

использовать: плоскую модель автомобиля с вертикально расположенными шкворнями, расстояние между центрами которых – шкворневая колея; новую методику расчета параметров рулевой трапеции с применением множества Парето; программный продукт «MTZRT-5», созданный впервые для оптимизации параметров различных конструкций рулевых трапеций – шестизвенной симметричной, шестизвенной несимметричной, четырехзвенной симметричной передней и задней рулевой трапеции, шестизвенной симметричной рулевой трапеции с сошкой.

Обоснование методики, методику, программный продукт «MTZRT-5» и результаты многокритериальной оптимизации параметров различных конструкций рулевых трапеций необходимо внедрить в учебный процесс технических вузов по дисциплинам «Теория мобильных машин», «Конструирование и расчет деталей автомобилей», «Методы одно – и многокритериальной оптимизации параметров машин».

ЛИТЕРАТУРА

1. Чудаков, Е.А. Теория автомобиля / Е.А. Чудаков // – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 462 с.

УДК 621.91.04

Данилов В.А.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Рассмотрены универсальные пути рационального построения кинематики формообразующих систем станочного оборудования для обработки сложных поверхностей на этапе его функционального проектирования с учетом взаимосвязи компонентов способа обработки. Дана характеристика уровней функционального проектирования, показана значимость соответствующих им решений при разработке формообразующей системы станка. Отражены пути интенсификации процессов обработки, реализуемые при проектировании станка. Представлена последовательность синтеза его кинематической схемы, основанная на результатах концептуального и системно-структурного проектирования.

Введение. Сложные поверхности широко применяются в конструкциях деталей машин и приборов, режущих инструментов. Основным методом обеспечения требуемой их точности является формообразование резанием. Техничко-экономические показатели способов обработки изделий со сложными поверхностями обычно ниже, чем деталей простой геометрической формы, поэтому актуальной является проблема интенсификации процессов обработки сложных поверхностей. Из возможных направлений ее решения важная роль принадлежит функциональному проектированию, определяющему технический уровень станочного оборудования, его соответствие современным требованиям.

Многообразие возможных способов обработки любой поверхности обуславливает необходимость разработки общих путей синтеза эффективных технологий формообразования, включающего обоснование реализуемых схем формообразования и методов обработки, структуры формообразующей системы станка, что важно для научно-обоснованного подхода к созданию прогрессивного станочного оборудования и режущих инструментов, обеспечивающих интенсификацию процессов формообразования сложных поверхностей. Ниже рассмотрены некоторые методологические аспекты решения этой задачи, исходя из известных моделей процесса проектирования [1, 2] и способа формообразующей обработки [3].

Характеристика этапов и уровней проектирования станочного оборудования.

Иерархическая модель процесса проектирования [2] включает этапы функционального и геометрического проектирования, уровни которых различаются степенями общности, абстракции и детализация, а также значимостью принимаемых при их выполнении решений.

Значимость *функционального проектирования* станочного оборудования обусловлена тем, что допущенные на этом этапе ошибки не могут быть устранены на последующих этапах его конструирования и изготовления. На концептуальном, системно-структурном и схематехническом уровнях функционального проектирования принимаются соответствующие им решения, определяющие структуру и принцип действия формообразующей системы станка.

Исходя из назначения *концептуального проектирования* [1], его основной задачей является обоснование принципа функционирования исполнительных элементов для обеспечения заданных технических характеристик создаваемого оборудования рациональным путем. Например, профилирование сложных поверхностей в общем случае может быть основано на принципе интерполяции, реализуемом различными системами ЧПУ. Недостатком метода интерполяции является приближенное (частичное) профилирование поверхности, так как траектория исполнительного движения инструмента неконгруэнтна формируемой линии, а имеет с ней лишь конечное множество общих точек, что обуславливает погрешность схемы формообразования. Поэтому для специализированных станков, например для обработки сложных поверхностей с определенным регулярным профилем, более эффективным по производительности и точности формообразования может быть простое в реализации кинематическое профилирование поверхности, осуществляемое согласованными элементарными движениями исполнительных органов станка [3,4].

Для обеспечения инновационного уровня и конкурентоспособности создаваемого оборудования принимаемый принцип функционирования его формообразующей системы может быть основан на нетрадиционных технических решениях. Например, учитывая, что траектория движения формообразования может обеспечиваться кинематическим и геометрическим методами [5], возможен переход от традиционного построения формообразующей системы станка на базе физических эталонов траекторий движений (прямолинейных, круговых и винтовых направляющих и др.) к системе с параллельной кинематикой, обеспечивающей режущему инструменту до шести степеней свободы, в результате чего достигается многофункциональность создаваемого оборудования.

