

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ОСНОВ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ  
В КУРСЕ «МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ»**

**Щербо А.Г.**

*The article concerns the results of the changes of elastic constants owing to plastic deformation and here is also inspected the possibility of using them while learning the course in «The Mechanics of Materials».*

Задачи повышения технической функциональности конструкций, улучшения их эксплуатационных, прочностных характеристик, учет деформационных и прочностных ресурсов конструкций, а также вопросы технологии (обработка металлов давлением) предъявляют новые требования в понимании деформирования материалов. В частности, при упругом деформировании достаточным было выявление некоторого напряженно-деформированного состояния, в то время как пути, которыми оно было достигнуто, оставались вне поля зрения исследователя вследствие весьма незначительного влияния на конечные параметры.

Иначе дело обстоит при рассмотрении упругопластического деформирования. В этом случае существенным оказывается не только некоторое конечное напряженно-деформированное состояние, но и пути его достижения, существенно влияющие на конечный результат. Таким образом, от описания некоторого состояния материала исследователь переходит к последовательному описанию ряда состояний, т.е. к описанию процесса упругопластического деформирования. Упругопластическая деформация описывается функциями процесса изменения напряжений, температуры и других параметров.

При этом изменяется и подход к экспериментальной части исследований, эксперимент перестает быть только модельным или натурным испытанием тех или иных элементов конструкций. В свете указанных подходов основной задачей эксперимента становится выявление или уточнение аппроксимирующих соотношений между напряжениями и деформациями в процессе упругопластического деформирования материала. Таким образом, роль экспериментальных исследований в ходе изучения данных вопросов значительно возрастает, что не может не сказаться на содержании учебного процесса при подготовке специалистов.

Как известно, первое знакомство с вопросами упругопластического деформирования происходит в процессе проведения лабораторного практикума как части курса «Механика материалов». Здесь наряду со стандартными лабораторными работами по выявлению механических характеристик материала или проверке теоретических зависимостей при различных видах деформации целесообразно проводить работы исследовательского характера, опирающиеся на новые данные исследований. Одной из таковых является работа по определению влияния упругопластического деформирования на механические характеристики материала, в ходе выполнения которой изучается изменение модулей упругости материала вследствие предварительного упругопластического деформирования.

Работа выполняется на специальной установке, выполненной по типу «мертвой нагрузки» [ 1 ]. Нагружение осуществляется гириями точного веса, нагрузка прикладывается плавно во избежание динамических эффектов. Деформации измеряются зеркальными тензометрами Мартенса, позволяющими получить достаточно высокую точность. Образцами являются цельнотянутые тонкостенные трубы стали марки 1Х18Н10Т, предварительно отожженные для снятия технологических напряжений. Последующая проверка показала, что полученная в процессе изготовления трубок анизотропия исчезает, и материал становится изотропным. Этот вывод сделан на основании сравнения диаграмм  $\sigma - \epsilon$ , построенных для образцов, деформированных в осевом и тангенциальном направлениях. Диаграммы практически совпа-

дают. Указанная проверка важна, т.к. подтверждает снятие нагартовки, существенно сказывающейся на определении модулей упругости.

Последовательность выполнения работы заключается в следующем. Определяются модули упругости первого и второго рода  $E$  и  $G$ , затем образец пластически деформируется путем растяжения или закручивания и после некоторой выдержки под нагрузкой, для прекращения процесса деформирования, определяются модули упругости. Реализация данной методики сравнительно проста, некоторую сложность представляет временной фактор, т. е. временные рамки учебных занятий. Эта сложность может быть преодолена выполнением предварительного упругопластического деформирования заранее.

При исследовании данного вопроса [2], [3] были выявлены значительные расхождения, принципиальный характер которых исследовался в более поздних работах [4]. Здесь наряду с объяснением причин полученных расхождений результатов приводится методика определения модулей упругости, исключающая ошибки. Прежде всего важна достаточная временная выдержка после предварительного деформирования. При отсутствии выдержки или недостаточной ее длительности продолжающаяся пластическая деформация грубо искажает результаты определения модуля упругости [6]. Для образцов рассматриваемого материала достаточной оказалась выдержка в 1 час. При этом деформирование полностью прекращалось при любой величине предварительной деформации, рассматриваемой в работе. Следует обратить внимание и на такую особенность. Если определять модуль упругости, измеряя деформацию при разгрузке от конечной точки диаграммы  $\sigma \sim \varepsilon$  предварительного нагружения или при повторном нагружении до этой же точки, кажущееся изменение модуля упругости  $G$  составляет около 40 % и зависит, кроме того, от величины начальной деформации. Это происходит вследствие ошибочного зачисления в разряд упругих деформаций пластических, которые возникают, согласно постулату пластичности [5], на любой замкнутой по деформациям траектории при положительной работе на этой траектории.

