М 498138

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

КРАВЧЕНКО НИКОЛАЙ ФЕДОРОВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЦИКЛОВОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РТК ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ

Специальность 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением

05.02.05 – Роботы, манипуляторы и робототехнические системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 1991

Работа выполнена в Рыбинском авиационном технологическом институте

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
Лауреат Государственной премии УССР Живов Л.И.

доктор технических наук, профессор Миропольский Ю.А.

доктор технических наук, профессор Нахапетян Е.Г.

Ведущая организация – НПО НИИТавтопром, г. Москва

Защита состоится "13" ноября 1991 г. в 14[30] часов на заседании специализированного совета Д.053.15.05 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можн
им. Н.Э.Баумана.

Ваш отзыв на авт
печатью, просим напра
справок 263-65-14.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
специализированного с
к.т.н., доцент

Подп. к печати _____
объем 2 п.л. Тир. 10(

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1498138
Кравченко Н.Ф.Разработка

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Комплексная автоматизация листоштамповочного производства обеспечивает высокий уровень производительности и качества изготовления на основе новых технических средств автоматизации. Существующие средства автоматизации листоштамповочного производства достаточно разнообразны. Выбор того или иного из них зависит от цикловой производительности оборудования, программы выпуска однотипной продукции, частоты и длительности переналадки оборудования, от материала, конфигурации, размеров заготовок и других факторов.

В массовом производстве задача автоматизации решается применением роторно-конвейерных комплексов и традиционных подач. В серийном и мелкосерийном производстве первые не используются, и шиберные, револьверные, грейферные и другие подачи нашли применение при обработке от трех до девяти наименований деталей, в то время как за каждым прессом закрепляется до двадцати - тридцати детале-операций.

Существует класс мелких заготовок, автоматизация которых на формоизменяющих и штамповочно-сборочных операциях традиционными средствами неэффективна. Это заготовки, имеющие следующие характеристики: массу - менее 0,25 кг; линейные размеры в плане - длина менее 200 мм, толщина 0,1...3 мм; величину партии запуска - 3...300 тыс. шт.; технологическое время обработки - менее 1 с; неплоскостность - более 0,4 мм; погрешность загрузки в штамп - $\pm$ 0,1...$\pm$ 1 мм; число степеней переориентации - 3...5; вертикальный или горизонтальный способ позиционирования заготовки в штампе. Трудоемкость изготовления этих заготовок в штамповочном производстве приборостроения и радиопромышленности достигает 60 % от общего объема производства.

Для обеспечения гибкости листоштамповочного производства необходимо применение высокофункциональных приемно-подающих устройств, осуществляющих процесс загрузки-разгрузки прессового оборудования. Такими универсальными устройствами являются промышленные роботы (ПР), с применением которых создаются роботизированные технологические комплексы (РТК) штамповки.

В настоящее время в листоштамповочном производстве работают комплексы, оснащенные специализированными ПР с пневмоме-

1498138

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1498138
Власенко С.П.Разработка те

МГТУ им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ханическим и электромеханическим приводами и цикловым программным управлением (ЦПУ) совместно с устройствами подачи и приема деталей.

Существующие РТК листовой штамповки мелких деталей имеют низкую производительность 15...20 дет/мин. и высокую стоимость 10...30 тыс. руб. Это определяется большим временем цикла специализированных ПР 3...4 с и большой их стоимостью 6...10 тыс. руб. Сокращение цикловых потерь времени в РТК листовой штамповки мелких деталей является основным резервом повышения (в несколько раз) их производительности.

Проблематичность повышения цикловой производительности роботизированных комплексов листовой штамповки состоит:
- в неустановленных причинно-следственных связях и факторах, определяющих быстродействие специализированных ПР, производительность РТК листовой штамповки и точность их работы; в отсутствии показателей оценки динамических нагрузок для специализированных ПР, запаса по точности роботизированных комплексов штамповки и повышения их цикловой производительности, что не позволяет оптимизировать процесс загрузки-разгрузки прессового оборудования;
- в многовариантности технических решений РТК листовой штамповки, обусловленных сложными связями показателей производительности, точности и динамики; отсутствии ограничений на установочные, конструктивные, точностные, динамические показатели и параметры, что не позволяет создать методику проектирования рациональных по производительности и приведенным затратам роботизированных листоштамповочных комплексов, обобщенную модель конструкций РТК листовой штамповки и алгоритм ее решения.

Поэтому разработка методологии повышения цикловой производительности РТК листовой штамповки мелких деталей является научной проблемой, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

Целью работы является разработка методологии повышения цикловой производительности РТК листовой штамповки мелких деталей на основе выявленных закономерностей между производительностью, точностью их работы и динамикой специализированных ПР, оптимизации процесса загрузки-разгрузки прессового оборудования и совершенствования функциональных параметров.

Методы исследований. Работа базируется на изучении процессов листовой штамповки мелких деталей в РТК. Решение поставленных в работе задач было проведено методами механики и теории производительности, моделированием на ЭВМ по разработанным алгоритмам с использованием методов оптимизации и статистических испытаний. Для проверки основных выводов было проведено экспериментальное исследование РТК листовой штамповки на разработанном стенде, при этом была использована скоростная киносъемка движений робота, а также измерение перемещений звеньев, скоростей, ускорений и усилий в приводах с помощью тензодатчиков.

Научная новизна работы состоит в развитии теории производительности и методов проектирования роботизированных листоштамповочных комплексов:

1. Разработана математическая модель РТК листовой штамповки с учетом динамики ПР и ограничений, накладываемых прессовым оборудованием и заготовками на движения ПР.

2. Установлены основные причинно-следственные связи между динамикой специализированных ПР, точностью функционирования РТК листовой штамповки и их цикловой производительностью; определены факторы, влияющие на цикловую производительность (быстродействие и модульность специализированных ПР, динамические нагрузки, погрешность загрузки заготовки в штамп, параметры специализированного ПР и структуры РТК штамповки).

3. Разработана методика оптимизации по критерию быстродействия ПР циклограмм работы РТК листовой штамповки, позволяющая: образовать структуры роботизированных комплексов без функциональной избыточности по отношению к операции загрузки-разгрузки прессового оборудования; увеличить скорости перемещения звеньев специализированных ПР, и, в первую очередь, имеющих наибольшую цикличность; совмещать движения звеньев ПР и выбрать рациональные моменты включения приводов с учетом ограничений в зоне штампа.

4. Разработаны методы структурной и параметрической оптимизации специализированных ПР и РТК листовой штамповки, позволяющие: выполнить оптимизационный синтез модульных ПР с пневмоприводом и ЦПУ по критериям быстродействия и точности; выбрать параметры ПР на основе квазисиловых и квазиинерционных показателей; выбрать жесткость пространственных механизмов ПР с учетом динамики нагружения звеньев, упругой податливости и колебаний.

5. Создана методика проектирования роботизированных комплексов листовой штамповки на основе обобщенной информационной модели конструкций РТК листовой штамповки и алгоритма ее реализации, позволяющая: разработать множество структурных исполнений РТК листовой штамповки и алгоритм уменьшения их размерности на основе установленной взаимосвязи между параметрами деталей, прессов и специализированных ПР по показателю минимума приведенных затрат; выбрать рациональные параметры структурной схемы РТК листовой штамповки, связывающие геометрические размеры деталей, прессов, специализированных ПР с показателями динамики, точности и производительности и обеспечивающие наименьшие приведенные затраты и наибольшую цикловую производительность.

Автор защищает результаты научно-исследовательской работы по повышению цикловой производительности РТК листовой штамповки мелких деталей путем оптимизации процесса загрузки-разгрузки прессового оборудования, составивших теоретическое обобщение и решение крупной научно-технической задачи и выразившиеся в разработке:

- динамической модели РТК листовой штамповки и выборе показателей оценки динамических нагрузок, действующих на звенья и приводы специализированных ПР, запаса по точности роботизированных комплексов штамповки и повышения их цикловой производительности;
- методики оптимизации по быстродействию циклограмм работы однооперационных и многооперационных РТК листовой штамповки;
- методики проектирования специализированных модульных ПР, оптимальных по быстродействию и удовлетворяющих заданной точности загрузки заготовки в штамп;
- методики проектирования высокопроизводительных РТК листовой штамповки с низкими приведенными затратами на основе созданной обобщенной информационной модели конструкций РТК листовой штамповки и алгоритма ее реализации.

