



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 96-44
ОАПчЭС

А. И. Курносенко

**МЕТРОЛОГ, КОНСТРУКТОР
И МЕТРОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ**

Протвино 1996

Аннотация

Курносенко А.И. Метролог, конструктор и метрологичность конструкций: Препринт ИФВЭ 96-44. – Протвино, 1996. – 24 с., 12 рис., библиогр.: 7.

Одно из требований, предъявляемых к конструкции, — *метрологичность*, т.е. принципиальная измеримость её геометрических параметров. Традиционное изложение этого круга проблем и сложившаяся терминология практически скрывают тот факт, что *неметрологичность* конструкции эквивалентна её *недетерминированности* или *нефункциональности*. Само же исследование измеримости есть лишь методический прием, позволяющий вскрыть эти недостатки безотносительно к фактическому измерению. В “метрологическом” подходе, а также в недостатках языка описания конструкций автор видит основную причину живучести типичных конструкторских ошибок и серьезное препятствие на пути автоматизации этой сферы производственной деятельности.

Abstract

Kurnosenko A.I. On Metrological Approach to Design and Manufacturing: IHEP Preprint 96-44. – Protvino, 1996. – p. 24, figs. 12, refs.: 7.

One of the most general requirements usually imposed upon the technical construction is the principal measurability of its geometry. The traditional *metrological* treatment of the subject leaves hidden an important feature: the non-measurability is equivalent to indefiniteness of design or inability to proper functioning, the metrological test being just a method to reveal these flaws. There are grounds to believe that the preference given to the metrological approach over functional, along with some ambiguities in design notation, causes a lot of problems in formalization and automatization of design and manufacturing.

E-mail: kurnosenko@mx.ihep.su

В сокращенном варианте и под названием
“О метрологическом подходе к конструированию и производству”
публикуется в журнале “Измерительная техника”, N4, 1998, стр. 14–19.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1996

“ ... Для применения теории вероятностей к анализу качества продукции необходимо сначала создать хорошо налаженное производство, в котором не было бы ни пьянства, ни прогулов, ни штурмовщины, ни негодного сырья, ни изношенного технологического оборудования, и т. п. Теория вероятности есть нечто вроде масла в каше: сначала надо иметь кашу”.

Тутубалин В.Н. Теория вероятностей в естествознании.¹

Пожалуй, самое примечательное в этом эпиграфе то, что взят он из журнала “Успехи физических наук”. Среди факторов, мешающих “сварить кашу”, упомянуты также дилетантизм и некомпетентность. Ужели физикам-математикам больше нечего делать, как заниматься проблемами такого рода? Нет, просто автор рекомендаций по *математизации управления качеством* считает необходимым изложить условия их применимости. Подобным же образом следует подходить и к более широкому кругу проблем — *автоматизации производства и управления им*: основа автоматизации — *формализация*, т. е. четкое определение структур, связей, задач, ответственности; лишь в такую кашу имеет смысл добавлять масло, напичкивая производство компьютерами и алгоритмами.

В этом смысле задолго до появления ЭВМ автоматизированы, например, библиотеки; именно оттуда пришел в компьютерную науку термин “каталог”. Порядок, наведенный Карлом Линнеем в ботанике, сродни автоматизации. Один из основных документов машиностроения ГОСТ 24642–81 как будто написан для исполнения на компьютере. Почему, однако, никак не удается полноценно автоматизировать производство?

Ответить на этот вопрос в столь широкой постановке мы не беремся. Из всего спектра производственных отношений, задач и деятельности мы проанализируем здесь лишь одну важную часть, попавшую в поле зрения автора в связи с ра-

¹Цитируется по статье Ю.И.Алимова и Ю.А.Кравцова “Вероятность как физическая величина” (УФН, N7, т. 162, 1992, стр. 164-165).

ботой по автоматизации допускового контроля и внедрению созданной системы. Эта задача потребовала не только анализа основных понятий взаимозаменяемости (народное название этой дисциплины — допуски и посадки), но также изучения проблем более высокого уровня, а именно деятельности и распределения компетенции конструктора, технолога и метролога. Представляется важным сформулировать *идеальную схему* их взаимоотношений. При этом в определении *идеальный* работают одновременно оба его смысловых оттенка — *совершенный* и *нереальный*.