После выполнения нескольких циклов разгрузка-нагрузка петля гистерезиса исчезает, и определенные при следующей нагрузке (разгрузке) деформации являются упругими. Указанная методика «выбирания» пластических деформаций позволяет определять истинно упругие деформации независимо от диапазона изменения напряжений или уровня напряжений, при котором определяется новая величина модуля упругости. Исключение составляют диапазоны изменения напряжений, включающие нулевые напряжения. Здесь проявляется эффект смещения упругой поверхности в направлении предварительного пластического деформирования, что обуславливает наличие квазипластических деформаций обратного знака на нулевом уровне напряжений. Поэтому нижняя граница диапазона напряжений фиксируется на уровне напряжений  $10 \div 20 \text{ МПа}$ .

С учетом указанных выше особенностей методики определения изменение модулей упругости  $E$  и  $G$  вследствие предварительного пластического деформирования составляет  $6 \div 11\%$ . При этом не отмечено сколько-нибудь заметного влияния характера предварительного деформирования (растяжение или сдвиг) на величину изменения модулей  $\Delta E$  или  $\Delta G$ , это изменение примерно одинаково.

Кроме решения основной задачи постановка данной лабораторной работы позволяет проиллюстрировать некоторые основные положения теории пластичности, ознакомить студентов с особенностями методики проведения экспериментальных исследований при упругопластическом деформировании материалов. Так, при неоднократной разгрузке-нагрузке образца после предварительного упругопластического деформирования возникающая и постепенно сужающаяся петля гистерезиса, указывающая на наличие пластических деформаций на этом пути, отвечает постулату Дракера [5]. Возможности установки (зеркальные тензометры Мартенса) позволяют визуально наблюдать процесс упругопластического деформирования во времени, что невозможно при использовании других типов тензометров. Фикси-

руа деформации по методике, рассмотренной выше, получаем достоверные параметры функции отклика  $\sigma \sim \varepsilon$ .

Таким образом, включение указанной лабораторной работы в лабораторный практикум при изучении курса «Механика материалов» представляется целесообразным с учетом современных требований. Это позволяет сделать определенные шаги в привлечении результатов современных исследований в учебный процесс, а также повышать заинтересованность студентов при изучении данного курса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М., 1984.
2. Жуков А.М. Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании. Вопросы теории пластичности. М., 1961.
3. Шишмарев О.А., Кузьмин Е.Я. О зависимости упругих постоянных металла от пластических деформаций. Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1961, № 3.
4. O.A. Shishmarev, A.G. Shcherbo. Variation of elastic constants of metal during plastic deformation. Arch. Mech., 42, 1, p.p. 43-52 Warszawa, 1990.
5. Ильюшин А.А. Пластичность. М., 1963.
6. Щербо А.Г., Родионов В.К. Методика испытания материалов за пределом упругости для построения равновесной модели процесса. Сб. «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин». Новополоцк 1999 г., с. 83-85.

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В УЧЕБНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ЦЕЛЯХ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ

Синькевич Ю.В., Беляев Г.Я., Янковский И.Н.

*Application of computer modelling for educational and engineering purposes by the example of projection, modeling and optimization of electropulse polishing plant's construction.*

*Taking development and optimization of electropulse polishing plant's construction as an example, a construction of bath was estimated using computer modelling by method of finite elements. The data received was used to design and manufacture a bath for electropulse polishing plant "Epol-6N".*

В период разработки наглядное представление о создаваемых изделиях получают с помощью аксонометрических проекций и перспективных моделей, реальное моделирование которых осуществляется с помощью макетирования. Однако при внесении конструктивных изменений в изделие возникает необходимость полностью переработать чертежи и макеты, что требует значительных времени и средств.

