

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ, КЛАССИФИКАЦИИ И СИМВОЛИКЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР

Ю. Я. КОВЫЛИН

(Представлено научно-методическим семинаром кафедр теоретической и прикладной механики)

1. В литературе по теории механизмов и машин до сих пор не приняты единые определения, классификации и условные обозначения звеньев, кинематических пар, кинематических цепей, механизмов и т. д. Ненормальность такого положения вполне очевидна: не только серьезно и, надо прямо сказать, неоправданно осложняется учебный процесс (в особенности, в системе заочного образования), но порой оказывается невозможным и общение прямых специалистов без предварительного согласования терминологии, классификаций и т. д. На это неоднократно указывалось, в частности, в выступлениях на II Всесоюзном совещании по основным проблемам теории механизмов и машин и в периодической печати.

В настоящее время, по нашему мнению, имеется полная возможность выработать и принять единые системы терминов, классификаций и обозначений в теории механизмов и машин. Она может быть должным образом реализована, если в работе примут участие не только соответствующие организации АН СССР, но и широкие круги научно-технической общественности.

В настоящей статье имеется в виду рассмотреть некоторые вопросы, связанные с понятием «кинематическая пара».

2. Прежде всего остановимся на определении кинематической пары. В литературе оно сводится к одному из следующих:

- а) соединение двух звеньев¹⁾;
- б) подвижное соединение двух звеньев;
- в) подвижное соединение двух тел, ограничивающее их относительные движения;
- г) два тела, соединенные друг с другом подвижно;
- д) два звена, взаимно соприкасающиеся своими элементами, ограничивающими относительные движения этих звеньев;
- е) совокупность элементов, которые вследствие взаимного соприкосновения ограничивают относительные движения тех звеньев, которым они принадлежат;

¹⁾ Звено — составная часть механизма, представляющая собой движущуюся как одно целое (или неподвижную) систему тел; в простейшем случае — одно тело.

ж) совокупность двух элементов, принадлежащих каждый одному звену, которые вследствие взаимного соприкосновения ограничивают относительные движения звеньев.

В понятие «элемент» различные авторы вкладывают также разное содержание:

точка, линия, поверхность (или их совокупность) одного звена, входящая в соприкосновение с другим звеном; часть звена, находящаяся в непосредственном соприкосновении с соответствующей частью другого звена.

Согласно определениям (а), (б) и (в) кинематическая пара трактуется как некоторое устройство (сочленение, сопряжение, узел), т. е. в том смысле, как это общепринято в практике машиностроения и в литературе по расчету и конструированию машин.

Из определения (а) следует, что звенья, входящие в кинематическую пару, несомненно, двигаются друг относительно друга, так как в противном случае, мы имели бы одно звено, а не два; в то же время ясно, что они не могут иметь столько же относительных движений, сколько было бы возможно, если бы звенья являлись телами свободными, иначе не может быть речи ни о каком их соединении.

Определение (а) не требует обязательно непосредственного соприкосновения звеньев, что позволяет, например, узлы с трением качения, обеспечивающие относительные вращательные, поступательные и винтовые движения, рассматривать (условно) как соответствующие кинематические пары. В противном случае, даже простой рычаг, установленный на подшипниках качения, пришлось бы с учетом промежуточных тел качения всегда считать механизмом многозвенным, тогда как обычно его считают двухзвенным.

Из определения (а) не вытекает ошибочный вывод о том, что кинематическая пара налагает ограничения на относительные движения только входящих в нее звеньев, ибо в механизме, как известно, кинематическая пара может частично ограничивать движения и других звеньев.

Наконец, определение (а) выгодно отличается от всех остальных своей предельной краткостью.

В определении (б) добавлено слово «подвижное». Это дополнение, с одной стороны, несколько не уточняет определение (а) («масло масляное»), ибо, как показано выше, и без этого дополнения невозможно предположить, что звенья, входящие в кинематическую пару, не двигаются относительно друг друга.

С другой стороны, добавление слова «подвижное» влечет за собой безусловную необходимость дополнительного разъяснения того, что оно характеризует только относительную подвижность. В противном случае, исключая возможность тавтологии, можно подумать, что кинематической парой является только такое соединение звеньев, которое передвигается в пространстве (например, кривошип-шатун, но не кривошип-стойка).

Определение (в) весьма неточно: во-первых, из него вытекает, что звено есть одно тело, тогда как в общем случае в состав звена может, как известно, входить несколько материальных тел (включая, например, заполнившую полости смазку); во-вторых, при такой формулировке понятие звена неизбежно вводится после определения кинематической пары, а это нарушает логическую последовательность изложения; наконец, если особо не разъяснить смысл слова «подвижное» и степень ограничения относительных движений, то ему могут удовлетворять и такие никогда не относившиеся к кинематическим парам устройства, как, например, соединение штока и ползуна в механизме паровой ма-

шины — оно движется (относительно стойки) и ограничивает относительные движения соединяемых тел (полностью).