Второй, *системно-структурный*, уровень функционального проектирования обеспечивает разработку структуры проектируемого объекта, в частности, кинематической подсистемы формообразующей системы станка, т.е. связей между ее компонентами, которые могут быть механическими, электромеханическими, мехатронными и иными. Здесь важно применение рациональных для конкретного случая типов связей и путей их реализации [5], в значительной мере определяющих сложность конструкции, точность и другие характеристики структурных компонентов. Результатом этого уровня проектирования является структурная схема станка, которая разрабатывается на об-

щих принципах независимо от типа функциональных связей между его компонентами [3, 6] с применением современных решений, например, модульного построения [7].

На основе структурной схемы при *схемотехническом проектировании* определяются тип, состав и основные свойства структурных компонентов, уточняются на основе структурно-параметрического анализа связи между ними. Результатом этапа являются принципиальные и функциональные схемы проектируемого оборудования (кинематические, гидравлические, пневматические, электрические и т. д.).

Последующий этап *геометрического проектирования*, включающий уровни композиционного и конструкционного проектирования, обеспечивает конкретизацию структурных и схематических решений. Важное значение для рационального построения и обеспечения универсальности станка имеет *композиционное* (компоновочное) проектирование, устанавливающее количество модулей и относительное расположение подвижных и неподвижных узлов исходя из структурной схемы станка с учетом кинематического и компоновочного факторов. Результат этапа представляется в виде структурных формул и графического изображения компоновки станка [8].

Интенсификация формообразующей обработки на этапе функционального проектирования станка. Уровень проекта в целом зависит от обоснованности решений на всех этапах проектирования, но в наибольшей степени при функциональном проектировании. Это относится, в первую очередь, к синтезу общих схем обработки и реализуемых способов формообразования поверхностей, кинематики формообразования и кинематических схем обработки, структуры формообразующих систем, выбору методов обработки и режущих инструментов. При решении этих задач важен системный подход, т.к. качественные и количественные характеристики технологии формообразования определяются в первую очередь структурой способа обработки поверхности (рис. 1) и совершенством его компонентов, к которым относятся:

– совокупность физических, химических и иных процессов, связанных с нанесением или удалением материала резанием, его поверхностно-пластическим или объемным деформированием, определяющая метод обработки;

– схема формообразования в пространстве и времени поверхности с заданными формой и размерами;

– потоки материалов, энергии и информации, формируемые посредством обрабатывающей системы.

При этом важно учитывать тенденции развития станочного оборудования, в частности, его модульное построение [3].

Выделение указанных компонентов обусловлено тем, что технологии формообразующей обработки различаются, прежде всего, видом используемой энергии, способом ее подвода, технологической средой, механизмом разрушения материала, типом инструмента, схемой срезания припуска. Указанные признаки определяют *первый компонент* способа обработки – метод (вид) обработки, например, шлифование, плазменная резка, гидроабразивная, электрохимическая и т.д. Реализуемый метод обработки выбирается на основе сравнительного анализа возможных методов, исходя из их физических возможностей [9].

Любую поверхность можно обработать одним методом, но разными комбинациями движений, сообщаемых инструменту и изделию, при различных направлениях и траекториях исполнительных движений. Так, обработка плоской поверхности торцовой фрезой возможна при сообщении заготовке относительно инструмента прямолинейной или круговой подачи. В данном случае один метод обработки (фрезерование) присущ двум различным схемам формообразования плоской поверхности, реализуемым разными станками. Следовательно, способы обработки различаются также схемами формообразования – *второй компонент* способа обработки.

Возможные схемы формообразования любой поверхности различаются взаимным расположением и направлением относительного перемещения инструмента и обрабатываемой поверхности, формой траектории этого перемещения и характеристического образа инструмента, числом инструментов и их расположением, характером обработки (многоцикловая или одноцикловая), т.е. общими схемами обработки, а также кинематикой формообразования – сочетанием и соотношением скоростей и направлений элементарных движений, сообщаемых инструменту относительно заготовки и определяющих кинематическую схему обработки. Существенное влияние общей и кинематической схем обработки на производительность и точность формообразования обуславливает необходимость их обоснования при проектировании станка [10, 11].

Кинематика формообразования поверхности определяется пространственными и временными характеристиками методов генерации её производящих линий. К пространственным характеристикам относится, в частности, форма производящих линий, а к временным – закон возникновения их во времени в смысле непрерывности. Кинематика формообразования и резания является основой кинематической схемы обработки – совокупности абсолютных элементарных движений, сообщаемых инструменту и заготовке в процессе обработки, а также делительного и установочного движений.