Современное программное обеспечение позволяет разрабатывать и создавать пространственные модели объектов неограниченной сложности, осуществлять их прогнозирование в предполагаемый период эксплуатации, при этом, в зависимости от задач, поставленных разработчиком, могут быть определены, смоделированы и оптимизированы наиболее ослаблен-

ные элементы конструкции и в кратчайший период времени внесены соответствующие изменения. Возможность получения наглядного изображения создаваемого на компьютере объекта позволяет заранее устранить конструктивные недостатки конструкции, провести расчет различных характеристик объекта и технологических параметров его изготовления.

Простота, многоплановость и быстрота выполнения моделирования на ЭВМ, возможность гибкого изменения разрабатываемых моделей, их наглядность делают такое моделирование предпочтительным в сравнении с традиционными способами проектирования, а также открывают неограниченные возможности для обучения студентов и молодых специалистов.

Покажем это на примере разработки и оптимизации конструкции установки электроимпульсного полирования (ЭИП).

С учетом анализа недостатков известных конструкций, внедренных на многих предприятиях машино- и приборостроения в Республике Беларусь и за ее пределами, а также результатов разработки дизайн-проекта базовой модели новой серии установок ЭИП [1] с помощью пакета прикладных программ Pro engineer была спроектирована и изготовлена первая установка этой серии – «ЭПОЛ-6Н», в состав которой входит установка ЭИП, силовой шкаф и силовой трансформатор (Рис. 1). Полировальная ванна является одним из основных конструктивных элементов установки. Опыт эксплуатации аналогичных установок показал, что ванна имеет недостаточную эксплуатационную надежность из-за течи сварных швов. Ванна конструктивно оформлена в виде прямоугольной емкости и имеет двойные стенки (бак в баке), полость между которыми является рубашкой охлаждения. В ней протекает охлаждающая вода, обеспечивающая температурный режим электролита в процессе полирования. Ванну сваривают электродуговой или аргонно-дуговой сваркой из листов аустенитной коррозионно-стойкой (нержавеющей) стали. После зачистки сварных швов ванна испытывается на герметичность под давлением. Тем не менее, тщательно изготовленная ванна часто дает течь в процессе эксплуатации.



*Рис.1. Общий вид установки ЭИП «ЭПОЛ-6Н»*

Связь квалификации сварщика с возникновением течи не просматривается. Была поставлена задача выявить причины разрушения сварных швов и предложить конструктивные и технологические меры по их устранению. Анализ показал, что непосредственной причиной течи является коррозионное разрушение швов по межкристаллитному типу. Вне зоны сварки на контакте с электролитом наблюдается незначительная питтинговая коррозия, которая не приводит к потере герметичности даже при длительной эксплуатации ванны (свыше 10 лет).

Ускоренная межкристаллитная коррозия в сварных швах обусловлена термоструктурным влиянием сварки. Локальный нагрев аустенитной коррозионно-стойкой стали в процессе сварки с последующим медленным охлаждением всей конструкции создает благоприятные условия для образования обогащенных хромом карбидов, преимущественно выделяющихся на границах зерен.

Коррозионная стойкость сварного шва и зоны термовлияния снижается. Появляется

склонность этих участков к межкристаллитной коррозии. Коррозионную стойкость можно повысить либо термообработкой сварной конструкции при температуре 1050 °С с последующим быстрым охлаждением, либо применением аустенитной коррозионно-стойкой стали с пониженным содержанием углерода, стабилизированной титаном или ниобием и дополнительно легированной молибденом. В связи с размерами и весом ванны, был выбран последний вариант повышения коррозионной стойкости. Однако подбор марки стали дает эффект только в случае, если сварной шов не подвергается в ходе эксплуатации перегрузкам и, соответственно, пластическому деформированию. Накопление пластических деформаций вызывает малоцикловую усталость, которая приводит к появлению поверхностных микротрещин. В них резко активизируется коррозия [2], вызывающая быстрое разрушение сварного шва.

По сравнению с обычной одностенной ванной принятая конструкция является сильно нагруженной. Давление воды перед входом в рубашку охлаждения может достигать 0,6 МПа. Автоматика системы охлаждения работает по ПИД-закону регулирования температуры. Возможны также нештатные ситуации в коммуникациях системы с вероятностью возникновения гидроударов. Поэтому была поставлена задача оптимизировать по прочности конструкцию ванны и обеспечить ее живучесть при давлении воды в рубашке охлаждения до 0,2 МПа. В первую очередь имелось в виду предотвратить циклические пластические деформации в сварных швах (механизм инициации коррозионной усталости).

