

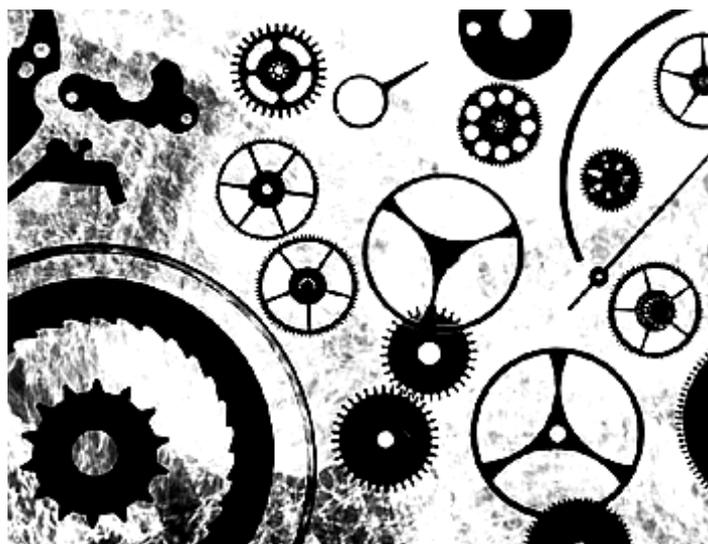
Министерство образования и науки Российской Федерации
Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский технологический
университет»

О.А. Маркова

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

ТЕОРИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Нижекамск
2013

УДК 539.3
М 25

Печатается по решению редакционно-издательского совета Нижнекамского химико-технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

Рецензенты:

Приданцев А.С., кандидат технических наук, доцент;
Макусева Т.Г., кандидат педагогических наук, доцент.

Маркова, О. А.

М 25 Прикладная механика. Теория машин и механизмов : учебное пособие / О.А. Маркова. – Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013. - 80 с.

В учебном пособии по разделу Прикладной механики «Теория машин и механизмов» изложены основные вопросы теории механизмов, изучены свойства отдельных типов механизмов, широко применяемых в машинах, приборах и устройствах. В работе приведены структурные, кинематические, динамические анализы и синтезы механизмов. Теория подкреплена практическими примерами. Материал изложен с учетом новых ГОСТов.

Пособие предназначено для студентов заочного отделения технического направления, обучающихся в учреждениях высшего профессионального образования по программам бакалавриата.

Подготовлено на кафедре «Машины и аппараты химических производств» НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

УДК 539.3

© Маркова О.А., 2013

© Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013

1. ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

Выпускник технического вуза, профилирующийся в какой-либо области производства или науки, должен знать о возможностях, достоинствах и недостатках механических устройств, которые получили очень широкое применение в современной индустрии.

Целью освоения дисциплины «Прикладная механика» является изучение основных разделов технической механики, освоение математических методов исследований механических систем и создание у студентов научной базы для последующего изучения общих и специальных дисциплин

Задача дисциплины в освоении решений задач, связанных с вопросами исследования, анализа и расчета механических систем.

1.1. Основное содержание и задачи дисциплины

Дисциплина *«Прикладная механика»* входит в раздел общепрофессиональных дисциплин федерального компонента (ОПД.Ф.10). Для освоения дисциплины необходимо знать: высшую математику, физику, инженерную графику (Табл. 1), информатику, теоретическую механику, а также численные методы расчетов.

Для усвоения теоретических и практических основ прикладной механики у студента должны быть сформированы когнитивные компетенции:

- способность к самоорганизации в процессе обучения;
- обладание умениями и навыками к использованию источниками для сбора, обработки и анализа информации;
- способность и умение использовать компьютер и иные средства коммуникативного назначения для поиска необходимых данных;
- способность коммуницировать в группе;
- социально-личностные;
- способность участвовать в опытно-экспериментальных работах.

Таблица 1. *Входные показатели*

<i>Наименование дисциплин</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Входные знания, умения и навыки</i>
Математика	ОК-1 ОК-2 ОК-6 ОК-9 ОК-10	<i>Знание</i> основных понятий и методов математического анализа, математических методов решения профессиональных задач. <i>Умение</i> применять математические методы при решении типовых профессиональных задач. <i>Владение</i> методами построения математической модели типовых профессиональных задач и содержательной интерпретации полученных результатов.
Физика	ОК-1 ОК-2	<i>Знание</i> законов Ньютона и законов сохранения. <i>Умение</i> использовать физические законы при анализе и решении проблем профессиональной деятельности.
Инженерная графика	ОК-1 ОК-2	<i>Знание</i> принципов графического изображения деталей. <i>Умение</i> выполнять эскизы и чертежи деталей при наличии ее натурального образца.

Изучение дисциплины «Прикладная механика» следует непосредственно за курсом теоретической механики и включает в себя следующие разделы: сопротивление материалов и основы конструирования машин и механизмов, теорию механизмов и машин, основы теории прочности, детали машин и основы метрологии, стандартизации и сертификации и др..

Краткое содержание некоторых из них:

- В разделе *«Сопротивление материалов»* на основе упрощений и допущений излагаются инженерные методы расчета элементов конструкций на прочность, жесткость и устойчивость с соблюдением двух основных принципов - надежности и экономичности.

- В *«Теории машин и механизмов»* изучаются вопросы преобразования механического движения, происходящего в машинах и механизмах, рассматриваются структурные формулы механизмов, проводится их структурный, кинематический, динамический анализы и синтеза.

- В разделе *«Детали машин»* рассматриваются основные этапы проектирования и конструирования деталей, узлов машин и механизмов, приборов и аппаратов. Изучаются оси, подшипники, упругие элементы и муфты, анализируются их расчеты, а также факторы, влияющие на их прочность и выносливость.

- *«Основы проектирования и конструирования»* предлагают особенности проектирования изделий: виды изделий, требования к ним, стадии разработки, механические свойства конструкционных материалов.

- *«Основы теории прочности»* излагают принципы инженерных расчетов: расчетные модели геометрической формы, материала и предельного состояния, типовые элементы изделий.

- *«Основы метрологии и стандартизации»* знакомят студентов с понятием «стандарты», с процессом установления и применения их. Стандартизация в области деталей и узлов машин охватывает материалы, из которых они изготовлены, геометрические параметры (диаметры валов, осей и отверстий, форму и размеры резьбы, различных соединений и т.д.), нормы точности, правила выполнения и оформления чертежей.

Разделы дисциплины тесно связаны между собой и все они направлены на то, чтобы понять работу какой-либо машины, ее устройство, из каких материалов и элементов она состоит и как эти элементы взаимодействуют.

«Википедия» (свободная энциклопедия) предлагает следующие трактовки дисциплины и ее разделов:

- Прикладная механика - техническая наука, посвященная исследованиям устройств и принципов механизмов, занимается также изучением и классификацией машин, их разработкой.

- Прикладная механика состоит из четырех основных разделов. В первом рассматриваются общие черты теории механизмов; второй раздел посвящен основам сопротивления материалов (динамика и прочность инженерных конструкций); третий раздел посвящен вопросам проектирования наиболее распространенных механизмов (кулачковых, фрикционных и зубчатых); четвертый посвящен деталям машин и механизмов.

1.2. Вклад великих ученых в развитие механики

Механика - одна из старейших отраслей наук, является важнейшим разделом естествознания, фундаментом многих технических дисциплин. Известно, например, что еще при строительстве египетских пирамид использовались простейшие механизмы, а именно рычаги, катки, блоки и т.п.. Потребность в систематизированных трудах по механике появилась в XVII в., когда накопился обширный фактический материал решения конкретных задач о движении тел. В начале XIX века прикладная, или, как тогда говорили, «практическая» механика как наука о машинах и других конструкциях выделилась из теоретической механики в самостоятельную отрасль. Это было связано с расцветом машинного способа производства и бурным ростом производительных сил в обществе. Начиная с древних мыслителей, многие изобретатели создавали фундамент машиностроения, который и явился основой дальнейшего развития всех областей механики.

Большой вклад в развитие механики внесли:

- *Архимед* (около 287-212 гг. до н.э.) - древнегреческий ученый, математик и механик, основоположник теоретической механики и гидростатики. Основное понятие статики (понятие силы) вначале тесно связывалось именно с мускульным усилием, вызванным давлением предмета на руку. Примерно к началу IV в. до н. э. уже были известны простейшие законы сложения и уравнивания сил, приложенных к одной точке

вдоль одной и той же прямой. Теория рычага была создана Архимедом. Им были установлены правила сложения и разложения параллельных сил, дано определение понятия центра тяжести системы двух грузов, подвешенных к стержню, и выяснены условия равновесия такой системы. Архимеду же принадлежит открытие основных законов гидростатики. Свои теоретические познания в области механики он применял к различным практическим вопросам строительства и военной техники, ему принадлежит множество технических изобретений (архимедов винт, определение состава сплавов взвешиванием в воде, системы для поднятия больших тяжестей, военные метательные машины). Понятие момента силы, играющее основную роль во всей современной механике, в скрытом виде уже имеется в законе Архимеда.

- *Ктесибий* (около II-I вв. до н. э.) - древнегреческий изобретатель-механик из Александрии. В III в. до н.э. начал развиваться раздел механики - пневматика, основателем этой отрасли считают *Ктесибия*. Он был создателем пожарного двухцилиндрового водяного насоса, снабженного всасываемыми наполнительными клапанами; водяного органа; водяных часов; военных метательных машин, использовавших силу сжатого воздуха и т. п..

- *Леонардо да Винчи* (1452-1519 гг.) - великий итальянский ученый, живописец, вводил представление о плече силы под видом «потенциального рычага». Леонардо изучал сопротивление материалов, увлеченно занимался гидравликой, его страсть к моделированию приводила ученого к поразительным техническим предвидениям: таковы наброски проектов металлургических печей и прокатных станов, ткацких станков, печатных, деревообрабатывающих и прочих машин, подводной лодки и танка, а также удивительные, разработанные им конструкции летательных аппаратов и парашюта.

- Великий польский астроном *Николай Коперник* (1473-1543 гг.). Его учения были обращены, главным образом, на уточнение представлений о неравномерном и криволинейном движении точки. До этого времени общепринятыми были не соответствующие действительности динамические воззрения *Аристотеля* (384-322 гг. до н.э.), изложенные в его «Проблемах механики».

- *Гвидо Убальди* (1545-1607 гг.) - итальянский механик. В своей теории блоков, где было введено понятие полиспафта (полиспафт - это система подвижных и неподвижных блоков, огибаемых канатом) он применяет и понятие момента.

- *Галилео Галилей* (1564-1642 гг.) - итальянский ученый, один из основателей точного естествознания. Боролся против схоластики, считал основой познания опыт. Заложил основы современной механики: выдвинул идею об относительности движения, установил законы инерции, свободного падения и движения тел по наклонной плоскости, сложения движений; открыл изохронность колебаний маятника; первым исследовал прочность балок и сопротивления жидкости движущимся в ней телам.

- *Рене Декарт* (1596-1650 гг.) - французский геометр и философ. Он высказал плодотворную идею сохранения количества движения. Количественную характеристику движения Декарт выводит, рассматривая процесс соударения двух равновеликих тел, в результате которого происходит обмен скоростями, само движение сохраняется.

- Голландский ученый *Христиан Гюйгенс* (1629-1695 гг.) последователь Галилея в области механики. Ему принадлежит дальнейшее развитие понятий ускорения при криволинейном движении точки. Гюйгенс первый сформулировал понятия центростремительной и центробежной сил, момента инерции, центра колебания физического маятника. Но основная его заслуга состоит в том, что он первый применил принцип, по существу эквивалентный принципу живых сил (центр тяжести физического маятника может подняться только на высоту, равную глубине его падения).

- *Исаак Ньютон* (1643-1727 гг.) - английский математик, механик, астроном и физик, создатель классической механики, член и президент (с 1703 г.) Лондонского королевского общества. Окончательная формулировка законов классической механики принадлежит Ньютону. Им и *Робертом Гуком* (1635-1702 гг.) были установлены зависимости для внутреннего трения в жидкости и между напряжением и деформацией в упругом теле. Ньютон обогащает понятие силы, указывает новые типы сил: тяготения, сопротивления среды, вязкости; изучает законы зависимости этих сил от положения и движения тел.

Он построил зеркальный телескоп, сформулировал основные законы классической механики, открыл закон всемирного тяготения, дал теорию движения небесных тел, создав основы небесной механики. Пространство и время Ньютон считал абсолютными. Работы его намного опередили общий научный уровень того времени и были малопонятны современникам.

- Президент Берлинской Академии наук *Пьер Мопертюи* (1698-1759 гг.), сформулировал первые принципы механики: когда в природе происходит какое-либо изменение, необходимое для этого количество действия всегда имеет минимальную величину. Под количеством действия здесь понимается произведение количества движения на пройденный путь.

- *Леонард Эйлер* (1707-1783 гг.) - математик, механик, физик и астроном, по происхождению швейцарец. В 1726 году был приглашен в Петербургскую АН. Эйлер считается основоположником механики твердого тела. Он развил динамику материальной точки в направлении применения методов анализа бесконечно малых к решению уравнений движения точки. Его трактат «Механика, то есть наука о движении, изложенная аналитическим методом». Кроме того, именно Эйлер впервые предложил для зубчатых колес эвольвентное зацепление, исследовал сжатые стержни на устойчивость.

- *Иоганн Бернулли* (1667-1748 гг.), в его работах использование аналитического метода решения задач механики получило дальнейшее развитие. Он с успехом применил принцип «живых сил» к выводу уравнения движения идеальной жидкости.

- Русские изобретатели-механики *А.К. Нартов* (1694-1756 гг.), *И.И. Ползунов* (1728-1766 гг.). В начале XVIII века создается и развивается раздел технической механики: Нартов изобретает токарно-копировальный станок, а Ползунов паровую машину.

- Великий русский ученый *Михаил Васильевич Ломоносов* (1711-1765 гг.) высоко оценивал значение механики для естествознания, физики и философии. Ему принадлежит материалистическая трактовка процессов взаимодействия двух тел: когда одно тело ускоряет движение другого и сообщает

ему часть своего движения, то только так, что само теряет такую же часть движения. Ломоносов создал закон сохранения энергии, разработал конструкцию машин для производства стекла и испытания материалов.

- *Д'Аламбер* (1717-1783 гг.), он в своем труде «Динамика» показал, что изменение количества движения тела определяется «суммой сопротивлений препятствию».

- *Жозеф Луи Лагранж* (1736-1813 гг.) - французский математик и механик, иностранный почетный член Петербургской АН. В трактате «Аналитическая механика» в основу статики Лагранж положил принцип возможных перемещений, в основу динамики сочетание этого принципа с принципом Д'Аламбера (принцип Д'Аламбера-Лагранжа), придал уравнениям движения формулу, названную его именем. Уравнение Лагранжа используется в гидродинамике и общей механике.

- Французский физик *Луи Пуансо* (1777-1859 гг.), ученый издает труд «Элементы статики», в котором излагаются основные принципы статики твердого тела: правила сложения и разложения сил, сложение и разложение пар сил.

- *М.В. Остроградский* (1801-1861 гг.) - российский математик и механик, академик Петербургской АН. Он первый рассмотрел связи, зависящие от времени, ввел новое понятие о неудерживающих связях, то есть связях, выражающихся аналитически при помощи неравенств, и обобщил на случай такого рода связей принцип возможных перемещений. Остроградскому принадлежит также приоритет в рассмотрении дифференциальных связей, накладывающих ограничения на скорости точек системы. Предложил приложение к принципу Д'Аламбера, к системам подверженным действию мгновенных и импульсных сил, возникающих при действии на систему ударов.

- Выдающийся новатор в сфере высшей математики и теоретической механики *П.Л. Чебышев* (1821-1894 гг.). Теория механизмов получила развитие в его трудах. Чебышев смело пролагал новые пути в вопросах приложения механических наук к производству. Его работа «Теория механизмов, известных под названием параллелограммов» составила эпоху в мировой науке.

- *Густав Кирхгоф* (1824-1887 гг.) - член Берлинской АН, член-корреспондент Петербургской АН. Кирхгофом были предложены основы теории движения твердого тела в идеальной жидкости.

- Русский ученый и инженер *Иван Алексеевич Вышнеградский* (1831-1895 гг.) – российский государственный деятель и предприниматель, почетный член Петербургской АН. Вышнеградский является основоположником современной динамики процесса регулирования, так как в связи с запросами машинной техники в годы его жизни продолжались исследования по теории колебаний и проблеме регулирования хода машин. Математик и ученик М.В. Остроградского, основатель научной школы по конструированию машин, профессор прикладной математики в Михайловской артиллерийской академии, директор Петербургского технологического института, Вышнеградский служил также инженером-механиком в Главном артиллерийском управлении, где по его разработкам был оборудован Охтинский пороховой завод, механические мастерские Петербургского арсенала. В работе «О регуляторах прямого действия» он впервые сформулировал известное неравенство, которому должна удовлетворять устойчиво работающая машина, снабженная регулятором.

- Немецкий механик и инженер *Отто Христиан Мор* (1835-1918 гг.). Мор вывел формулу для определения перемещений в стержневых системах и предложил очень удобное графическое изображение напряженного состояния и на основе его разработал критерий пластичности и разрушения.

- *Дмитрий Константинович Чернов* (1839-1921 гг.), русский ученый в области металлургии, металловедения, термической обработки металлов. Ему принадлежит ряд важных исследований в области артиллерийского производства: получение высококачественных стальных орудийных стволов, стальных бронебойных снарядов, изучение выгорания каналов орудий при стрельбе в результате действия пороховых газов и других факторов.

- *Н.Е. Жуковский* (1847-1921 гг.). Задача об устойчивости движения была рассмотрена им в сочинении «О прочности движения», в котором изучается орбитальная устойчивость.

Все критерии этой устойчивости сформулированы в наглядной геометрической форме, характерной для всего научного творчества великого механика. Русский ученый имел труды по теории авиации, исследования по механике твердого тела, астрономии и математике, гидродинамике и гидравлике, прикладной механике и теории регулирования машин и механизмов. Теоретические и экспериментальные исследования такого сложного явления, как гидравлический удар, позволили Жуковскому предложить законченную теорию гидравлического тарана. Кроме того, видный ученый - член-корреспондент РАН, член-корреспондент Петербургской АН, основоположник современной аэродинамики, участник создания Аэродинамического института, организатор и первый руководитель Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ).

- *Ляпунов Александр Михайлович* (1857-1918 гг.). Ему принадлежит строгая постановка задачи об устойчивости движения и указание наиболее общих методов ее решения, а также конкретное рассмотрение отдельных важнейших задач теории устойчивости, и изложены им в фундаментальном сочинении «Общая задача об устойчивости движения».