Принятая схема формообразования поверхности и метод обработки реализуются кинематической подсистемой формообразующей системы, представляющей *третий компонент* способа обработки (см. рис. 1).

Возможные способы обработки заданной поверхности могут различаться всеми или отдельными структурными компонентами. Данное обстоятельство с учетом разнообразных по форме обрабатываемых поверхностей обуславливает многообразие возможных способов обработки. Отсюда следует необходимость их исследования и сопоставительного анализа при синтезе или выборе рациональных для заданной поверхности с учетом технологических ограничений.

Рассматриваемая структурная модель отражает взаимосвязь основных компонентов способа обработки, влияющих на его эффективность. Например, схема формообразования поверхности, как совокупность общей схемы обработки и метода формообразования, является основой синтеза кинематической схемы обработки, определяющей структуру кинематической подсистемы формообразующей системы станка. Целенаправленное изменение каждого из входящих в указанные компоненты признаков обуславливает иные технико-экономические показатели способа обработки. Так, например, переход от полного формообразования поверхности к частичному формообразованию влечет за собой, как следует из структуры способа, модификацию его основных компонентов – схемы формообразования поверхности и формообразующей системы станка.

Целенаправленное изменение признаков структурных компонентов способа обработки является основой интенсификации процессов формообразования на этапе функционального проектирования станочного оборудования. Исходя из структуры способа обработки (см. рис. 1), общими путями интенсификации технологий формообразования, реализуемыми на стадии функционального проектирования станочного оборудования, являются [3]:

- оптимизация общей схемы обработки;
- выбор рационального распределения функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами;
- синтез рациональной кинематики формообразования и кинематической схемы обработки поверхности;
- разработка или выбор эффективного метода обработки;
- оптимизация кинематической структуры формообразующей системы станка;
- обеспечение возможности управления процессами формообразования и резания при проектировании и эксплуатации технологического оборудования.

В соответствии со структурной моделью способа формообразующей обработки синтез общих схем обработки поверхностей включает задание на основе их аналитического исследования: цикличности процесса формообразования; формы и положения производящих линий и элементарных поверхностей; характеристического образа инструмента, метода его управления, формы производящих элементов; схемы формирования элементарных поверхностей с учетом принципов совмещения процессов формообразования, многопозиционной и многоинструментальной обработки.

Необходимым является также сравнение возможных схем формообразования и выбор из них эффективной на основе зависимостей общих показателей эффективности – технологической производительности и точности формообразования от основных параметров общей схемы обработки, т.е. направления относительного перемещения инструмента и заготовки, формы характеристического образа инструмента, кинематики и цикличности процесса формообразования [3].

Основная функция формообразования – образование заданной поверхности может быть обеспечена или только кинематикой оборудования, или совместно кинематикой оборудования и инструментом или только инструментом. При выборе конкретного варианта распределения функции формообразования между инструментом и кинематикой оборудования следует учитывать, что при перенесении функции формообразования на инструмент упрощается кинематика станка, повышается его жесткость, что важно для интенсификации процесса обработки, однако усложняется форма производящих элементов инструмента и снижается его универсальность.

Важность синтеза рациональной кинематики формообразования обусловлена тем, что она, как основа кинематической схемы обработки, в значительной степени влияет на сложность кинематики, производительность и универсальность станка.

К основным принципам синтеза кинематики формообразования относятся [11]:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент;

- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов комплекса за счет исключения геометрическим или кинематическим методами реверсивных движений исполнительных органов, замены возвратно-поступательных движений вращательными;
- совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;
- введение движений для стабилизации условий резания, управления точностью формообразования, схемой или условиями резания;
- задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений;
- рациональное распределение элементарных движений между исполнительными органами комплекса для повышения его универсальности.

Современным направлением интенсификации технологий формообразования за счет применения эффективных методов обработки является использование концентрированных потоков энергии [3].

Особенностью станочного оборудования является наличие кроме потоков материалов и энергии потока информации [12]. Преобразование и перенос информации представляют две основные функции технологии формообразования, способ реализации которых во многом определяет производительность, точность, универсальность и другие характеристики *станка* и поэтому должен учитываться при построении его формообразующей системы (см. рис. 1).

Производительность формообразования при совмещении процессов преобразования и переноса информации определяется скоростью переноса информации (производительностью резания), которая зависит от подводимой мощности. Ее повышение обеспечивают источники высококонцентрированной энергии, что обуславливает актуальность создания соответствующего *технологического оборудования [3]*. Возможность практической реализации методов управления характеристическим образом инструмента должна быть обеспечена на этапе проектирования формообразующей системы.