Оптимизация конструкции по прочности была проведена путем компьютерного моделирования ванны с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Моделировалась ванна размерами 1,6×1,0×0,6 м (Рис.2). Она состоит из внутреннего 1 и наружного 2 баков (четверть ванны для наглядности не показана). Процесс полирования проходит во внутреннем баке. Пространство 3 между баками служит рубашкой охлаждения. Толщина стенок наружного и внутреннего баков составляет 5 мм. Для повышения жесткости ванны стенки соединены стальными шпильками Ø10 мм.

На первом этапе моделирования решалась трехмерная упругая статическая задача. Стенки ванны были смоделированы оболочечными конечными элементами, шпильки представлены как балочные элементы. Предварительное моделирование показало, что собственный вес конструкции, гидростатическое давление электролита на стенки ванны, особенности ее крепления малосущественны. Единственным видом нагрузки было принято гидростатическое давление 0,2 МПа внутри водяной рубашки охлаждения.

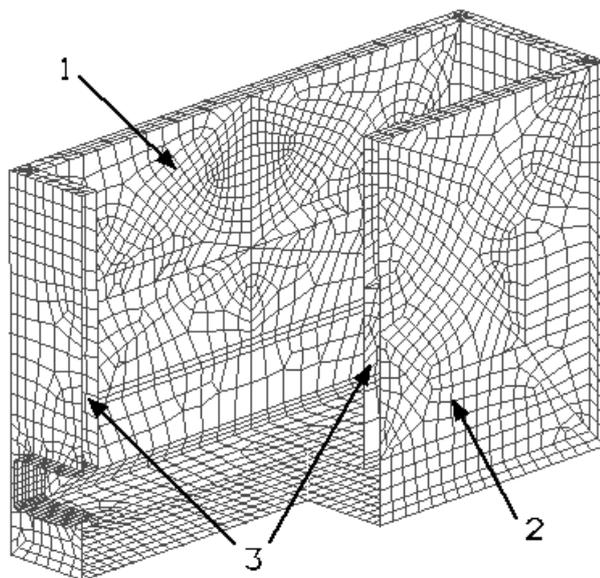


Рис.2. Конечно-элементная модель ванны для электрополирования: 1 – внутренний бак, 2 – наружный бак, 3 – рубашка охлаждения

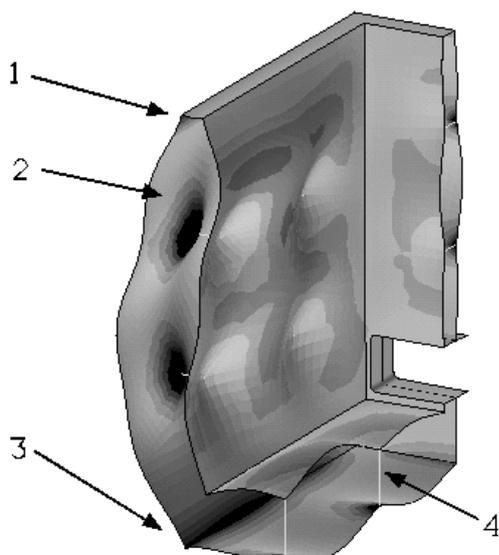


Рис.3. Распределение максимального главного напряжения  $\sigma_1$  на стенках ванны (четверть модели): 1,3 – области концентрации напряжений на ребрах; 2,4 – области концентрации напряжений возле шпилек

Во-вторых, это места прикрепления к стенкам шпилек (2, 4). Оба типа областей лежат на сварных швах. Следовательно, при всплесках давления сварные швы пластически деформируются. Это ведет к малоцикловой усталости – образованию и быстрому росту микротрещин.

Для повышения жесткости ванны в ходе серии МКЭ–расчетов было оптимизировано количество и расположение шпилек 3 (Рис.4). Цвета и масштабы аналогичны (Рис.3), а также дополнительно введены ребра жесткости 2. В результате деформации стенок сильно снизились. Максимальный прогиб уменьшился с 17,8 мм до 5,2 мм, а максимальное главное напряжение  $\sigma_1$  – примерно в два раза. Напряжения в шпильках упали ниже предела текучести и не превышают 190 МПа. Области концентрации напряжений на ребрах и возле шпилек значительно сократились и не представляют опасности.

