**П3.2.2 Примеры использования разработанных математических моделей и методов оптимизации при планирования процесса восстановления деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования в многостадийных (поточных) системах на специализированных ремонтных предприятиях**

Современные специализированные ремонтные предприятия выполняют ремонт узлов и агрегатов транспортного и промышленного оборудования. Детали узлов и агрегатов в результате износа в процессе эксплуатации теряют свою работоспособность. Дефекты деталей узлов и агрегатов транспортного и технологического оборудования связаны с изменением их формы и размеров. Начальный этап проведения ремонтных работ предусматривает разборку узлов и агрегатов на отдельные детали с целью их последующей дефектации. В результате дефектации определяется возможность ремонта (восстановления) формы и размеров деталей. Возможность восстановления деталей связана с наличием у них остаточного ресурса, который может быть использован. Затраты на восстановление составляют 10-50% от стоимости деталей. В результате дефектации определяются детали, которые должны быть заменены, детали, которые требуется восстановить, и детали, которые могут быть использованы в дальнейшем без их восстановления. Детали, которые могут быть восстановлены, поступают на склад, а затем на участки восстановления.

Дефекты деталей узлов и агрегатов транспортного и технологического оборудования разбиты на следующие группы [285, 286]:

– износ цилиндрической наружной поверхности (задиры, риски, износ, овальность);

– износ конической и сферической поверхностей;

– износ шлицев;

– износ пазов и канавок (нарушение каналов под шпонку);

– износ поверхности под шкив;

– износ и повреждение резьбы;

– износ зубьев цилиндрических и конических шестерен;

– износ шкивов;

– трещины, изломы, сколы, скручивание, изгиб.

Износ цилиндрической поверхности составляет 52% [285, 286] от общего количества дефектов деталей. Поэтому восстановлению деталей цилиндрической формы уделяется большое внимание на специализированных ремонтных предприятиях.

К деталям цилиндрической формы больших размеров относятся: валы сплошные и полые с глухими отверстиями, валы со шлицами, коленчатые валы двигателей и компрессоров, валы сцепления, валы распределительные, валы ведущие, валы коробок передач, валы рулевого управления, валы ременных и цепных передач и т.д. К деталям цилиндрической формы малых размеров относятся пальцы, валики, оси. Детали этих типов не восстанавливаются и подлежат замене [285, 286].

В зависимости от видов дефектов определяются технологические процессы восстановления деталей (способы устранения дефектов). Организация технологических процессов восстановления деталей предусматривает упорядочивание операций в виде поточных линий (в виде многостадийных систем), каждое рабочее место в которых выполняет определенный технологическую операцию. Технологический процесс восстановления деталей цилиндрической формы предполагает:

– удаление следов износа и создание микрорельефа путем предварительной механической обработки (так как поверхность имеет неравномерную выработку, то необходимо создать условия, обеспечивающие равномерный по толщине слой наплавки при восстановлении форму и размеров деталей);

– реализацию операций восстановления (наплавка, сварка, металлизация и т.д.);

– токарную механическую обработку после восстановления;

– шлифование.

По окончанию ремонта возможно формирование комплектов деталей разных типов, прошедших восстановление, входящих в состав одного устройства или агрегата.

Выполнение ремонта на специализированных предприятиях предполагает использование специального оборудования, реализующего автоматическое или автоматизированное восстановление размеров и формы цилиндрических деталей после их износа (наплавочные автоматы, устанавливаемые на токарные станки общего назначения, либо специальные наплавочные станции со сменными кассетами с проволокой разных диаметров). К основным (базовым) технологическим операциям, обеспечивающим восстановление формы и размеров деталей цилиндрической формы (валов) относятся:

– автоматическая электродуговая наплавка под слоем флюса;

– вибродуговая наплавка;

– металлизация (напыление расплавленного металла на подготовленную поверх-ность деталей).

Операция наплавки применяется в 50% случаев восстановления деталей [286, 287]. Наиболее распространенными способами восстановления деталей цилиндрической формы являются автоматическая электродуговая наплавка под слоем флюса и вибродуговая наплавка. Для осуществления операций восстановления деталей цилиндрической формы используются различные виды наплавочных головок (наплавочные полуавтоматы), реализующие автоматизированные способы восстановления деталей [286, 287].

Выполнение ремонта деталей цилиндрической формы обеспечивается объединением их в партии [285, 286, 288]. При объединении деталей в партии учитываются 1) общность технологического способа устранения дефектов (разные дефекты устраняются одним способом); 2) общность дефектов восстанавливаемых деталей (одинаковые дефекты цилиндрических деталей устраняются путем реализации одинакового технологического процесса – маршрутная технология). В качестве способа группирования деталей в партии использована маршрутную технологию восстановления деталей с однотипными дефектами.

Восстанавливаемые детали относятся к одному типу, если они имеют одинаковую форму и размеры, а также дефекты одинаковых видов, которые могут быть устранены посредством одного технологического процесса (то есть время устранения дефектов этих деталей одинаковое). Тогда в соответствии с маршрутной технологией реализуется восстановление деталей разных типов, обладающих одинаковыми видами дефектов.