- *Циолковский Константин Эдуардович* (1857-1935 гг.) - русский советский ученый и великий изобретатель в области аэродинамики, ракетодинамики, теории самолета и дирижабля; основоположник современной космонавтики. Он разработал теорию полета реактивных самолетов в стратосфере, схемы и планы устройства самолетов для полета с гиперзвуковыми скоростями; теорию многоступенчатых ракет. Циолковский первым решил задачу о движении ракеты в неоднородном поле тяготения и рассмотрел (приблизительно) влияние атмосферы на полет ракеты, а также вычислил необходимые запасы топлива для преодоления сил сопротивления воздушной оболочки Земли.

- Российский кораблестроитель, механик и математик, академик АН СССР, Герой Социалистического Труда *Алексей Николаевич Крылов* (1863-1945 гг.) - участник проектирования и постройки первых русских линкоров. Вся деятельность Крылова была посвящена применению современных достижений математики и механики к решению важнейших технических задач. Ученый имеет труды по теории корабля, магнитных

и гироскопических компасов, артиллерии, механике, математике, истории науки, создал ряд корабельных и артиллерийских приборов, получил Государственную премию СССР.

- Российский ученый *Сергей Алексеевич Чаплыгин* (1869-1942 гг.). Чаплыгин один из основоположников аэродинамики, академик АН СССР и Герой Социалистического Труда, создавший труды по теоретической механике, гидро-, аэро- и газовой динамике. Участвовал в организации Центрального аэрогидродинамического института совместно с Н.Е. Жуковским. Именно Чаплыгину принадлежит фундаментальное исследование в области газовой динамики, указавшее на многие десятки лет вперед пути развития аэродинамики больших скоростей.

- Русский ученый *Л.В. Ассур* (1878-1920 гг.). Он открыл общую закономерность в структуре многозвенных плоских механизмов, и сейчас применяемую при их анализе и синтезе, разработал метод «особых точек» для кинематического анализа сложных рычажных механизмов.

- *А.П. Малышев* (1879-1962 гг.), ученый предложил теорию структурного анализа и синтеза применительно к сложным плоским и пространственным механизмам.

- *Л.И. Мандельштам* (1879-1944 гг.) - российский физик, один из основателей отечественной научной школы по радиофизике, академик АН СССР. Мандельштамом разработан метод параметрического возбуждения электрических колебаний и предложен метод радиоинтерференции, получил премию им. В.И. Ленина.

- Ученый *И.Н. Вознесенский* (1887-1946 гг.). Выдающаяся роль принадлежит ему в развитии теории и техники регулирования машин и производственных процессов.

- *Николай Гурьевич Четаев* (1902-1959 гг.) - крупный советский ученый в области аналитической механики, теории устойчивости движения и качественных методов теории дифференциальных уравнений.

- Механик и инженер *Василий Захарович Власов* (1906-1958 гг.) был членом-корреспондентом Академии наук СССР. Первым крупным научным достижением Власова было создание теории расчета незамкнутых цилиндрических оболочек и складчатых покрытий, которая была изложена в монографии, затем ученым разработана общая теория

изгиба и кручения стержней открытого профиля, удостоенная Государственной премии. В последние годы жизни Власов занимался методами расчета толстостенных плит на основе решений пространственной задачи теории упругости.

Древнейшим из учений механики является учение о покое - статика; учение о движении возникло значительно позже, затем появилась теория колебаний, и уже в XX веке - теория устойчивости. В настоящее время пути механики часто пересекаются с искусством, много общих задач у механики с архитектурой и скульптурой. Отметим, что живопись внесла важный вклад в создание и начертательной и проективной геометрии, что оказало влияние на развитие едва ли не всех отраслей механики. Сегодня механика, как и другие области науки, все в большей степени становится делом не отдельных ученых, а целых научных коллективов.

2. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

2.1. Проектирование и конструирование машин и механизмов

Проектированием называют процесс разработки описания, общих схем еще несуществующих объектов - механизмов и машин, *конструированием* - процесс создания изделия в чертежах и моделях на основе проектировочных и проверочных расчетов.

Конструирование машин и механизмов - это творческий процесс со свойственными ему закономерностями построения и развития моделей. При разработке конструкции изделия рассматривают различные варианты с целью получения оптимальной конструкции при наименьшей стоимости ее изготовления и эксплуатации. Конструирование подразумевает проведение всестороннего анализа статистического материала, отражающего опыт проектирования, изготовления и эксплуатации машин данного типа.

Стандартом (ЕСКД ГОСТ 2.103-68) установлены следующие стадии разработки конструкторской документации и этапы проектировочных работ (См. табл. 1 приложения):

1-я стадия - *техническое задание*, документ, содержащий наименование, основное назначение, технические требования, показатели качества, экономические показатели и специальные требования заказчика к изделию.

2-я стадия - *техническое предложение*, это совокупность конструкторских документов, обосновывающих техническую и технико-экономическую целесообразность разработки изделия на основе технического задания. В нем рассматриваются варианты возможных решений с учетом достижений науки и техники.

3-я стадия - *эскизный проект*, совокупность конструкторских документов, содержащих принципиальные конструкторские решения и разработку общих видов чертежей. Сюда входит пояснительная записка с необходимыми расчетами.

4-я стадия - *технический проект*, это совокупность конструкторских документов, содержащих окончательное решение и дающих полное представление об устройстве изделия. Графическая часть проекта состоит из чертежей общих видов и сборочных чертежей узлов, полученных с учетом достижений науки и техники. На этой стадии проектирования рассматриваются вопросы надежности и безопасности.

5-я стадия - *конструкторская документация*, это совокупность документов, содержащих чертежи общих видов узлов и деталей, оформленных так, чтобы по ним можно было изготавливать изделия и контролировать их производство и эксплуатацию. На этой стадии разрабатываются конструкции деталей и узлов, оптимальные по показателям надежности, технологичности и экономичности.

Документация, разработанная в результате процессов проектирования и конструирования, называется *проектом*. При проектировании деталей машин встречаются расчеты двух видов: проектный (проектировочный) и проверочный.

Проектный расчет выполняется по допускаемым напряжениям. На этой стадии проектирования в большинстве случаев невозможно точно учесть все факторы, влияющие на прочность детали. Поэтому при проектном расчете определяют только основные размеры деталей и разрабатывают ее конструкцию, расчет является упрощенным.

Проверочный расчет производят по тем критериям работоспособности, которые отражают физические явления при работе машины (это прочность, жесткость, выносливость и т.д.). Проверочный расчет является уточненным и выполняется, когда форма и размеры изделия известны из проектного расчета или были приняты (заданы) конструктивно. Расчеты и конструирование связаны между собой.

2.2. Классификация и основные свойства машин и механизмов

Современное производство немыслимо без всевозможных машин и механизмов. Благодаря их использованию намного повышается производительность труда, облегчается физический и умственный труд человека. *Машина* - это устройство, выполняющее механические движения для преобразования энергии, материалов или информации с целью замены или облегчения труда человека. Основными признаками машины являются механические движения ее элементов и выполнение полезной работы.

По функциональному назначению все машины условно подразделяются на три основные группы:

1). *Энергетические*, эти машины преобразуют любой вид энергии в энергию механическую, и наоборот. К ним относятся двигатели внутреннего сгорания, электродвигатели, электрогенераторы, турбины и другие устройства.

2). *Технологические (рабочие) и транспортные* машины, они преобразуют материалы, изменяют свойства, форму, состояние и положение объектов труда. К технологическим машинам относят металлообрабатывающие станки, прокатные станы, горные, упаковочные, текстильные и полиграфические машины. К транспортным машинам причисляют автомобили и тепловозы, самолеты и вертолеты, конвейеры и транспортеры, подъемники и т.п..

3). *Информационные*, такие машины предназначены для получения и преобразования информации. Информационные машины выполняют контрольно-измерительные операции, а также функции регулирования и управления технологическими

процессами, это вычислительные и кибернетические машины. Кибернетические машины способны заменить или имитировать различные механические, физиологические или биологические процессы, присущие человеку или живой природе.

Основу каждой машины составляет устройство или группа устройств, называемых механизмом или механизмами. *Механизм - система твердых тел, подвижно соединенных путем касания друг с другом и движущихся определенным, требуемым образом относительно одного из них, принятого за неподвижное тело.* Если в преобразовании движения, кроме твердых тел, участвуют жидкие или газообразные тела, то механизм соответственно называется гидравлическим или пневматическим.

В зависимости от способа управления различают машины ручного управления, полуавтоматы и автоматы. Машинные агрегаты, выполняющие все операции без участия человека, называют машинами-автоматами. Для изготовления изделий сложной формы могут применяться несколько машин-автоматов, комплекс которых составляет автоматическую линию.

Качества машин (и механизмов) характеризуют следующие показатели:

- *работоспособность*, состояние изделия, при котором оно способно нормально выполнять заданные функции в соответствии с параметрами, установленными нормативной документацией;

- *надежность*, свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в пределах, соответствующих заданным режимам;

- *безотказность*, это состояние изделия сохранять работоспособность в течение некоторого времени или при выполнении определенного объема работы без вынужденных перерывов в заданных условиях эксплуатации.

- *долговечность* в технике, способность изделия сохранять работоспособность до определенного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта;

- *технологичность*, это совокупность ряда признаков, обеспечивающих наиболее экономичное и производительное

изготовление машины применением прогрессивных методов обработки при одновременном повышении качества, точности и взаимозаменяемости составных частей;

- *экономичность*, свойство машин, которое достигается за счет снижения материалоемкости, энергоемкости и трудоемкости производства, за счет максимального коэффициента полезного действия в эксплуатации при высокой надежности; высокой специализацией производства и т.д.;

- *ремонтпригодность*, приспособленность машины к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов;

- *сохраняемость*, это свойство машины сохранять после установленного срока хранения и транспортирования, требуемые эксплуатационные показатели;

- *эргономичность*, совокупность специфических свойств машины, которая обеспечивает совершенство и красоту ее внешних форм, удобство обслуживания, что существенно увеличивает производительность труда и влияет на отношение к машине потребителей и обслуживающего персонала.

К характеристикам машин и механизмов относятся: назначение, область применения, способ управления, мощность и производительность, коэффициент полезного действия, масса, габаритные размеры, стоимость и др..

3. ОСНОВНЫЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Расчет и проектирование машин и механизмов начинается с выбора материала составных частей и назначения режимов его обработки, которые определяются соображениями конструктивными (обеспечение надежности), технологическими (единичное, серийное, массовое производство) и экономическими. Выбор материала осуществляется конструктором, при нем необходимо учитывать работоспособность, надежность, а также выполнение некоторых специальных требований. Например, для механизмов авиационной техники требованиями являются обеспечение минимальной массы и габаритных размеров; для

деталей, работающих при трении скольжения - износостойкости, а при повышенных температурах - теплостойкости.

3.1. Характеристики конструкционных материалов

Технологические характеристики материалов должны соответствовать способам получения заготовок (штамповка, прокат, литье, плавление, резанье) и виду производства. Основные свойства и характеристики качества конструкционных материалов:

1) *Механические свойства*, характеризуются способностями материала сопротивляться деформированию и разрушению под действием внешних воздействующих факторов. К таким свойствам относятся:

- *прочность* (способность материала сопротивляться деформации и разрушению под действием внешних сил и нагрузок);

- *твердость* (способность материалов сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местном, контактном и силовом воздействии);

- *упругость* (способность материала восстанавливать свою форму и размеры после снятия нагрузки, вызвавшей деформацию);

- *вязкость* (способность материала поглощать механическую энергию внешних сил и при этом испытывать значительную пластическую деформацию до разрушения);

- *хрупкость* (способность материала разрушаться под действием внешних сил практически без заметной пластической деформации).

2) *Физические свойства*, характеризуют поверхность материала в гравитационных, электромагнитных тепловых и радиоактивных полях:

- *свет* (способность материала отражать световые лучи с определенной длиной световой волны);

- *плотность* (масса единицы объема вещества);

- *электропроводность* (способность материала хорошо и без потерь проводить электрический ток);

- *теплопроводность* (способность материала переносить тепловую энергию от более нагретого участка к менее нагретому);

- *теплоемкость* (способность материала поглощать определенное количество теплоты) и др..

3) *Технологические свойства* характеризуют способность материала подвергаться различным видам холодной и горячей обработки. Это литейные свойства; ковкость (важно при обработке давлением); свариваемость (способность металлов образовывать при установленной технологии сварки неразъемное соединение); обработка резанием; закаливаемость и др..

4) *Химические свойства* характеризуют способности материала вступать в химическое взаимодействие с другими веществами:

- *растворимость* (способность материала образовывать с одним или несколькими веществами однородную систему, называемую раствором);

- *жаростойкость* (способность материала противостоять химическому разрушению поверхности изделия под действием воздуха или другой окислительной среды при высоких температурах);

- *коррозионностойкость* (способность металлических материалов в результате химического или электрохимического воздействия на их поверхности внешней агрессивной среды противостоять разрушению);

- *окисление* (способность материалов отдавать электроны, то есть окисляться при химическом взаимодействии с окружающей средой или другой материей).

5) *Эксплуатационные свойства* характеризуют способность материалов обеспечивать надежную и долговечную работу деталей, (составных частей, изделий) в конкретных условиях, полностью базируются на механических, физических, химических свойствах.

Характеристикой конструкционных материалов служат и *экономические показатели* - это стоимость и трудоемкость, дефицитность материалов и коэффициент использования металла, и т.п..

3.2. Виды обработки и упрочнения материалов

Упрочнение металлов - это повышение сопротивляемости материала заготовки (или изделия) разрушению или остаточной деформации. Способы упрочнения материалов следующие: горячая обработка давлением; легирование; упрочняющая термическая и химико-термическая обработки; обработка методами холодной пластической деформации.

При *горячей обработке давлением* упрочнение происходит в результате превращения рыхлой структуры материала в уплотненную структуру с ориентированным направлением кристаллитов. Пустоты между кристаллитами укрупняются и завариваются, прослойки примесей по стыкам кристаллитов дробятся и растворяются в металле под действием высокой температуры и давления.

Всем кованным и прокатанным металлам свойственна анизотропия механических свойств в направлениях вдоль и поперек волокон. Направление волокон особенно влияет на вязкость материала. Это направление в деталях должно быть согласовано с конфигурацией и направлением действия рабочих нагрузок. Штампованные коленчатые валы и другие фасонные детали с волокнами, следующими контуру, значительно прочнее деталей, изготовленных из сортового проката с перерезкой волокон. Горячее накатывание зубьев шестерен с последующим холодным калиброванием обеспечивает правильное направление волокон относительно действующих на зуб нагрузок. Накатанная резьба обладает повышенной прочностью.

Главное назначение *легирования* - повышение прочности с дифференцированным улучшением частных характеристик: износостойкости и вязкости, пластичности и упругости, жаропрочности и хладостойкости, коррозионной стойкости, антифрикционности и других. Присадка некоторых элементов увеличивает прокаливаемость сталей, что позволяет получать повышенные механические и эксплуатационные свойства. Для получения высоких качеств материала легирование должно быть дополнено термообработкой.

Термическая обработка материала вызывает образование неравновесных структур с повышенной плотностью дислокаций

и сильно деформированной атомно-кристаллической решеткой (сорбит, троостит, мартенсит, бейнит). Регулируя режимы термообработки, можно получать стали с различным содержанием этих структур, размерами и формой зерен и соответственно с различными свойствами.

Для конструкционных сталей чаще всего применяют *улучшение*, а именно закалку с высоким отпуском на сорбит. Такая обработка обеспечивает наиболее высокие механические свойства - благоприятное сочетание прочности, вязкости и пластичности. Закалка с индукционным нагревом поверхностного слоя помимо технологических преимуществ (экономичность, высокая производительность) дает значительный упрочняющий эффект, обусловленный возникновением в закаленном поверхностном слое остаточных напряжений сжатия.

Химико-термическая обработка заключается в насыщении поверхностного слоя углеродом (цементация) или азотом (азотирование). При комплексных процессах (цианирование, нитроцементация) поверхность насыщается одновременно углеродом и азотом с образованием карбонитридов и карбидов. Эти виды химико-термической обработки придают поверхности высокую твердость и износостойкость. Вместе с тем они увеличивают прочность благодаря образованию в поверхностном слое напряжений сжатия.

Разновидностью химико-термической обработки является *термодиффузионное поверхностное легирование* (насыщение поверхностного слоя атомами легирующих элементов), которое применяют для повышения прочности и твердости, а также придания поверхности особых свойств. Насыщение основного металла атомами легирующего компонента в результате диффузии его при высоких температурах позволяет значительно снизить расход легирующего металла. Разработаны процессы комплексного диффузионного легирования.

Поверхности, подвергаемые местному поверхностному упрочнению, классифицируют по группам сложности:

1 группа - плоскости сплошные; плоскости с вырезами, с выступами;

2 группа - прямолинейные и криволинейные, цилиндрические, конусные и фасонные отверстия; отверстия круглого и произвольного сечения;

3 группа - сложные поверхности (поверхности двойной кривизны, сквозные глубокие отверстия, окантовки и ребра жесткости); резьбовые и шлицевые поверхности;

4 группа - сопряженные поверхности; пересечения плоских, сложных или цилиндрических поверхностей; пересечения плоской и цилиндрической поверхностей; фаски и скосы.

Местной упрочняющей обработке *пластической деформации* подвергаются детали из различных материалов. Особую группу составляют, так называемые, «маложесткие детали» - панели, профили, дуги, которые требуют повышенного внимания в процессе упрочнения. Такие детали упрочняют на вибрационных, барабанных или дробеструйных установках. Силовые детали (цилиндры, балки, коленчатые валы, стойки, рычаги) обычно упрочняются поверхностным наклепом, как по всем поверхностям, так и по отдельным, заранее определенным участкам.

Местному *поверхностному упрочнению* подвергаются зоны концентрации напряжений (отверстия, шлицы, резьбы, галтели, пазы); участки, недоступные при упрочнении в предназначенных для этого установках, а также места деталей, которые после упрочнения поверхности вынуждены подвергаться последующей механической обработке, приводящей к частичной потере упрочненного слоя.

К настоящему времени путь получения новых материалов практически исчерпан. Ожидать создания составов, которые могли бы значительно превосходить различные свойства известных, не приходится, поэтому продолжают разрабатывать новые комбинированные методы упрочнения материалов. Например, поверхностное упрочнение стальных деталей, заключающееся в предварительном локальном лазерном легировании и последующем термодиффузионном насыщении поверхности различными легирующими элементами.

3.3. Материалы, применяемые в производстве

Металлы и их сплавы являются важнейшими материалами, применяемыми для изготовления различных машин, механизмов,

приборов и инструментов. Характерными признаками металлов является металлический блеск, высокая электропроводность и теплопроводность, а также пластичность, то есть способность изменять свою форму при обработке давлением. Технически чистые металлы имеют ограниченное применение в промышленности. Большинство наиболее распространенных металлов в технике применяется в виде металлических сплавов, которые обладают более ценными механическими, технологическими и другими свойствами, чем чистые металлы. Все металлы и сплавы делятся на черные и цветные. К черным относят железо и сплавы на его основе (сталь, чугун и т.д.), к цветным - все остальные металлы и сплавы.