В результате МКЭ–моделирования была оптимизирована конструкция ванны и разработана технология ее изготовления.

Приведенные в статье результаты использованы при проектировании и изготовлении ванны для установки электроимпульсного полирования «ЭПОЛ-6Н» и показали высокую эффективность принятых решений в процессе эксплуатации оборудования.

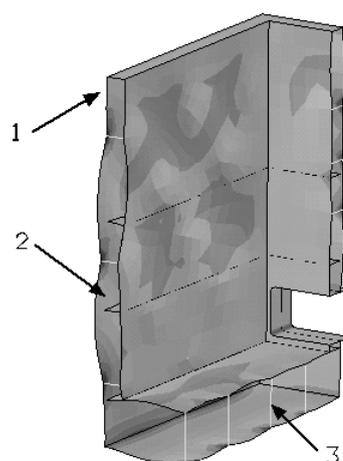


Рис.4. Распределение напряжения  $\sigma_1$  для ванны усиленной конструкции (четверть модели): 1 – угол ванны, 2 – дополнительные ребра, 3 – дополнительные шпилеки

На рис.3 показана четверть ванны в деформированном состоянии под действием давления охлаждающей воды. Для наглядности перемещения стенок масштабированы в 10 раз. Изохромы показывают распределение главного напряжения  $\sigma_1$  (растягивающие напряжения). Оттенки серого цвета соответствуют диапазону от 0 до 500 МПа. В зачерненных областях  $\sigma_1$  превышает 500 МПа. Предел текучести  $\sigma_T$  составляет для используемых при изготовлении ванны сталей примерно 350 МПа [3]. Следовательно, ванна подвергается локальным пластическим деформациям. Очевидно, что промоделированная ванна имеет малую жесткость: стенки ванны сильно раздуты, прямые углы по сварным швам 1 и 3 существенно развернуты, шпильки 2, 4 нагружены выше предела текучести.

Следует выделить два типа областей концентрации растяжений и пластического течения. Во-первых, это середины всех ребер ванны (1, 3).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Синькевич Ю.В., Беляев Г.Я., Старовойтов В.Н. Проектирование установок электроимпульсного полирования серии «ЭПОЛ-6Н» на этапе разработки дизайн-проекта // Машиностроение. – Мн., 2002. – Вып.18. – С. 336-340. 2. Справочник по коррозии: Пер. с болг. / Перевод Нейковского С.И.; под ред. Н.И.Исаева. – М.: Мир, 1982. – 520 с. 3. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – М.: Metallurgia, 1983. – 352 с.

### ПРИМЕНЕНИЕ MATHCAD И NASTRAN ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В КУРСЕ ТММ

Бокун Г.С., Гляков С.А.

*Mathcad and Nastran are used to develop programs for designing and analysis various mechanisms. Several examples are considered.*

Современная вычислительная техника находит все большее применение в задачах проектирования механизмов. Для этого, как правило, используются каталогизированные программы систем автоматизированных расчетов курсовых проектов (САРКП). Необходимость такого подхода продиктована тем, что традиционное программирование этих задач требовало очень больших временных затрат, хороших навыков в составлении и отладке программ, и по этой причине уступало традиционным графическим методам. Общепринятой является практика сочетания графических методов с использованием числовых программ в виде "черных ящиков" [1].

В последние годы совершенствование программного обеспечения персональных компьютеров, разработка пакетов для символьных преобразований, создание пакетов, составляющих и решающих уравнения Лагранжа для систем со многими степенями свободы позволяют ставить вопрос о полной замене графоаналитических расчетов компьютерными методами, при этом не ущемляя, а наоборот, расширяя и углубляя познания основных подходов, принципов и методов механики.

Представляется возможным осуществить такой подход на основе программных пакетов Mathcad и Nastran [2, 3]. Одно из преимуществ таких пакетов состоит в том, что для их применения не требуется специальная подготовка по программированию. Эти пакеты доступны для обычного пользователя персональным компьютером, имеют хорошо отработанный, удобный интерфейс, схожий с большинством программ работающих в операционной системе Windows. Во-вторых, применение этих пакетов для решения задач проектирования требует знаний собственно по механической части задачи в программных компьютерных манипуляциях.

