. 6. Г.Б. Сергеев Нанохимия. М.: 2006 г. 7. Б.С. Лукьянов, Н.А. Волошин, А.В. Метелица и др. Фотохромизм спиропиранов на поверхности раздела фаз // Межд. конф. по новым технологиям и приложениям современных физико-химических методов. Ростов-на-Дону, 2001. С. 42-43.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Соловьёв С.Ю., Медведев В.В. (кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

В настоящее время в тяжелых условиях производства, таких как угольная и химическая промышленность, где приходится работать во взрывоопасных условиях для обеспечения безопасности производства необходимо создание взрывозащищенного оборудования, основным критерием которого являются повышенные требования к качеству обработки фланцев корпусов, в особенности – к их плоскостности. Наиболее целесообразным видом обработки в данном случае является фрезерование, в процессе которого возникает ряд факторов отрицательно влияющих на качество обрабатываемой поверхности.

Поэтому, целью данной работы стало рассмотрение и анализ факторов, влияющих на погрешности поверхностей при обработке фрезерованием и возможные методы их минимизации.

В работе рассмотрены следующие показатели погрешностей обработки при фрезеровании:

1. Точность размеров, т. е. соответствием фактических размеров детали размерам, указанным на чертеже.
2. Допустимые отклонения от правильной геометрической формы полученной поверхности (плоскостность, прямолинейность).
3. Отклонением расположения отдельных граней поверхности детали относительно других поверхностей (параллельность, перпендикулярность, отклонение от требуемого угла между плоскостями, симметричность и др.) [1].

Однако при достижении требуемых показателей точности возникают погрешности, обусловленные рядом факторов. В таблице 1 приведены факторы, влияющие на точность поверхности, их причины, проявления и методы борьбы с ними.

**ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

Таблица 1. Причины, влияющие на погрешность фрезерной обработки

Причина	Проявление на изделии	Методы борьбы
Погрешности станка		
Неточность изготовления деталей станка	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение взаимного расположения поверхностей	Грамотное техническое обслуживание станка, адаптивное управление станком
Износ элементов станка	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение взаимного расположения поверхностей	Проведение планово-предупредительных осмотров и ремонта оборудования, наладка оборудования
Неточности приспособления		
Неточность изготовления элементов приспособления	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение взаимного расположения поверхностей	Создание рациональных схем базирования, наладка приспособления
Износ элементов приспособления	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение взаимного расположения поверхностей	Проведение планово-предупредительных осмотров и ремонта приспособления, возможно, его замена, подналадка схемы обработки
Неточность установки приспособления на станок	Неточность размеров, отклонение взаимного расположения поверхностей	Наладка оборудования
Погрешности инструмента		
Неточность изготовления	Неточность размеров, отклонение взаимного расположения поверхностей	Наладка оборудования, применение более точного инструмента
Износ инструмента	Неточность размеров, отклонение взаимного расположения поверхностей	Переточка инструмента, переналадка оборудования, замена инструмента
Погрешность установки	Неточность размеров, отклонение взаимного расположения поверхностей	Наладка оборудования
Жесткость технологической системы		
Жесткость станка	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение взаимного расположения поверхностей	Затяжка клиньев всех направляющих, выборка люфтов и стопорение элементов стола, не участвующих в рабочей подаче
Жесткость приспособления	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение	Изменение конструкции приспособления, изменение схемы установки

**ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

Причина	Проявление на изделии	Методы борьбы
	взаимного расположения поверхностей	
Жесткость инструмента	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы	Подбор жесткого инструмента, применение дополнительного приспособления, корректировка режимов резания
Жесткость детали	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение взаимного расположения поверхностей	Применение дополнительного (другого) приспособления, конструктивная доработка детали, применение специальных методов обработки
Вибрации технологической системы	Неровности поверхности (шероховатость), волнистость поверхности	Повышение жесткости технологической системы, применение различных средств гашения вибраций, применение СОТС
Тепловые деформации элементов технологической системы		
Нагрев инструмента	Неточность размеров	Применение СОТС, корректировка режимов резания
Нагрев оборудования	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение взаимного расположения поверхностей	Поддержание постоянной температуры и влажности воздуха помещения, соблюдение правил эксплуатации оборудования
Неточности заготовки		
Неточность установки заготовки в приспособление	Неточность размеров, отклонение от правильной геометрической формы, отклонение взаимного расположения поверхностей	Наладка приспособления, применение разметочных операций, применение электронных щупов при станке
Нестабильность глубины резания	Перенос формы заготовки на форму детали (технологическая наследственность)	Увеличение жесткости технологической системы, корректировка режимов резания
Наличие остаточных напряжений в заготовке	Нарушение формы заготовки (коробление, изогнутость), появление трещин	Корректировка технологического процесса, ввод операций снятия остаточных напряжений

Следовательно, точность изделий при обработке фрезерованием зависит от многих факторов, от которых невозможно полностью избавиться. Так, нельзя избавиться от неточности изготовления деталей станка и приспособления ввиду того, что даже при самом тщательном их изготовлении существуют погрешности размеров в пределах по-

лей допусков. Также невозможно избежать и износа элементов станка, оборудования, инструмента, полностью учесть тепловые деформации и избавиться от вибраций.

Таким образом, для предотвращения брака особое внимание следует уделить контролю качества обработки поверхностей. В настоящее время существует достаточное количество способов контроля, отличающихся применимостью в различных типах производства, своей точностью и универсальностью. Особую актуальность имеют научные разработки, связанные с диагностикой качества изделий в гибком автоматизированном производстве, где важными требованиями является отсутствие человека, достаточно высокая степень точности и универсальность измерения.

Вывод. Из всего вышесказанного следует, что параллельно с ростом требований, предъявляемым к качеству изготавливаемой продукции необходимо совершенствование всех элементов входящих в технологическую систему обработки изделия, непосредственно самого технологического процесса и различных дополнительных факторов. В частности, необходимо проводить планово-предупредительные осмотры и ремонты оборудования, соблюдать требования к эксплуатации, проектировать рациональные схемы установки и оптимизировать режимы резания, внедрять новые технологии, обеспечивающие точность изготовления.

Также особое внимание необходимо уделить средствам контроля качества обрабатываемых поверхностей. Поскольку именно диагностика качества продукции препятствует возникновению брака, способствует выявлению причин роста погрешностей при обработке и своевременному их устранению, что также в свою очередь влияет на себестоимость изделия и в целом на производительность.

Список литературы: 1. Кувшинский В.В. Фрезерование / М.: Машиностроение, 1977. – 240 с. 2. Медведев Ф.В. Моделирование динамики концевой фрезерования // Ф.В.Медведев, Б.Б.Пономарёв, Е.А.Черемных / Міжнародний збірник наукових праць «Прогресивні технології і системи машинобудування». – Донецьк, 2009 – №38 – С.139-142. 3. Панасенко В.А. Черновое фрезерование широкохордовых вентиляторных лопаток твёрдосплавным инструментом на станках ЧПУ // В.А.Панасенко, А.Я.Качан, В.Ф.Мозговой / Технология производства летательных аппаратов – Харьков, 2009 – №9 – С.21-26. 4. Мельничук П.П. Анализ траекторий чистовой обработки при 3D фрезеровании на станках с ЧПУ // П.П.Мельничук, В.Б.Струтинский, В.Е.Юмашев / Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла – Дніпропетровськ, 2010 – №11 – С.197-202.

КЛАССИФИКАЦИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Таровик А.Б., Михайлов А.Н. (кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Решение проблемы снижения металлоемкости изделий привело к появлению всевозрастающего числа входящих в эти изделия деталей, характеризующихся как нежесткие, одну из основных групп которых составляют тонкостенные цилиндрические детали.

В настоящее время в мировой практике металлообработки разработано большое количество методов обработки. По своей сущности они усложнились. Интенсив-

ность протекания процессов разрушения, деформирования, преобразования материала деталей значительно возросла. В разработке и совершенствовании методов обработки имеет место тенденция одновременного воздействия на обрабатываемые заготовки и детали механических нагрузок и химических веществ, теплового или магнитного полей, электрической и лучевой энергии, энергии элементарных частиц и т.д. в различном их сочетании.