В определениях (г), (д), (е) и (ж) кинематическая пара истолковывается как некоторая совокупность двух тел, звеньев или элементов. Каждому из этих определений присущи те или иные недостатки, отмеченные выше при анализе определений (б) и (в), а кроме того добавляются еще и другие. Так, например, если исходить из определений (г) и (д), то можно подумать, что четыре тела (звена) могут образовать только две кинематические пары, тогда как фактически — две, три или четыре. Определения (е) и (ж) в одном случае (элемент — точка, линия...) слишком абстрактны, а в другом (элемент — часть звена...) требуют дополнительного разъяснения относительно размеров (объема) элемента.

Таким образом, приходим к выводу, что из всех рассмотренных определений наилучшим является первое.

Кинематической парой называется соединение двух звеньев.

В таком виде оно дается, например, в книге проф. М. В. Семенова «Структура механизмов» (Физматгиз, 1959).

3. Теперь обратимся к рассмотрению классификаций кинематических пар.

Согласно основным современным классификациям все кинематические пары делятся на пять классов либо по числу степеней свободы в относительном движении (т. е. по степени подвижности), либо по числу условий связи. Формально обе эти классификации равноправны, но на практике классификация по степени подвижности более удобна и естественна, в частности, по следующим причинам: уже само название «кинематическая пара» указывает на связь с движением; большая наглядность (возможные движения можно указать на чертеже стрелками); номер класса кинематической пары не изменяется в зависимости от того, образована ли она звеньями плоского или пространственного механизма; каждый класс имеет свое название — «одноподвижные», «двухподвижные», ..., «пятиподвижные», — четко указывающее на признак, положенный в основу классификации; формулы подвижности (структурные формулы) кинематических цепей и механизмов имеют более симметричный вид.

Таким образом, имеются, на наш взгляд, достаточно веские основания отдать предпочтение предложенному чл.-корр. АН СССР В. В. Добровольским делению кинематических пар на классы¹⁾ по степени подвижности.

Внутри каждого класса кинематические пары можно делить на виды по виду, взаимной ориентации и взаимной обусловленности допускаемых ими мгновенных относительных движений входящих в них звеньев.

4. Кроме рассмотренной выше классификации широкое распространение получило деление кинематических пар на низшие и высшие. Встречающиеся в литературе определения этих понятий можно свести к следующим:

низшими кинематическими парами называются такие, в которых звенья соприкасаются по поверхностям;

высшими кинематическими парами называются такие, в которых звенья соприкасаются по отдельным линиям и точкам.

Кинематические пары, обладающие одновременно признаками низших и высших, некоторые авторы выделяют в особую категорию — смешанных.

¹⁾ В трудах В. В. Добровольского вместо слова «класс» употребляется слово «род».

Рассматривая различные кинематические пары, легко установить, что в некоторых из них (например, в пятиподвижных) характер соприкосновения звеньев целиком предопределяется структурой реализуемых относительных движений, в других — зависит от конструктивного исполнения. Так, например, вращательная и поступательная кинематические пары, в зависимости от конструкции, согласно этим определениям, могут быть низшими, высшими или смешанными.

Поскольку такое деление отражает только характер соприкосновения звеньев вне определенной связи с их возможными относительными движениями, то, очевидно, для теории механизмов и машин в нем нет никакой необходимости. Оно могло бы быть в некоторой мере полезно для расчета и конструирования деталей механизмов и машин, но и в этом случае вместо терминов «низшая», «высшая» и «смешанная» удобнее пользоваться точными терминами — «поверхностная», «линейная», «точечная», «поверхностно-линейная» и т. д.

Отмечая эти обстоятельства, отдельные авторы предлагают вообще отказаться от деления кинематических пар на низшие и высшие и исключить эти термины из употребления. Между тем, большая часть ученых, независимо от существующих определений, удачно использует деление кинематических пар на низшие и высшие не только для общей характеристики их свойств, но и с целью систематического изложения проблем теории соответствующих механизмов. При этом к низшим кинематическим парам они без каких-либо оговорок относят вращательную, поступательную, винтовую, цилиндрическую, сферическую и плоскостную¹⁾, к высшим — все остальные.

Легко видеть, что при таком делении термины «низшие» и «высшие» прямо связаны с характером относительных движений, допускаемых соответствующими кинематическими парами: низшие допускают относительно простые движения звеньев, вследствие чего осуществление заданных форм движения при помощи механизмов только с низшими кинематическими парами, как известно, представляет задачу исключительной трудности; высшие же, наоборот, обладают значительно большими кинематическими возможностями, ввиду чего содержащими их механизмами даже при минимальном числе звеньев можно сравнительно легко воспроизводить практически любые формы движения.