Приоритетным в этом смысле является использование пакета Mathcad, имеющего ряд необходимых встроенных функций (решение уравнений и систем уравнений, поиск экстремумов, интегрирование, дифференцирование и т. д.), удобное представление графиков и изображений, включая возможность сохранять анимации движения механизмов в видеофайлах. Запись программы в Mathcad, максимально приближена к форме, используемой при записи формул на бумаге, что позволяет пользователям легко редактировать программы в каждом конкретном случае. В данной работе это показано на примерах применения Mathcad для

проектирования плоских рычажных механизмов, зубчатых передач и кулачковых механизмов.

Проектирование плоских рычажных механизмов показано на примере двух механизмов, кинематические схемы которых представлены на рисунке 1.

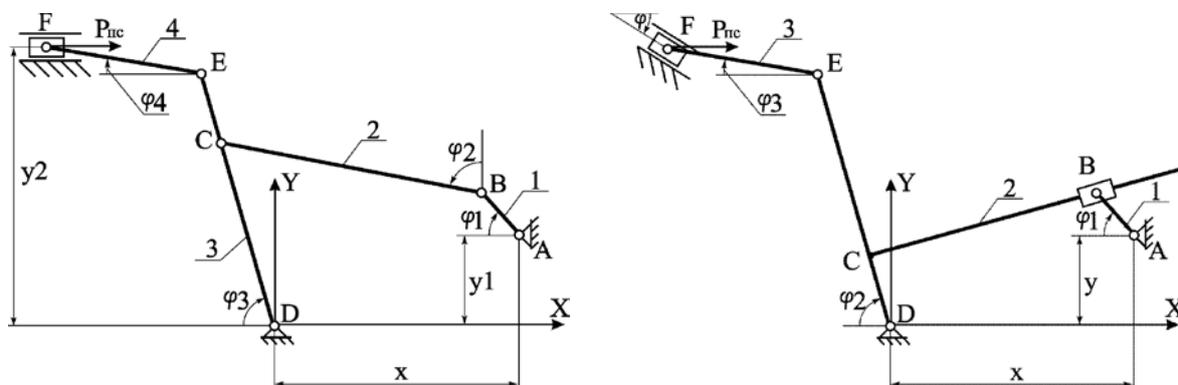


Рис. 1 Кинематические схемы механизмов

Задача проектирования заключается в определении момента двигателя и момента инерции маховика, в условиях установившегося движения при заданном коэффициенте неравномерности движения.

Реализуется следующий алгоритм проектирования. Сначала вычерчивается одно из произвольных положений механизма, которое используется для задания начального приближения для решения систем уравнений, определяющих функции положения звеньев механизма и отбора ветви решений, отвечающей заданному варианту сборки механизма. План этого положения используется для составления систем уравнений, определяющих зависимость углов поворота и координат центров масс звеньев механизма от угла поворота звена привода. Углы отсчитывают от горизонтальной либо вертикальной оси по ходу или против хода часовой стрелки (см. рис. 1). На основании метода замкнутых контуров составляется система уравнений, определяющая названные углы и далее с помощью оператора Given находится решение этой системы для всех 360 положений механизма. При компьютерной реализации этого алгоритма удобным оказалось разбиение механизма на группы Ассур. Результатом вычислений являются массивы, каждый из которых содержит 361 элемент и определяет зависимость соответствующего угла либо координаты интересующей точки от значений угла  $\varphi_1$ . Далее разработан алгоритм "Анимация" для создания при помощи Mathcad видеофильмов движущихся механизмов. Включение этого видеофайла очень важно для проверки правильности произведенных вычислений, так как каждое звено здесь движется по своему закону, в соответствии с выполненным расчетом, независимо от других. И только при правильном решении совокупность таких независимых движений воспроизводит нужное движение механизма. Анимация важна и для понимания студентом особенностей движения механизма.