Практическая ценность. 1. Использование результатов работы позволяет конструктору и технологу определить основные динамические, точностные, установочные, конструктивные и экономические показатели и параметры, обеспечивающие создание

высокопроизводительных роботизированных комплексов листовой штамповки мелких деталей с минимальными приведенными затратами. 2. Разработана методика оптимизации по быстродействию проектируемых и существующих РТК листовой штамповки, позволяющая увеличить цикловую производительность в два раза. 3. Созданы алгоритмы и программы расчета на ЭВМ основных параметров специализированных ПР с пневмоприводом и ЦПУ, оптимальных по быстродействию и точности позиционирования. 4. Разработаны и практически испытаны высокопроизводительные кулисно-рычажные и мальтийские механизмы для модулей в специализированных ПР. 5. Разработана методика проектирования высокопроизводительных роботизированных комплексов штамповки с минимальными приведенными затратами, позволяющая на ранних стадиях проектирования выбрать рациональную по приведенным затратам структурную схему РТК листовой штамповки, а на заключительной стадии выбрать для нее рациональные параметры.

Апробация работы. Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на 1У Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (г. Ташкент, 1986 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции в МГТУ им. Н.Э.Баумана "Современные проблемы технологии машиностроения" (г. Москва, 1986 г.), на Всесоюзных семинарах "Промышленные роботы и их применение" (ЛДНТП, 1976, 1980, 1983, 1985 г.г.), на Всесоюзных совещаниях по робототехническим системам (Владимир, Минск, 1978, 1981 г.г.), на Всесоюзных научно-технических конференциях "Проблемные вопросы автоматизации производства" (г. Рига, Краснодар, Воронеж, 1978, 1981, 1987 г.г.) и других конференциях.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 106 печатных работ, в том числе 13 А.С. на изобретения, 56 статей, 2 брошюры и 1 монография.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы из 195 наименований и приложений. Материал изложен на 374 страницах, содержит 82 рисунка и 22 таблицы.

Реализация работы. Результаты исследований использовались при создании РТК листовой штамповки мелких деталей на Рыбинском приборостроительном заводе при долевом участии с ОКБ

"Старт" г. Рыбинска. Комплексная методика проектирования высокопроизводительных РТК внедрена в Рыбинском ОКБ "Старт". Программа машинного проектирования специализированных ПР с пневмоприводом, оптимальных по быстродействию и точности, внедрена в НПИ "Импульс" г. Москва и Рыбинском ОКБ "Старт". Она использовалась при разработках серийных роботов РФ-201М, РФ-202М, ИМ-I, РФ-204М. На основе разработанных рекомендаций и оригинальных конструкций роботов созданы специализированные ПР с кулисно-рычажными и мальтийскими механизмами в модулях поворота, что позволило увеличить их быстродействие в два и более раз. Полученные в диссертации результаты были использованы при выполнении автором ряда хоздоговорных НИР, включенных в комплексную межотраслевую программу Минвуза РСФСР "Создание роботов для автоматизации процессов и других целей".

Экономический эффект от использования результатов работы в промышленности за 1988-89 г.г. составляет 440 тыс. руб.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному консультанту Заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, д.т.н., проф. Семенову Е.И.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исследованиям, разработкам и внедрению автоматизированного оборудования при решении задач комплексной автоматизации производства посвящены работы И.И.Артоболевского, С.И.Артоболевского, Б.С.Балакшина, В.П.Боброва, А.П.Владзиевского, Л.И. Волчкевича, Н.И.Камышного, И.И.Капустина, И.А.Клусова, В.С.Корсакова, Л.Н.Кошкина, М.С.Лебедовского, Н.А.Усенко, А.И.Федотова, Б.И.Черпакова, Г.А.Шаумяна и др.

Большой вклад в развитие методов и средств автоматизации штамповочного производства внесли отечественные ученые: Ю.А.Бочаров, В.П.Бобров, В.И.Власов, Л.И.Кивов, А.И.Дащенко, А.Н.Малов, Ю.А.Мирольский, А.Н.Манзуров, Ф.П.Михаленко, Г.А.Навроцкий, В.Ф.Прейс, Е.И.Семенов, Е.Н.Складчиков и др.

Большой вклад в развитие методов анализа и синтеза ПР внесли советские ученые: П.Н.Белянин, Е.И.Воробьев, А.Ф.Верещагин, В.С.Кулешов, А.И.Корендясев, В.С.Медведев, Е.Г.Нахапетян, А.Г. Овакимов, Е.П.Попов, И.Б.Челпанов, Е.И.Юревич и др.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ параметров технических средств роботизации (ТСР) и комплексов листовой штамповки позволил установить, что избыточность компоновки специализированных ПР и их динамика оказывают определяющее влияние на производительность комплексов штамповки и приведенные затраты. Так, у существующих РТК листовой штамповки мелких деталей при времени операции штамповки менее 1 с, коэффициент использования числа ходов ползуна не превышает 15 %, при стоимости комплекса от 10 до 30 тыс. руб.

Для расчета производительности автоматизированного оборудования и установления причинно-следственных связей и факторов, на нее влияющих, существуют многие теории. Теория производительности, разработанная проф. Шаумяном Г.А., является в настоящее время наиболее общей теорией производительности автоматического оборудования, позволяющая комплексно решать вопросы их проектирования и эксплуатации.

Однако в работах Г.А.Шаумяна, Л.И.Волчкевича и М.М.Кузнецова не были раскрыты причинно-следственные связи и не исследованы факторы, влияющие на потери времени в кинематическом цикле роботизированных комплексов листовой штамповки. В теориях производительности, предложенных Б.И.Гордиенко, Г.А.Наврецким, Ю.М. Миропольским и др., не исследованы факторы и параметры, определяющие быстродействие специализированных ПР и производительность РТК листовой штамповки (рис. 1), точность их работы (см. раздел 2). Это не позволяет разработать показатели оценки: динамических нагрузок, действующих на приводы и звенья специализированных ПР, запаса по точности и повышения их цикловой производительности, без которых, в свою очередь, невозможен целенаправленный синтез высокопроизводительных роботизированных комплексов штамповки с минимальными приведенными затратами.

В настоящее время процесс проектирования автоматизированного кузнечно-прессового оборудования состоит из двух, не связанных между собой, этапов и основан в основном на решении задач 1 этапа.

1 этап заключается в решении одной из трех задач: формировании множества структурных исполнений комплексов штамповки;



Рис. 1. Принципиальная схема взаимосвязи факторов, определяющих цикловую производительность РТК листовой штамповки мелких деталей

анализе и уменьшении "размерности" вариантов структур; выборе рационального варианта по экономическим показателям и параметрическим ограничениям. В этих задачах за целевые функции, переменные и ограничения принимаются только экономические параметры.

П этап заключается в решении различных задач анализа и синтеза автоматического оборудования по геометрическим, кинематическим и динамическим параметрам и показателям качества.

Для решения задач П этапа проектирования необходимо создать обобщенную информационную модель конструкций РТК листовой штамповки и алгоритм ее реализации. Это затруднено многовариантностью структурных исполнений РТК листовой штамповки и сложными связями параметров техпроцессов, прессов и специализированных ПР с показателями производительности, динамики и точности, что не позволяет установить ограничения на конструктивные, динамические и экономические показатели и параметры.

В результате обзора предложена уточненная классификация РТК листовой штамповки, определены факторы, характеризующие причины неэффективной работы, и сформулированы требования к ТСР и РТК листовой штамповки.

Основными из них являются увеличение цикловой производительности роботизированных комплексов штамповки в два-три раза и уменьшение приведенных затрат в два и более раз, что достигается оптимизацией процесса загрузки-разгрузки прессового оборудования.