Рассмотрим каждую группу материалов:

Сталь - это сплав железа с углеродом и другими элементами, содержащий углерода не более 2%. Изделия из этого материала поддаются ковке, они имеют высокую прочность, пластичность, хорошо обрабатываются.

Все применяемые стали классифицируются по следующим признакам:

- по химическому составу - углеродистая, легированная;
- по качеству - сталь обыкновенного качества, качественная и высококачественная;

- по назначению - конструкционная, инструментальная.

Стали обыкновенного качества относительно дешевы, из них изготавливают напряженные детали (болты, гайки, оси, шестерни, корпуса), их классифицируют по группам *А*, *Б*, *В*:

- К группе *А* относятся стали без уточненного химического состава, в которых не ограничивается наличие примесей. Пример обозначения: *Ст.3*, ..., *Ст.6*. Цифра 3 обозначает, что содержание углерода 0,3%, цифра 6 - углерода 0,6%.

- Стали группы *Б* имеют гарантированный химический состав. Изделия из этой стали подвергаются обязательной термообработке и обозначаются - *БСт1*, ..., *БСт4*...;

- Стали группы *В* имеют строго установленный химический состав и подвергаются различным видам обработки, их обозначение - *ВСтб*.

Конструкционные качественные стали имеют фиксированный химический состав, их выполняют с соблюдением более строгих технологических условий. Пример обозначения: *Сталь*

10, ..., Сталь 20, ..., Сталь 45... Низкоуглеродистые (до 0,25%С) - пластичные стали. Детали, изготовленные из них, хорошо обрабатываются и подвергаются сварке. Среднеуглеродистые стали (0,3-0,55%С) менее пластичны, но также хорошо обрабатываются, широко используются для изготовления разнообразных деталей машин. Высокоуглеродистые (0,6-0,85%С) - стали твердые и прочные. Из них изготавливают высокопрочные детали, рессоры, пружины, замковые шайбы, шкивы, шпиндели. Специальная (инструментальная) сталь высокопрочная, из нее изготавливают режущие инструменты. Все легированные стали содержат различные элементы, которые вводят в ее состав для улучшения механических, тепловых, антикоррозионных и др. свойств. Легирующие элементы обозначаются следующими буквами: *Б* - ниобий, *В* - вольфрам, *Г* - марганец, *Д* - медь, *К* - кобальт, *Н* - никель, *М* - молибден, *Р* - бор, *С* - кремний, *Т* - титан, *Ф* - ванадий, *Х* - хром, *Ю* - алюминий. Например, обозначение *12Х2Н3А* расшифровывается так: 0,12% углерода, 2% хрома, 3% никеля, *А* - высококачественная сталь. Если сталь содержит до 1,5% легирующего элемента, то цифра после соответствующей буквы не ставится.

Сплавами называют такие соединения металлов, у которых легирующих элементов больше, чем железа, а железа меньше 50%. Все сплавы разделяют на несколько групп. В промышленности наиболее широко применяют сплавы типа «алнико». Сплавы тверды, хрупки и не поддаются деформации, из них изготавливают магниты для машин и приборов литьем, затем проводят шлифование. Сплав *ЮНДК15* содержит 18-19% *Ni*, 8,5-9,5% *Al*, 14-15% *Co*, 3-4% *Cu*.

Медные сплавы вырабатываются на основе латуни и бронзы, они почти в 5 раз дороже стали. Различают две основные группы медных сплавов: 1) латуни - сплавы меди с цинком; 2) бронзы - сплавы меди с другими элементами. Медные сплавы обладают высокими механическими и техническими свойствами, хорошо сопротивляются коррозии и износу.

Латунь (желтая медь) - представляет и один из самых полезных и наиболее употребляемых сплавов. Такие сплавы хорошо обрабатываются, легко поддаются пластической

деформации, имеют высокие антикоррозионные свойства. Из них изготавливают трубу, узлы трения, проволоку, катаные полуфабрикаты - листы, полосы, ленты, прутки разных профилей и обозначают - *Л59, Л62...*

Бронза в зависимости от состава называется оловянной, алюминиевой, бериллиевой и т.п.. Например, из обозначения *БрА9Ж4* значит, что сплав содержит 9% алюминия и 4% железа. Сплавы, полученные на основе бронзы, почти в 10 раз дороже стали, применяются в подшипниках скольжения, в червячных и винтовых колесах.

Баббиты (по ГОСТ 1320-74) - это белые легкоплавкие антифрикционные сплавы на основе олова или свинца. Очень высокая стоимость баббитов (в 20 раз и более превышающая стоимость качественной стали) ограничивает области их использования, из них изготавливают подшипники скольжения, узлы трения. Обозначаются, например, *Б16*, и такое обозначение марки говорит о том, что сплав состоит из 15-17% олова, такого же количества сурьмы, 1,5-2,0% меди, остальное - свинец.

Титановые сплавы очень дорогие, применяются в военной промышленности, трубопроводах, авиастроении и судостроении. Титановые сплавы имеют высокую удельную прочность. Как и в железных сплавах, легирующие элементы оказывают большое влияние на полиморфные превращения титана. Пример обозначения - сплав *BT14* (*Al* - 5,5%, *V* - 1,2%, *Mo* - 3,0%).

Сплавы с эффектом «памяти формы» - эти сплавы после пластической деформации восстанавливают свою первоначальную геометрическую форму или в результате нагрева, или непосредственно после снятия нагрузки (сверхупругость). В настоящее время известно большое число двойных и более сложных сплавов с обратным мартенситным превращением, обладающих в разной степени свойствами «памяти формы»: *Ni-Al, Ni-Co, Ni-Ti, Cu-Al, Cu-Al-Ni*.

Наиболее широко применяют сплавы на основе моноклида титана *Ni-Ti*, получившие название *нитинол*. Нитинол обладает высокой прочностью и пластичностью, коррозионной и кавитационной стойкостью, и демпфирующей

способностью. Его применяют во многих ответственных конструкциях.

Алюминиевые сплавы можно разделить на деформируемые, предназначенные для получения полуфабрикатов (листов, плит, прутков и т. д.), а также поковок и штамповых заготовок путем прокатки, прессования,ковки и штамповки, и литейные, предназначенные для фасонного литья. Сплавы алюминия обладают хорошей технологичностью, малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью, достаточной прочностью и пластичностью. Наибольшее распространение получили сплавы: *Al-Cu*, *Al-Si*, *Al-Mg*, *Al-Cu-Mg* и другие.

Чугунами называются сплавы железа с углеродом (2-4% C) и другими элементами. Один из самых дешевых металлических конструкционный материал, имеющий хорошие литейные и антифрикционные свойства. Чугуны бывают белые, ковкие, серые и высокопрочные.

Белый чугун содержит до 4% углерода в виде цементита. Это весьма твердый и хрупкий материал, поэтому в машиностроении почти не применяется. Его используют для переделки в серый и ковкий чугун.

Ковкий чугун получают длительным нагревом при высоких температурах отливок из белого чугуна. В результате образуется графит хлопьевидной формы. Ковкий чугун обладает высокой прочностью и пластичностью, хорошо переносит вибрационные и ударные нагрузки.

Серый чугун содержит до 3,6% углерода в виде пластинчатого графита. Это прочный и хрупкий материал, но хорошо обрабатываемый. Они применяются для изготовления неподвижных соединений, узлов трения, корпусов, его используют для изготовления литых деталей относительно сложной конфигурации, обозначение - *СЧ20*. Цифра 20 получается делением предела прочности чугуна на 10.

Высокопрочные чугуны получают добавлением легирующих элементов (*Cr*, *Mg* и др.), а также поверхностной закалкой с нагревом ТВЧ и упрочнением наклепом, чугуны с присадкой *Al* поддаются азотированию. Из таких материалов изготавливают ответственные тяжело нагруженные детали, например, коленчатые валы, которые по прочности не уступают кованым и штампованным валам из углеродистых

и низколегированных сталей, а по износостойкости даже превосходят их.

Конструкционные порошковые материалы - это материалы, изготавливаемые путем прессования металлических порошков в изделия необходимой формы и размеров и последующего спекания сформованных изделий в вакууме или защитной атмосфере при температуре $0,75-0,8 T_{пл}$. Антифрикционные порошковые сплавы имеют низкий коэффициент трения, легко обрабатываются, выдерживают значительные нагрузки и имеют хорошую износостойкость. Наибольшее применение получил материал *ФМК-11* (15% Cu, 9% графита, 3% асбеста, 3% SiO₂ и 6% барита). Применение порошковых материалов рекомендуется при изготовлении деталей простой симметричной формы, небольшой массе и размеров: тормозных колодок, вкладышей подшипников скольжения, малонагруженных зубчатых колес, втулок, шайб и других.

К *неметаллическим материалам* относятся полимерные материалы органические и неорганические: различные виды пластических масс, композиционные материалы на основе неметаллической, каучуки и резины, клеи, герметики, покрытия лакокрасочные, а также графит, стекло, керамика. Такие их свойства, как достаточная прочность, жесткость и эластичность при малой плотности, а также светопрозрачность, химическая стойкость, диэлектрические свойства делают эти материалы незаменимыми. Так как их основой являются синтетические полимеры, то они находят все большее применение в различных отраслях машиностроения.

Пластмассы - это материалы на основе природных или синтетических полимеров (смол). Они характеризуются невысокой плотностью, высокой коррозионной стойкостью и прочностью. Наиболее распространены

- термоактивные слоистые пластмассы (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, асботекстолит) применяются при изготовлении деталей, нагруженных знакопеременными электрическими и механическими нагрузками или работающих при трении (втулки, кулачки и т.д.);

- термоактивные пластмассы (волокнит, фенопласт и др.) используются для изготовления шкивов, ступиц колес и других изделий бытовой техники;

- термопластичные пластмассы - это органическое стекло плексиглас, винипласт, фторопласт и другие, используются для изготовления стекол, труб, защитных пленок, ремней, зубчатых колес.

Резиной называется продукт специальной обработки (вулканизации) каучука и серы с различными добавками. Резина отличается от других материалов высокими эластическими свойствами, которые присущи каучуку - главному исходному материалу резины. Для резиновых материалов характерна высокая стойкость к истиранию, газо- и водонепроницаемость, химическая стойкость, электроизолирующие свойства и небольшая плотность. В зависимости от назначения резина изготавливается мягкой (для шин), пористой (для амортизаторов) и жесткой (эбонит, для изготовления электротехнических изделий). Для повышения несущей способности изделий из резины их армируют текстильными и стальными элементами. Такую резину используют для автопокрышек, ремней, рукавов и так далее.

4. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

В *Теории механизмов и машин* изучаются свойства типовых механизмов, которые широко применяются в самых различных машинах, приборах и устройствах. Анализ и синтез механизмов осуществляется независимо от его назначения, то есть все однотипные механизмы (зубчатые, рычажные, кулачковые) исследуются одними и теми же приемами для двигателей, насосов, компрессоров и других видов машин.

4.1. Составные части механизма

Механизмы независимо от назначения и конструктивного исполнения, имеют одну структурную основу. Все они состоят из частей, подвижно соединенных друг с другом. Части, образующие механизм, называются звеньями. *Звено* - это деталь или группа жестко соединенных между собой

деталей (твердое звено). Кроме того, звенья могут быть и гибкими - тросы, ремни, цепи.

В каждом механизме обязательно есть неподвижное звено (или звено, условно принимаемое за неподвижное), которое называют *стойкой*. Стойкой может быть станина, корпус и другое изделие. Относительно стойки оценивают параметры движения механизма. Из подвижных звеньев в зависимости от их расположения в механизме выделяют входные и выходные звенья. Механизмы могут иметь несколько входных и выходных звеньев. Механизм автомобиля при одном входном звене, получающем движение от двигателя, имеет два выходных звена, соединенных с задними или передними колесами.

Звено, движение которому сообщается извне, называют *ведущим*, а звено, которому движение передается, - *ведомым*. Остальные подвижные звенья механизма называются промежуточными. В слесарных тисках, например, корпус с неподвижной губкой образуют неподвижное звено, где ведущим звеном является рукоятка, а ведомым - подвижная губка.

Такая классификация используется при структурном исследовании механизма. При силовом анализе разделение звеньев проводится по знаку элементарной работы сил, действующих на звено. У ведущих звеньев эта работа положительная, у ведомых - отрицательная или равна нулю.

Положения всех звеньев механизма относительно неподвижного звена задаются обобщенными координатами, то есть независимыми переменными, полностью и однозначно определяющими положение механизма. Число обобщенных координат соответствует числу степеней подвижности механизма. На чертежах для указания пути передачи движения от ведущего звена к ведомому, а также для возможности изучения движения звеньев механизма вводят вместо конструктивного изображения кинематических пар и звеньев механизма их условные изображения в виде схем.

На рисунке 1 показана типичная структурная схема механизма.

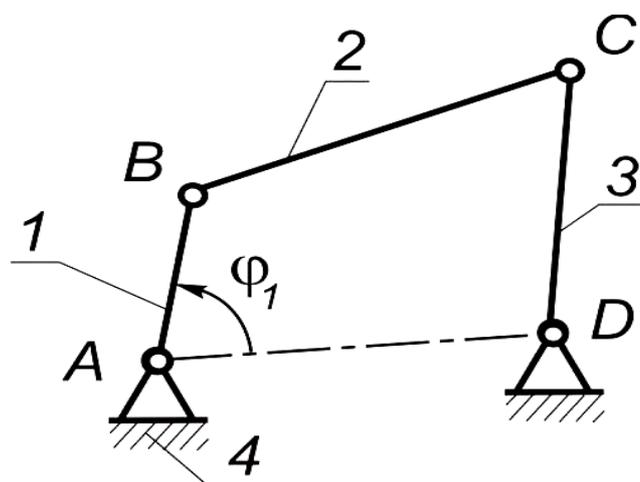


Рисунок 1 -
Структурная схема шарнирного четырехзвенника

Здесь 1, 2, 3, 4 - звенья; A, B, C, D - кинематические пары. Положение механизма шарнирного четырехзвенника, имеющего одну степень свободы, полностью и однозначно определяется одной координатой - углом поворота φ_1 кривошипа 1, которую можно принять за обобщенную координату.

Звено, координаты которого выбираются в качестве обобщенных координат механизма, называется *начальным звеном*, в большинстве случаев оно совпадает с входным звеном. Однако иногда за начальное звено удобнее принимать промежуточное или выходное звенья.

Звенья различают по:

- *конструктивным признакам* (зубчатое колесо, вал поршень и т.д.);
- *деформативности* (гибкое и жесткое звено);
- *характеру движения*.

В зависимости от характера движения звенья именуют:

- *кривошип* - звено, совершающее полнооборотное вращательное движение вокруг неподвижной оси;
- *коромысло* - звено, совершающее вращательное движение на неполный оборот;
- *шатун* - звено, совершающее плоское движение;
- *ползун* - звено, совершающее возвратно-поступательное движение;

- *кулиса* - звено рычажного механизма, вращающееся вокруг неподвижной оси, кулиса является подвижной направляющей;

- *камень* - ползун, перемещающийся по кулисе;

- *стойка* (уже рассмотренная) - неподвижное звено механизма. Понятие «неподвижность стойки» для механизмов некоторых машин, например, летательных аппаратов, условное.

Основные типы звеньев представлены в таблице 2 приложения.

4.2. Классификация кинематических пар

Ограничение, накладываемое на движение твердого тела, называется условием связи. Подвижное соединение двух твердых звеньев, налагающее ограничения на их относительное движение условиями связи, называется кинематической парой. Таким образом, всякая кинематическая пара ограничивает движение соединяемых звеньев. Точки, линии, поверхности, по которым звенья соприкасаются, называют *элементами кинематических пар* (одно звено может иметь несколько геометрических элементов). Каждое из условий связи устраняет одну степень свободы, то есть возможность одного из 6 независимых относительных движений в пространстве.

Известно, что свободное твердое тело в пространстве имеет шесть степеней подвижности. Перемещение его в пространстве можно представить как результат сложения шести независимых движений, а именно, трех поступательных параллельно осям координат OX , OY , OZ и трех вращательных относительно этих осей движений (Рис. 2).

Определенные ограничения (связи), которые кинематические пары накладывают на относительные движения звеньев, зависят от способа их соединения.

Число S , ограничивающих движения звеньев, силовых или геометрических связей, определяется равенством:

$$S = 6 - H, \quad (4.1)$$

где H - число степеней подвижности кинематической пары (независимых движений одного звена относительно другого).

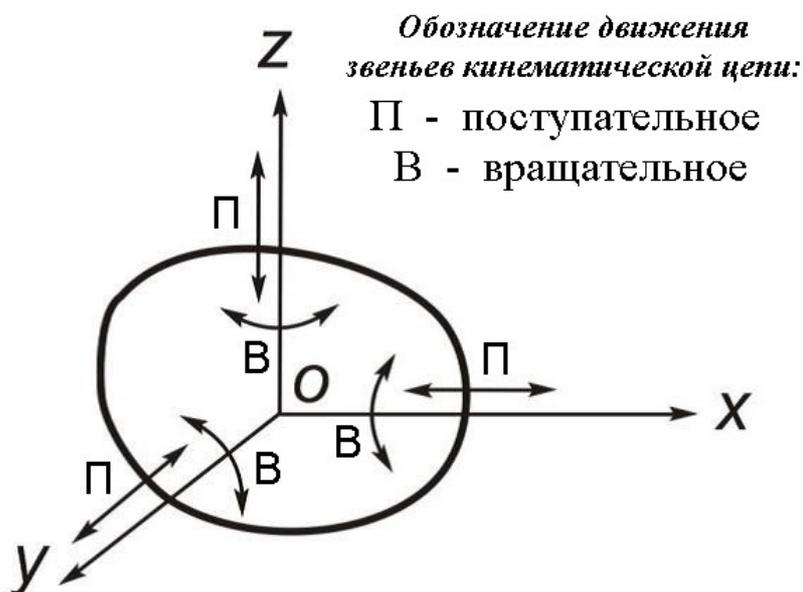
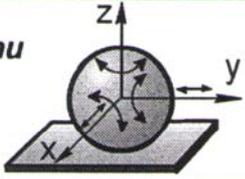
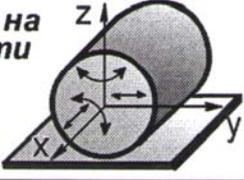
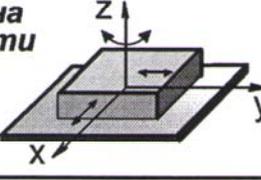
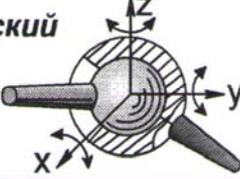
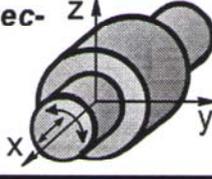
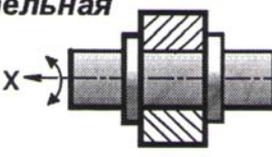
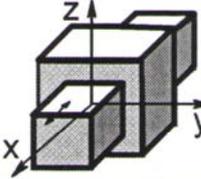
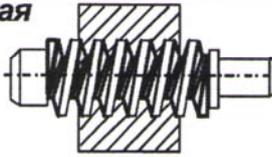


Рисунок 2 -
Перемещение в пространстве тела

По предложению советского академика И.И. Артоболевского кинематические пары делят на классы. В зависимости от числа связей S (число наложенных условий связи, изменяющееся от 1 до 5) или от H (степени подвижности) ученый предложил пять классов. При $S = 6$ кинематическая пара становится жестким звеном, а при $S = 0$ кинематической пары не существует. При $S = 1$ кинематические пары имеют пять степеней подвижности, и относятся к первому классу, а при $S = 2$ - четыре степени подвижности и относятся ко второму классу. Наибольшее распространение получили кинематические пары 5-го класса (одноподвижные), и к ним относятся поступательная, вращательная и винтовая пары.