Количество типов восстанавливаемых деталей и количество деталей каждого типа, с которыми реализуются действия в поточных системах на специализированных ремонтных предприятиях, достаточно велико. Это ограничивает применение методов частично целочисленного линейного программирования при планировании восстановления партий деталей разных типов (для оптимизации составов партий деталей разных типов и расписаний их восстановления) в поточных системах. При значительной размерности задачи планирования ее решение не может быть получено известными методами. В связи с этим возникает необходимость в применении разработанных в диссертации математических моделей процесса выполнения пакетов заданий в многостадийных системах (процесса восстановления партий деталей в поточных системах), численных методов оптимизации составов партий и расписаний реализации действий с ними для планирования восстановления деталей разных типов.

Таким образом, при значительном количестве типов деталей и деталей каждого типа задача планирования их восстановления в поточных системах на специализированных ремонтных предприятиях в составе партий не решена. Применение рассмотренных в работе математических моделей и численных методов оптимизации решений позволяет сократить общее время восстановления деталей разных типов и повысить эффективность работы оборудования путем снижения его простоев.

Так как восстанавливаемые детали разных типов могут входить в состав одних и тех же узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования, то оптимизацию составов партий необходимо выполнять с учетом требования формирования комплектов. В тоже время планирование процесса восстановления деталей разных типов выполняется для ограниченных временных интервалов работы оборудования предприятия (планирования сменно-суточных заданий, либо заданий на восстановление в течение определенных интервалов времени). В связи с этим требуется решение задачи оптимизации составов партий, составов групп партий, восстанавливаемых в течение временных интервалов заданной длительности, расписаний восстановления деталей из партий, включенных в группы. При этом требуется учет условия включения деталей разных типов в состав одних и тех же узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования (условия формирования комплектов из результатов выполнения заданий в составе пакетов, включенных в их группы, действия с которыми реализуются в течение временных интервалов ограниченной длительности). Так как в настоящее время отсутствуют методы совместной оптимизации составов партий деталей, составов групп партий и расписаний выполнения партий, включенных в группы в многостадийных системах, поэтому решение указанной задачи может быть получено только с использованием математических моделей процесса выполнения пакетов заданий и численных методов оптимизации решений, рассмотренных в работе. Применение рассмотренных в работе математических моделей и численных методов оптимизации решений позволяет увеличить количество деталей, восстанавливаемых в течение интервалов времени ограниченной длительности, а также увеличить количество узлов и агрегатов, в которые входят восстановленные детали, снизив тем самым сроки ремонта оборудования и повысив эффективность использования оборудования.

При формировании технологических процессов восстановления деталей рассчитываются режимы их (деталей) обработки и нормы времени выполнения операций на приборах, которые используются при планировании. Типы деталей обозначены через *i* (), индексы приборов через *l* (так как в технологическую цепочку восстановления деталей входят 4 операции восстановления деталей, то ). К параметрам операций предварительной механической (токарной) обработки, выполняемой на первом (*l=1*) приборе многостадийной (поточной) системы (продольное точение), относятся [285, 287, 288]:

– длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа с учетом врезания и перебега  ();

– длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа по чертежу  ();

* величина врезания и перебега для детали *i-*го типа ();

− диаметры деталей *i*-ых типов перед токарной обработкой (продольное точение)  (), диаметры деталей *i*-ых типов после токарной обработки  ();

− припуск на обработку деталей *i*-ых типов на первом приборе  () (мм);

− глубина резания для деталей *i*-ых типов на первом приборе  () (мм);

* количество проходов для снятия припуска на обработку  при глубине резания  для деталей *i*-ых типов  ();

– подача режущего инструмента для деталей *i*-ых типов () (мм/об);

* скорость резания для деталей *i*-ых типов () (м/ч);
* число оборотов деталей *i*-ых типа в минуту () (об/мин);
* длительность основной токарной обработки деталей *i*-ых типов при продольном точении  () (мин);
* длительность вспомогательных операций токарной обработки деталей при продольном точении  () (мин).

Значение  является заданным (определяется по чертежу восстанавливаемой детали), значение  определяется по таблице [289], значение  определяется выражением вида:

.

(П3.2.1)

Припуск на обработку  определяется для заданных значений  и  по формуле [289]:

.

(П3.2.2)

Значение  определяется для вычисленного значения  и заданного количества проходов  ():. Подача режущего инструмента за один оборот детали *i*-го типа (), а также скорость резания () для деталей *i*-го типа определяются по таблицам [289]. Количество оборотов () детали *i*-го типа определяется выражением [289]:

,

(П3.2.3)

где  – диаметр детали, мм. В соответствии с полученными значениями основное время  токарной обработки деталей (при продольном точении) на первом приборе определяется выражением вида [289]:

.

(П3.2.4)

Вспомогательное время , связанное с основным временем обработки детали *i-*го типа, определяется по таблицам [289]. В соответствии со значениями  и  суммарная длительность выполнения операции предварительной токарной обработки детали *i*-го типа на первом приборе перед реализацией операции направки определяется следующим образом:

.