На основе проведенного изучения состояния вопроса по типовым средствам автоматизации листоштамповочного производства, методам повышения производительности и проектирования автоматизированного оборудования была сформулирована цель работы, достижение которой связано с решением ряда задач:

- разработать динамическую модель РТК листовой штамповки и исследовать факторы, определяющие быстродействие специализированных ПР; факторы, определяющие точность работы и цикловую производительность роботизированных комплексов листовой штамповки; рассчитать и назначить показатели оценки динамических нагрузок, действующих на приводы и звенья специализированных ПР, показатели оценки точности работы и производительности РТК листовой штамповки;
- создать методику оптимизации по быстродействию циклограмм работы однооперационных и многооперационных РТК листовой штамповки;
- разработать методику проектирования специализированных модульных ПР с пневмоприводом и ШПУ, оптимальных по быстродействию и удовлетворяющих заданной точности загрузки заготовки;
- создать методику проектирования роботизированных комплексов штамповки на основе обобщенной информационной модели конструкций РТК листовой штамповки и алгоритма ее реализации, для чего: образовать множество структурных исполнений РТК листовой штамповки под всю номенклатуру мелких заготовок и создать алгоритм уменьшения их размерности на основе разнообразия видов функциональных элементов и связей между ними, разнообразия циклограмм работы комплекса и параметрической взаимосвязи между функциональными элементами (параметрами техпроцессов, прессов и ТСР) при минимуме приведенных затрат; для выбранных структур

РТК листовой штамповки определить их рациональные параметры, обеспечивающие наибольшую производительность и наименьшие приведенные затраты при удовлетворении заданным ограничениям.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЦИКЛОВУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ РТК ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

В теоретической части работы даны методические основы выбора показателей оценки силовых и инерционных нагрузок, действующих на приводы и звенья специализированных ПР, запаса по точности работы РТК листовой штамповки и повышения их цикловой производительности. Динамическая модель РТК штамповки состоит из уравнений движения исполнительного устройства ПР с учетом упругости звеньев, уравнений изменения давлений воздуха в полостях наполнения и выхлопа пневмоцилиндров приводов и ограничений, накладываемых прессовым оборудованием на движения ПР.

$$A_j(q_j)\ddot{q}_j = B_j(q_j, q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i, P_{ni}, P_{Bi}), \qquad (1)$$

где $j = 1,2,\ldots, S$; $i = 1,2,\ldots, S-1$; $j \neq i$; S – число степеней подвижности механизма ПР; q – обобщенная координата транспортного или локального перемещения; $P_н$, $P_в$ – давление воздуха в полостях наполнения и выхлопа пневмоцилиндра привода; A_j – квазиинерционный фактор – приведенные к j-тому звену ПР масса или момент инерции; B_j – квазисиловой фактор – сила или момент, приложенные к j-тому звену.

Для решения различных задач анализа и синтеза РТК листовой штамповки необходимо обоснованно назначать функциональные и параметрические ограничения. Здесь приведены наиболее общие функциональные и параметрические ограничения, которые совместно с уравнениями движения ПР (1) и будут представлять динамическую модель работы РТК листовой штамповки. Ограничения приведены для специализированных ПР с одной вращательной и двумя поступательными кинематическими парами в одноруком и двуруком исполнении.

Первый вид ограничений связан с нормальным функционированием пневмоприводов ПР и описывается уравнениями газовой динамики.

Второй вид ограничений относится к ограничениям на траекторию перемещения детали при загрузке-разгрузке пресса. Этот

вид ограничений связан с геометрией пресса и зависит от расположения направляющих колонок, стягивающих болтов, а также закрытых или открытых боковых сторон пресса.

При моделировании работы РТК листовой штамповки решается задача по перемещению детали из точки $M_0(q_{1,0}, q_{3,0})$, где $q_{1,0}$, $q_{3,0}$ – координаты детали на позиции загрузки, в точку $M_i(q_{1,i}, q_{3,i})$, где $q_{1,i}$, $q_{3,i}$ – координаты матрицы штампа. Начало координат соответствует расположению ПР. Тогда имеем

$$q_{1,0} \leq q_{1,вкл} \leq q_{1,i}; \qquad q_{3,0} \leq q_{3,вкл} \leq q_{3,i}, \qquad (2)$$

где $q_{1,вкл}$ – координата угла поворота руки, соответствующая включению привода радиального перемещения руки; $q_{3,вкл}$ – координата радиального перемещения руки, соответствующая включению привода поворота руки.

Аналогичные ограничения должны накладываться на работу специализированного ПР при разгрузке пресса.

Условия (2) являются общими ограничениями при моделировании любых движений ПР. Для РТК штамповки с однорукими ПР и прессовым оборудованием с ограничениями в зоне штампа, кроме условий вида (2), необходимо выполнять кинематические условия следующих видов:

$$q_3 \leq \ell_3, \qquad \text{при} \qquad t_1 \leq \Delta t_3;$$

$$q_3 = \ell_3 + \dot{q}_3 \left(\frac{t_1 - \Delta t_3}{2}\right) < L, \qquad \text{при} \quad t_1 \geq \Delta t_3. \qquad (3)$$

Для РТК листовой штамповки с двуруким ПР к ограничениям вида (3) необходимо добавить условие вида

$$q_4 = (\ell_4 + q_{4\,max}) - \dot{q}_4 \left(\frac{t_1 + \Delta t_н}{2}\right) < R - L \quad \text{при } t_1 \geq \Delta t_4, \qquad (4)$$

где t_1 – текущее время поворота руки; q_3, q_4 – текущие значения величин перемещений рук; $\dot{q}_3$, $\dot{q}_4$ – текущие значения скоростей выдвижения и втягивания рук; ℓ_3, ℓ_4 – длины рук во втянутом состоянии; $q_{4\,max}$ – максимальное перемещение руки; Δt_3 – время задержки момента включения привода радиального перемещения руки относительно момента включения привода поворота руки; Δt_4 – время опережения момента включения привода радиального перемещения руки относительно момента включения привода поворота руки; L – расстояние от оси вращения руки до препятствия в зоне штампа; R – наибольший вылет руки ПР.

Согласно первому условию (3) поворот руки осуществляется при ее втянутом положении. Согласно второму условию (3) вклю-

чение привода радиального перемещения загружающей руки (выдвижение) происходит с задержкой по времени Δt_3 относительно начала ее поворота t_1 . Согласно неравенству (4) включение привода радиального перемещения разгружающей руки (втягивание) происходит с опережением по времени Δt_4 относительно начала ее поворота t_1 .

Была исследована в составе РТК листовой штамповки работа однорукого и двурукого ПР (жесткая и упругая система). Исследования проведены путем решения на ЭВМ уравнений, описывающих движения ПР с пневмоприводом и ЦПУ по разработанным алгоритмам, а также с экспериментальной проверкой результатов расчетов. Это позволило выбрать показатели оценки: динамических нагрузок для специализированных ПР, работающих в составе РТК листовой штамповки; запаса по точности роботизированных комплексов листовой штамповки.

При расчете специализированных ПР необходимо учитывать динамическую взаимосвязь между звеньями ПР при совмещении движений и определять движущие силы и управление при прямом и обратном ходе на режимах разгона и торможения при обеспечении времени цикла и точности позиционирования детали. Ввиду сложности рассматриваемых моделей, их нелинейностей, неявного характера целевых функций и функциональных ограничений, при моделировании этих систем приходится принимать ряд ограничений и допущений, которые искажают реальную картину движения системы.

С этой целью предлагается выполнять расчет массовых характеристик ПР, параметров привода и управления для случая последовательного движения звеньев с последующей корректировкой полученных характеристик и параметров по квазиинерционным и квазисиловым показателям, т.е. использовать принцип суперпозиции на каждом шагу интегрирования. Оценку усилий, развиваемых приводами ПР, и инерционных нагрузок, действующих на исполнительное устройство, выполняют с помощью квазиинерционных и квазисиловых показателей:

а) для инерционных характеристик $\bar{A}_j = A_j - A_{нj} / A_{нj}$, (5),

б) для силовых характеристик $\bar{B}_j = B_j / B_{нj}$, (6)

под $A_{нj}$, $B_{нj}$ понимается номинальная инерционность и усилие, развиваемое приводом j-того звена.

Выражения для $\bar{A}_j$ и $\bar{B}_j$ получены из уравнений движения

механизма ПР (1). Они использовались для качественной и количественной оценки влияния структуры кинематической схемы и характера движения механизма ПР на инерционные и силовые характеристики его звеньев и их приводов.

При проектировании ПР необходимо уменьшать модульные значения a_{ji} и b_{ji}, добиваясь $\bar{A}_j \to 0$ и $\bar{B}_j \to 1$. Нулевые значения получают применяя в конструкциях ПР звенья одинаковой конфигурации и массы; для уменьшения других коэффициентов a_{ji} необходимо уменьшить массу подвижных звеньев. При выборе конструктивных параметров приводов следует избегать получения значений b_{ji}, лежащих вне диапазона значений $1 \geq b_{ji} \geq -1$, что приводит к недостаточной эффективности привода. При этом $\bar{B}_j$ принимают отрицательные значения. Для специализированных ПР получены рациональные значения квазиинерционных и квазисиловых показателей $\bar{A}_j = 0, \ldots 0{,}5$; $\bar{B}_j = 0 \ldots 2$. Их использование при проектировании ПР приведено в 4 разделе.

При взаимосвязи ТСР в роботизированных комплексах листовой штамповки необходимо обоснованно назначать допуски их установки на разметочных координатных осях. На рис. 2 изображена схема однооперационного РТК листовой штамповки.