Совершенство достигается минимумом связей и чёткостью формулировок. Так, совершенная документация не требовала бы какого-либо общения конструктора, изготовителя и контролёра, что, в частности, предполагает совершенство самого языка описания конструкций и однозначность его определений.

На практике общение участников производства почти всегда происходит и состоит во взаимных уступках, уточнениях неоднозначностей. **Нереальность** схемы не является её недостатком: при наличии нескольких спорных трактовок конкретной реальной ситуации именно мера близости каждой из них к идеалу будет иметь решающее значение.

Знания конструктора можно представить как объединение множеств — нормы взаимозаменяемости + специализированные дисциплины (кинематика, аэро/гидродинамика, криогеника и пр.) + *язык описания конструкций (язык чертежа)* ^[1] ². Этот язык есть набор соглашений для представления конструкторского замысла, изначально изложенного в терминах функциональности, с помощью универсальной терминологии геометрических форм и материалов. Множество знаний технолога — станки + технологии обработки + ... + *язык чертежа*. Компетенция метролога и контролёра — приборы и методы контроля + ... + *язык чертежа*. Язык чертежа, таким образом, является пересечением этих множеств, благодаря чему участники производства “транслируют” запись конструкции в реальное изделие — кулачок, турбину, холодильник, — не обладая специализированной компетенцией.

Довольно редко используемое понятие “*метрологичность конструкции*” заимствовано нами у В.А. Чудова.³ Гораздо чаще встречается термин “*контролепригодность*”. Уточним использование этих понятий в рамках настоящей статьи.

Первому и более пышному из них отводится и более фундаментальное толкование: под метрологичностью понимается *принципиальная* измеримость параметров конструкции, не связанная с применением тех или иных средств измерений.

Понятие же контролепригодности в соответствии с определением в ГОСТ 8.103–73 более приземлено: вполне метрологичная поверхность может оказаться **неконтролепригодной** только потому, что она недоступна для зондирования;

²Значком ^[1] обозначены ссылки на комментарии в конце статьи. Они содержат дополнительные пояснения или подробности и могут быть опущены при ознакомительном чтении.

³Здесь и далее автор ссылается на рукопись “*Принципы взаимозаменяемости и метрологичность конструкций (проектное обеспечение точности)*”, любезно предоставленную ему В.А. Чудовым.

неконтролепригодность детали может быть связана с отсутствием на данном предприятии некоторого прибора, дороговизной контроля, недостаточно развитым программным обеспечением измерительного автомата и т. д. Если контроль детали считать стадией технологического процесса (промежуточной либо заключительной), то и контролепригодность естественно считать составной частью понятия технологичности.

Деятельность конструктора определяется требованием обеспечения в изделии определённого набора функций. Основным понятием схемы его деятельности является понятие *конструкторского замысла*: “изделие должно летать, пахать, крепить, создавать магнитное поле и т. п. В силу этого необходимо реализовать такую-то геометрию в таких-то пределах (с использованием таких-то материалов)”.

Об определяющей роли конструкторского замысла обычно незаслуженно забывают как о чём-то отвлеченно-философском и во главу угла ставят требования технологичности (включая контролепригодность) и метрологичности. В какой мере обязательными являются эти требования? Вероятно, какие-либо сомнения в этом звучат почти как крамола. Тем не менее позволим себе обсудить этот вопрос.