Накопленный опыт показывает, что не существует универсальных методов обработки деталей из различных конструкционных материалов, так как каждый имеет свою конкретную область рационального применения. Технолог и конструктор должны выбрать высокоэффективный метод обработки из большого числа возможных или создать на основе их совмещения комбинированный метод изготовления детали.

В настоящее время во всех ведущих отраслях машиностроения все в больших масштабах применяют высокоэнергетические и комбинированные методы обработки материалов. Эти методы развиваются быстрыми темпами не только в силу своей относительной молодости, наличия задела еще не реализованных идей и возможностей, универсальности используемых энергоносителей, но и главным образом благодаря развитию современного машиностроения.

Под методом обработки понимают комплекс условий, характеризующих взаимодействие обрабатывающей среды или инструмента и обрабатываемой заготовки (детали), используемых для решения одной или совокупности технологических задач: изменения формы, размеров и взаимного расположения элементов детали, состояния и свойств ее материала, поверхности и поверхностного слоя. Метод обработки определяется видом затрачиваемой энергии, классом производительности и сущностью процесса формообразования, типом применяемого инструмента или обрабатывающей среды и их характеристикой, кинематикой процесса и его схемой.

Классификация методов обработки может осуществляться по ряду признаков: по виду применяемой энергии, физической сущности процесса обработки, по технологическому назначению, производительности формообразования, виду применяемого инструмента, оборудования и др. [1].

На рис. 1 представлена классификация методов обработки изделий по виду затрачиваемой энергии.

По виду применяемой энергии различают следующие методы обработки: механической обработки (М), химической (Х), электрической (Э), термической (Т), магнитной (Мг), лучевой (Л), акустической (Ак), комбинированные методы обработки (К).

В настоящее время особый интерес для практики изготовления изделий в машиностроении представляет комбинированные методы обработки. Это связано с тем, что традиционные методы исчерпали свои возможности и не позволяют существенно повышать параметры свойств изделий. Это особенно остро стоит для обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

Методами комбинированной обработки называют методы, в которых процесс преобразования, нанесения или удаления обрабатываемого материала происходит в результате протекания двух и более воздействий, осуществляемых по своему механизму [2].



Рис. 1. Классификация методов обработки по виду затрачиваемой энергии

На рис. 2 представлена классификация комбинированных методов обработки изделий по виду затрачиваемой энергии.



Рис. 2. Классификация комбинированных методов обработки по виду применяемой энергии

К комбинированным методам обработки относят следующие методы [1,3]:

- методы механохимической обработки (МХ);
- электрохимическая обработка (ЭХ);
- механотермическая обработка (МТ);
- методы электромеханической обработки (ЭМ);
- механомагнитная обработка (ММг);
- методы механоакустической обработки (МАк);
- химико-термическая обработка (ХТ);
- механоэлектрохимическая (МЭХ);

- методы механохимико-термической обработки (МХТ) и др.

На рис. 3 представлена классификация комбинированных методов обработки изделий.