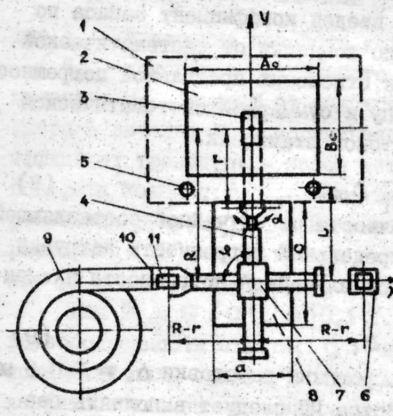


Рис.2. Схема, поясняющая компоновку РТК листовой штамповки мелких деталей
1 – пресс; 2 – штамп пресса; 3 – позиция обработки; 4 – рука ПР; 5 – направляющие колонки пресса; 6 – площадка базирования приемного устройства; 7 – исполнительное устройство ПР; 8 – плита ПР; 9 – подающее устройство; 10 – площадка базирования заготовки подающего устройства; 11 – заготовка

Предельные значения точностных параметров РТК листовой штамповки определяются погрешностью загрузки заготовки в штамп и зависят от погрешности установки ТСР на координатных осях

и динамической погрешности позиционирования исполнительного устройства ПР.

Погрешность загрузки заготовки в матрицу штампа, трафарет или на направляющие штыри Δ_* определяется неточностью размеров заготовки и высотой ее загрузки. Погрешность установки ТСР определяется: неточностью базирования заготовок и деталей на площадках подающего и приемного устройств, а также неточностью установок этих площадок относительно матрицы штампа. Погрешности установки плиты ПР и площадок базирования подающего и приемного устройства ($\Delta_{вс}$) являются систематическими. Погрешность установки заготовок ($\Delta_з$ и Δ_φ) связана с неточностью изготовления заготовки и ее размещения на площадках базирования подающего и приемного устройств. Эта погрешность является случайной. Динамическая погрешность позиционирования ПР складывается из погрешности от упругой деформации исполнительного устройства (Δ_x) и ($\Delta\varphi_к$), от колебаний руки ($\Delta_л$), а также износа в кинематических парах ($\Delta_э$).

Условие обеспечения точности работы РТК листовой штамповки имеет такой вид:

$$\Delta_{вс} + (\Delta_з)(\Delta_\varphi) + (\Delta_x + \Delta\varphi_к) + \Delta_л + \Delta_э \leq \Delta_*. \qquad (7)$$

Для оценки назначения запаса по точности роботизированных комплексов листовой штамповки введен коэффициент запаса по точности. Коэффициент запаса по точности от систематической составляющей погрешности равен отношению предельной погрешности загрузки заготовки в матрицу к суммарной систематической погрешности элементов РТК листовой штамповки.

$$n_{\Delta_*} \geq 0{,}06\,\Delta_* \Big/ \sum_{i=1}^{n} \Delta_{ci}. \qquad (8)$$

Коэффициент запаса по точности от случайной составляющей погрешности равен отношению предельной погрешности загрузки заготовки в матрицу к суммарной случайной погрешности элементов РТК

$$n_\Delta \geq 0{,}3\,\Delta_* \Big/ \sum_{i=1}^{n} \Delta_i. \qquad (9)$$

При погрешности позиционирования заготовки $\Delta_* \geq \pm 0{,}5$ мм расчет исполнительного устройства ПР следует выполнять без учета упругой податливости звеньев и их колебаний, т.е. считать ПР жесткой системой.

Для обеспечения точностных параметров РТК листовой

штамповки мелких деталей допуск на позиционирование руки ПР(Δ_Y) и заготовки($\Delta_з$) на площадке подающего устройства не должен превышать 30 % от допуска базирования заготовки в штампе ($\Delta_о$), при нескомпенсированных систематических смещениях($\Delta_{зс}$), не превышающих 6 % от этого допуска (для жесткой системы исполнительного устройства ПР).

Для упругой системы исполнительного устройства ПР кроме этих допусков необходимо учитывать погрешность ПР, вызванную упругой податливостью ($\Delta_x + \Delta\varphi_к$) и колебаниями звеньев ПР(Δ_λ), которая должна быть не более 50 % от допуска на базирование заготовки в штампе ($\Delta_о$), а также погрешность $\Delta_з$, вызванную износом ($\Delta_з$) в кинематических парах ПР. Для компенсации износа необходима поднастройка ПР по упорам после 20 часов работы.

При ограниченном усилии зажима детали в схвате ПР инерционные нагрузки, действующие на перемещаемую деталь, могут вызвать ее переориентацию. В этом случае необходимо, чтобы ускорения отдельных звеньев робота не превышали допустимых значений, при которых перемещаемая деталь не теряет своей ориентации в схвате робота $\ddot{q}_{гт} \leq |M/J_x|$;

$$\ddot{q}_{зт} \leq \left| \frac{1}{m_д} \sqrt{(N\mu)^2 - m_д^2 (2\dot{q}_{гmax} q_{зmax} - q_{зт} M/J_x)^2} - \dot{q}^2_{гmax} q_{зт} \right|, \quad (10)$$

где $\ddot{q}_{гт}$ – ускорение поворота колонны на режиме торможения; $\ddot{q}_{зт}$ – ускорение радиального перемещения руки на режиме торможения; M – момент от сил трения детали о схват; J_x – момент инерции детали; N – нормальная составляющая реакции; μ – коэффициент трения; $m_д$ – масса детали; $\dot{q}_{гmax}$ – максимальная скорость поворота колонны; $\dot{q}_{зmax}$ – максимальная скорость радиального перемещения руки; $q_{зт}$ – длина участка торможения. Динамические ограничения (10) используются при проектировании специализированных ПР и их захватных устройств.

Для $\bar{P} = G/Q$; $\in [0{,}1 \ldots 0{,}04]$, где $\bar{P}$ – параметр грузоподъемности схвата; G – вес перемещаемой детали; Q – подъемная сила схвата, получена рабочая область кинематических характеристик специализированных ПР в случае ограничения по усилию зажима перемещаемой детали.

Установлено, что при проектировании ПР для процессов штамповки мелких деталей можно уменьшить время цикла за счет рационального способа совмещения движений с учетом обеспечения точ-

ностных параметров. Необходимо учитывать момент от кориолисовой силы инерции и нормальную силу инерции, которые являются силами сопротивления для соответствующих приводов. Колебания звеньев ПР увеличивают время цикла на величину времени, необходимого для затухания колебаний, до величины, определяемой погрешностью загрузки заготовки в штамп. Эти динамические характеристики специализированных ПР оказывают значительное влияние (до 35 ... 50 %)на время кинематического цикла РТК листовой штамповки.

В процессе экспериментальных исследований подтверждены и уточнены основные допущения относительно изменения скоростей перемещения звеньев, давлений в полостях пневмоцилиндров приводов, сил трения, колебаний звеньев и погрешности загрузки заготовки в штамп.

3. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОГРАММ РАБОТЫ РТК ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Сокращение цикловых потерь времени в роботизированных комплексах штамповки является основным резервом повышения в несколько раз их производительности. Для решения этой задачи создана методика оптимизации по быстродействию циклограмм работы РТК листовой штамповки мелких деталей, которая позволяет:
- образовать структуры комплексов без функциональной избыточности по отношению к конкретной операции загрузки-разгрузки прессового оборудования за счет выбора схемы ПР с рациональным числом модулей, их видом и порядком соединения;
- увеличить скорости перемещения звеньев ПР, и, в первую очередь, имеющих наибольшую цикличность за счет расчета оптимальных конструктивных параметров приводов, массовых и упругих характеристик исполнительных устройств специализированных ПР, параметров гидродемпферов, динамических нагрузок, параметров передаточных механизмов и устройств для гашения колебаний;
- совмещать движения звеньев ПР и выбрать рациональные моменты времени включения приводов с учетом ограничений в зоне штампа.

Под рациональной структурой модульного робота понимают структурную схему, обеспечивающую реализацию конкретной операции загрузки-разгрузки прессового оборудования за минимальное время. Это достигают структурной схемой без избыточных степеней

подвижности с рациональным видом и соединением кинематических пар. Условие избыточной способности модульного ПР имеет вид: $W_{Mi} > W_{Cxi}$, а условие оптимальной подвижности – вид $W_{Mi} = W_{Cxi}$, где W_M – число степеней подвижности модульного робота; W_{Cx} – число движений схвата с деталью, необходимое для наиболее производительного выполнения заданной операции. Для структурообразования цепей, имеющих минимальное число степеней свободы при отсутствии избыточности относительно заданного вида движения объекта, необходимо соблюдать условие:

$$\sum_{i=3}^{5} (i-2) P_i = W_{Cx}. \qquad (11)$$

где P_i $(i = 3, 4, 5)$ – число пар i-того класса.