В качестве способов восстановления формы и размеров цилиндрических деталей рассмотрена электродуговая наплавка и вибродуговая наплавка. Для параметров процесса электродуговой наплавки детали *i*-го типа введены следующие обозначения (наплавка выполняется на приборе с номером *l=2,* все параметры проиндексированы номером этого прибора):

– сварочный ток для наплавки детали *i*-го типа на *(l=2)*-ом приборе  () (А);

* диаметр проволоки, используемой в наплавочной головке для реализации восстановления детали *i*-го типа на втором приборе с использованием электродуговой наплавки  () (мм);
* количество проходов при электродуговой наплавке детали *i*-го типа ();

– коэффициент наплавки детали *i*-го типа  () (г/(А\*ч));

* площадь поперечного сечения наплавленного валика *F* (см2);
* плотность металла проволоки, используемой при наплавке детали *i*-го типа  () – плотность наплавляемого шва (г/см3);
* скорость восстановления детали *i*-го типа с использованием электродуговой наплавки (скорость наплавки)  () (м/ч);
* количество оборотов детали при реализации наплавки  (об/мин);

– шаг наплавки детали *i-*го типа () (мм/об);

* длительность основной операции по восстановлению детали электродуговой наплавкой на втором приборе  () (основное время выполнения операции, мин);
* длительность вспомогательных операций по восстановлению детали электродуговой наплавкой на втором приборе  () (мин).

Величина  определяется выражением вида: , где – диаметр восстанавливаемой детали. Значение  определяется выражением вида [285, 288]:

.

(П3.2.5)

Скорость электродуговой наплавки  детали *i*-го типа на (*l=2*)-м приборе определяется в соответствии с выражением вида [285, 288]:

,

(П3.2.6)

где  см2 при  мм. В качестве значения плотности наплавочной проволоки , используемой при наплавке детали *i*-го типа, принята плотность металла электрода УОНИ 13/55 (низкоуглеродистая и низколегированная сталь марки СВ-08Г, 7,81 г/см3.). Частота вращения детали (об/мин) определяется выражением вида [285, 288]:

.

(П3.2.7)

Шаг наплавки детали *i-*го типа  () (мм/об) в соответствии с [285, 288] определяется выражением вида: . Значение основного времени выполнения операции электродуговой наплавки определяется выражением [285, 288]:

.

(П3.2.8)

В соответствии с [285, 288, 289]: вспомогательное время  определяется как 15% от основного времени электродуговой наплавки . В тоже время подготовительно-заключительное время, связанное с установкой оснастки и подготовкой ее к работе, составляет 16 мин [288,289].

Для параметров процесса вибродуговой наплавки детали *i*-го типа введены следующие обозначения (наплавка выполняется на приборе с номером *l=2,* все параметры проиндексированы номером прибора):

* диаметр проволоки, используемой в наплавочной готовке для реализации восстановления детали *i*-го типа с использованием вибродуговой наплавки  () (мм);

– сварочный ток для вибродуговой наплавки детали *i*-го типа  () (А), напряжение вибродуговой наплавки детали *i*-го типа *Ui* ();

* скорость подачи проволоки при вибродуговой наплавке детали *i-*го типа  () (м/ч);
* скорость вибродуговой наплавки детали *i*-го типа  (м/ч);
* количество оборотов детали при реализации наплавки  (об/мин);
* коэффициент перехода электродного материала в наплавляемый металл  () [285, 288];
* шаг наплавки детали *i-*го типа () (мм/об);
* толщина наплавляемого слоя при вибродуговой наплавке детали *i*-го типа () (мм);
* количество проходов при реализации наплавки () ;
* коэффициент, учитывающий отклонение фактической толщины наплавляемого слоя от требуемой – *a* () [285, 288];
* длительность основной операции по восстановлению детали вибродуговой наплавкой  () (основное время выполнения операции, мин);
* длительность вспомогательных операций по восстановлению детали вибродуговой наплавкой  () (мин).

Величина тока  при вибродуговой наплавке определяется выражением вида:  [285, 288]. Величина подачи проволоки при вибродуговой наплавке  определяется выражением вида [285, 288]:

.

(П3.2.9)

Шаг наплавки () определяется выражением вида:  [285, 288]. Скорость вибродуговой наплавки  детали *i*-го типа на (*l=2*)-м приборе определяется в соответствии с выражением вида [285, 288]:

.

(П3.2.10)

Частота вращения детали (число оборотов, об/мин) определяется выражением [285, 288];:

.

(П3.2.11)

Значение основного времени выполнения операции вибродуговой наплавки определяется выражением:

.

(П3.2.12)

Если толщина наплавляемого слоя  составляет 1.0-1.5 мм, то мм, а  В [285, 288]. Если толщина наплавляемого слоя  составляет 2.0-2.5 мм, то мм, а В [285,288].