Одной из основных задач схмотехнического проектирования станка является синтез его кинематической схемы (рис. 2), обеспечивающей реализацию общей и кинематической схем обработки поверхности.

Значимость данного этапа обусловлена тем, что на базе кинематической схемы далее на этапе геометрического проектирования разрабатываются компоновка и кинематическая подсистема формообразующей системы станка. Особенностью предлагаемого решения задачи синтеза кинематической схемы станка является использование результатов концептуального и системно-структурного проектирования в виде принятых схемы информационного преобразования, метода и общей схемы обработки, исследования геометрии заданной поверхности и структурной схемы станка.

На основе изложенного подхода разработаны формообразующие системы станков, реализующих прогрессивные схемы обработки сложных поверхностей различных изделий машиностроения [3].



Рис. 2. Этапы синтеза кинематической схемы станка

Заключение. Интенсификация процессов формообразования сложных поверхностей возможна на стадии функционального проектирования станочного оборудования на основе комплексного решения задач синтеза рациональных схем формообразования, методов их обработки и реализующих их обрабатывающей системы. Значимость функционального проектирования обусловлена тем, что допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих стадиях конструирования и производства станочного оборудования. Задачи этого этапа проектирования обусловлены структурой способа формообразующей обработки, необходимостью реализации обоснованными методами связей между его компонентами. Изменение этих компонентов или связей между ними позволяет синтезировать множество способов обработки поверхности, на основании анализа которых по критериям эффективности принимается рациональное для заданных условий решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, Г.Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков / Г.Н. Васильев. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
2. Данилов, В. А. Системный подход к проектированию способов формообразующей обработки / В.А. Данилов, В.А. Терентьев // Современные методы проектирования машин. Вып. 2, Т. 5. – 2004. – С. 84-89.

3. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ.ред. А.М. Русецкого. – Минск :Беларус. навука, 2014. – 316 с.
4. Карелин Н.М. Бескопирная обработка цилиндрических деталей / Н.М. Карелин. – М.: Машиностроение, 1966. – 187 с.
5. Данилов, В.А. Реализация функциональных связей в формообразующих системах станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 11. – С. 6-14.
6. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
7. Данилов, В.А. Модульное построение формообразующих систем при функциональном проектировании станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – №3. – С. 9-18.
8. Врагов, Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонетики) / Ю. Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
9. Этин, А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийными инструментами / А.О. Этин, М.Е. Юхвид. – М.: АО ЭНИМС, 1994. – 185 с.
10. Данилов, В.А. Синтез рациональных общих схем обработки при проектировании станков / В.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2011. – №11. – С. 89-96.
11. Данилов, В.А. Методологические основы синтеза кинематики формообразования и кинематических схем обработки при функциональном проектировании станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2012. – №3. – С. 2-10.
12. Смирнов, А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении / А.И. Смирнов. – М.: НИИМаш, 1982. – 49 с.

УДК 621.9.011:517.962.1

Довнар С.С.

МКЭ-ОЦЕНКА КОНЦЕПЦИИ СТАЛЕБЕТОННОГО НАРУЖНОГО УСИЛЕНИЯ КОЛОНН СВЕРХТЯЖЕЛЫХ СТАНКОВ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Предложена концепция наружного сталебетонного усиления (СБУ) колонн и стоек станков. Она заключается в вынесении оробрения колонн изнутри наружу и в заполнении получившихся кессонов бетоном или полимербетоном. Это технологично для стальных сварных корпусов. Концепция оценена виртуальными испытаниями с помощью МКЭ.

Проведены статические, модальные и гармонические МКЭ-расчеты для многоцелевого станка типа «Travellingcolumn». Испытаны варианты с одинарной и двойной колоннами. Наружное оробрение и бетонирование (НОБ) увеличивает жесткость стальных и чугунных колонн в статике до 1,83 раза. В динамике опасен крутильный резонанс (32 – 56 Гц). НОБ моно-колонны ослабляет его только до 1,53 раза. Этого мало для стабильной обработки вблизи резонанса.

Обсужден подход «допустимости всех резонансов» в рабочем диапазоне частот станка (от 0 до ~100 Гц). Для соответствия подходу сталебетонное наружное усиление надо производить на двойной колонне. Динамическая жесткость оказывается не ниже 28,5 Н/мм даже на резонансах. Срыв в автоколебания и неустойчивость резания предупреждается. Концепция сталебетонного усиления рекомендуется как недо-