В таблице 2 представлено разделение кинематических пар по классам, на рисунках стрелками отмечены возможные перемещения звеньев, которые сохраняются и после образования пары. В таблице для каждого класса указаны число степеней подвижности кинематической пары H и число связей S . Показаны также схематические и условные изображения кинематических пар различных классов в соответствии с ГОСТ 2.770-68.

Таблица 2. Классификация кинематических пар

Схематическое изображение кинематических пар	Условное изображение по ГОСТ ЕСКД	Число связей S	Степень свободы W	Класс кинематической пары	Структурная формула
<p>Шар на плоскости</p> 		1	5	1 Пятиподвижная	ВВВ-ПП
<p>Цилиндр на плоскости</p> 		2	4	2 Четырехподвижная	ВВ-ПП
<p>Призма на плоскости</p> 		3	3	3 Трехподвижная	В-ПП
<p>Сферический шарнир</p> 		3	3	3 Трехподвижная	ВВВ
<p>Цилиндрическая пара</p> 		4	2	4 Двухподвижная	В-П
<p>Вращательная пара</p> 		5	1	5 Одноподвижная	В
<p>Поступательная пара</p> 		5	1	5 Одноподвижная	П
<p>Винтовая пара</p> 		5	1	5 Одноподвижная	(В) (П)

В зависимости от вида составляющих их элементов кинематические пары разделяют на низшие и высшие. Кинематическая пара, у которой соединение двух звеньев происходит по поверхности, называется *низшей*. В тех случаях, когда соединение двух звеньев происходит по линии или точке, такую кинематическую пару называют *высшей* (такие точки и линии - элементы высших кинематических пар).

К низшим кинематическим парам, элементами которых являются поверхности, относятся пары поступательная, вращательная, сферическая, винтовая и плоскостная. К высшим кинематическим парам относятся пары «шар на плоскости» и «цилиндр на плоскости». Примеры таких пар - это колесо и рельс, фрикционные катки, кулачковая пара с острым толкателем и другие.

Главное преимущество для низших пар - это их способность передавать значительные усилия при меньшем износе в сравнении с высшими кинематическими парами, основной недостаток - это меньший КПД по сравнению с высшими парами. Для высших пар достоинство - это возможность воспроизводить с их помощью достаточно сложные относительные движения, компактная конструкция, бóльший КПД, меньшие потери на трение, а недостаток по сравнению с низшими парами - это большие напряжения в зоне касания.

Следовательно, низшие кинематические пары более износостойки, так как сила давления одного звена на другое звено у них распределяется по поверхности соприкосновения, тогда как у высших пар соприкосновение звеньев происходит в точках или, в лучшем случае, по линиям.

4.3. Кинематические цепи

Кинематической цепью называют связанную систему звеньев, образующих между собой кинематические пары. Если звенья совершают движение в одной плоскости, кинематическая цепь будет плоской, в противном случае - пространственной. В зависимости от строения кинематическая

цепь может быть замкнутой и разомкнутой, простой и сложной.

К *простым цепям* относят кинематические цепи, у которых каждое звено входит в две кинематические пары (Рис. 3а,г). К *сложным цепям* - у которых имеются звенья, входящие в три и более кинематические пары (Рис. 3в). К *замкнутым цепям* - цепи, у которых каждое звено входит, по крайней мере, в две кинематические пары (Рис. 3б,г), а к *незамкнутым* - у которых есть звенья, входящие только в одну кинематическую пару (Рис. 3а).

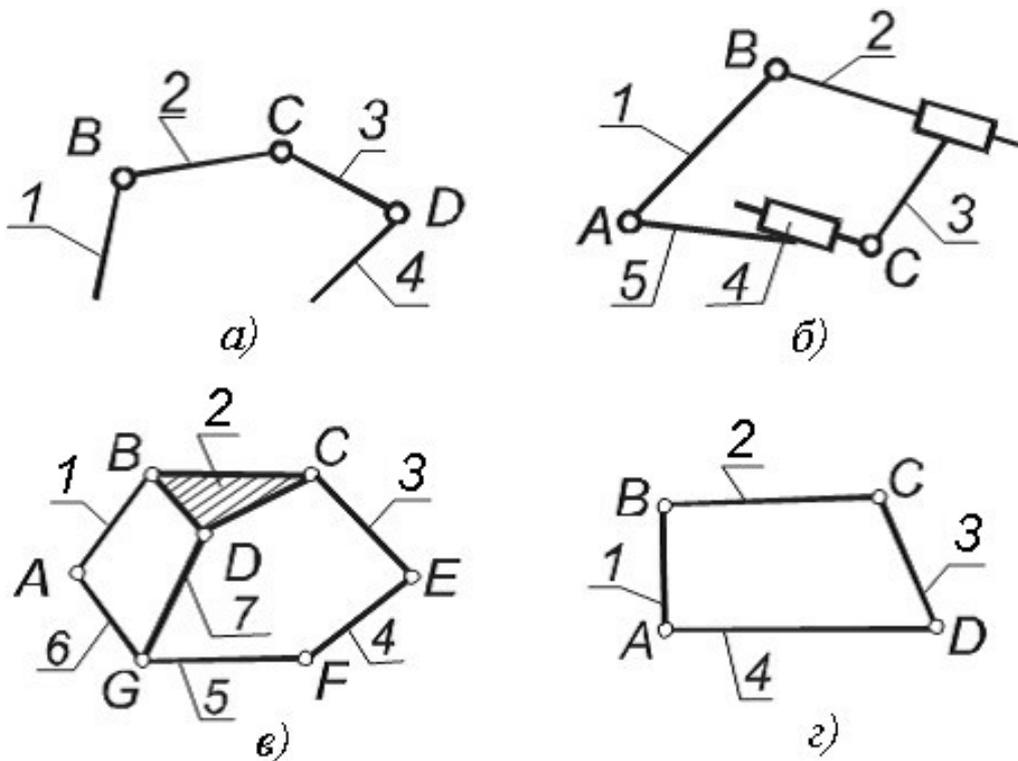


Рисунок 3 - Кинематические цепи

Все подвижные звенья плоской кинематической цепи совершают движения, параллельные одной и той же неподвижной плоскости (См. рис. 1). В пространственных кинематических цепях точки звеньев описывают пространственные кривые, либо движутся по плоским кривым, лежащим в пересекающихся плоскостях (Рис. 4).

Механизмы могут быть образованы как замкнутыми, так и незамкнутыми кинематическими цепями. Механизм элементарного манипулятора (устройство для подъема грузов)

служит примером незамкнутой кинематической цепи и изображен на рисунке 5, но большинство механизмов образовано замкнутыми кинематическими цепями (См. рисунки 1; 4).

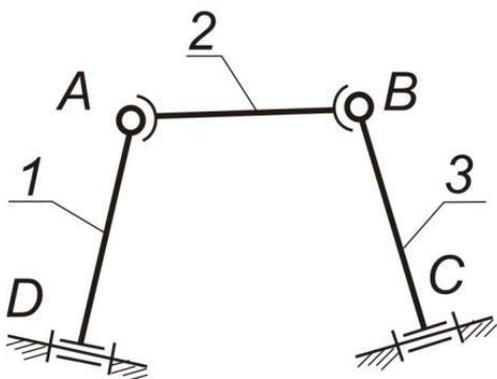


Рисунок 4 - Замкнутая кинематическая цепь

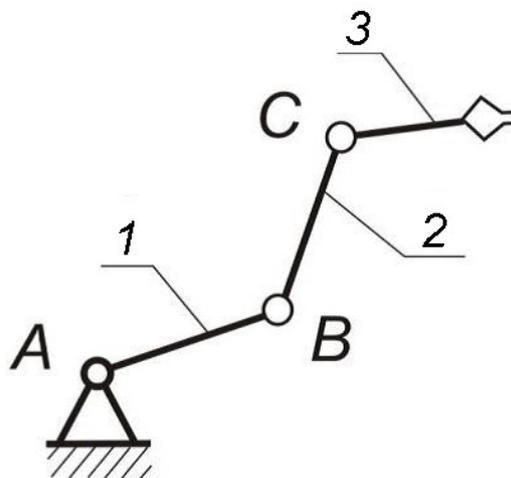


Рисунок 5 - Незамкнутая кинематическая цепь

4.4. Основные виды механизмов

Рассмотрим основные виды механизмов, нашедших широкое применение в технике. Исходя из кинематических, конструктивных и функциональных свойств, такие механизмы подразделяют на:

1). *Рычажные*, предназначенные для преобразования вращательного движения входного звена в возвратно-поступательное движение выходного звена, и состоят из звеньев, соединенных между собой в низшие кинематические пары. Могут передавать большие усилия и мощности. Эти механизмы нашли широкое применение благодаря тому, что они долговечны, надежны и просты в эксплуатации.

Среди рычажных механизмов наиболее распространены так называемые четырехзвенные, примеры которых представлены на рисунке 6 (а, б, в, г). Рычажные механизмы применяют для передачи больших усилий в прессах, ковочных машинах, двигателях внутреннего сгорания, погрузчиках.

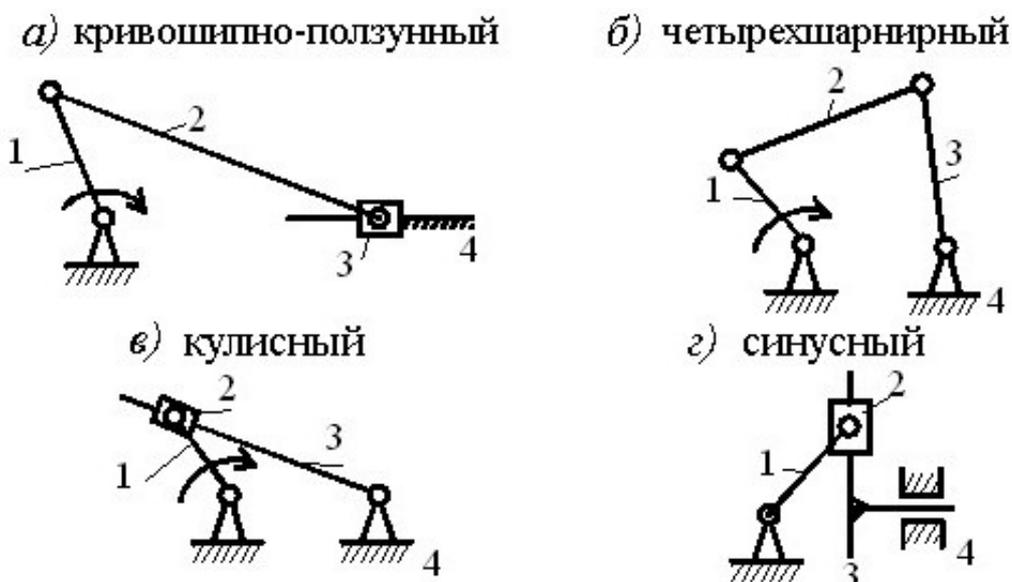


Рисунок 6 - Виды рычажных механизмов

2). *Кулачковые*, в состав таких механизмов обычно входят два подвижных звена - это кулачок и толкатель, и неподвижное звено - это стойка. Они *содержат хотя бы одну высшую кинематическую пару*. Кулачковые механизмы предназначены для преобразования вращательного и возвратно-поступательного движений входного звена в возвратно-поступательное или возвратно-вращательное движения выходного звена.

Простейший кулачковый механизм изображен на рисунке 7 (а). Он состоит из кулачка 1, штанги 2, связанной с рабочим органом, и стойки, поддерживающей в пространстве звенья механизма и обеспечивающей каждому звену соответствующие степени свободы. Ролик 3, устанавливаемый в некоторых случаях на конце штанги, не влияет на закон движения звеньев механизма.

На рисунке 7(б) штанга, совершающая поступательное движение, называется толкателем 2, а вращательное - коромыслом 4. Придавая профилям кулачка и толкателя соответствующие очертания, всегда можно осуществить любой желательный закон движения толкателя. Кулачковые механизмы применяются в различных областях машиностроения, например в двигателях внутреннего сгорания, металлорежущих станках, машинах пищевой промышленности.

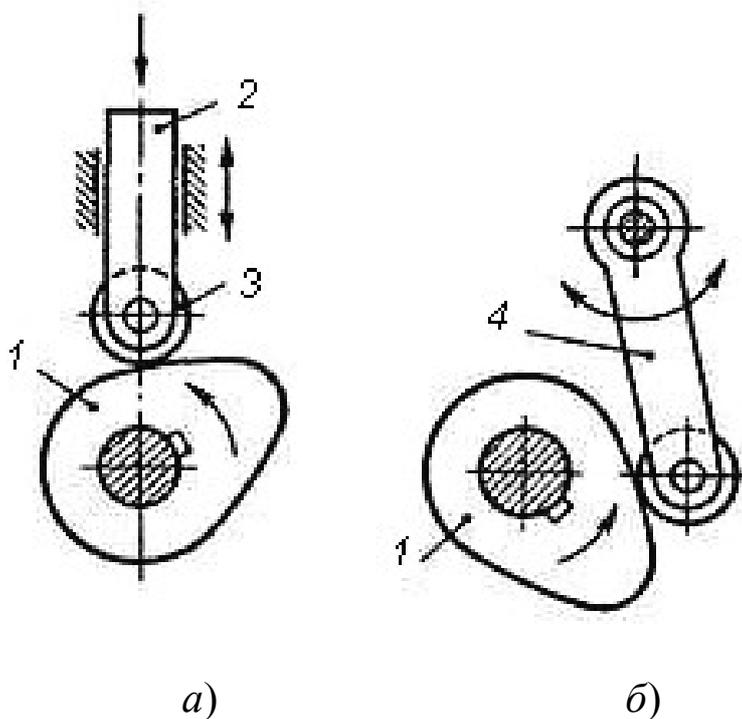


Рисунок 7 - Кулачковые механизмы

3). *Зубчатые* (Рис. 8) - образуются с помощью зубчатых колес. Служат для передачи вращения между неподвижными и подвижными осями. Оси валов могут быть параллельными, пересекаться или перекрещиваться под различными углами.

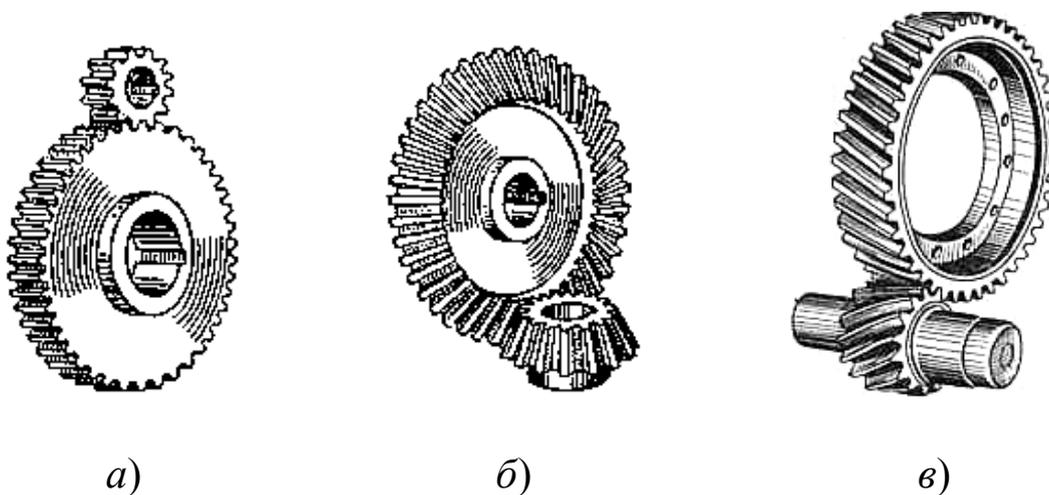


Рисунок 8 - Зубчатые механизмы

В первом случае механизм является плоским, в остальных случаях механизмы пространственные. Зубчатые передачи с параллельными осями осуществляются при помощи цилиндрических зубчатых колес (Рис. 8а), с пересекающимися

осями - при помощи конических зубчатых колес (Рис. 8б), а со скрещивающимися осями - при помощи червяка и червячного колеса (Рис. 8в). Зубчатые передачи представляют собой наиболее распространенный вид передач в современном машиностроении.

4). *Фрикционные* - передают движение от ведущего звена к ведомому за счет сил трения, возникающих в результате контакта этих звеньев. На рисунке 9 (а) изображена цилиндрическая фрикционная передача. На ведущем 2 и ведомом 1 валах на шпонках насажены два катка. Подшипники вала 1 установлены неподвижно, а подшипники вала 2 позволяют перемещаться валу по направлению линии центров передачи. Если привести во вращение ведущий вал 2, то вместе с ним будет вращаться и ведущий диск. Ведомый диск не будет вращаться до тех пор, пока не будет преодолено полезное сопротивление на валу 1 (вращающий момент и сопротивление трения в подшипниках).