Количественно влияние перемещения звена на быстродействие ПР можно оценить степенью цикличности звена в общем времени загрузки- разгрузки пресса, которая показывает, какая часть времени, затрачиваемого на смену детали, приходится на перемещения i-того звена:

$$\mu_i = \rho_i \tau_i / t_{цр}. \qquad (12)$$

где i – номер звена; ρ – число перемещений звена в цикле РТК штамповки; τ – время перемещения i-того звена.

Оптимальные параметры приводов находят из решения общей системы уравнений движения механизма ПР и уравнений, характеризующих изменения давлений воздуха в полостях пневмоцилиндров приводов (1) с учетом ограничений (2) – (4), (7) – (10).

Для специализированных ПР с одной вращательной и двумя поступательными кинематическими парами установлена зависимость быстродействия ПР от геометрических размеров приводов поворота руки (рук) и радиального перемещения при их совместной работе (рис. 3).

Расчеты выполнены при отношении площадей торцев поршня приводов $\Pi^F_x = \Pi^F_y = F_{2x,y} / F_{1x,y} = 0{,}75$; отношения эффективных площадей отверстий для выхода и входа воздуха в пневмоцилиндры $\omega^f_x = \omega^f_y = f^э_{2x,y} / f^э_{1x,y} = 1$; диаметрах входных отверстий пневмоцилиндров $d_x = d_y = 2$ мм.

При увеличении диаметра пневмоцилиндра (D_x) по координате поворота (X) происходит уменьшение времени обработки координаты X. Появляется первый минимум, затем происходит увеличение времени перемещения, что вызвано действием момента кориолисовой

М498138

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

силы инерции как момента сопротивления. При дальнейшем увеличении диаметра D_x время перемещения t_x по координате X увеличивается еще в большей степени, т.к. увеличение D_x не приводит к возрастанию движущей силы этого привода из-за запирания, связанного с постоянством диаметра входного отверстия d_x и возрастанием вредного объема полости наполнения. Уменьшение диаметра пневмоцилиндра $D_ц$ по координате радиального перемещения руки приводит к резкому уменьшению времени перехода по координате X. Это связано с уменьшением инерционности перемещаемой массы и момента от кориолисовой силы инерции.

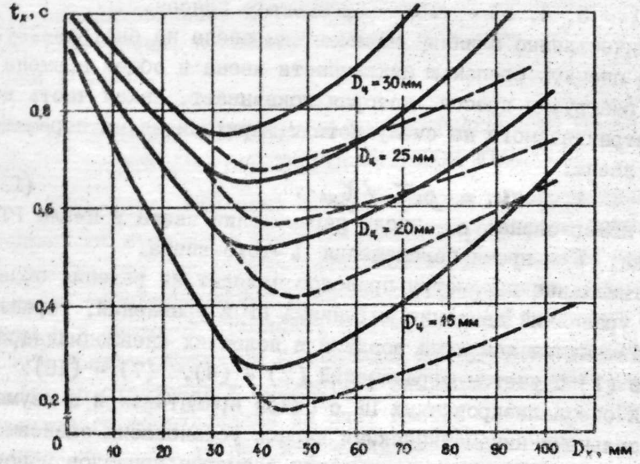


Рис. 3. Влияние конструктивных параметров приводов специализированных ПР на его быстродействие

Пневматические исполнительные устройства ПР наряду со многими достоинствами имеют неудовлетворительные динамические характеристики. Динамические характеристики зависят от величины ведомых масс привода и характера изменения скоростей движения звеньев на режимах трогания с места, разгона и торможения. Используя в приводах ПР кулисно-рычажные и мальтийские механизмы, можно увеличить в 1,5 ... 2 раза быстродействие робота при хороших динамических характеристиках. Конструкции этих устройств и специализированных ПР защищены 13 авторскими свидетельствами на изобретения.

Установлено, что повышение скоростей перемещения звеньев, имеющих наибольшую цикличность для специализированных ПР, приводит к уменьшению времени цикла РТК листовой штамповки на 30 ... 50 %.

Показано, что для типового режима работы ПР в составе комплексов листовой штамповки максимальное быстродействие однорукого ПР обеспечивается следующими условиями совмещения движений:

а) для жесткой системы механизма ПР (при погрешности позиционирования детали $\Delta_{\text{д}} \geq \pm$ 0,5 мм) режимом, при котором выдвижение руки заканчивается одновременно с поворотом колонны, что приводит к сокращению времени кинематического цикла в 1,5 ... 2 раза по сравнению с режимом последовательного перемещения звеньев ;

б) для упругой системы механизма ПР (при погрешности позиционирования детали $\Delta_{\text{д}} \leq \pm$ 0,5 мм) режимом, при котором выдвижение руки заканчивается раньше поворота колонны на величину времени, необходимого для затухания колебаний руки до величины погрешности позиционирования заготовки, что приводит к сокращению времени кинематического цикла на 15 ... 30 % по сравнению с режимом последовательного перемещения звеньев.

Аналогичные закономерности получены и для типового режима работы двурукого ПР.

Рекомендуется в качестве показателя повышения производительности РТК листовой штамповки мелких деталей использовать соотношение $\varphi_{\text{РТК}} = t_{\text{ц}min} / t_{\text{ц}max}$; при варьировании величин масс руки в диапазоне $m_{\text{р}}$ = 0,5 ... 3,0 кг и моментов инерции звеньев $J_{\text{х}}$ = 0,01 ... 0,2 кг м^2, величина $\varphi_{\text{РТК}}$ = 0,2 ... 0,5. Коэффициент $\varphi_{\text{РТК}}$ является четвертым показателем повышения производительности комплексов листовой штамповки.

Учитывая, что режим рационального по быстродействию совмещения движений колонны и радиального перемещения загружающей (выдвигающейся) и разгружающей (втягивающейся) рук соответствует одновременному началу их движений, что на практике можно весьма просто обеспечить, разработан алгоритм оптимизации по быстродействию циклограмм работы существующих РТК листовой штамповки.

Для комплекса штамповки, компонуемым ПР с одним, двумя

или тремя модулями линейных перемещений, или одним модулем углового перемещения, оптимизацию по быстродействию необходимо выполнять на основе 1-го и 2-го пунктов. Для других структурных построений комплексов штамповки оптимизацию по быстродействию необходимо выполнять с использованием всех изложенных подходов.

4. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МОДУЛЬНЫХ ПР

Методика включает: а) общий метод проектирования специализированных ПР; б) расчет параметров приводов и исполнительных устройств ПР, обеспечивающих заданное время цикла комплекса; в) расчет на жесткость пространственных устройств ПР; г) расчет параметров тормозных устройств (гидродемпферо.) .

Для модульных ПР, работающих в комплексах листовой штамповки, классифицированы траектории движения и зоны обслуживания. Получены относительные размеры перемещений модулей ПР, представленные матрицами перемещений. Для РТК листовой штамповки любого типа необходимо обеспечить от 1-ой до 7-ми условных траекторий движения схвата, что достигается 1 - 3-мя функциональными модулями угловых и линейных перемещений. Основными блоками алгоритма образования рациональных структур модульных ПР являются блоки: проверка на избыточность компоновки; проверка на достижимость; проверка на выполнение циклограмм работы и проверка на точность.

При решении прямых и обратных задач динамики ПР предлагается использовать принцип суперпозиции, т.е. определять массовые характеристики исполнительного устройства ПР, или параметры приводов для случая последовательного перемещения звеньев и корректировать их по квазиинерционным $\bar{A}_j$ и квазисиловым $\bar{B}_j$ показателям.

При проектировании ПР используют квазиинерционные и квазисиловые показатели следующим образом: 1) определяя максимальное значение квазиинерционного показателя для звена и прибавляя его к инерционности этого звена, рассчитанной для случая последовательной работы приводов, по суммарной инерционности и заданному закону движения определяют усилия в приводах и далее

их параметры, 2) определяя максимальное значение квазисилового показателя для привода и прибавляя его к усилию этого привода, рассчитанного для случая последовательной работы приводов, по суммарному обобщенному усилию находят массовые характеристики звеньев, обеспечивающие заданное время цикла ПР.