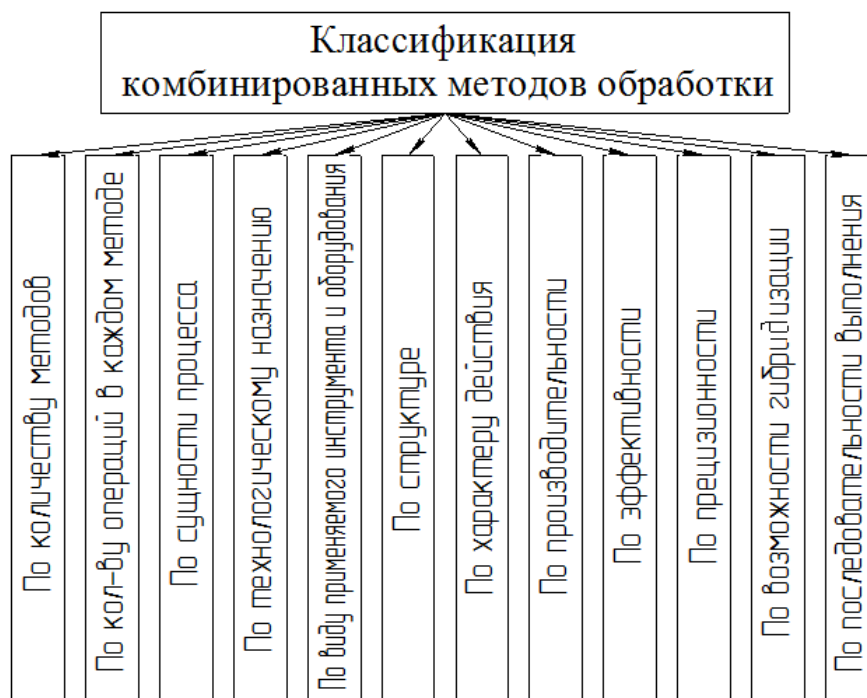


Рис. 3. Классификация комбинированных методов обработки изделий

Комбинированные методы обработки подразделяются:

1. По количеству методов (два метода, три метода, ..., семь методов).
2. По количеству операций в каждом методе (одна операция, две операции, ..., n -операций).
3. По сущности процесса.
4. По технологическому назначению все методы могут быть разделены на методы размерной и безразмерной обработки. В первом случае метод и условия обработки определяют форму и размеры обрабатываемой детали, во втором – имеют место лишь изменения качества поверхности (шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя), а изменение размеров носит случайный характер и управляется параметрами процесса обработки. Размерная обработка также сопровождается изменением качества обработанной поверхности.
5. По виду применяемого инструмента и оборудования.
6. По структуре (ветвящаяся, иерархическая, мультипликативная, аддитивная, ..., мультипликативно-аддитивная).
7. По характеру действия (последовательно, параллельно, смешанно).
8. По производительности (низкой, нормальной, высокой, сверхвысокой).
9. По эффективности.
10. По прецизионности (низкой, нормальной, высокой, особо высокой).
11. По возможности гибридизации.
12. По последовательности выполнения (1-й вариант, 2-й вариант, ..., n -й вариант).

Выводы. Выполнена классификация методов обработки по виду применяемой энергии. Представлена классификация комбинированных методов обработки изделий. Эта классификация дает возможность технологу назначать необходимые виды комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий. Установили, что создание комбинированных методов обработки основывается на одновременном или последовательном использовании различных видов энергии и вызываемых ими соответствующих физико-химических эффектов. Использование комбинированных методов обработки приводит к повышению как производительности обработки, так и качества детали. В ряде случаев освоение комбинированных способов обработки позволяет достигнуть новых технических эффектов, например, значительно увеличить прочность, износостойкость и другие эксплуатационные параметры деталей.

Список литературы: 1. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с. 2. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с. 3. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с. 4. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 346 с.

К ВОПРОСУ О КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ



Тока А., Стынгач И., Рушика И.

(Технический Университет Молдовы, г. Кишинев, Республика Молдова)



1. ВВЕДЕНИЕ.

Размерный анализ традиционно выполняется в наиболее простом варианте – методом максимума-минимума, давая, при этом, заниженные оценки получаемой точности обработки. Непрерывный рост точности на современном этапе развития машиностроения, повсеместный переход на серийное производство, массивное использование станков с ЧПУ влечет за собой необходимость пересмотра подходов к методике размерного анализа.

Размерный анализ по методу максимума-минимума основывается на положении о независимости формирования размеров в технологических процессах. В итоге, допуск замыкающего звена размерной цепи вбирает в себя допуски размеров – составляющих звеньев $\omega_{\Delta} = \omega_M + \omega_L$ (рис.1). На самом деле в технологическом процессе да и в последовательных технологических процессах проявляется эффект компенсации погрешностей и рост точности обработки [1,2]. Это связано с тем, что размеры – составляющие звенья размерной цепи формируются во взаимозависимости и метод максимума и минимума, в строгом смысле, становится некорректным.