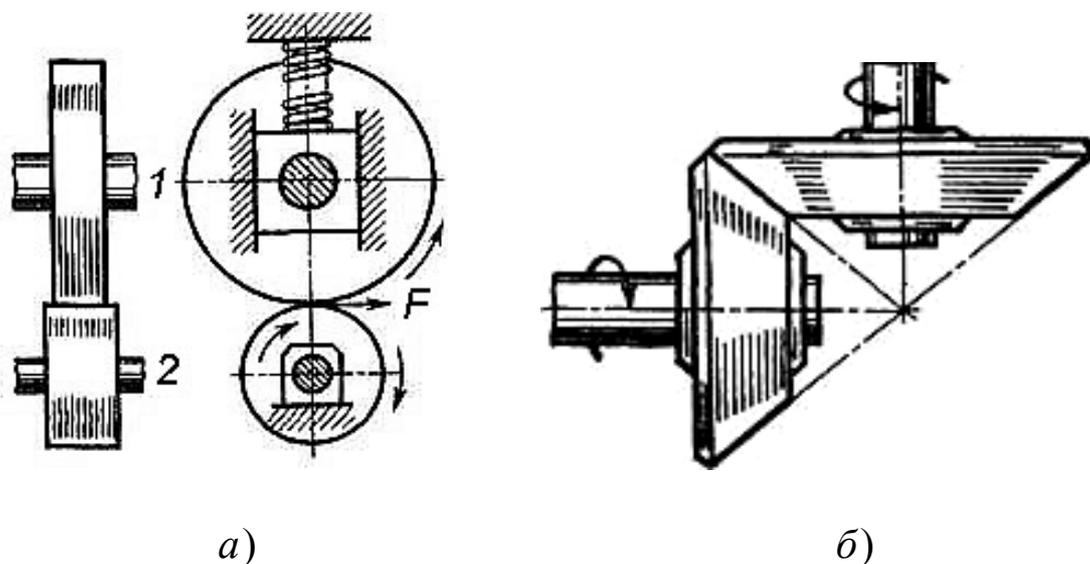


Рисунок 9 - Фрикционные механизмы

На рисунке 9 (б) изображена коническая фрикционная передача. Катки передачи представляют собой усеченные конусы, которые соприкасаются по общей образующей. При осевом сжатии конусов на их образующих в месте контакта возникает сила трения, которая и увлекает во вращение ведомый каток и вал. Для правильной работы передачи необходимо, чтобы конусы имели общую вершину, являющуюся

точкой пересечения осей катков. Фрикционные передачи широко используются в различных отраслях промышленности. Их часто применяют в приводах конвейеров, в сварочных и литейных машинах, в металлорежущих станках.

4.5. Понятие о структурном анализе и синтезе механизмов

Под *структурным анализом* механизма понимается определение количества звеньев и кинематических пар, определение степени подвижности механизма, установление класса и порядка механизма. Вспомним, что число возможных независимых движений кинематической цепи относительно одного из звеньев называют ее *степенью подвижности*.

Степень подвижности W плоского механизма определяется по формуле Чебышева:

$$W = 3n - 2P_n - P_v, \quad (4.2)$$

где n - число подвижных звеньев, P_n - число низших, а P_v - число высших кинематических пар.

Степень подвижности пространственного механизма определяется по формуле Сомова-Малышева:

$$W = 6n - (5P_1 + 4P_2 + 3P_3 + 2P_4 + P_5) \quad (4.3)$$

или

$$W = 6n - 5P_1 - 4P_2 - 3P_3 - 2P_4 - P_5, \quad (4.4)$$

где P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 - число одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиподвижных кинематических пар.

Структурным синтезом механизма называется проектирование структурной схемы механизма. Синтез является начальной стадией составления схемы механизма, удовлетворяющего заданным условиям. Исходными данными обычно являются виды движения ведущего и рабочего звеньев механизма, взаимное расположение осей вращения

и направления поступательного движения звеньев, их угловые и линейные перемещения, скорости и ускорения.

Наиболее удобным методом определения структурной схемы является построение механизма по Ассуру. Он состоит в последовательном присоединении к ведущим звеньям и стойке особых кинематических цепей, называемых структурными группами или группами Ассура, без изменения степени подвижности механизма в целом. Кинематическая цепь с нулевой степенью подвижности относительно тех звеньев, к которым она присоединяется своими элементами - это и есть группа Ассура. Такая цепь не распадается на еще более простые кинематические цепи.

Принцип построения механизмов методом наложения групп Ассура рассмотрим на примере плоского механизма с одной степенью свободы, у которого положение всех звеньев определяется заданием одной обобщенной координаты (φ или l). Построение начинается с объединения ведущего звена и стойки. Согласно классификации Ассура-Артоболевского, полученный таким образом механизм называется *начальным механизмом* 1-го класса (Рис. 10 а, б).

Более сложные механизмы образуются присоединением к начальному механизму групп Ассура. Структурные группы с числом звеньев более четырех встречаются в механизмах крайне редко.

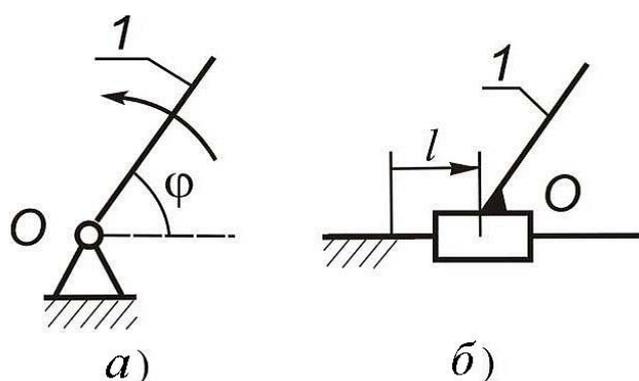


Рисунок 10 - Построение начального механизма

В качестве примера определения W рассмотрим, изображенный на рисунке 11, четырехзвенный механизм рулевого управления автопилота. Звенья 1 и 2 образуют

цилиндрическую пару четвертого класса, имеющую две степени свободы; звенья 2-3 и 4-1 образуют вращательные пары пятого класса, имеющие одну степень свободы; звенья 3-4 образуют шаровую пару третьего класса, имеющую три степени свободы; число подвижных звеньев равно трем, тогда:

$$W = 6 \cdot 3 - 2 \cdot 5 - 1 \cdot 4 - 1 \cdot 3 = 1.$$

Степень подвижности данного механизма равна 1.

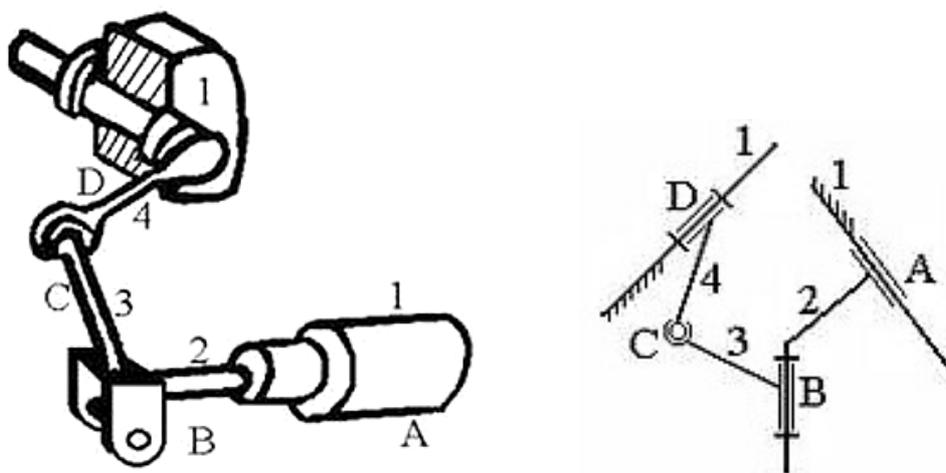


Рисунок 11 - Четырехзвенный механизм

Структурные группы подразделяют по классу и порядку. Класс группы определяется максимальным числом кинематических пар входящих в одно звено (Рис. 12).

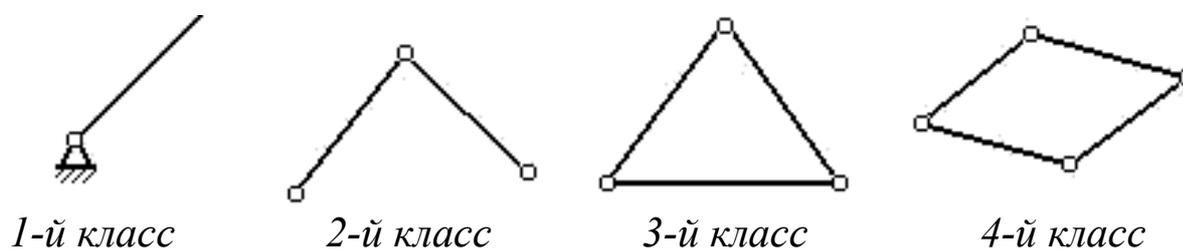


Рисунок 12 - Классы групп

И класс, и порядок механизма зависят от того, какое звено является ведущим (Рис. 13). Порядок группы определяется числом кинематических пар, которыми группа присоединяется к основному механизму. Пунктирными линиями на рисунках

показаны звенья, к которым другие звенья присоединяются. Звеньями, изображенными штриховыми линиями, могут быть стойка или звенья.

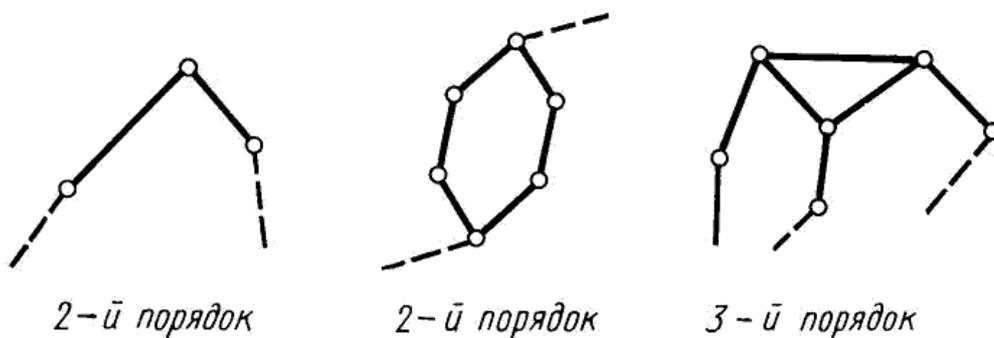


Рисунок 13 - Порядок групп

Группа, имеющая два звена и три кинематические пары 5-го класса ($n = 2, P_5 = 3$), называется группой 2 класса 2-го порядка или двухповодковой группой (Рис. 14а; Рис. 1 приложения). На рисунке 14 (б) изображена группа 3 класса 3-го порядка (трехповодковая) ($n = 4, P_5 = 6$).

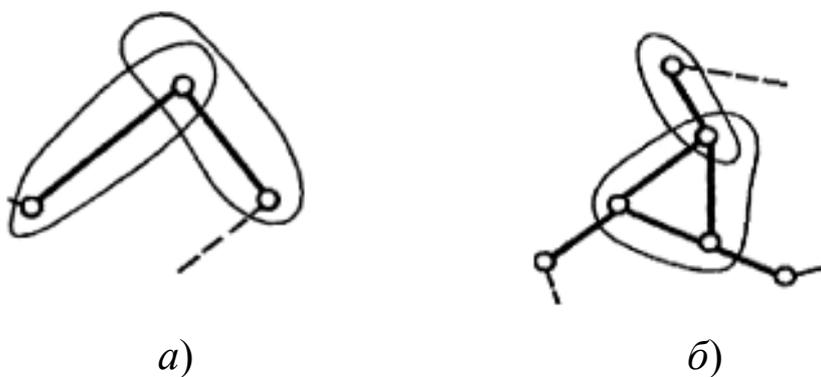


Рисунок 14 - Примеры структурных групп Ассура

Группы второго класса и второго порядка ($n = 2, P_5 = 3$), делятся на 5 видов, которые определяются взаимным расположением вращательных и поступательных пар (Рис. 15):
 в группе 1-го вида - все пары вращательные;
 в группе 2-го вида - на конце одного из звеньев поступательная пара;
 в группе 3-го вида - в середине поступательная пара;

в группе 4-го вида - на конце обоих звеньев поступательные пары;

в группе 5-го вида - в середине и на конце одного из звеньев поступательные пары.

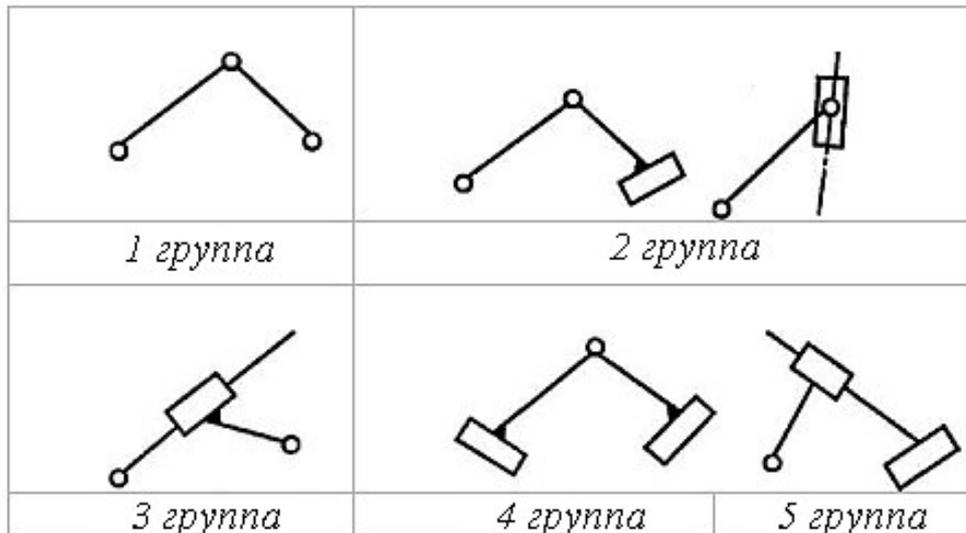


Рисунок 15 - Виды структурных групп 2-го класса

Структурный анализ механизмов предполагает:

- определение количества звеньев механизма, числа и класса его кинематических пар;
- определение степени подвижности механизма;
- разделение механизма на начальные механизмы и структурные группы;
- определение класса и порядка структурных групп.

Отделение групп начинается со звеньев, наиболее удаленных от ведущего звена. Разделение кинематической цепи механизма на группы Ассуров ведется до тех пор, пока не останутся только начальные механизмы (ведущие звенья и стойка).

Структурный анализ и классификация механизмов по Ассуров-Артоболовскому рассмотрим на примере механизма, изображенного на рисунке 16. Механизм имеет пять подвижных звеньев ($n = 5$) и семь кинематических пар 5-го класса ($P_5 = 7$). Степень подвижности механизма определяется:

$$W = 3n - 2P_5 = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 = 1.$$

Ведущее звено 1 со стойкой образуют механизм 1-го класса. Ведомую кинематическую цепь можно разделить на две группы Ассур 2-го класса (выделены на рисунке контурными линиями), начиная с группы, которая состоит из звеньев $4, 5$.

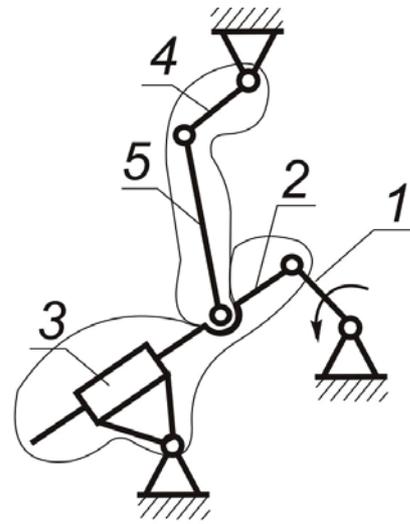


Рисунок 16 -
Механизм 2-го класса

Так как механизм имеет в своем составе только группы Ассур 2-го класса, то его следует отнести к механизмам 2-го класса.

Кроме двух-, трех- и четырехзвенных механизмов с одноподвижными кинематическими парами (парами 5-го класса) используются различные механизмы с большим числом звеньев, служащие для реализации специальных законов движения ведомых звеньев. Примером может служить шестизвенный двухкривошипно-ползунный механизм (Рис. 17) применяемый в касающихся конвейерах. В таких конвейерах желоб с сыпучим материалом должен передвигаться с меньшей скоростью в направлении перемещения сыпучего материала и с большей скоростью в обратном, чтобы желоб уходил в этом направлении без груза.

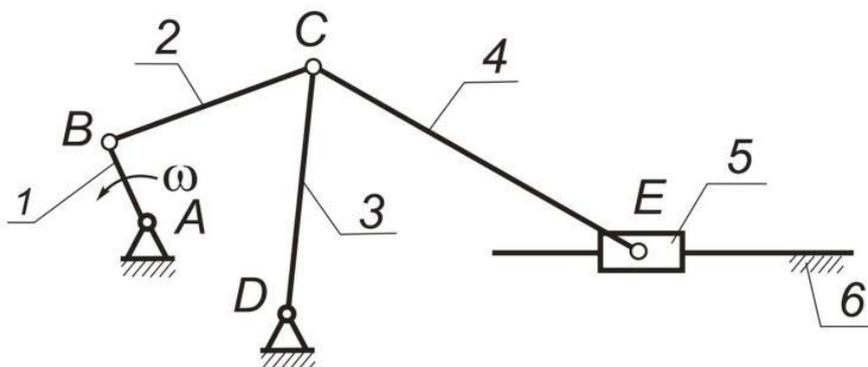


Рисунок 17 -
Шестизвенный двухкривошипно-ползунный механизм

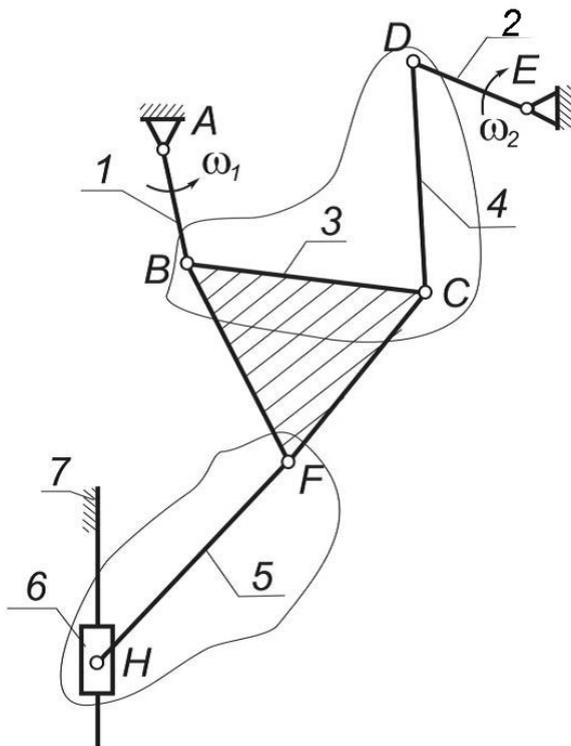


Рисунок 18 -
Кривошипно-рычажный пресс

Пример механизма с двумя ведущими кривошипами 1 и 2 (Рис. 18) - это механизм кривошипно-рычажного пресса.

Все построения механизмов по Ассур-Артоблевскому удобно использовать как при структурном анализе, так и при структурном синтезе механизмов. Еще на этапе проектирования машин их закладываемая работоспособность, а также надежность во многом зависят от того, несколько правильно и рационально выбраны схема построения и структура механизма.