Показано, что при расчете на жесткость пространственных устройств специализированных ПР с погрешностью позиционирования $\Delta_{\text{п}} \leq \pm$ 0,5 мм необходимо учитывать динамику нагружения звеньев, которая определяет их изгибную и контактную податливости, а также колебания, на которые в сумме приходится до 50 % от погрешности РТК листовой штамповки.

Для специализированных ПР построены номограммы, позволяющие выбрать рациональные параметры гидравлических тормозных устройств, обеспечивающие минимальное время торможения и заданную точность позиционирования детали.

5. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РТК ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Методика проектирования основана на создании обобщенной информационной модели конструкций РТК листовой штамповки и алгоритма ее реализации при обеспечении высокой 20 ... 60 шт/мин. производительности и низких 3 ... 16 тыс. руб. приведенных затрат.

Для выбора рационального роботизированного комплекса штамповки создана обобщенная информационная модель конструкций РТК листовой штамповки, которая отражает их состав, структуру, экономические, динамические и конструктивные показатели.

$$M = \left\{ З_i , \quad П_i , \quad К_i \right\}_{i=1}^{n} , \qquad (13)$$

где M – конструкция РТК штамповки, состоящая из n элементов; $З_i$ – параметры, определяющие приведенные затраты на РТК штамповки; $П_i$ – показатели оценки динамических нагрузок, запаса по точности и повышения производительности; $К_i$ – параметры, определяющие конструкцию РТК листовой штамповки.

Реализация алгоритма информационной модели конструкций РТК листовой штамповки содержит два этапа.

Первый этап проектирования включает: формирование множества структур под всю номенклатуру мелких заготовок; оценкой

множества служит многообразие циклограмм и параметрических взаимосвязей между функциональными элементами; анализ структур, уменьшение их размерности и выбор рациональных структур; оценкой рациональности выбранного варианта РТК штамповки служит структура без функциональной избыточности по отношению к конкретной операции загрузки-разгрузки прессового оборудования, что и определяет наименьшие приведенные затраты при ограничениях, установленных для этого этапа проектирования.

Второй этап проектирования включает выбор рациональных параметров структуры РТК штамповки; оценкой рациональности найденных параметров служит наибольшая производительность, наименьшие приведенные затраты при удовлетворении параметрическим ограничениям, установленным для этого этапа проектирования.

На первом этапе установлена взаимосвязь между параметрами РТК штамповки, входящими в (13), т.е. $K = \{K_i\}_{i=1}^{n}$ и определены границы их изменения под всю номенклатуру мелких заготовок.

Конструкцию РТК листовой штамповки мелких деталей определяют параметры, устанавливающие взаимосвязь размеров столов прессов, размеров заготовок, перемещений модулей специализированных ПР и точности работы РТК листовой штамповки (рис. 2): параметр геометрии стола пресса $K_c = B_c / A_c = 0,66$, где B_c – размер стола спереди назад, A_c – размер стола слева направо; установочный параметр ПР относительно стола пресса слева направо $0,3 \leq K_\mu = R/A_c \leq 4,8$ и спереди назад $0,5 \leq K_\gamma = R / B_c \leq 8$, где R – наибольший вылет руки робота; параметр глубины подачи заготовки в зону штампа слева направо $0,3 \leq K_\lambda = r / A_c \leq 1,8$ и спереди назад $0,5 \leq K_\psi = \frac{R}{B_c} \leq 4$, где r – радиальное перемещение руки робота; установочный параметр ПР относительно ограничений в зоне штампа $0,7 \leq K_\ell = R - r / L \leq 1,0$, где L – расстояние от площадки базирования заготовки до ограничения в зоне штампа; параметры погрешности установки ТСР на координатных осях $\Delta_z \leq 0,3\Delta_o$ и $\Delta_\varphi \leq 0,3\Delta_o / R$, где Δ_o – предельная погрешность загрузки заготовки в штамп.

На первом шагу проектирования выбирается класс схем с минимальным временем цикла $t_{ц\,min}$, максимальной производительностью $П_{max}$ и минимальными приведенными затратами $З_{min}$. Для этого случая на первом шагу принимается ряд допущений. Время

цикла РТК штамповки принимается равным времени цикла ТР. Цикловая производительность определяется при 100 %-ной надежности оборудования. По рациональным значениям одного или нескольких представителей класса исключаются из рассмотрения остальные схемы этого класса. По всем оставшимся классам схем выполняется аналогичный поиск, что резко сужает область исследований.

На втором шагу для каждого класса схем с рациональными значениями (наибольшими или наименьшими) функций цели анализируются варианты при удовлетворении параметрическим ограничениям и с максимальным приближением их работы к реальным условиям, т.е. с учетом надежности работы оборудования и инструмента, с учетом собственных и дополнительных простоев оборудования, фактической трудоемкости обработки детали (по числу занятых на обслуживании операторов и наладчиков) и др.

Первый этап проектирования позволил образовать множество структур РТК штамповки и циклограмм их работы; классифицировать комплексы по числу операций, необходимых для изготовления детали на однооперационные (23 структурные схемы), двухоперационные (12 структурных схем), трехоперационные (11 структурных схем), а также комплексы многопереходной штамповки; установить связь между параметрами прессов и ТСР и определить время цикла.

Первый этап проектирования РТК штамповки (рис. 4 а,б,в) позволил определить параметры (приведенные затраты, производительность и число модулей в комплексе) для однооперационных (область 1), двухоперационных (область 2)и трехоперационных (область 3) РТК листовой штамповки (рис. 4. а,б,в). Нижняя граница областей 1, 2, 3 определяет рациональную структурную схему (схемы) комплексов штамповки, т.е. их состав, структуру, установочные и точностные параметры.

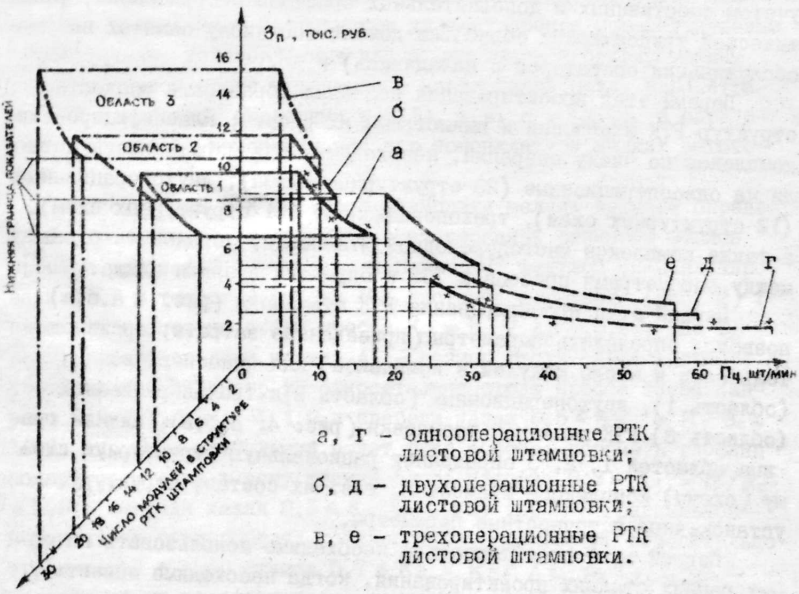
Первый этап проектирования необходимо использовать на самых ранних стадиях проектирования, когда необходимо оценить множество вариантов структур и выбрать рациональный по приведенным затратам.

Второй этап включает структурный, кинематический и динамический синтез выбранной схемы. Основными блоками алгоритма являются блоки: проверка на достижимость и функциональную избыточность; проверка на выполнение циклограммы работы; проверка на динамические нагрузки; проверка на допускаемые ускорения

перемещения звеньев ПР; проверка на обеспечение точностных параметров РТК штамповки; проверка на обход препятствий в зоне штампа; проверка на производительность.

На втором этапе проектирования для этих схем установлены рациональные значения установочных, конструктивных, точностных и динамических параметров ПР и РТК штамповки, обеспечивающие их наибольшую производительность и наименьшие приведенные затраты.

В результате второго этапа проектирования определены рациональные значения параметров, позволяющие сконструировать комплексы штамповки с характеристиками, приведенными на рис. 4.



а, г – однооперационные РТК листовой штамповки;

б, д – двухоперационные РТК листовой штамповки;

в, е – трехоперационные РТК листовой штамповки.