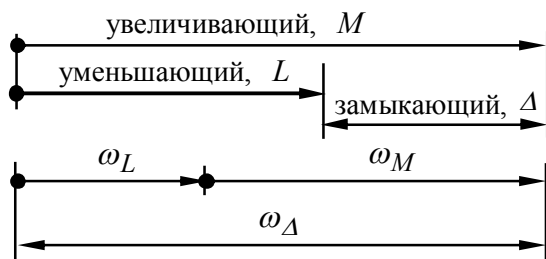


Рис. 1. Накопление погрешностей по методу максимума-минимума

2. ПРИРОДА КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Взаимозависимость формирования размеров объясняется тем, что в определенных

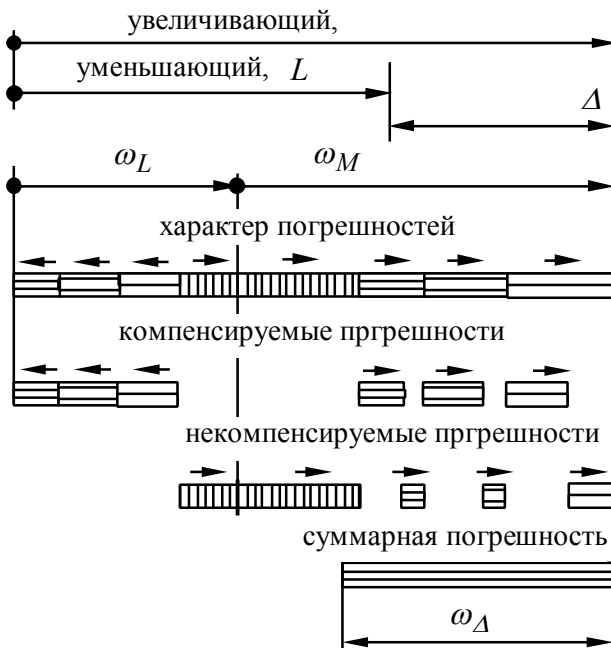


Рис. 2. Накопление погрешностей с компенсируемыми компонентами погрешностей

ситуациях в структуре погрешностей присутствуют погрешности-векторы одного направления (обусловленные например износом инструмента, податливостью элементов технологической системы, базированием и пр.). Для замыкающего размера цепи эффект заключается в том, что составляющие звенья одновременно проявляются и как увеличивающие и как уменьшающие (рис. 2). Другими словами, увеличивающий размер в соответствии с размерной схемой одними компонентами суммарной погрешности является таки увеличивающим, а другими компонентами - уменьшающим. Аналогичное происходит и с уменьшающим размером. Размерная цепь перестает быть однородной, поскольку не состоит из чисто увеличивающих и чисто уменьшающих размеров.

Наличие в размерных цепях элементов противоречивого действия приводит к изменению порядка суммирования погрешностей замыкающего звена, часть погрешностей взаимно компенсируются. Эффекты одновременного увеличения и уменьшения неодинаковы для размеров – составляющих звеньев M и L , поскольку имеют различные допуски и формируются в разных условиях. Как следствие, компенсация имеет место лишь в меру общего для составляющих размеров количественного эффекта $\omega^c = \min\{\omega_M^c, \omega_L^c\}$. Здесь, ω_M^c и ω_L^c - компенсируемые части полей допусков размеров соответственно M и L .

Эффект компенсации находит отражение в известном выражении для допуска замыкающего звена [2]:

$$\omega_{\Delta}^c = \omega_M + \omega_L - 2 \cdot \omega^c \quad (1)$$

Компенсация погрешностей не только уменьшает допуск замыкающего звена, но

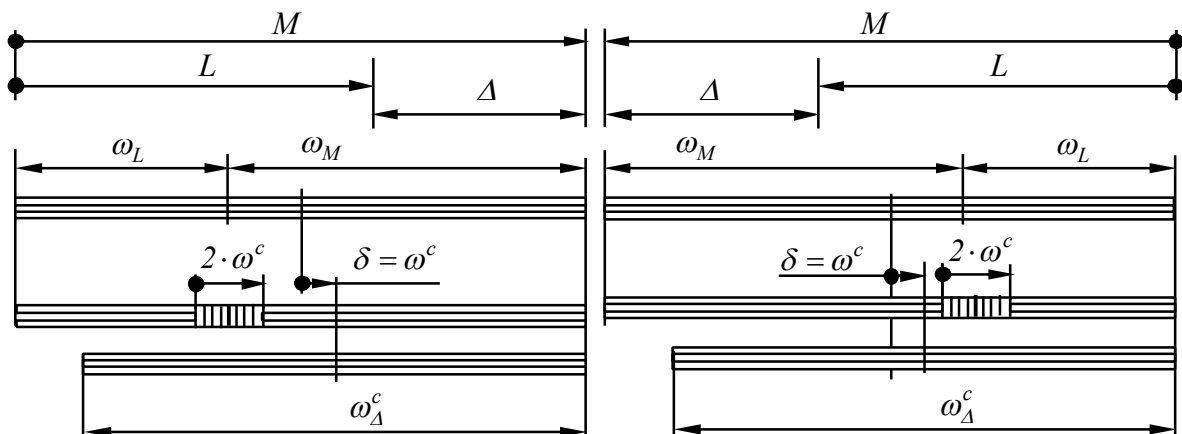


Рис. 3. Изменение положения поля допуска замыкающего звена

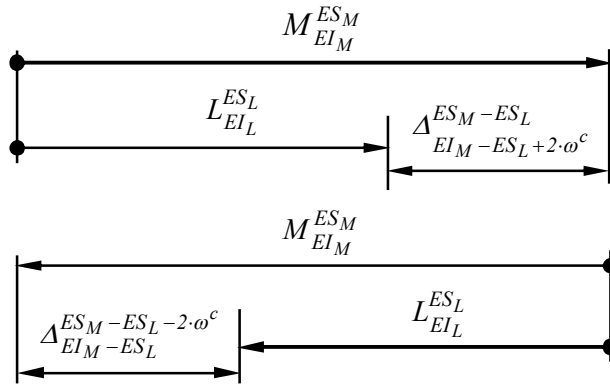


Рис. 4. Неуравновешенные размерные цепи

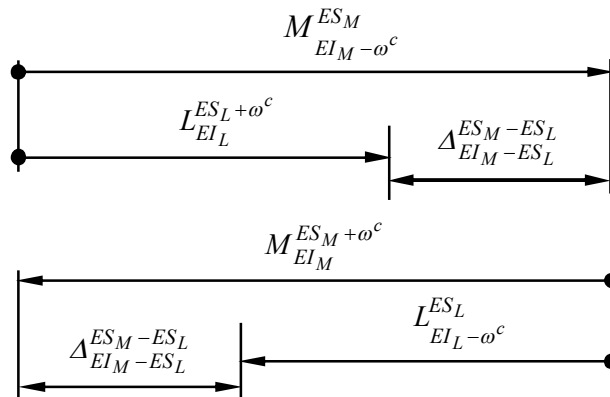


Рис. 5. Эквивалентные размерные цепи

венно, однонаправленности и разнонаправленности компенсационного вектора и увеличивающего звена, $\eta = |\xi| - 1$.

Если предельные отклонения заданы для замыкающего звена Δ , эффекты компенсации погрешностей проявляются в возможности назначения больших допусков для размеров составляющих звеньев на величину ω^c . Неуравновешенные размерные цепи показаны на рис. 6, а решение для предельных отклонений имеет вид:

$$ES_M^c = ES_M - \xi \cdot \omega^c,$$

$$EI_M^c = EI_M - (\xi + 1) \cdot \omega^c,$$

$$ES_L^c = ES_L - \eta \cdot \omega^c,$$

$$EI_L^c = EI_L - (\eta + 1) \cdot \omega^c,$$

Можно отметить, что выражения (2) и (3) справедливы для случаев когда направление вектора компенсации $2 \cdot \omega^c$ известно (связанное с износом, с податливостью и т.