Если дефекты, связанные с изменением формы и размеров цилиндрических деталей, зафиксированы на их краях, тогда восстанавливаемые участки тоже находятся на краях деталей. По этой причине в результате наплавки формируется слой металла, который необходимо выровнять путем торцевого точения. Тогда механическая обработка деталей после реализации наплавки предполагает выполнение двух операций: 1) выравнивание наплавленного слоя путем продольной токарной обработки; 2) выравнивание торцов деталей путем торцевой токарной обработки. Таком образом, механическая обработка деталей на третьем приборе после реализации наплавки предусматривает как продольное точение, так и срезание кромок металла на торцах деталей.

Обозначения параметров операции токарной обработки, выполняемой на третьем приборе в многостадийной (поточной) системы (продольное точение) после реализации наплавки (первая операция на третьем приборе), аналогичны обозначениям параметров для предварительной обработки с изменением индекса *l* обрабатывающего прибора (*l=3*):

– длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа с учетом врезания и перебега  ();

– длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа по чертежу  ();

* величина врезания и перебега для детали *i-*го типа  ();

− требуемые диаметры деталей *i*-ых типов (продольное точение)  (), диаметры деталей *i*-ых типов перед токарной обработкой  ();

− припуск на обработку деталей *i*-ых типов на третьем приборе  () (мм);

− глубина резания для деталей *i*-ых типов  () (мм);

* количество проходов для снятия припуска на обработку  при глубине резания  для деталей *i*-ых типов  ();

– подача режущего инструмента для деталей *i*-ых типов () (мм/об);

* скорость резания для деталей *i*-ых типов () (м/ч);
* число оборотов детали *i*-го типа в минуту () (об/мин);
* длительность основной токарной обработки деталей при продольном точении на третьем приборе  () (мин);
* длительность вспомогательных операций токарной обработки деталей при продольном точении на третьем приборе  () (мин).

Определение значений введенных параметров осуществляется аналогично способам вычисления значений этих же параметров для первого прибора, рассмотренным выше.

В качестве параметров процесса торцевого точения (вторая операция на третьем приборе) рассматриваются:

– длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа при торцевом точении с учетом врезания и перебега  ();

– длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа при торцевом точении  ();

* величина врезания и перебега для детали *i-*го типа при торцевом точении  ();

− глубина резания для деталей *i*-ых типов  () (мм);

* количество проходов при глубине резания  для деталей *i*-ых типов  ();

– подача инструмента для деталей *i*-ых типов () (мм/об);

* скорость резания для деталей *i*-ых типов () (м/ч);
* число оборотов детали *i*-го типа () (об/мин);
* длительность основной токарной обработки деталей при торцевом точении  () (мин);
* длительность вспомогательных операций токарной обработки деталей при торцевом точении  () (мин).

Величина  определяется как , значение  определяется по таблице [289], тогда значение  определяется выражением вида:

(П3.2.13)

.

Глубина резания  и количество проходов  () являются заданными входными параметрами. В соответствии со значением  подача режущего инструмента за один оборот детали *i*-го типа  (), а также скорость резания  () для деталей *i*-го типа определяются по таблицам [289]. Количество оборотов  () детали *i*-го типа определяется выражением [285, 289]:

,

(П3.2.14)

где  – диаметр детали *i-*го типа, мм. В соответствии с полученными значениями основное время  торцевой токарной обработки деталей на первом приборе определяется выражением вида [289]:

.

(П2.2.8)

(П3.2.15)

Вспомогательное время , связанное с основным временем обработки детали *i-*го типа, определяется по таблице [289]. В соответствии со значениями , , ,  суммарная длительность выполнения операции токарной обработки детали *i*-го типа на третьем приборе после реализацией направки детали определяется следующим образом:

(П2.2.16)

.

Технологическая операция, выполняемая на (*l=4*)-м приборе предусматривает шлифование восстановленной детали после ее механической обработки. Обозначения параметров операции шлифования деталей, выполняемой на четвертом (*l=4*) приборе в многостадийной (поточной) системы после реализации токарной обработки, имеют следующий вид:

– диаметры деталей *i*-ых типов, подвергающиеся шлифовальной обработке  ();

– длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа при продольном точении с учетом врезания и перебега  ();

– длина обрабатываемой поверхности детали *i*-го типа при шлифовании по чертежу  ();

* величина врезания и перебега для детали *i-*го типа при шлифовании  ();

– поперечная подача инструмента (шлифовального круга) для деталей *i*-ых типов (глубина шлифования) – () (мм/об);

* количество проходов при глубине шлифования  для деталей *i*-ых типов  ();

– продольная подача инструмента (шлифовального круга) для деталей *i*-ых типов () (мм/об);

* скорость шлифования деталей *i*-ых типов () (м/ч);
* число оборотов детали *i*-го типа в минуту () (об/мин);
* коэффициент зачистных ходов  (принимает значения 1.2-1.7 в зависимости от требуемой чистоты обработки) [289];
* длительность основной операции шлифования детали *i*-го типа  () (мин);
* длительность вспомогательных операций при шлифовании детали *i*-го типа–  () (мин);
* общая длительность выполнения операции шлифования восстановленной детали (при черновой и чистовой обработке) –  () (мин);

Значения параметров  и , а также  определяются по таблицам [289]. Значения параметра  определяются в соответствии с выражениями вида [289]:

.