Рис. 4. Показатели эффективности РТК листовой штамповки : а, б, в – 1-ый этап проектирования; г, д, е – II-ой этап проектирования

Реализация алгоритма обобщенной информационной модели конструкций РТК листовой штамповки мелких деталей показала:
– во всех типах РТК листовой штамповки при ограничениях в зоне штампа и на усилия зажима перемещаемой в схвате ПР заготовки,

оптимизация процесса загрузки-разгрузки прессового оборудования в режиме последовательной работы приводов ПР приводит к сокращению времени кинематического цикла комплекса на 30 % (Рис. 4 г,д,е - сплошные кривые); оптимизация процесса загрузки-разгрузки оборудования при отсутствии ограничений приводит к сокращению времени кинематического цикла комплекса на 60 % (Рис. 4 г,д,е - пунктирные кривые);

- оптимизация процесса загрузки-разгрузки оборудования в РТК листовой штамповки мелких деталей в режиме совместной работы приводов ПР и наличии ограничений приводит к уменьшению времени кинематического цикла комплекса на 50 % (Рис. 4 г,д,е - сплошные кривые) ; оптимизация процесса загрузки-разгрузки оборудования при отсутствии ограничений приводит к уменьшению времени кинематического цикла комплекса на 80 % (Рис. 4 г,д,е - пунктирные кривые).

6. МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЦИКЛОВОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РТК ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РТК ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Методология повышения цикловой производительности роботизированных листоштамповочных комплексов основана на выявленных закономерностях между производительностью, точностью их работы и динамикой специализированных ПР и оптимизации процесса загрузки-разгрузки прессового оборудования.

В соответствии с методологией разработаны методики, позволяющие:

- оптимизировать по быстродействию кинематические циклограммы работы однооперационных и многооперационных роботизированных комплексов штамповки;
- проектировать специализированные модульные ПР с пневмоприводом и ЦПУ, оптимальные по быстродействию и точности позиционирования;
- проектировать рациональные РТК листовой штамповки с высокой производительностью и низкими приведенными затратами.

Экономический эффект от внедрения результатов работы определяется:

- повышением цикловой производительности РТК листовой штамповки

за счет выбора рациональных структурно-компоновочных схем и их оптимальных параметров;
- сокращением трудоемкости проектирования при выборе параметров технических средств роботизации и структур РТК листовой штамповки;
- повышением цикловой производительности РТК листовой штамповки за счет оптимизации циклограмм их работы.

Результаты работы использовались при создании РТК листовой штамповки мелких деталей на Рыбинском приборостроительном заводе. Комплексная методика проектирования высокопроизводительных РТК листовой штамповки внедрена в Рыбинском ОКБ "Старт". Программа машинного проектирования специализированных ПР с пневмоприводом, оптимальных по быстродействию и точности, внедрена в НИИ "Импульс" г. Москва и Рыбинском ОКБ "Старт". Она использовалась при разработках серийных роботов РФ-202М, РФ-201М, РФ-204М.

Экономический эффект от использования результатов работы в промышленности за 1980-89 г.г. составил 445 тыс. руб.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ состояния и перспектив повышения эффективности листоштамповочного производства показал, что одним из путей повышения производительности и уменьшения приведенных затрат является повышение цикловой производительности роботизированных листоштамповочных комплексов мелких деталей.

Данное положение реализовано в работе путем создания методологии повышения цикловой производительности РТК листовой штамповки, основанной на выявленных закономерностях между производительностью, точностью их работы и динамикой специализированных ПР, оптимизации процесса загрузки-разгрузки прессового оборудования и совершенствовании их функциональных параметров.

2. Разработана динамическая модель роботизированных листоштамповочных комплексов; выбраны показатели оценки динамических нагрузок, действующих на приводы и звенья специализированных ПР, запаса по точности роботизированных комплексов штамповки и повышения их цикловой производительности; разработан

алгоритм и действующие программы расчета на ЭВМ параметров специализированных ПР с пневмоприводом и ЦПУ, а также параметров процесса загрузки-разгрузки оборудования в РТК листовой штамповки.

Рекомендуется при проектировании специализированных ПР и РТК листовой штамповки мелких деталей использовать следующие допускаемые значения показателей: для инерционных и силовых нагрузок специализированных ПР – $\bar{A}_j = 0 \ldots 0,5$; $\bar{B}_j = 0 \ldots 2$; запаса по точности РТК листовой штамповки – $n_\Delta = 1,1 \ldots 1,2$; повышение производительности – $\varphi_{РТК} = 0,2 \ldots 0,5$. Установлено, что точностные параметры РТК листовой штамповки определяются погрешностью установки ТСР на координатных осях $\Delta_{уз} \leq 0,3\,\Delta_з$ и динамической погрешностью ПР $\Delta_д \leq 0,5\,\Delta_з$. При погрешности загрузки заготовки в штамп $\Delta_з \geq \pm 0,5$ мм не следует учитывать динамическую погрешность ПР, что сокращает трудоемкость создания комплексов штамповки и увеличивает их производительность ~ 30 %.

3. Разработана методика оптимизации по быстродействию циклограмм работы РТК листовой штамповки, позволяющая:

– образовать рациональные структуры специализированных ПР и РТК листовой штамповки без функциональной избыточности по отношению к конкретной операции загрузки-разгрузки пресса;

– повысить скорости перемещения звеньев специализированных ПР, и, в первую очередь, имеющих наибольшую цикличность;

– рационально совмещать движения звеньев ПР и выбрать моменты времени включения приводов с учетом обхода препятствий в зоне штампа.

Показано, что модульное построение роботизированных листоштамповочных комплексов без функциональной избыточности сокращает приведенные затраты и повышает их производительность на 20 ... 30 %.

Основным резервом повышения скоростей перемещения звеньев специализированных ПР в 1,5 ... 2 раза является применение в модулях роботов оригинальных конструкций кулисно-рычажных и мальтийских механизмов.

Установлено, что выбор рациональных моментов времени включения приводов специализированных ПР сокращает время цикла РТК листовой штамповки на 20 ... 30 % по сравнению с режимом

одновременного включения приводов.

4. Разработана методика проектирования оптимальных по быстродействию специализированных модульных ПР для листовой штамповки, которая базируется на полученных показателях и параметрических ограничениях и позволяет:

- выполнить оптимизационный синтез специализированных ПР с пневмоприводом;

- рассчитать параметры приводов и исполнительных устройств специализированных ПР, обеспечивающие заданное время цикла на основе квазиинерционных и квазисиловых показателей;

- рассчитать на жесткость пространственный механизм ПР;

- выбрать параметры тормозных устройств (гидродемпферов) специализированных ПР.

Установлено, что при проектировании специализированных ПР с погрешностью позиционирования $\Delta_{\text{п}} \geq \pm$ 0,5 мм (жесткая система) целесообразно использовать квазиинерционные и квазисиловые показатели, что позволяет уменьшить размерность задачи и осуществить выбор рациональных параметров пневмоприводов и исполнительного устройства из условия совмещения движений звеньев и обеспечения заданного быстродействия.

Показано, что при расчете на жесткость пространственных исполнительных устройств ПР с погрешностью позиционирования $\Delta_{\text{п}} \leq \pm$ 0,5 мм необходимо учитывать динамику нагружения звеньев, которая определяет их изгибную и контактную податливости, а также колебания, на которые приходится до 50 % суммарной погрешности РТК штамповки.

5. Разработана методика проектирования высокопроизводительных РТК листовой штамповки с низкими приведенными затратами, позволяющая:

- формировать множество структур РТК листовой штамповки под всю номенклатуру мелких заготовок, выполнить анализ структур и выбрать рациональные структуры РТК штамповки по показателю наименьших приведенных затрат;

- создать информационную модель конструкций РТК листовой штамповки и алгоритм расчета рациональных параметров, обеспечивающих наибольшую производительность и наименьшие приведенные затраты.

Установлены зависимости между производительностью,

приведенными затратами и числом модулей в структуре РТК листовой штамповки, позволяющие определять рациональные показатели и параметры роботизированных комплексов штамповки как на ранних, так и на заключительных стадиях проектирования.

Реализация алгоритма информационной модели конструкций РТК листовой штамповки показала, что оптимизация процесса загрузки-разгрузки прессового оборудования и совершенствование их функциональных параметров позволяет увеличить их цикловую производительность в 2 и более раз и сократить приведенные затраты в 2 раза.

6. Разработанная методология повышения цикловой производительности РТК листовой штамповки внедрена:

- в проектных организациях ОКБ "Старт" г. Рыбинск и НИИ "Импульс" г. Москва в виде методики, руководящих материалов по созданию высокопроизводительных РТК листовой штамповки и технических средств роботизации к ним;

- в производстве, при долевом участии с ОКБ "Старт" г. Рыбинск, в виде новых конструкций специализированных ПР с повышенным в 1,5 ... 2 раза быстродействием и комплексов штамповки с повышенной в 2 ... 3 раза производительностью и уменьшенными в 2 раза приведенными затратами.