и смещает поле допуска по сравнению положением поля определяемым методом максимума и минимума в направлении вектора компенсации на величину $\vec{\delta} = \vec{\omega}^c$ (рис. 3).

Компенсационные эффекты приводят к нарушению равновесия размерной цепи в традиционном варианте (рис. 4).

Строгое решение размерной цепи можно получить с использованием эквивалентной размерной цепи, в которой пересчитаны допуски и предельные отклонения составляющих звеньев (рис. 5). Предельные отклонения составляющих звеньев эквивалентной цепи рассчитывают из выражений:

$$ES_M^c = ES_M + \xi \cdot \omega^c,$$

$$EI_M^c = EI_M + (\xi + 1) \cdot \omega^c,$$

$$ES_L^c = ES_L + \eta \cdot \omega^c,$$

$$EI_L^c = EI_L + (\eta + 1) \cdot \omega^c,$$

где ES , EI - предельные отклонения; $\xi = 0$ и $\xi = -1$ для случаев, соответ-

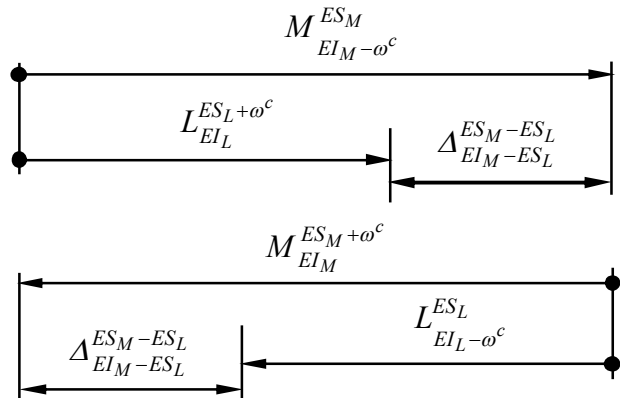


Рис. 6. Неуравновешенные размерные цепи, решение для составляющих звеньев

(3)

п.). Компенсационный вектор связанный например с базированием, с наладкой, в общем случае, может иметь противоположное направление или же случайное направление.

В общем случае компенсационные эффекты могут проявляться посредством трех векторов, двух разнонаправленных и одного случайного направления: $\vec{\omega}^c$, $\overleftarrow{\omega}^c$ и $\overleftrightarrow{\omega}^c$, каждый из них определяемых по выражению $\omega^c = \text{Min}\{\omega_M^c, \omega_L^c\}$. Тогда:

$$\omega_\Delta^c = \omega_M + \omega_L - 2 \cdot (\vec{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c + \overleftrightarrow{\omega}^c) \quad (4)$$

Положение поля допуска определяется результирующим вектором $\vec{\delta} = \vec{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c$, при отсутствии влияния вектора $\overleftrightarrow{\omega}^c$. Эквивалентная размерная цепь для этого более сложного случая показана на рис. 7.

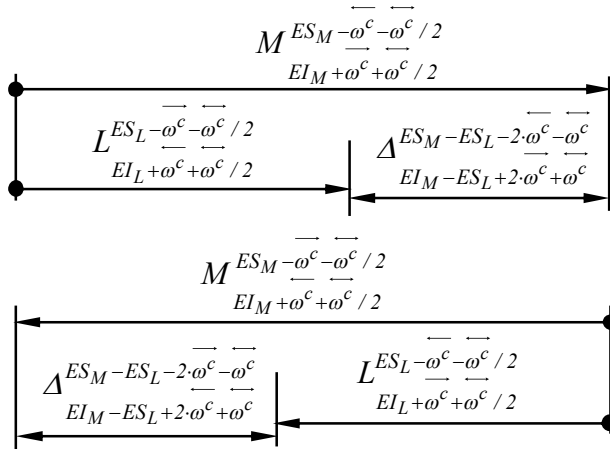


Рис. 7. Эквивалентная размерная цепь с эффектами компенсации- векторами разного направления

Компенсация погрешностей позволяет:

- обеспечивать более высокую точность замыкающего звена по сравнению с точностью оцененной по методу максимума и минимума;
- формировать размеры – составляющие звенья с меньшей точностью чем та которая определяется по методу максимума и минимума.