(П3.2.17)

Основное время шлифования  деталей *i*-ых типов () определяются выражением вида [289]:

.

(П3.2.18)

Время вспомогательных операций при шлифовании деталей *i*-ых типов () определяется по таблицам [289].

Общее время выполнения операций шлифования с деталями *i-*ых типов определяется следующим образом:

(П3.2.19)



Рассмотренные в работе математические модели процесса выполнения ПЗ, математической модели иерархической игры оптимизации составов ПЗ и расписаний их выполнения, методы оптимизации составов ПЗ и расписаний, реализованные в виде соответствующего комплекса программ, применены для решения задач планирования процесса восстановления деталей цилиндрической формы в составе партий. Для реализации восстановления формы и размеров деталей разных типов применены электродуговая и вибродуговая наплавки. Технологический процесс восстановления включает этап предварительной механической обработки (продольная токарная обработка на первом приборе), этап непосредственно наплавки (на втором приборе), этап последующей механической обработки (продольная и торцевая токарные обработки на третьем приборе), этап шлифования (на четвертом приборе).

Восстановлению подлежат детали четырех типов (*n=4*). Параметрами восстанавливаемых деталей и параметрами, характеризующими износ, являются:

– деталь (*i=1*)-го типа – вал 40 мм ( мм), износу подвержены два участка по 50 мм на обоих концах детали, износ составляет 0.8 мм относительно начального диаметра;

– деталь (*i=2*)-го типа – вал 60 мм ( мм), износу подвержены два участка по 50 мм на обоих концах детали, износ составляет 1.0 мм относительно начального диаметра;

– деталь (*i=3*)-го типа – вал 80 мм ( мм), износу подвержены два участка по 50 мм на обоих концах детали, износ составляет 1.5 мм относительно начального диаметра;

– деталь (*i=4*)-го типа – вал 100 мм ( мм), износу подвержены два участка по 50 мм на обоих концах детали, износ составляет 2.0 мм относительно начального диаметра.

**Этап предварительной механической обработки деталей перед наплавкой.** На этапе предварительной механической обработки детали подвергаются продольной токарной обработке с целью выравнивания участков с износом под наплавку. В результате токарной обработки значения диаметров участков, подлежащих восстановлению, будут получены следующими: мм, мм,  мм,  мм. Значения припусков на продольную токарную обработку на (*l=1*)-ом приборе: для детали (*i=1*)-го типа мм; для детали (*i=2*)-го типа мм; для детали (*i=3*)-го типа  мм; для детали (*i=4*)-го типа  мм. Припуски на деталях каждого *i*-го типа снимаются целиком за один проход. Тогда  (при ). В этом случае глубина резания составит:  мм,  мм,  мм, мм. В соответствии с глубиной резания  () и диаметром деталей по таблицам [289] определены следующие значения подачи инструмента  ():  мм/об,  мм/об,  мм/об,  мм/об. По таблице [289] на основе значений  () получены следующие значения скоростей резания  деталей *i-*ых типов (): м/мин; м/мин; м/мин; м/мин. В соответствии со значениями  () и заданными значениями  () по формуле (П3.2.3) вычислены значения количества оборотов деталей каждого типа при предварительной токарной обработке [285, 288, 289]: об/мин, об/мин, об/мин, об/мин.

Длины обрабатываемых поверхностей *Li* для деталей каждого типа определены по формуле (П3.2.1) с учетом врезания и перебега  (), полученного для заданной глубины резания по таблице [289]: ,,,. Так как обрабатываются два участка по 50 мм, то значения *Li*  определены следующим образом: . Тогда мм, мм, мм, мм. По формуле (П3.2.4) определены значения основного времени предварительной токарной обработки деталей: мин, мин, мин, мин.

Продолжительность вспомогательного времени, связанного с установкой, выверкой, снятием детали зависит от массы детали, типа приспособления, в которое устанавливается деталь, наличием и характером выверки (рассматривался четырех кулачковый шпиндель). Также в вспомогательное время входят операции, связанные с установкой оборотов и подач, включением и выключением вращения шпинделя и т.д. С использованием таблиц [289] вспомогательное время для каждой детали определено следующим образом: мин, мин, мин, мин.

Тогда общее время предварительной механической обработки деталей *i*-ых типов () на (*l=1*)-ом приборе составляет:  мин, мин, мин, мин.

**Этап восстановления деталей с использованием электродуговой и вибродуговой наплавок.** Восстановление формы и размеров деталей *i*-ых типов () реализуется двумя способами: детали первого и второго типов восстанавливаются с использованием электродуговой наплавки, детали третьего и четвертого типов восстанавливаются с использованием вибродуговой наплавки.

Значение силы тока наплавки для восстановления детали (*i=1)*-го типа определено по формуле : А. Так как диаметр детали после предварительной механической обработке мм, а требуемый диаметр  мм, то для наплавки используется проволока с мм (восстановление детали наплавкой реализуется за один проход, ). Значение коэффициента наплавки детали (*i=1*)-го типа  определено по формуле (П3.2.5): (г/(Ач)). Значение скорости наплавки  определено по формуле (П3.2.6) с учетом значения  г/см3:  м/ч. Количество оборотов детали (*i=1*)-го типа при реализации наплавки определено по формуле (П3.2.7) и составляет  (об/мин).