4.6. Кинематические анализ и синтез механизмов

Кинематический анализ состоит в определении параметров движения звеньев механизма по заданному движению ведущих звеньев. Анализ проводят без учета сил, вызывающих движение, аналитическим или графическим методом. При этом решают в основном три задачи:

- определение перемещений звеньев и траекторий заданных точек;
- определение скоростей точек звеньев и угловых скоростей звеньев;
- определение ускорений точек звеньев и угловых ускорений звеньев.

Кроме того, при решении задач кинематического анализа должны быть заданы:

- кинематическая схема механизма и размеры его звеньев;
- закон движения ведущего звена в виде зависимости перемещения звена (линейного или углового) или точки на нем от времени или других параметров движения.

Аналитический метод позволяет установить в виде математического уравнения зависимость кинематических параметров механизма от размеров звеньев. Для многих механизмов он характеризуется сложностью расчетных зависимостей и трудоемкостью вычислений, используются методы аналитической геометрии, тензорно-матричных операций, векторного анализа. Вместе с тем аналитические методы не отличаются наглядностью, что затрудняет проверку получаемых результатов в самом процессе вычислений.

Графический метод, более простой, основан на непосредственном геометрическом построении планов положений механизма. Он позволяет получить наглядную картину движения звеньев механизма и его точек. При этом на чертеже отображаются действительная форма этих траекторий, действительные значения углов, составляемых звеньями. Все это дает возможность наглядного суждения о движении звеньев механизма и их отдельных точек. Графически может быть отображена любая величина (длина, скорость, ускорение, сила и т.д.), однако, с помощью этого метода нельзя получить общее решение, так как необходимые построения выполняются для каждой конкретной конфигурации механизма.

Некоторые положения метода:

- *Планом скоростей* механизма называется графическая диаграмма, на которой в выбранном масштабе из некоторой точки плоскости отложены векторы скоростей основных точек механизма.

- *План ускорений* - графическая диаграмма, на которой из плюса отложены векторы ускорений точек механизма в определенном масштабе.

- *Планом скоростей или ускорений* называется фигура, составленная из векторов абсолютных скоростей или ускорений точек звеньев, выходящих из одной точки p (π для плана ускорений), называемой полюсом плана скоростей или ускорений, и векторов относительным скоростей или ускорений,

соединяющих концы векторов абсолютных скоростей или ускорений.

Рассмотрим решение задач о положениях, скоростях и ускорениях графическим методом на примере кинематического анализа механизма плоского шарнирного четырехзвенника (Рис. 19а).

Механизм состоит из ведущего звена 1 (кривошипа), одной группы Ассур 2-го класса, состоящей из звеньев 2 (шатуна) и 3 (коромысла). Механизм имеет одну степень подвижности. За обобщенную координату принимаем угол (См. рис. 10а).

При решении используют так называемый *вычислительный масштаб*, под которым следует понимать отношение изображаемой на чертеже величины к соответствующему отрезку чертежа. Для построения схемы механизма выберем масштаб построений (м/мм):

$$\mu_l = l_{AB} / AB, \quad (4.5)$$

где l_{AB} - длина звена 1, м; AB - отрезок, изображающий звено 1 на чертеже, мм. Величину μ_l принимают по стандарту ЕСКД для выполнения чертежей деталей узлов машин.

Длины отрезков на чертеже, изображающих звенья механизма, представим в виде:

$$BC = l_{BC} / \mu_l, \quad CD = l_{CD} / \mu_l, \quad AD = l_{AD} / \mu_l, \\ BE = l_{BE} / \mu_l, \quad EC = l_{EC} / \mu_l.$$

После вычисления длин этих отрезков геометрическим построением получим план положения механизма для данного значения угла. Построив планы положений механизма для n -го количества значений угла, получим траектории движения точек звеньев механизма.

Задачу на определение скоростей (Рис. 19б) решают методом построения плана скоростей. Сначала для заданного положения механизма с известными размерами его звеньев строится план положений. При заданной угловой скорости ведущего звена ω_1 требуется определить угловые скорости

ω_2, ω_3 звеньев 2, 3, а также скорости характерных точек B, C и E звеньев механизма (См. рис. 19а). Скорость точки B ведущего звена v_B (м/с) и масштабный коэффициент μ_v ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}/\text{мм}$) определяются по формулам:

$$v_B = \omega_1 l_{AB}, \quad (4.6)$$

$$\mu_v = v_B / (pb), \quad (4.7)$$

где (pb) - длина отрезка, изображающего скорость v_B на плане скоростей (выбирается максимально возможным для имеющегося места построения плана скоростей (ускорений) и таким, чтобы масштабный коэффициент μ_v (μ_a) выражался одной цифрой (См. масштабы ЕСКД) или двумя цифрами.

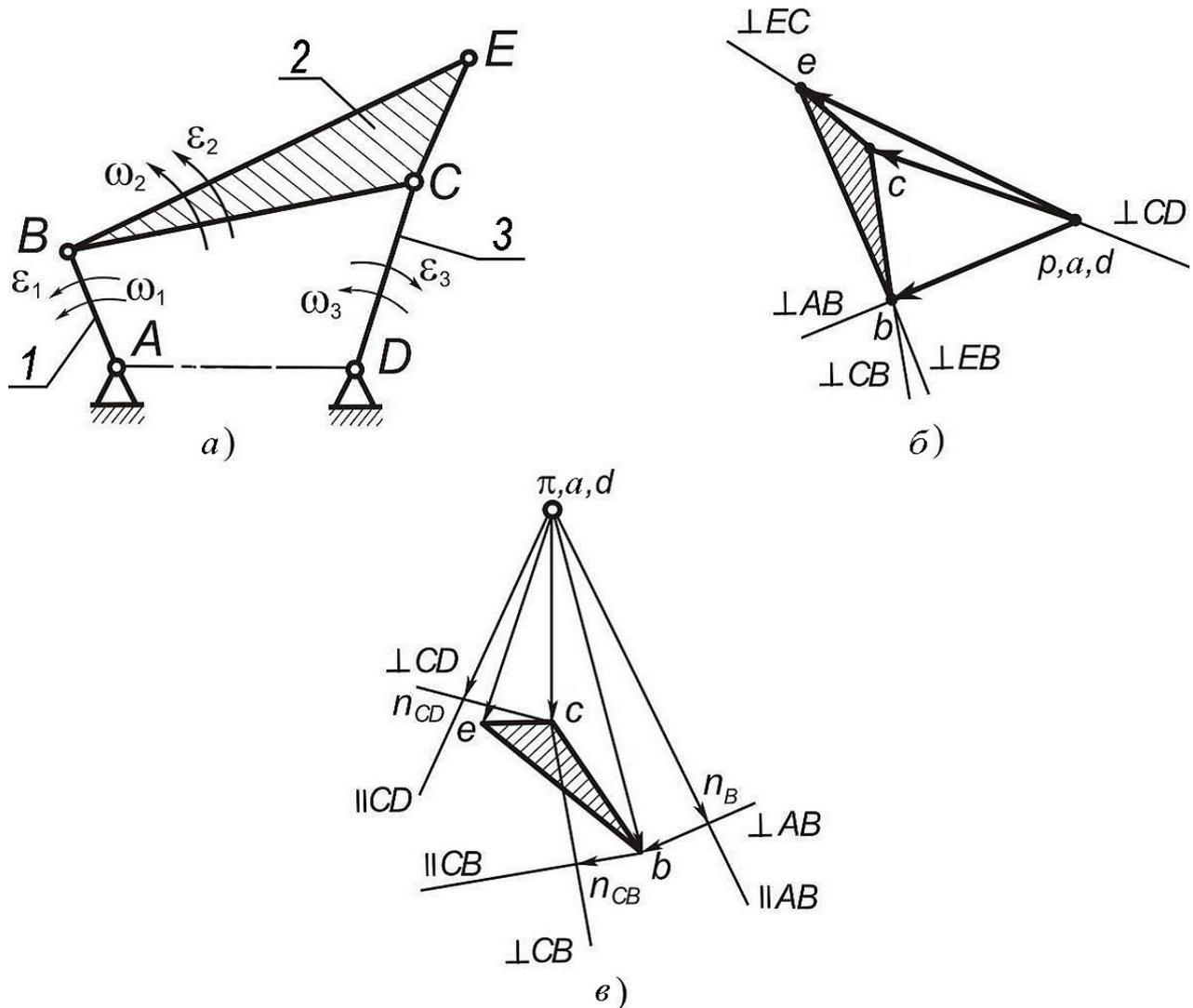


Рисунок 19 - Планы механизма, скоростей, ускорений

Чтобы построить план скоростей, составляется два векторных уравнения скоростей на каждую группу Ассур 2-го класса, начиная с первой группы, присоединенной к ведущему звену. Скорости точек, принадлежащих внешним кинематическим парам группы, известны:

$$v_A = 0, \quad v_B = \omega_1 l_{AB}, \quad v_D = 0.$$

Точка C принадлежит внутренней кинематической паре, значит, принадлежит одновременно и звену 2 и звену 3. Определим скорость этой точки. Шатун 2 совершает плоскопараллельное движение, поэтому абсолютную скорость точки C можно представить суммой скоростей переносного и относительного движений. Переносным движением является поступательное движение звена 2 со скоростью точки B (v_B), а относительным - вращательное движение этого звена вокруг точки B . Проанализировав движение звена 2 запишем первое векторное уравнение скоростей.

Используя теорему сложения скоростей, имеем:

$$\vec{v}_C = \vec{v}_B + \vec{v}_{CB}, \quad (4.8)$$

где \vec{v}_{CB} - вектор скорости точки C во вращательном движении звена 2 относительно точки B .

Также составим второе векторное уравнение скоростей движения звена 3:

$$\vec{v}_C = \vec{v}_D + \vec{v}_{CD}, \quad (4.9)$$

где \vec{v}_{CD} - вектор скорости точки C во вращательном движении звена 3 относительно неподвижной точки D .

Применяя эти уравнения (4.8) и (4.9), находим абсолютную и относительную скорости точки C . Результат графического решения этих уравнений векторные треугольники скоростей - это и есть план скоростей.

С выбора полюса начинаем построение плана скоростей. Отмечаем на плоскости чертежа произвольную точку p (Рис. 19б), затем из полюса p откладываем отрезок (pb) . Отрезок направлен перпендикулярно звену AB и в сторону,

соответствующую направлению вращения звена AB . Затем из точки b проводим перпендикулярно звену CB линию действия вектора v_{CB} , и выполняем построение векторного треугольника по уравнению (4.9). Так как $v_D = 0$, то конец вектора v_D (точка d на плане скоростей) совпадает с полюсом p . Из точки d проводим линию действия вектора v_{CD} , направленную перпендикулярно звену CD . Пересечение построенных линий (точка c) определяет положение конца вектора скорости v_C . Вектор скорости v_{CB} изображается на плане скоростей отрезком (cb) .

При определении направлений векторов на плане скоростей руководствуемся следующими правилами:

- вектор абсолютной скорости всегда направлен из полюса;

- вектор относительной скорости всегда направлен к точке плана, соответствующей первой букве индекса в обозначении этой скорости. Таким образом, стрелку вектора v_{CB} на плане скоростей направляем из точки b в точку c . Вектор $v_{CD} = v_C$, изображаемый отрезком $(cd) = (cp)$, также направлен в точку c .

Учитывая, что точка A звена AB неподвижна, точку a на плане совмещаем с полюсом p . План скоростей механизма построен.

Значения искомых скоростей \vec{v}_{CB} и \vec{v}_{CD} находятся путем замера длин отрезков (cb) и (cd) :

$$v_{CB} = \mu_v (cb), \quad v_{CD} = v_C = \mu_v (cd).$$

Полученные результаты используем при определении угловых скоростей звеньев механизма. Модуль угловой скорости вращения звена 2 (шатунa) подсчитываем по формуле:

$$\omega_2 = v_{CB} / l_{CB}.$$

Для определения направления вращения звена 2 со скоростью ω_2 перенесем вектор v_{CB} параллельно самому себе из плана скоростей в точку C механизма. Направление вектора

v_{CB} показывает, что вращение шатуна будет направлено против хода часовой стрелки.

При определении угловой скорости вращения звена 3 проводим аналогичные операции:

$$\omega_3 = v_{CD} / l_{CD} .$$

Параллельный перенос вектора v_{CD} в точку C механизма позволяет установить, что вращение звена 3 с угловой скоростью ω_3 направлено, как и вращение шатуна 2, против хода часовой стрелки. На схеме механизма, изображенной на рисунке 19 (а), круговыми стрелками указаны направления вращения звеньев.

После построения плана скоростей и определения угловых скоростей всех звеньев механизма, появляется возможность определить скорости любой точки механизма. Например, требуется найти скорость точки E шатуна 2 (См. рис. 19а). Составляем два векторных уравнения, аналогичных уравнениям (4.8) и (4.9):

$$\begin{array}{c} \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \\ v_E = v_B + v_{EB}; \end{array} \quad (4.10)$$

$$\begin{array}{c} \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \\ v_E = v_C + v_{EC}. \end{array} \quad (4.11)$$

Направление векторов v_{EB} и v_{EC} :

$$\begin{array}{c} \rightarrow \quad \rightarrow \\ v_{EB} \perp BE; \quad v_{EC} \perp CE. \end{array}$$

После построения плана при необходимости можно определить абсолютную скорость \vec{v}_E . Из точки b плана скоростей проводим линию, перпендикулярную BE , из точки c - линию, перпендикулярную CE . Точка e в пересечении этих линий и определяет положение конца вектора v_E . Соединив точку e с полюсом p , получим отрезок (pe) , с помощью которого вычислим значение скорости:

$$v_E = \mu_v (pe) .$$

Построение планов скоростей и их чтение упрощаются при использовании свойств этих планов. Видим, что стороны Δbcs плана скоростей и ΔBEC плана положений механизма взаимно перпендикулярны и, следовательно, эти треугольники подобны. Вершины треугольников сходственно расположены, то есть обход контуров (bcs) и (BEC) происходит в одном направлении, в данном случае по ходу часовой стрелки. Это справедливо как для плана скоростей, так и для плана ускорений любых точек одного и того же звена механизма.

Сказанное сформулируем в виде теоремы подобия: отрезки прямых, соединяющих концы векторов абсолютных скоростей (или ускорений) точек одного и того же звена на плане скоростей (или ускорений), и отрезки прямых, соединяющих соответствующие точки самого звена на плане положений механизма, образуют подобные и сходственно расположенные фигуры.

Используя эту теорему, можно найти скорость (или ускорение) любой точки звена механизма путем построения подобных и сходственно расположенных фигур по известным скоростям двух точек этого звена.

Для определения ускорений точек звеньев механизма построим план ускорений (Рис. 19в). Проведем построения на примере того же шарнирного четырехзвенника при заданном значении обобщенной координаты φ_1 . Считаются известными угловая скорость ω_1 и угловое ускорение ε_1 ведущего звена. Ускорение любой точки звена, которое совершает вращательное движение вокруг неподвижной оси, можно представить суммой:

$$\vec{a} = \vec{a}^{\tau} + \vec{a}^n, \quad (4.12)$$

где \vec{a}^{τ} , \vec{a}^n - соответственно касательная (тангенциальная)

и нормальная составляющие ускорения \vec{a} .

Ведущее звено (кривошип) четырехзвенника вращается вокруг точки A , поэтому ускорение точки B :

$$\vec{a}_B = \vec{a}_B^\tau + \vec{a}_B^n, \quad (4.13)$$

где $\vec{a}_B^\tau = \varepsilon_1 l_{AB}$, $\vec{a}_B^n = \omega_1^2 l_{AB}$.

Нормальная составляющая \vec{a}_B^n ускорения точки B направлена к центру вращения параллельно AB (к точке A).

Касательная составляющая \vec{a}_B^τ направлена перпендикулярно AB в сторону, совпадающую с направлением ускорения ε_1 .

Обозначим буквой n с индексом на плане ускорений конец вектора нормальной составляющей ускорения точки:

n_B - конец вектора \vec{a}_B^n ; n_{CB} - конец вектора \vec{a}_{CB}^n .

Зададим отрезок (πn_B) , изображающим нормальную составляющую ускорения точки B , и определим масштабный коэффициент плана ускорений (в $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}/\text{мм}$):

$$\mu_a = a_B^n / \pi n_B.$$

Для ускорения точки C также составим два векторных уравнения, принадлежащей звеньям 2 и 3:

$$\vec{a}_C = \vec{a}_B^\tau + \vec{a}_B^n + \vec{a}_{CB}^\tau + \vec{a}_{CB}^n,$$

$$\vec{a}_C = \vec{a}_D + \vec{a}_{CD}^\tau + \vec{a}_{CD}^n.$$

где $a_D = 0$, ускорения \vec{a}_B^τ и \vec{a}_B^n уже определены по величине и направлению. Значения \vec{a}_{CB}^n и \vec{a}_{CD}^n вычисляем по формулам:

$$a_{CB}^n = \omega_2^2 l_{CB}, \quad a_{CD}^n = \omega_3^2 l_{CD}.$$

Отрезки, которые изображают эти ускорения на плане ускорений (См. рис. 19в) - по формулам:

$$(bn_{CB}) = a_{CB}^n / \mu_a, \quad (\pi n_{CD}) = a_{CD}^n / \mu_a.$$

Продолжаем построение плана ускорений. От произвольной точки π (полюса) откладываем отрезок πn_B параллельно AB в направлении от B к A . Из точки n_B проводим отрезок $(n_B b)$

- ускорение \vec{a}_B^τ . Соединив точку b с полюсом π , получим отрезок (πb) , который изображает ускорение \vec{a}_B . Стрелки, указывающие направление векторов, расставляются согласно правилу векторного суммирования.

Для завершения графического решения из точки b откладываем отрезок (bn_{CB}) параллельно шатуну 2 и в направлении от точки C к точке B , а из точки n_{CB} перпендикулярно шатуну проводим линию действия вектора

ускорения \vec{a}_{CB}^τ .

При построении плана ускорений, необходимо учесть, что ускорение точки D - $\vec{a}_D = 0$ и, следовательно, точка d плана ускорений совпадает с полюсом π . Из точки d нанесем параллельно CD отрезок (πn_{CD}) , изображающий вектор

нормального ускорения точки C относительно точки D (\vec{a}_{CD}^n), и направленного к точке D . Из n_{CD} перпендикулярно CD проведем линию действия вектора тангенциального ускорения

\vec{a}_{CD}^τ . Пересечение линий ускорений определяет точку c - это

конец вектора искомого ускорения \vec{a}_C . Соединив точку c и полюс π и замерив длину отрезка (πc) , получим общее ускорение точки C .