Первая возможность заключается в уменьшении допусков составляющих размеров M и L в эквивалентной размерной цепи на величину $\vec{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c + \overleftrightarrow{\omega}^c$, в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} ES_M^c &= ES_M + \xi \cdot \vec{\omega}^c + (|\xi| - 1) \cdot \overleftarrow{\omega}^c - \overleftrightarrow{\omega}^c / 2, \\ EI_M^c &= EI_M + (\xi + 1) \cdot \vec{\omega}^c + |\xi| \cdot \overleftarrow{\omega}^c + \overleftrightarrow{\omega}^c / 2, \\ ES_L^c &= ES_L + (|\xi| - 1) \cdot \vec{\omega}^c + \xi \cdot \overleftarrow{\omega}^c - \overleftrightarrow{\omega}^c / 2, \\ EI_L^c &= EI_L + |\xi| \cdot \vec{\omega}^c + (\xi + 1) \cdot \overleftarrow{\omega}^c + \overleftrightarrow{\omega}^c / 2, \\ \Delta_{o\Delta}^c &= \Delta_{o\Delta} + (\xi - |\xi| + 1) \cdot (\vec{\omega}^c - \overleftarrow{\omega}^c), \end{aligned} \quad (5)$$

где ES , EI , $\Delta_{o\Delta}$ и ES^c , EI^c , $\Delta_{o\Delta}^c$ – предельные отклонения размеров – составляющих звеньев M и L , координаты середин полей допусков замыкающих звеньев соответственно в традиционных и эквивалентных размерных цепях, ξ – параметр ($\xi = 0$ для случая, когда вектор $\vec{\omega}^c$ совпадает с направлением формирования увеличивающего

размера цепи и $\xi = -1$ для случая несовпадения этих направлений).

Второе направление отражается в выражениях:

$$\begin{aligned}
 ES_M^c &= ES_M - \xi \cdot \overrightarrow{\omega^c} - (|\xi| - 1) \cdot \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c} / 2, \\
 EI_M^c &= EI_M - (\xi + 1) \cdot \overrightarrow{\omega^c} - |\xi| \cdot \overleftarrow{\omega^c} - \overleftrightarrow{\omega^c} / 2, \\
 ES_L^c &= ES_L - (|\xi| - 1) \cdot \overrightarrow{\omega^c} - \xi \cdot \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c} / 2, \\
 EI_L^c &= EI_L - |\xi| \cdot \overrightarrow{\omega^c} - (\xi + 1) \cdot \overleftarrow{\omega^c} - \overleftrightarrow{\omega^c} / 2, \\
 \Delta_{oM}^c &= \Delta_{oM} + (\overrightarrow{\omega^c} \cdot (1 + 2 \cdot \xi) - \overleftarrow{\omega^c} \cdot (1 - 2 \cdot |\xi|)) / 2, \\
 \Delta_{oL}^c &= \Delta_{oL} - (\overrightarrow{\omega^c} \cdot (1 - 2 \cdot |\xi|) - \overleftarrow{\omega^c} \cdot (1 + 2 \cdot \xi)) / 2,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где Δ_{oM} , Δ_{oL} и Δ_{oM}^c , Δ_{oL}^c - координаты середин полей допусков размеров М и L соответственно в традиционных и эквивалентных размерных цепях. В этом случае допуски размеров М и L в эквивалентных размерных цепях увеличиваются на $\overrightarrow{\omega^c} + \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c}$, а координата середины поля допуска замыкающего звена не изменяется $\Delta_{0\Delta}^c = \Delta_{0\Delta}$.

Список литературы: 1. Фридлендер И. Г., Иванов В. А., Барсуков М. В., Слущер В. А. Размерный анализ технологических процессов обработки. – Л.: Машиностроение, 1987. – 141 с., 2. Матвеев В. В., Тверской М. М., Бойков Ф. И. Размерный анализ технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.