Значение основного времени выполнения операции электродуговой наплавки определено по формуле (П3.2.8):  мин. (при условии, что , мм/об,  мм). При условии, что время вспомогательных операций  составляет 15% от , то мин. Тогда время выполнения операции электродуговой наплавки одной детали (*i=1*)-го типа на (*l=2*)-ом приборе  мин.

Аналогичным образом выполнен расчет времени восстановления детали (*i=2*)-го типа ( мм) с использованием электродуговой наплавки проволоки с мм. Значение основного времени выполнения операции электродуговой наплавки  мин. Значение вспомогательного времени мин. Время выполнения операции электродуговой наплавки одной детали (*i=2*)-го типа на (*l=2*)-ом приборе  мин.

Подготовительно-заключительное время, связанное с установкой и наладкой оснастки, составляет 16 мин (время переналадки прибора на выполнение электродуговой наплавки деталей разных типов, связанное со сменой кассеты с проволокой либо наплавочной головки) [285, 288].

Детали третьего и четвертого типов восстанавливаются с использованием вибродуговой наплавки. Расчет времени восстановления детали третьего типа выполнен следующим образом. Так как диаметр детали после предварительной механической обработки мм, а требуемый диаметр  мм, то для наплавки используется проволока с мм (восстановление детали наплавкой реализуется за один проход ). Значение силы тока наплавки для восстановления детали (*i=3)*-го типа определено по формуле : А. Значение напряжения наплавки выбрано равным 20 В. Скорость подачи проволоки  определена по формуле (П3.2.9): м/ч. Скорость вибродуговой наплавки  определена по формуле (П3.2.10) при условии, что толщина слоя наплавки мм, шаг наплавки  мм/об (). Получено значение  м/ч. Количество оборотов детали (*i=3*)-го типа при реализации вибродуговой наплавки определено по формуле (П3.2.11) и составляет  (об/мин). Значение основного времени выполнения операции вибродуговой наплавки  определено по формуле (П3.2.12):  мин (при условии, что , мм/об,  мм). Так как время вспомогательных операций  составляет 15% от  [285, 288, 289], то мин. Тогда время выполнения операции вибродуговой наплавки одной детали (*i=3*)-го типа на (*l=2*)-ом приборе  мин.

Расчет времени восстановления детали четвертого типа выполнен по аналогии. Так как диаметр детали после предварительной механической обработки мм, а требуемый диаметр  мм, то для наплавки используется проволока с мм (восстановление детали наплавкой реализуется за один проход ). Значение силы тока наплавки для восстановления детали (*i=4)*-го типа определено по формуле [285,289] : А. Значение напряжения наплавки  выбрано равным 25 В. Скорость подачи проволоки  определена по формуле (П3.2.9): м/ч. Скорость вибродуговой наплавки  определена по формуле (П3.2.10) при условии, что толщина слоя наплавки мм, шаг наплавки  мм/об. Получено значение  м/ч. Количество оборотов детали (*i=4*)-го типа при реализации вибродуговой наплавки определено по формуле (П3.2.11) и составляет  (об/мин). Значение основного времени выполнения операции вибродуговой наплавки  определено по формуле (П3.2.12):  мин. (при условии, что , мм/об,  мм). Так как время вспомогательных операций составляет 15% от  [285, 288], то мин. Тогда время выполнения операции вибродуговой наплавки одной детали (*i=4*)-го типа на (*l=2*)-ом приборе  мин.

Подготовительно-заключительное время, связанное с установкой и наладкой оснастки, составляет 20 мин (время переналадки прибора на выполнение вибродуговой наплавки деталей разных типов, связанное со сменой кассеты с проволокой либо наплавочной головки) [285, 288],

**Этап механической обработки деталей после реализации восстановления деталей с использованием наплавки.** После реализации операции наплавки значения диаметров деталей следующие:  мм (требуемый диаметр  мм),  мм (требуемый диаметр  мм),  мм (требуемый диаметр  мм),  мм (требуемый диаметр  мм). Приведение диаметров деталей к требуемым значениям  () реализуется на третьем приборе путем токарной обработки наплавленных участков и торцов деталей, а также на четвертом приборе путем реализации шлифования.

В соответствии с приведенными значениями  и  () припуски на выполнение операций токарной обработки и шлифования получены в следующем виде: мм, мм,  мм, мм, мм,  мм,  мм, мм. При этом предполагается, что при продольном точении все припуски на третьем приборе снимаются за один проход режущего инструмента, то есть  ().

Глубины резания для деталей *i*-ых типов на третьем приборе при продольном точении (при условии, что  ()) соответствуют припускам на обработку, то есть мм,  мм,  мм, мм.