Закончив построение плана ускорений, находим остальные ускорения:

$$a_C = \mu_a(\pi C), \quad a_{CB}^\tau = \mu_a(n_{CB}C), \quad a_{CD}^\tau = \mu_a(n_{CD}C).$$

Затем определим угловые ускорения звеньев:

$$\varepsilon_2 = a_{CB}^\tau / l_{CB}, \quad \varepsilon_3 = a_{CD}^\tau / l_{CD}.$$

Направления ускорений ε_2 и ε_3 , условно показанные на рисунке 19 (а) круговыми стрелками, определяют векторы \vec{a}_{CB}^τ и \vec{a}_{CD}^τ , перенесенные с плана ускорений в точку С механизма.

Для нахождения ускорения a_E точки E шатуна используем свойство подобия. На отрезке (bc) плана ускорений строим Δbce , подобный ΔBCE плана положений и сходственно с ним расположенный. Полученную точку e соединим с полюсом π .

Тогда ускорение точки E :

$$a_E = \mu_a(\pi e).$$

Подобным образом определяются ускорения и других точек механизма. Следовательно, планы скоростей (ускорений) - это результат решения графическим путем векторных уравнений, определяющих скорости (ускорения) соответствующих точек звеньев механизмов.

4.7. Динамические анализ и синтез механизмов

В общей постановке динамика изучает какие-либо процессы или явления в функции времени.

Прямая задача динамики - определение закона движения системы при заданном управляющем силовом воздействии.

Обратная задача динамики - определение требуемого управляющего силового воздействия, обеспечивающего заданный закон движения системы.

В теории машин и механизмов исследование движения механизма под действием заданных сил является *динамическим*

анализом механизмов. Основные задачи такого анализа следующие: определение сил, действующих в кинематических парах механизма; определение сил трения; определение закона движения механизма, находящегося под действием приложенных к звеньям сил.

Проектирование нового механизма по заданным параметрам (кинематическим и динамическим) называется *синтезом*. Важное значение в технике имеет синтез механизмов для преобразования вращательного движения вокруг одной оси во вращательное движение вокруг другой оси.

При всем разнообразии задач анализа и синтеза их разделяют на два основных типа:

- в задачах первого типа определяют, под действием каких сил происходит заданное движение механизма (*первая задача динамики*);

- в задачах второго типа по заданной системе сил, действующей на звенья механизма, находят их кинематические параметры (*вторая задача динамики*).

Закон движения механизма в аналитической форме задается и виде зависимостей его обобщенных координат от времени. Наиболее просто задачи динамики решают для механизмов с жесткими звеньями и одной степенью свободы с помощью классических методов теории механизмов и машин. Однако современная техническая практика требует решения более сложных задач. В подобных случаях решаются задачи динамики механических систем с несколькими степенями свободы (или с бесконечным числом степеней свободы) с привлечением сложного математического аппарата многомерных систем.

Силы и моменты, действующие на звенья механизма, можно разделить на внешние и внутренние.

К внешним силам относятся:

- 1). *Движущие силы F_d или пары сил с моментом M_d* - это силы, элементарная работа которых на возможных перемещениях точек их приложения положительна (точки приложения направлены в одну сторону или направление их приложений образует острый угол). Движущие силы или их моменты прикладываются к ведущим звеньям со стороны двигателей. Они предназначены для приведения

машин в движение, преодоления сил сопротивления и осуществления заданного технологического процесса. В качестве приводных двигателей применяют двигатели внутреннего сгорания, электрические, гидравлические, пневматические и другие.

2). *Силы сопротивления F_C или пары сил сопротивления с моментом M_C* - это силы, элементарная работа которых на возможных перемещениях точек их приложения отрицательна (силы и скорости противоположны или направления их приложений образуют тупой угол). Они разделяются на силы производственных сопротивлений ($F_{n.c.}$, $M_{n.c.}$), для преодоления которых предназначен данный механизм, и силы вредных сопротивлений ($F_{в.с.}$, $M_{в.с.}$), вызывающие непроизводительные затраты энергии движущих сил.

Силы производственных сопротивлений обусловлены процессами технологическими (это силы технологических сопротивлений), обычно они приложены к выходным звеньям исполнительных машин. Силы вредного сопротивления (понятие «вредные силы» является условным) - это, в основном, силы трения в кинематических парах и силы сопротивления среды. В ряде случаев они обеспечивают работоспособность механизма (например, движение катка обеспечивают силы сцепления с дорожным полотном).

3). *Силы веса звеньев F_g (силы тяжести G)*, в зависимости от направления их действия относительно направления движущих сил, могут быть полезными (или вредными), когда они способствуют (или препятствуют) движению механизма. Значит работа приложения может быть положительной или отрицательной.

4). *Силы инерции F_i или моменты сил инерции M_i* , возникающие при изменении скорости движения звеньев, могут быть как движущимися силами, так и силами сопротивления, в зависимости от направления движения звеньев. Работа которых может быть положительной или отрицательной.

К внутренним силам относятся:

- *реакции в кинематических парах R* , являющиеся функциями внешних сил, их работа (для идеальных пар) равна нулю;

- внутренние силы упругости F_y или их моменты M_y , возникающие в звеньях или элементах кинематических пар под действием внешних сил и реакций в кинематических парах; и другие.

Для силового исследования механизма необходимо знать приложенные к его звеньям пары сил. Например, пару сил создает вес звена или инерционная сила. Конечной задачей силового анализа является определение уравновешивающей силы, приложенной к ведущему звену. Для ее определения используется метод *кинетостатики* (кинетостатика - это раздел технической механики, в котором рассматриваются способы решения динамических задач с помощью аналитических или графических методов статики). При кинетостатическом анализе механизма, исходя из заданных внешних сил и закона движения ведущего звена, определяются и реакции в кинематических парах, и уравновешивающие силы.

В общем случае силы движущие и силы сопротивления являются функциями кинематических параметров (времени, координат, скорости, ускорения точки приложения силы). Эти функции для конкретных двигателей и рабочих машин называют механическими характеристиками, которые задаются в аналитической форме или графически.

Характеристики рабочих машин чаще представляют собой восходящие кривые. Такой вид имеют многие механические характеристики компрессоров, центробежных насосов и других. Пример представлен на рисунке 20, где показана зависимость двух характеристик механизма - момента сопротивления M_C и угловой скорости ω .



Рисунок 20 -
Зависимость M_C и ω

4.8. Общие сведения о трении в механизмах

Трением называется сопротивление возможному или действительному перемещению соприкасающихся тел, возникающему в местах контакта их поверхностей. Трение сопровождается диссипацией (рассеиванием) энергии. Если взаимодействие соприкасающихся тел происходит при наличии микроскопических смещений, обусловленных упругими или пластическими деформациями до перехода к относительному движению (перемещению), то сопротивление такому смещению называют *трением покоя*. Сопротивление относительному перемещению соприкасающихся тел при их относительном движении называют *трением движения*. По виду относительного движения соприкасающихся тел трение движения разделяют на *трение скольжения* и *трение качения*. Трение скольжения возникает при относительном поступательном движении (перемещении) соприкасающихся тел, а трение качения - при их относительном качении. Рассмотрим подробнее некоторые виды трений:

1). *Трение скольжения* в зависимости от состояния контактирующих тел может быть:

- *чистым* (ювенильным), при котором на трущихся поверхностях полностью отсутствуют посторонние примеси;

- *сухим*, то есть трением несмазанных поверхностей, покрытых пленками оксидов и адсорбированными молекулами газов или жидкостей;

- *граничным*, при котором между трущимися поверхностями существует тонкий слой смазочного материала (порядка 0,1 мк и менее), обладающим особыми свойствами;

- *жидкостным*, при котором поверхности трущихся тел полностью отделены слоем твердого тела (порошком графита), жидкости или газа (смазки) различной толщины.

Силы, возникающие при соприкосновении поверхностей двух тел (или частей одного тела) и препятствующие их взаимному перемещению, называют *силами трения*. Силы трения отличаются от рассматриваемых в механике сил тем, что зависят не столько от конфигурации тел, сколько от их взаимного расположения. Основное же отличие в том, что они зависят от относительных скоростей тел, между

которыми действуют. Вектор силы трения лежит в плоскости, касательной к поверхности трущихся тел в зоне их контакта, и направлен в сторону, противоположную направлению относительного движения.

Сила трения покоя зависит от внешних сил, приложенных к трущимся телам. Наибольшего значения она достигает в мгновение, предшествующее началу скольжения. Такое ее значение называется предельной или полной силой трения. Превышение предельной силы трения ведет к нарушению состояния покоя и вызывает скольжение трущихся поверхностей.

Сила трения скольжения направлена вдоль вектора относительной скорости скольжения в противоположную от скорости сторону и по величине меньше силы трения покоя. При наличии смазочного материала сила трения скольжения при прочих равных условиях достигает наименьшего значения. При отсутствии смазочного материала и при отсутствии загрязнений между трущимися поверхностями она возрастает. Скольжение поверхностей сопровождается процессами механического зацепления и деформированием отдельных выступов шероховатых поверхностей, возникновением сил молекулярного взаимодействия между ними, на преодоление которых затрачивается энергия движущих сил.

В технических расчетах применяют приближенные формулы, определяющие предельную силу трения покоя $F_{m.o.}$ и силу трения скольжения F_{mp} :

$$F_{m.o.} = f_0 F_n, \quad F_{mp} = f F_n \quad (4.14)$$

где f_0, f - коэффициенты трения соответственно покоя и скольжения; F_n - сила нормального давления на поверхности трения. Значения коэффициентов зависят от: материала трущихся тел, качества соприкасающихся поверхностей, наличия на этих поверхностях пленок оксидов, скорости скольжения тел, жесткости и упругости соприкасающихся тел, температурного режима. Большинство подобных факторов учитывается опытно-экспериментальным путем с учетом реальных условий работы каждого механизма в отдельности.

Силы трения в приближенных расчетах можно определить по формулам (4.14) в предположении, что коэффициенты трения постоянны. В таблице 3 приведены приближенные значения коэффициентов трения для некоторых пар материалов.

Таблица 3. Значения коэффициентов трения

Материалы	Сухое трение		Трение со смазкой	
	f_0	f	f_0	f
Сталь по стали	0,15	0,15	0,1...0,12	0,05...0,1
Сталь по бронзе	0,15	0,15	0,1...0,15	0,1...0,15
Сталь по чугуну	0,3	0,18	-	0,05...0,15
Чугун по чугуну	-	0,15	0,15	0,07...0,12
Чугун по бронзе	-	0,15...0,2	-	0,07...0,15
Бронза по бронзе	-	0,2	0,1	0,07...0,1

При граничном трении зависимость коэффициента трения скольжения f от скорости скольжения трущихся тел v часто представляется эмпирической формулой:

$$f = f_0 + f_1 + f_2 v^2 + f_3 v^3, \quad (4.15)$$

где f_1, f_2, f_3 - экспериментальные коэффициенты, которые могут быть положительными и отрицательными.

При жидкостном трении, когда трущиеся поверхности тел полностью разделены слоем смазки, сила трения оказывается значительно меньше, чем при других видах трения. Ее величина рассчитывается по формуле Ньютона:

$$F_m = \mu A du/dy, \quad (4.16)$$

где F_m - сила сдвига, которую требуется приложить к слою жидкости площадью A для того, чтобы этот слой двигался относительно соседнего слоя, расположенного на расстоянии dy , со скоростью du ; μ - коэффициент, называемый динамической вязкостью, нс/м².

Если градиент скорости du/dy приближенно принять равным v/h , где v - это относительная скорость скольжения контактирующих поверхностей, а h - величина зазора между

ними, то вместо формулы Ньютона можно использовать следующие формулы:

$$F_m = \mu A v/h$$

или

$$F_m = \beta v, \quad (4.17)$$

где $\beta = \mu A/h$ - постоянный коэффициент вязкого трения.

Линейная характеристика (4.17) справедлива лишь при разделении трущихся поверхностей слоем смазки. Чтобы трение было жидкостным требуется в слое смазки создать определенное давление. Оно может быть обеспечено подачей самой смазки под необходимым давлением (в этом случае трение называется гидростатическим) или движением смазки в клиновом зазоре, когда зазор между плоскостями трения имеет форму клина (трение называется гидродинамическим).

2). Трение качения - это сопротивление, возникающее при относительном перекатывании двух упругих тел на площадке их контакта. Сопротивление качению звеньев значительно меньше сопротивления скольжения, поэтому при конструировании подвижных соединений звеньев скольжение стараются заменить качением.

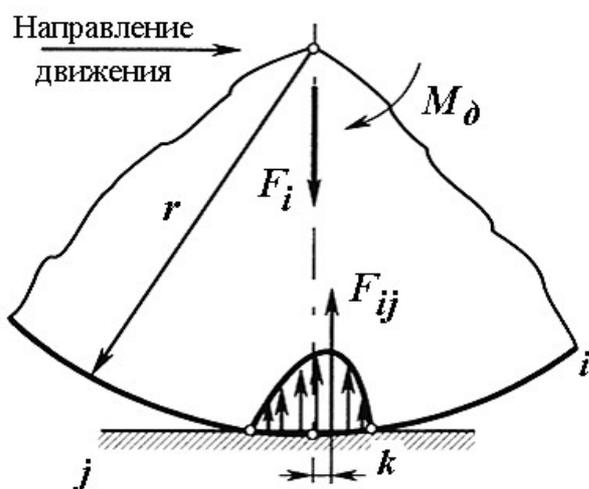


Рисунок 21 - Деформация поверхностей двух тел

При качении в зоне контакта звеньев i и j под действием момента движущих сил M_δ происходит упругая деформация поверхностных слоев, которая нарушает симметричное расположение эпюры удельных давлений (Рис. 21). Это приводит к смещению точки приложения силы давления в сторону направления движения и к возникновению момента силы трения качения:

$$M_\delta = F_{ij}^n,$$

где k - коэффициент трения качения, F_{ij}^n - результирующая сила нормального давления.

Значение коэффициента k зависит от многих факторов: материала изделий, диаметров тел качения, состояния поверхностей трения, наличия смазки, удельного давления, скорости относительного движения и других. Ориентировочные значения коэффициентов трения качения для некоторых соприкасающихся поверхностей приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения коэффициентов трения качения

<i>Материалы трущихся тел</i>	<i>Коэффициент трения (мм)</i>
Сталь по стали	0,5
Закаленная сталь по закаленной стали (шарик в подшипнике)	0,01
Мягкая сталь по мягкой стали	0,05
Железо по железу	0,51
Железо по граниту	2,1
Железо по мягкому дереву	5,6
Чугун по чугуну	0,05
Полимер по стали	2
Дерево по стали	0,3-0,4
Мягкое дерево по стали	0,8
Дерево по дереву	0,5-0,8
Твердое дерево по твердому дереву	0,8
Мягкое дерево по мягкому дереву	1,5
Эбонит по бетону	10-20
Резина по бетону	15-35

4.9. Уравнения и стадии движения механизма

Уравнения движения механизма записываются с помощью различных принципов и теорем классической механики и могут быть представлены в различных формах. Уравнениями движения называют аналитические зависимости, которые связывают силы, действующие на звенья механизма, с параметрами движения этих звеньев.

На рисунке 22 изображено звено механизма, принимаемое за начальное. При плоском движении механизма кинетическую энергию любого звена определяют по формуле:

$$T_i = \frac{1}{2} m_i v_{ci}^2 + \frac{1}{2} J_{ci} \omega_i^2, \quad (4.18)$$

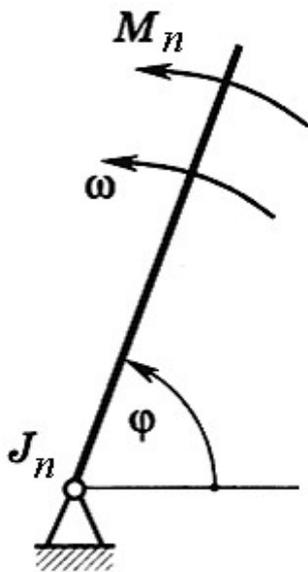


Рисунок 22 -
Движение начального звена

где m_i - масса i -го звена механизма; v_{ci} - скорость центра масс i -го звена; J_{ci} - момент инерции i -го звена механизма относительно оси, проходящей перпендикулярно плоскости движения через центр масс звена; ω_i - угловая скорость i -го звена.

Полагая, что для i -го звена механизма, которое движется поступательно, $\omega_i = 0$ и, подставляя значение в формулу (4.18), получаем следующее:

$$T_i = \frac{1}{2} m_i v_{ci}^2.$$

Для i -го звена механизма, которое вращается вокруг неподвижной оси, формула (4.18) становится (Рис. 22):

$$T_i = \frac{1}{2} J_i \omega_i^2,$$

где J_i - момент инерции i -го звена механизма относительно оси вращения.

При определении уравнения движения начального звена, последнее принимается за звено привода. Момент инерции этого звена J_n относительно оси вращения называется *приведенным моментом инерции*. Момент M_n пары сил,

действующей на звено приведения, называется *приведенным моментом сил*.

В механизмах с одной степенью свободы принято различать три стадии (режима) работы: разбег, установившееся движение и выбег (Рис. 23).

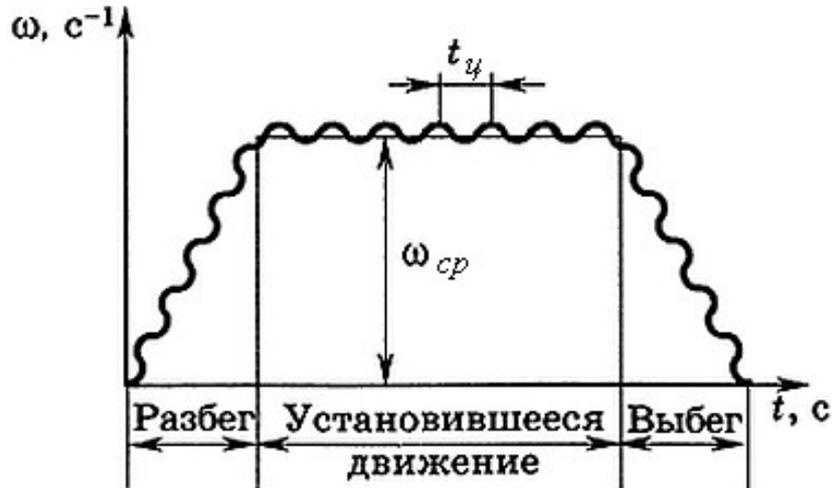


Рисунок 23 - Стадии работы механизма

Время разбега механизма характеризуется возрастанием скорости начального звена от нуля до некоторого значения, соответствующего началу установившегося движения, а время установившегося движения характеризуется периодическим изменением скорости начального звена. Промежуток времени, по истечении которого положения, скорости и ускорения начального звена принимают свои первоначальные значения, восстанавливается запас кинетической энергии, называется *циклом установившегося движения механизма*. Время выбега характеризуется убыванием скорости начального звена до нулевого значения.