С другой стороны, такое деление кинематических пар непосредственно связано с возможностями их конструктивного выполнения: низшие можно оформить так, что соприкосновение звеньев будет только по поверхностям, в высших — неизбежно соприкосновение по отдельным линиям и точкам.

С точки зрения теории механизмов главным признаком, очевидно, является характер относительных движений. Характер возможного соприкосновения здесь является как бы своеобразной мерой, при помощи которой удобно судить о характере относительных движений звеньев пары.

Суммируя все изложенные выше соображения, можно предложить следующие определения:

низшими кинематическими парами называются такие, в которых относительные движения звеньев можно воспроизвести при соприкосновении их даже только по поверхностям;

высшими кинематическими парами называются такие, в которых относительные движения звеньев можно воспроизвести лишь при наличии соприкосновения их по отдельным линиям и точкам.

¹⁾ Некоторые авторы к низшим кинематическим шарам относят также сферическую с пальцем в случае плоской прорези.

Согласно этим определениям, к низшим кинематическим парам независимо от конструктивного оформления относятся вращательная, поступательная, винтовая, цилиндрическая, сферическая и плоскостная, а все остальные — к высшим. Категория смешанных кинематических пар совершенно исключается.

5. В заключение остановимся на вопросах символики в обозначении кинематических пар.

Символические обозначения представляют интерес с точки зрения возможности выражать в обобщенной форме наиболее важные свойства кинематических пар, сокращать текст, в особенности, когда речь идет о кинематических парах, не имеющих определенных названий. Практически важно, чтобы символ был возможно более кратким и вместе с тем однозначно отражал все основные характеристики кинематической пары: число и вид допускаемых относительных движений, их взаимную ориентацию и наличие функциональной связи между ними.

Из числа предложенных в разное время символов этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяет система символов, разработанная чл.-корр. АН СССР В. В. Добровольским¹). Однако при составлении

| Класс | Наименование | Символ | Категория | № фигур |
|-----------------------------|---|--------|-----------|---------|
| I Одно- подвижные | Вращательная | В | Низшая | 89 |
| | Поступательная | П | Низшая | 100 |
| | Траекторная | (ВП) | Высшая | 137 |
| | Винтовая | (В П) | Низшая | 101 |
| II Двух- подвижные | Сферическая с пальцем | ВВ | Высшая | 153, e |
| | Тороидная | ВВ | Высшая | 99 |
| | Пара качения-скольжения | ВП | Высшая | 135 |
| | Цилиндрическая | В П | Низшая | 95 |
| III Трех- подвижные | Сферическая | ВВВ | Низшая | 94 |
| | Шар с пальцем в трубке с профрезом | ВВП | Высшая | 97 |
| | Плоскостная | ВПП | Низшая | 98 |
| IV Четырех- подвижные | Шар в трубке | ВВВП | Высшая | 96 |
| | Цилиндр на плоскости | ВВПП | Высшая | 93 |
| V Пяти- подвижные | Шар с плоскостью, пара соприкасающихся рычагов и другие | ВВВПП | Высшие | 92 |

символа по В. В. Добровольскому приходится рассматривать конечные перемещения, что в ряде случаев оказывается делом чрезвычайно трудоемким, а для учащегося просто непосильным. Этот недостаток в значительной степени устраняется, если при составлении символа исходить из учета мгновенных относительных движений.

Для упрощения символики целесообразно также не употреблять знак \perp (перпендикулярно), полагая, что стоящие рядом буквы В и П обозначают соответственно мгновенные вращательные и поступательные относительные движения звеньев, ориентированные на взаимно перпен-

¹) См., например, его книгу «Теория механизмов» (Машгиз, 1953).

дикулярные оси. В противном случае соответствующие две буквы разделяются знаком || (параллельно).

Буквы, обозначающие движения, между которыми имеются какие-либо функциональные зависимости, как и в символике В. В. Добровольского, целесообразно заключать в круглые скобки. Число этих зависимостей можно указывать соответствующим индексом в показателе степени (индекс «1» опускается). Для указания звеньев, входящих в кинематическую пару, можно ее символ снабжать нижним индексом, составленным из соответствующих номеров звеньев.

В написании символа буквы В, по нашему мнению, целесообразно записывать первыми, поскольку вращательное движение в технике является основным.

Степень подвижности кинемической пары равна числу букв В и П в ее символе минус число функциональных зависимостей между относительными движениями звеньев.

Для иллюстрации всех изложенных выше соображений приводим таблицу наиболее часто встречающихся кинематических пар с указанием их символов и других характеристик.

В таблице указаны номера фигур по учебнику акад. И. И. Артоблевского «Теория механизмов и машин» (ГТТИ, 1953).