Для заданных глубин резания  () и заданных диаметров деталей  () по таблицам [289] определены следующие значения подач  и скоростей резания  (): мм/об, мм/об, мм/об, мм/об, м/мин, м/мин, м/мин, м/мин. В соответствии с полученными значениями по формуле (П3.2.3) рассчитаны значения количества оборотов деталей  (): об/мин,  об/мин,  об/мин,  об/мин. С учетом значений  () и значений мм, мм, мм, мм, полученных выше, рассчитаны значения основного времени токарной обработки деталей (продольное точение): мин,  мин,  мин,  мин. С использованием таблиц [289] вспомогательное время при обработке деталей каждого типа определено следующим образом: мин, мин, мин, мин.

После окончания продольной токарной обработки выполняется операция обработки торцов деталей (вторая операция с каждой деталью на (*l=3*)-м рабочем месте). Так как толщина слоя наплавки для детали (*i=1*)-го типа мм, то глубину резания при торцевой обработке примем равной 3.5 мм (мм). Так как толщина слоя наплавки для детали (*i=2*)-го типа  мм, то глубину резания при торцевой обработке примем равной 3.5 мм (мм). Так как толщина слоя наплавки для детали (*i=3*)-го типа  мм, то глубину резания при торцевой обработке примем равной 4 мм (мм). Так как толщина слоя наплавки для детали (*i=4*)-го типа  мм, то глубину резания при торцевой обработке примем равной 4 мм (мм). В соответствии со значениями  () и  () по таблицам [289] определены значения подачи  и скорости резания (): мм/об, мм/об, мм/об, мм/об; м/ч, м/ч, м/ч, м/ч. В соответствии с заданными значениями  () и полученными значениями () по формуле (П3.2.14) определены значения параметра  (): об/мин; об/мин; об/мин; об/мин.

Величина врезания и перебега для деталей *i-*ых типов при торцевом точении  () определены по таблице [289]: ;;; . С учетом того, что , по формуле (П2.2.13) вычислены значения , а по формуле (П3.2.15) значения : мин, мин, мин, мин.

С использованием таблиц [289] вспомогательное время при торцевой обработке деталей каждого типа определено следующим образом: мин, мин, мин, мин. Суммируя значения основного и вспомогательного времени выполнения первой и второй операций на третьем приборе, получим общее время обработки детали каждого типа: мин, мин, мин, мин.

Э**тап шлифования деталей после реализации их токарной обработки.** В соответствии с [289] при учете диаметров  () деталей по таблицам определены значения поперечной подачи шлифовального круга  (при условии, что длина деталей на менее 10 диаметров): мм/об;  мм/об; мм/об;мм/об. В соответствии с полученными выше припусками на шлифование ( мм,  мм,  мм, мм) количество проходов при выполнении операции определено следующим образом: ; ; ; . В соответствии со значениями поперечной подачи () по [289] определены значения продольной подачи шлифовального круга  (): мм/об;  мм/об;  мм/об; мм/об. Скорость шлифования  () определена по таблицам [289] с учетом поперечной  и продольной подач: м/мин; м/мин; м/мин; м/мин. По формуле (П3.2.17) рассчитаны значения количества оборотов деталей *i-*ых типов ():об/мин; об/мин; об/мин; об/мин. В соответствии с полученными значениями  (мм, мм, мм, мм), , ,  () по формуле (П3.2.18) рассчитаны значения основного времени выполнения операции шлифования : мин, мин, мин, мин. Вспомогательное время на установку и снятие детали, а также на вспомогательные операции, связанные с проходом (по таблицам [289]): мин, мин, мин, мин. Тогда общее время выполнения операций составляет: мин, мин, мин, мин. Подготовительно-заключительное время, связанное с установкой и наладкой оснастки, составляет 8-10 мин (время переналадки прибора на выполнение шлифования деталей разных типов, связанное со сменой шлифовального круга) [289].

С целью реализации планирования восстановления деталей узлов и агрегатов технологического и транспортного оборудования решены две задачи: 1) задача комплексного планирования восстановления деталей разных типов (*n=4*), включенных в партии, в поточных системах на специализированных ремонтных предприятиях (предусматривается определение локально оптимальных решений по составам партий деталей и расписаниям их выполнения на приборах систем); 2) задача комплексного планирования восстановления деталей разных типов (*n=4*), включенных в партии, в течение интервалов времени заданной длительности и условии формирования комплектов (предполагается, что восстановленные детали входят в узлы и агрегаты транспортного и технологического оборудования и задано ограничение на длительность интервалов времени функционирования системы, т.е. формируются сменно-суточные задания на восстановление деталей, входящих в одни и те же узлы и агрегаты оборудования).

Значения длительностей выполнения операций с восстанавливаемыми деталями на каждом из приборов поточной системы сведены в матрицу длительностей (в минутах) выполнения операций на соответствующих приборах системы  (где *L=4* – количество приборов в поточной системе, *n=4*– количество типов восстанавливаемых деталей). Значения длительностей определены выше при нормировании процесса восстановления. Вид матрицы *T* следующий:



Длительности переналадки приборов сведены в матрицы переналадок 

(), которые имеют следующий вид:

; ; ;.

Для первой задачи планирования процесса восстановления деталей формировались решения при различных значениях параметра  () – количества заданий каждого *i-*го типа. Для сформированного комплексного решения по составам партий и расписаниям их выполнения фиксировались значения критерия (4.17) вида  для каждого набора значений входных параметров. Также фиксировались значения критерия (4.17) вида  для фиксированных партий, включающих все  деталей определенного *i-*го типа ().