Экономический эффект от использования результатов работы за 1981 - 89 г.г. составил 440 тыс. руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Семенов Е.И., Кравченко Н.Ф. Робототехнологические комплексы для листовой штамповки мелких деталей -М.: Машиностроение, 1989.- 288 с.

2. Кравченко Н.Ф. Пути повышения производительности роботизированных технологических комплексов листовой штамповки // Тр. ВНИИТЭМР. Сер.- Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства.- 1989.- Вып 1.- 48 с.

3. Кравченко Н.Ф. Методы проектирования и повышения производительности РТК листовой штамповки мелких деталей // Тр. ВНИИТЭМР. Сер.- Технология и оборудование кузнечно-штамповочного производства.- 1989.- Вып 5.- 56 с.

4. Кравченко Н.Ф. Типовые приемные и подающие устройства

для РТК // Механизация и автоматизация производства.- 1986.- № 10.- С. 13-15.

5. Кравченко Н.Ф. Исследование механизма манипулятора с помощью скоростной киносъемки // Экспериментальное исследование и диагностирование роботов - М.: Наука. 1981.- С. 116-123.

6. Кравченко Н.Ф. Расчет промышленных роботов // У1 Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике: Тез.докл. - Ташкент, 1986.- С. 379.

7. Кравченко Н.Ф. Метод расчета на жесткость сверхлегких промышленных роботов // Вестник машиностроения.- 1986.- № 1.- С. 9-12.

8. Кравченко Н.Ф. Выбор оптимальных технологических схем промышленных роботов модульной конструкции // Вестник машиностроения.- 1986.- № 11.- С. 3-7.

9. Архипенко Н.А., Кравченко Н.Ф., Смирнов Ю.В. Автоматический комплекс штамповки с двуруким манипулятором // Механизация и автоматизация производства.- 1982.- № 3.- С. 3-5.

10. Архипенко Н.А., Кравченко Н.Ф. Методика выбора структуры роботизированной системы штамповки // Кузнечно-штамповочное производство.- 1984.- № 1.- С. 34-36.

11. Архипенко Н.А., Кравченко Н.Ф., Мельников А.В. Оптимизация движения автоматического манипулятора по быстродействию с учетом упругости выходного звена // Вестник машиностроения.- 1983.- № 1.- С. 17-19.

12. Архипенко Н.А., Кравченко Н.Ф. Оптимизация по быстродействию движений двурукого промышленного робота выбором релейного управления // Вестник машиностроения.- 1985.- № 2.- С. 29-31.

13. Архипенко Н.А., Кравченко Н.Ф. Исследование быстродействия промышленного робота // Станки и инструмент.- 1984.- № 6.- С. 11-13.

14. Архипенко Н.А., Кравченко Н.Ф. Оптимизация движений звеньев промышленного робота при ограничениях в рабочей зоне пресса // Прогрессивная технология приборостроения.- 1983.- С. 87-95.

15. Воробьев Е.И., Кравченко Н.Ф. Выбор параметров пневмоприводов манипуляторов // Изв. ВУЗов. Машиностроение.- 1981.- № 2.- С. 34-35.

16. Варенцов В.В., Кравченко Н.Ф., Потеев М.И. Моделирование на ЭВМ системы автоматизированного проектирования промышленных роботов // Вестник машиностроения.- 1981.- № 5.- С.25-27.

17. Кравченко Н.Ф., Мельников А.В., Поляков Ю.Б. Типовой комплекс изготовления деталей с автоматическим манипулятором //Механизация и автоматизация производства.- 1978.- № 11 .- С. 8-9.

18. Кравченко Н.Ф., Леонов В.Н., Романский Ю.З. Вопросы разработки и создания робототехнологического комплекса для процессов холодной штамповки деталей // Промышленные роботы и их применение : Материалы семинара ЛДНТП.- 1976.- С. 13-14.

19. Кравченко Н.Ф. РТК для автоматизации подачи заготовок штамповочному оборудованию // Автоматизация технологических и производственных процессов.- Ярославль.- 1978.- Вып. 2.- С. 35-38.

20. Кравченко Н.Ф. Математическая модель манипулятора с пневмоприводом // Проектирование механизмов и динамика машин.- 1979.- Вып. 13.- С. 118-125.

21. Кравченко Н.Ф., Поляков Ю.Б. Допускаемые ускорения звеньев манипулятора при ограниченном усилии зажима детали // Изв. ВУЗов, Машиностроение.- 1980.- № 6.- С. 44-48.

22. Гуревич А.И., Кравченко Н.Ф. Расчет точности позиционирования ПР и расположения средств РТК // Механизация и автоматизация производства.- 1988.- № 6.- С. 8-10.

23. Кравченко Н.Ф. Рациональные параметры модулей РТК листовой штамповки // Вестник машиностроения.- 1987.- № 9.- С. 25-27.

24. Кравченко Н.Ф., Поляков Ю.Б. Использование квазиинерционных и квазисиловых показателей при проектировании ПР // Вестник машиностроения.- 1989.- № 12.- С. 8-10.

25. А.с. 831608 СССР, М.Кл^3. В 25J11/00. Манипулятор /Н.Ф. Кравченко, В.М.Абрамов (СССР).- № 274706/25-08. Опубл.23.05.81, бкл. № 19 // Открытия. Изобретения.- 1981.- № 19.

26. А.с. 867607 СССР, М.Кл^3. В 23Q7/04. Автооператор/Н.Ф. Кравченко, В.М.Абрамов, А.Б.Литван (СССР).- № 2914265/28-12. Опубл. 15.03.82, бкл. № 10 // Открытия. Изобретения.- 1981, - № 36.

27. А.с. 905553 СССР, М.Кл^3. F 16 H 27/06 B 23Q7/04. Маль-

тийский механизм автооператора / Н.Ф.Кравченко, В.М.Абрамов, А.В.Мельников, А.Б.Литван (СССР).- № 2935345/25-28. Опубл. 15.02.82, бюл. № 6 // Открытия. Изобретения.- 1982.- № 6.

28. А.с. 963851 СССР, М.Кл^3. В 25J15/00. Захват манипулятора / Н.Ф.Кравченко, Ю.Б.Поляков, А.Л.Безруков, А.В.Мельников, Н.А.Архипенко (СССР).- № 3257509/25-08. Опубл. 07.10.82, бюл. № 37 // Открытия. Изобретения.- 1982.- № 37.

29. А.с. 912308 СССР, М.Кл^3. В 07С5/02. Устройство для сортировки и кассетирования миниатюрных деталей / Н.Ф.Кравченко, А.С.Гладкой, О.А.Тишинов, А.И.Юматов, И.Н.Шустов (СССР).- № 2914265/28-12. Опубл. 15.03.82, бюл. № 10 // Открытия. Изобретения.- 1982.- № 10.

30. А.с. 1227848 СССР, МКИ^3 F 16 F 7/10. Способ гашения колебаний системы / Н.Ф.Кравченко, Н.А.Архипенко Ю.Б.Поляков, А.В.Румянцев (СССР).- № 3596402/25-28. Опубл. 30.04.86, бюл. № 16 // Открытия. Изобретения.- 1986.- № 16.

31. А.с. 1073090 СССР, МКИ^3 В 25J11/00. Манипулятор/Н.Ф. Кравченко, Н.А.Архипенко, Н.В.Гулиа, И.Д.Юдовский (СССР).- № 3520345/25-08. Опубл. 15.02.84, бюл. № 6 // Открытия. Изобретения.- 1984.- № 6.

32. А.с. 918083 СССР, М.Кл^3. В 25J11/00. Манипулятор / Н.Ф.Кравченко, В.М.Абрамов, Н.А.Архипенко, А.В.Мельников, А.Б.Литван (СССР).- № 2902222/25-08. Опубл. 07.04.82, бюл. № 13 // Открытия. Изобретения.- 1982.- № 8.

33. А.с. 1271740 СССР, МКИ^3 В 25J11/00. Манипулятор/Н.Ф. Кравченко, Б.П.Семенов (СССР).- № 3800056/25-08. Опубл. 23.11.86, бюл. № 43 // Открытия. Изобретения.- 1986.- № 43.

34. А.с. 1227463 СССР, МКИ^3 В 25J15/00. Манипулятор/Н.Ф. Кравченко, Б.П.Семенов (СССР).- № 3810557/25-08. Опубл. 30.04.86, бюл. № 16 // Открытия. Изобретения.- 1986.- № 16.

Справ