В дальнейшем будем рассматривать только режим установившегося движения. Уравнение движения машины, используя теорему об изменении кинетической энергии, можно записать:

$$T - T_0 = A_{\partial} - A_{n.c.} - A_{в.с.}, \quad (4.19)$$

где T - кинетическая энергия машины в конечный момент времени; T_0 - кинетическая энергии машины в начальный момент времени; A_∂ - работа движущих сил; $A_{n.c.}$ - работа сил производственного сопротивления; $A_{в.с.}$ - работа сил вредного сопротивления.

Если на стадии разбега $T_0 = 0$, то согласно равенству (4.19) можно записать:

$$A_\partial = A_{n.c.} + A_{в.с.} + T. \quad (4.20)$$

Следовательно, на стадии разбега при запуске механизма движущие силы должны не только преодолеть силы сопротивлений, но и сообщить кинетическую энергию.

Время цикла установившегося движения t_u , то есть минимальный промежуток времени, по истечении которого обобщенная координата и кинетическая энергия механизма принимают начальные значения. Изменение кинетической энергии за весь период установившегося движения равно нулю, и тогда уравнение (4.19) принимает следующий вид:

$$A_\partial = A_{n.c.} + A_{в.с.}. \quad (4.21)$$

Из уравнения видно, что чем меньше работа сил вредного сопротивления (трения и др.), тем эффективнее используется энергия в машине.

На стадии выбега (*останова*) скорости звеньев механизма убывают до нуля, движущие силы отключают, и поэтому $A_\partial = 0$. В конце выбега $T = 0$, и уравнение (4.19) станет таким:

$$T_0 = A_{n.c.} + A_{в.с.}. \quad (4.22)$$

Когда вся кинетическая энергия механизма оказывается израсходованной на преодоление сил сопротивлений, механизм останавливается. Для уменьшения времени торможения используются и тормозные устройства, особенно эффективно применение тормозных устройств, если по технологическим

причинам производственные сопротивления на стадии выбега выключаются.

Одним из важнейших параметров, оценивающих работу и качество машин и механизмов, а также эффективность использования ими поступающей энергии, является коэффициент полезного действия (КПД). Коэффициент полезного действия η - это отношение работы сил производственного сопротивления $A_{n.c.}$ к работе движущих сил A_{∂} , совершаемых за один и тот же промежуток времени:

$$\eta = A_{n.c.} / A_{\partial}. \quad (4.23)$$

Если вычисляется мгновенный КПД (за бесконечно малый промежуток времени), то вместо отношения работ берется отношение мощностей:

$$\eta = P_{n.c.} / P_{\partial}, \quad (4.24)$$

где $P_{n.c.}$ - мощность на ведомом звене; P_{∂} - мощность на ведущем звене.

Так как за период установившегося движения выполняется равенство (4.21), работу сил полезного сопротивления удобно представить разностью:

$$A_{n.c.} = A_{\partial} - A_{в.с.}.$$

Тогда КПД механизма при установившемся движении можно подсчитать по формуле:

$$\eta = A_{\partial} - A_{в.с.} / A_{\partial} = 1 - A_{в.с.} / A_{\partial}. \quad (4.25)$$

Отношение $A_{в.с.} / A_{\partial}$ называют коэффициентом потерь Ψ . При установившемся движении коэффициент потерь определяют равенствами:

$$\Psi = A_{в.с.} / A_{n.c.} + A_{в.с.} \quad \text{или} \quad \Psi = P_{в.с.} / P_{n.c.} + P_{в.с.} \quad (4.26)$$

Коэффициенты полезного действия η и потерь Ψ являются безразмерными величинами. Иногда коэффициент полезного действия выражается в процентах.

Из-за неизбежных потерь энергии на трение, на нагревание окружающих тел и т.п. коэффициент полезного действия всегда меньше единицы. В реальных условиях работа сил вредных сопротивлений не может быть равной нулю. Анализ формулы (4.25) показывает, что КПД механизма на холостом ходу (на стадии разбега, когда подвижные звенья не нагружаются силами производственного сопротивления) равен нулю. В этом случае $A_{n.c.} = 0$, вся работа движущих сил затрачивается на преодоление сил вредных сопротивлений.

Если $A_{в.с.} > A_{\partial}$, то КПД становится отрицательным и механизм оказывается неспособным совершать движение в заданном направлении. В этом случае наблюдается явление, называемое самоторможением. На КПД влияют многочисленные факторы, связанные с конструкцией механизмов и машин, условиями их эксплуатации. Так, увеличения КПД можно добиться заменой трения скольжения трением качения или применением рациональной смазки в узлах трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов заочного обучения и позволяет слушателям курса лекций «Прикладная механика. Теория машин и механизмов» самостоятельно изучить многие вопросы, недостаточно полно затронутые в постановочных лекциях.

В пособии освещены разделы по изучению типов, видов, схем, структур механизмов, даны понятия кинематических звеньев, пар, цепей, уделено внимание различным методам исследования рычажных, шарнирных и других механизмов, приведены методики их расчета, даны сведения о трениях, коэффициенте полезного действия, уравнениях движения.

Вопросам по растяжению (сжатию) звеньев, основным геометрическим характеристикам плоских фигур, сложному сопротивлению, усталостной прочности и др. уделяется большое внимание в курсе «Сопротивление материалов».

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

К первому разделу:

1. Почему дисциплину «Прикладная механика» называют научной дисциплиной?
2. Что изучается в разделе дисциплины «Теория машин и механизмов»?
3. Что такое статика?

Ко второму разделу:

4. В чем сущность понятия «проектирование механизма»?
5. Назовите отличие «проектирования» от «конструирования».
6. Перечислите основные стадии разработки конструкторской документации.
7. Что называется проектом?
8. Назовите главный вид расчета деталей, выполняемый в процессе проектирования?
9. В чем разница между проектным и проверочным расчетами?
10. Что называется машиной?
11. Перечислите группы машин.
12. Какими основными показателями характеризуется качество машины?
13. Как характеризуется термин «надежность»?
14. В чем суть понятия «безотказность машины»?
15. Какие характеристики машин знаете?

К третьему разделу:

16. Какими основными свойствами обладают конструкционные материалы?
17. Что такое коррозионностойкость материала?
18. В чем суть окисления материала?
19. Что такое упрочнение материала?
20. Какие виды упрочняющей обработки следует применять?
21. Определите главное назначение легирования материала.
22. Перечислите конструкционные материалы, используемые в производстве.
23. На какие группы по назначению разделяются стали?
24. Как изменяется структура и свойства латуней в зависимости от содержания цинка?
25. Охарактеризуйте титановые сплавы.

26. Какие материалы относятся к группе порошковых?
К четвертому разделу:
27. Что называется механизмом?
28. Назовите определение звена механизма.
29. Что такое стойка?
30. Какие звенья механизма называются входными и выходными?
31. Перечислите названия звеньев в зависимости характера движения.
32. Что понимают под кинематической цепью?
33. Дайте определение низших кинематических пар.
34. Какие кинематические пары называются высшими?
35. В чем основное различие между низшими и высшими кинематическими парами?
36. Чем определяется класс кинематической пары?
37. Какие виды механизмов бывают?
38. Что такое степень подвижности механизма?
39. Для чего служат структурные формулы механизмов?
40. Что такое структурный анализ механизма?
41. Для каких механизмов справедлива формула Сомова-Малышева?
42. Перечислите структурные группы механизмов.
43. Что собой представляют механизмы первого класса?
44. Сколько существует низших пар пятого класса?
45. Какие названия имеют звенья рычажных механизмов?
46. Какие механизмы называются рычажными?
47. В чем состоит принцип Ассура образования плоских рычажных механизмов?
48. Что такое группа Ассура?
49. В чем принцип построения планов скоростей и ускорений?
50. Чем характеризуют масштаб кинематической схемы механизма?
51. Что такое кинематический анализ механизма?
52. В чем суть кинематического синтеза механизма?
53. Какие допущения используют при структурном и кинематическом анализе механизма?
54. Назовите внешние силы, действующие на механизм.
55. Какие виды трения вам известны?

56. Что такое коэффициенты трения скольжения и качения?
57. Какие факторы влияют на величину силы трения скольжения?
58. Перечислите стадии работы механизма с одной степенью свободы.
59. Назовите определение коэффициента полезного действия механизма?
60. Каким отношением характеризуется коэффициент потерь?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремова З.Г. Прикладная механика. Часть 1 : учебное пособие. - Гомель, 1999. - 121 с.
2. Мурин А.В. Прикладная механика : учебное пособие для вузов / А.В. Мурина, В.А. Осипов. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - 326 с.
3. Теория механизмов и механика машин : учебник для втузов / К.В. Фролов [и др.] - М.: Высш. шк., 2003. - 496 с.
4. Тимофеев, Г.А. Теория механизмов и машин : курс лекций / Г.А. Тимофеев. - М.: ИД Юрайт, 2010. - 351 с.
5. Рабочая программа по дисциплине «Прикладная механика», Д.В. Беляев, С.Р. Ижендеева, 2011. - 14 с.
6. Учебно-методический комплекс, Мицкевич В.Г., Лисицин Р.Е. - Москва, 2011. - 42 с.
7. Носко П.Л., Тексты лекций по дисциплине "Теория механизмов и машин" для студентов заочной формы обучения / П.Л. Носко [и др.]. - Луганск: Издательство ВУНУ им. В. Даля, 2002. - 122 с.
8. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>.
9. <http://slovari.yandex.ru/>.
10. <http://www.myshared.ru/slide/>.
11. http://www.ooyu.ru/istoriya_mehaniki_.
12. <http://sesii.net/exactscience/>.
13. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/>.
14. <http://www.misis.ru/ru/5866>.
15. <http://studystuff.ru/controlnaya/osnovyi-konstruirovaniya.html>.

16. <http://www.referat.ru/referats/view/2516>.
17. http://revolution.allbest.ru/manufacture/00057798_1.html.
18. <http://www.osipyun.ru/Design-basics/Ways-of-hardening-of-materials/index.html>.
19. <http://xreferat.ru/76/2491-1-svoystva-konstrukcionnyh-materialov.html>.
20. <http://www.metalloobrabotka.su/>.
21. <http://www.dissercat.com/content/poverkhnostnoe-uprochnenie-instrumentalnykh-stalei>.
22. <http://stroy-technics.ru/article/elementy-teorii-mekhanizmov-i-mashin>.
23. <http://kvs-mehanca.narod.ru/razdel3/razdel3.html>.
24. <http://www.nuru.ru/tmm/008.htm>.
25. <http://do.gendocs.ru/docs/>.
26. http://www.xliby.ru/tehnicheskie_nauki/istorija_inzhenernoi_deyatelnosti/p1.
27. <http://www.prikladmeh.ru/lect30.htm>
28. <http://lib.ssga.ru/fulltext/UMK/170101>.
29. <http://gendocs.ru/v37643/>.
30. <http://gendocs.ru/v4263/>.
31. <http://gendocs.ru/v15735/>.
32. <http://www.kraftmachinery.ru/bookinfo-v-v-dzhamay/v-v-dzhamay-prikladnaya-mekhanika-razdel-1.html>.
33. <http://www.engindoc.com/index.php>.
34. http://edu.nstu.ru/education/educourses/ig/eskd/eskd/GOST/2_103.htm.
35. http://allmechanics.narod.ru/1posobii/struct_analiz.htm.

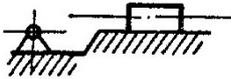
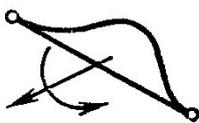
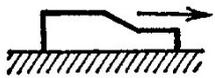
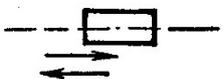
ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1 - *Стадии разработки конструкторской документации и этапы выполнения работ*

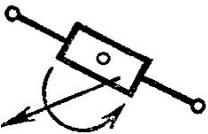
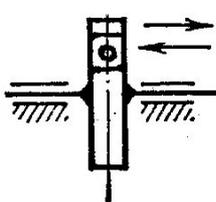
<i>Стадии разработки</i>	<i>Этапы выполнения работ</i>
<i>1</i>	<i>2</i>
Техническое предложение	<p>Подбор материалов. Разработка технического предложения с присвоением документам литеры "П". Рассмотрение и утверждение технического предложения</p>
Эскизный проект	<p>Разработка эскизного проекта с присвоением документам литеры "Э". Изготовление и испытание макетов (при необходимости). Рассмотрение и утверждение эскизного проекта.</p>
Технический проект	<p>Разработка технического проекта с присвоением документам литеры "Т". Изготовление и испытание макетов (при необходимости). Рассмотрение и утверждение технического проекта.</p>
Рабочая конструкторская документация:	
<p>а) опытного образца (опытной партии) изделия, предназначенного для серийного (массового) или единичного производства (кроме разового изготовления)</p>	<p>Разработка конструкторской документации, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии), без присвоения литеры. Изготовление и предварительные испытания опытного образца (опытной партии). Корректировка конструкторской документации по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) с присвоением документам литеры "О". Приемочные испытания опытного образца</p>

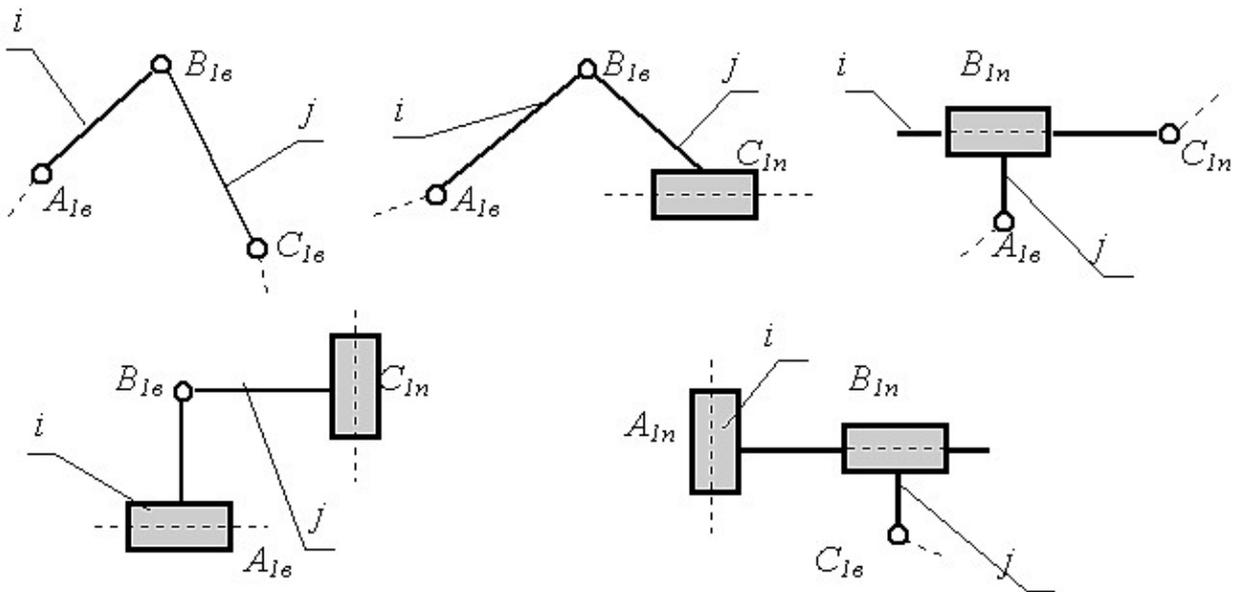
1	2
	<p>(опытной партии). Корректировка конструкторской документации по результатам приемочных испытаний опытного образца (опытной партии) с присвоением документам литеры "О₁". Для изделия, разрабатываемого по заказу Министерства обороны, при необходимости, повторное изготовление и испытания опытного образца (опытной партии) по документации с литерой "О₂" и корректировка конструкторских документов с присвоением им литеры "О₂".</p>
<p>б) серийного (массового) производства</p>	<p>Изготовление и испытание установочной серии по документации с литерой "О₁" (или "О₂"). Корректировка конструкторской документации по результатам изготовления и испытания установочной серии, а также оснащения технологического процесса изготовления изделия, с присвоением конструкторским документам литеры "А". Для изделия, разрабатываемого по заказу Министерства обороны, при необходимости, - изготовления и испытания головной (контрольной) серии по документация с литерой "А" и соответствующая корректировка документов с присвоением им литеры "Б".</p>

Таблица 2 - Основные типы звеньев механизмов

№	Наименов.	Эскиз	Движение	Особенности
1	2	3	4	5
1	Стойка		Отсутствует	—
2	Кривошип		Вращательное	Полный оборот
3	Кулачок		»	Профиль определяет движение ведомого звена
4	»		Плоскопараллельное	—
5	»		Поступательное	—
6	Зубчатое колесо		Вращательное	Зубчатый контур
7	Коромысло		Колебательное	Неполный оборот, возвратное движение
8	Шатун		Плоскопараллельное	Нет пар, связанных со стойкой
9	Ползун		Поступательное	Возвратное движение

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5
10	Кулиса		Колебательное, вращательное	Направляющая для ползуна
11	»		Плоскопараллельное	—
12	»		Поступательное	Возвратное движение, направляющая для ползуна



$$W_{\text{зп}} = 3 n_{\text{зп}} - 2 p_1 = 0, \text{ где } n_{\text{зп}} = 2, p_1 = 3.$$

Рисунок 1- Двухповодковые группы Ассура (1-й класс 2 порядок)

СОДЕРЖАНИЕ

1. ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА	3
1.1. Основное содержание и задачи дисциплины.....	3
1.2. Вклад великих ученых в развитие механики.....	6
2. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ	14
2.1. Проектирование и конструирование машин и механизмов.....	14
2.2. Классификация и основные свойства машин и механизмов.....	16
3. ОСНОВНЫЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	18
3.1. Характеристики конструкционных материалов.....	19
3.2. Виды обработки и упрочнения материалов.....	21
3.3. Материалы, применяемые в производстве.....	23
4. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН	29
4.1. Составные части механизма.....	29
4.2. Классификация кинематических пар.....	32
4.3. Кинематические цепи.....	35
4.4. Основные виды механизмов.....	37
4.5. Понятие о структурных анализе и синтезе механизмов.....	41
4.6. Кинематические анализ и синтез механизмов.....	47
4.7. Динамические анализ и синтез механизмов.....	57
4.8. Общие сведения о трениях в механизмах.....	61
4.9. Уравнения и стадии движения механизма.....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА	71
ЛИТЕРАТУРА	73
ПРИЛОЖЕНИЕ	75

Учебное издание

Маркова Ольга Анатольевна
кандидат педагогических наук

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА
ТЕОРИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Корректор Габдурахимова Т.М.
Худ. редактор Федорова Л.Г.

Сдано в набор 15.04.2013
Подписано в печать 28.06.2013.
Бумага писчая. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 5. Тираж 100.
Заказ №29.

НХТИ (филиал) ФГОУ ВПО «КНИТУ»,
г. Нижнекамск, 423570, ул.30 лет Победы, д.5а.