В качестве параметра , характеризующего эффективность полученных решений, определялось уменьшение общей длительности выполнения всех партий деталей в решении, сформированном с использованием предложенного метода их оптимизации, по сравнению с фиксированными партиями (эффективность метода оптимизации составов партий – ЭМОСП). Для этого вычислялось отношение разности общих длительностей выполнения фиксированных пакетов и пакетов, сформированных в соответствии с рассмотренным методом, к общей длительности выполнения фиксированных партий: (, где – значение критерия *f1*, полученное для решения, не предполагающего оптимизацию составов партий (для фиксированных партий), – значение критерия *f1*,, полученное для решений, оптимизированных с использованием предложенного в работе метода.

Результаты решения первой задачи планирования (определение составов партий деталей и расписаний их выполнения) представлены в Таблице П3.2.1.

Таблица П3.2.1– Результаты планирования процесса восстановления партий деталей с использованием рассмотренного метода оптимизации их составов и расписаний их выполнения

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Значение | Значение критерия  для решений, оптимизи-рованных с использованием рассмотренного метода (мин) | Значение критерия  для фиксированных партий деталей (мин) | Эффективность полученных при оптимизации решений (значение ) |
| 1 | 10 | 1082 | 1276 | 0.15 |
| 2 | 20 | 2357 | 2640 | 0.11 |
| 3 | 30 | 3491 | 3910 | 0.11 |
| 4 | 40 | 4667 | 5280 | 0.12 |

Анализ полученных результатов планирования показал, что для представленных исходных данных, характеризуемых малыми значениями параметров неоднородностей длительностей выполнения операций с деталями на приборах системы и длительностей переналадки приборов на выполнение операций с деталями соответствующих типов, эффективность планирования варьируется в пределах 10-15 %.

Для второй задачи планирования процесса восстановления деталей формировались решения при следующих значениях параметров: ; количество комплектов каждого типа  (всего из восстановленных деталей должно быть сформировано 20 комплектов). Матрица составов комплектов имеет следующий вид:.

.

В ходе планирования варьировались значения длительностей интервалов времени  () функционирования системы, для которых выполняется планирование, и количество Z этих интервалов. Матрицы длительностей выполнения операций  по восстановлению деталей на приборах системы, а также длительностей переналадки приборов на выполнение операций восстановления  () аналогичны введенным выше.

Для сформированного с использованием рассмотренного в работе метода комплексного решения по составам партий деталей, составам групп партий деталей, восстанавливаемых в течение временных интервалов ограниченной длительности, и расписаниям обработки партий, включенных в группы, на приборах системы, определялись значения критерия (6.24) вида  для каждого набора значений входных параметров. Также определялись значения критерия (6.24) вида  при условии, что составы групп партий не оптимизируются (то есть формируются начальные составы групп, по которым распределены партий, полученные в решении с первого уровня, без их дальнейшей оптимизации).

В качестве результатов исследования эффективности планирования с использованием рассмотренного метода фиксировались значения отношения от входных параметров задачи (– степень увеличения количества комплектов при использовании рассмотренного метода оптимизации групп партий деталей по сравнению с фиксированными группами партий,  – значение критерия при условии, что составы групп не оптимизируются,  – значение критерия  при условии, что решения по составам групп оптимизируются с использованием рассмотренного метода).

Результаты решения второй задачи планирования (определение составов партий деталей, составов групп партий и расписаний обработки партий в системе (при условии формирования комплектов)) представлены в Таблице П3.2.2.

Анализ полученных результатов планирования показал, что для представленных исходных данных, характеризуемых малыми значениями параметров неоднородностей длительностей выполнения операций с деталями на приборах системы и длительностей переналадки приборов на выполнение операций с деталями соответствующих типов, эффективность планирования варьируется в пределах 10-30 %.

Таблица П3.2.2– Результаты планирования процесса восстановления партий деталей с использованием рассмотренного метода комплексной оптимизации составов партий, групп партий и расписаний их выполнения

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Длительности интервалов времени функционирования системы, | Количество интервалов времени функционирования системы, *Z* | Значение критерия  для решений, оптимизированных с использованием рассмотренного метода | Значение критерия  для решений, в которых составы групп не оптимизируются (фиксированные группы) | Эффективность полученных при оптимизации решений (значение ) |
| 1 | 200 | 2 | 4 | 3 | 0.25 |
| 3 | 7 | 5 | 0.28 |
| 4 | 9 | 6 | 0.3 |
| 5 | 11 | 8 | 0.27 |
| 2 | 250 | 2 | 7 | 6 | 0.14 |
| 3 | 10 | 8 | 0.2 |
| 4 | 12 | 9 | 0.25 |
| 5 | 14 | 11 | 0.21 |
| 3 | 300 | 2 | 10 | 9 | 0.1 |
| 3 | 13 | 11 | 0.15 |
| 4 | 15 | 12 | 0.2 |
| 5 | 16 | 13 | 0.18 |