Затем путем численного вычисления первых и вторых центрированных производных находятся передаточные функции механизмов. На основании последних рассчитываются массивы значений приведенного момента инерции и приведенного момента сил сопротивления в соответствии с определениями

$$I_{np} = \sum_{k=1}^n m_k \left( (x'_{S_k})^2 + (y'_{S_k})^2 \right) + \sum_{k=1}^n I_{S_k} (\varphi'_k)^2, \quad (1)$$

$$M_{np} = - \sum_{k=1}^n m_k g y'_{S_k} + P_x x'_F, \quad (2)$$

где  $x'_{S_k}$  и  $y'_{S_k}$  – производные координат центров масс  $k$ -го звена по обобщенной координате  $\varphi_1$ ,  $I_{S_k}$  – момент инерции  $k$ -того звена относительно центральной оси,  $g$  – ускорение свободного падения,  $x'_F$  – аналог скорости исполнительного звена.

После интегрирования приведенного момента сил сопротивления получается зависимость работы от угла поворота входного звена, по которой находится момент двигателя ( $M_{об} = const$ ) из условия стационарности установившегося движения. Момент инерции маховика определяется по методу Мерцалова. Разработаны критерии проверки правильности расчетов на каждом отдельном этапе проектирования. В частности перед выполнением силового расчета предусмотрен контроль правильности путем проверки справедливости условия

$$M_{об} + M_{np} + M_{np}^{ин} = 0, \quad (3)$$

здесь  $M_{np}^{ин}$  – приведенный момент сил инерции.

Далее на основании принципа Даламбера выполняется динамический анализ и рассчитываются реакции в кинематических парах во всех положениях механизма. При этом момент сил инерции для звеньев, углы поворота которых отсчитываются по часовой стрелке, в уравнениях динамического равновесия должны быть взяты с отрицательным знаком.

Кроме того, данные механизмы, были спроектированы с применением VisualNastran Desktop 4D, т. е. программы, специально предназначенной для анализа работы механизмов. Здесь уже не требуется математическое описание механизмов; достаточно лишь задать взаимное расположение звеньев, их массы, моменты инерции и степени свободы в кинематических парах. Все результаты, полученные в Nastran, полностью совпали с данными в Mathcad. Nastran используется далее для анализа поведения механизма с учетом реальной механической характеристики двигателя и исследования переходных режимов движения механизма. На рисунке 2 показана зависимость угловой скорости приводного звена от угла его поворота при различных значениях начальной угловой скорости. Из графиков видно, что режим установившегося движения не зависит от начальных условий, а определяется только характеристиками механизма и двигателя.

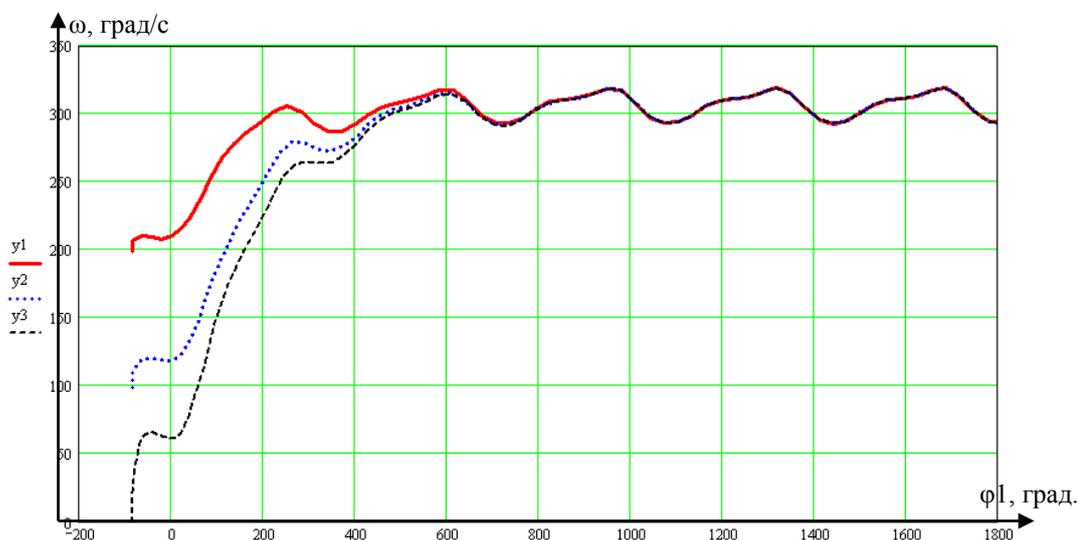


Рис. 2 Графики переходных процессов при различных начальных условиях

**Проектирование кулачковых механизмов.** Задачей проектирования кулачковых механизмов является определение профиля кулачка в зависимости от закона движения, вида толкателя и других накладываемых ограничений (например, угол давления). Программа написана для четырех видов толкателей (рис. 3).

Для получения профиля кулачка, независимо от вида толкателя, сначала по заданному закону движения толкателя определяется передаточная функция выходного звена. Затем, в зависимости от накладываемых на механизм ограничений и вида толкателя, осуществляется выбор радиуса основной окружности. После этого рассчитывается профиль кулачка в полярных координатах. Для проверки правильности расчетов создается анимация вращения кулачка по результатам вычислений и анимация движения толкателя по исходным данным. Если вычисления верны, то кулачок и толкатель всегда будут касаться друг друга (не будут отрываться либо пересекаться).

**Проектирование зубчатых передач.** При проектировании зубчатых передач исходными данными являются модуль, количества зубьев и коэффициенты смещения обоих колес. Сначала по формулам определяются основные геометрические параметры зубчатого зацепления (межосевое расстояние, радиусы делительной и основной окружностей, высота зуба и др.). Затем определяются координаты точки касания профилей колёс и выполняется построение и анимация зубчатого зацепления. По полученной анимации можно судить о правильности проведенных расчетов и построений. Например, если первая точка касания пропадает раньше, чем появляется следующая, или зубья получились острыми, то неправильно выбраны коэффициенты смещения исходного контура.

**Заключение.** Показано, что пакеты MATHCAD и NASTRAN позволяют развить подход к проектированию, который может быть более эффективным, чем графоаналитические методы и который реализуется в учебном процессе без использования САРКП. Усилия, затраченные на изучение указанных пакетов, полезны для изучения других дисциплин и в практической инженерной деятельности, ввиду общеинженерного характера этих пакетов.

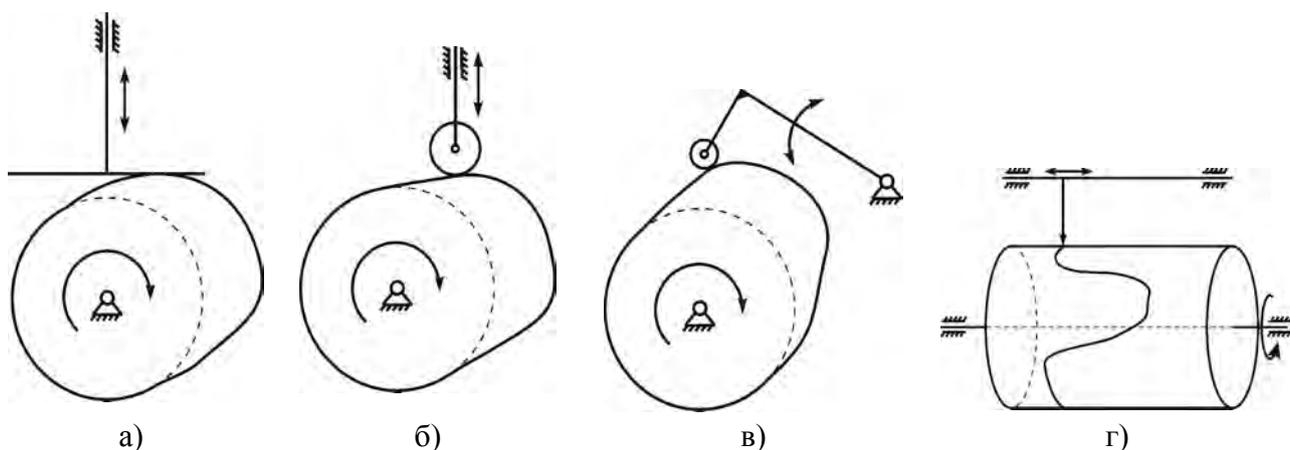


Рис. 2 Кулачковые механизмы.

*а) с тарельчатым толкателем, б) с роликовым толкателем,  
в) с роликовым коромыслом, г) пространственный кулачковый механизм*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов С.А., Тимофеев Г.А. Курсовое проектирование по теории механизмов и механике машин. – М.: Высш. шк., 2002.
2. Кирьянов Д.А. Самоучитель Mathcad 2001. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2003.
3. Шимкович Д. Г., Расчет конструкций в MSC/Nastran for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001.