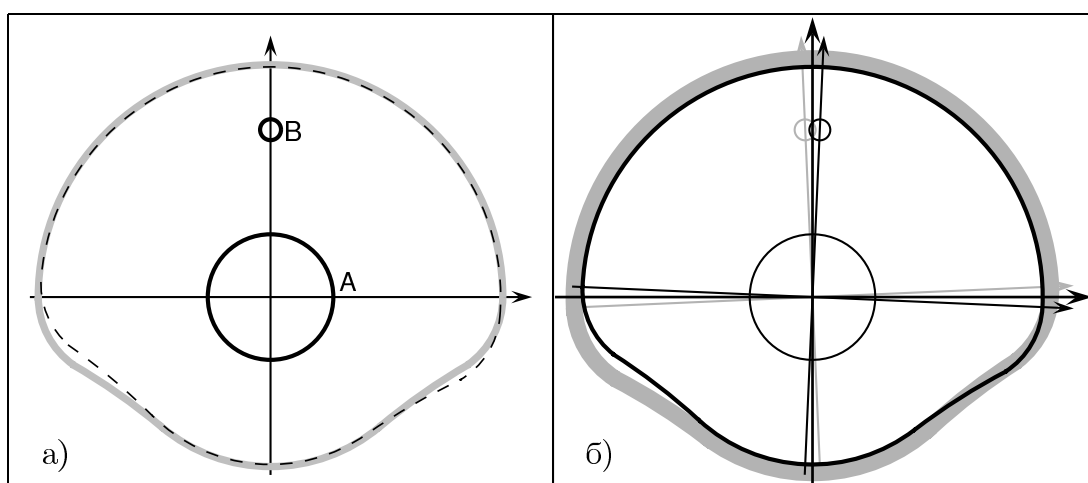


Рис. 1.

Проектируя кулачок (рис. 1а), конструктор решает задачу реализации заданного закона движения толкателя. Найденный профиль он представляет в виде аналитической зависимости или таблицы координат точек. Согласно чертежу, начало системы координат детали (СКД) определяется посадочным отверстием A , ось — отверстием B . В этой СКД нормируются отклонения реальной формы профиля от номинальной. *Обязан* ли конструктор вводить дополнительное отверстие B , позволяющее технологу и контролёру легко восстановить СКД, но не несущее никакой нагрузки во время работы кулачка?

У технолога не возникло бы такой необходимости, если бы деталь можно было изготовить за один установ на станке с ЧПУ. Однако последующая обработка поверхности на другом станке требует восстановить его положение. Дополнительное отверстие — не единственный способ решения этой задачи. Можно, например, изготовить оснастку — охватывающий профиль с необходимыми установочными

элементами. Выбор того или иного способа определяется технологом с учётом и таких факторов, как стоимость изготовления, количество деталей в серии, наконец, сама возможность сверления отверстия без ущерба для функционирования.

Этот пример позволяет рассматривать требование технологичности в рамках нашей идеальной схемы как дополнение к конструкторскому замыслу: изделие должно летать, пахать, ... и т. д. и изготавливаться с помощью данного станочного парка, в пределах отпущенных сроков и средств.

Что касается метрологичности, то из самых общих соображений следует, что отсутствие ненужного отверстия не может быть фатальным для решения вопроса о принципиальной измеримости детали. В самом деле, контроль можно провести и на кинематическом стенде, исследовав непосредственно движение толкателя, правда, выходя при этом за рамки чисто геометрической информации чертежа. Но и в рамках геометрии, ограничивающих действия контролёра, это вполне разрешимая задача. Заданный профиль сам по себе определяет СКД и может служить конструкторской базой^[2]. Возможность задать положение *профиля относительно отверстия* абсолютно обратима: можно задать и измерить положение *отверстия относительно профиля*, паспортизовать его (скажем, $1^\circ 20'$) и использовать, например, при установке на станке для ремонта изделия. Заметим, что чем ближе этот профиль будет к окружности, тем хуже будут его базирующие свойства по определению направления оси. Но пропорционально будет уменьшаться и *необходимость* в таковых свойствах, которая вместе с ними и исчезнет при вырождении профиля в окружность.

История этого кулачка весьма поучительна. Измерения показали, что реальный профиль не входит в поле допуска (пунктир и серая линия на рис. 1а). Технолог и контролёр заподозрили, что если отверстие B проигнорировать и немного повернуть профиль, то отклонения уменьшатся. Программист реализовал базирование по сложной кривой (благо всё программное обеспечение КИМ доморощенное). Профиль оказался почти идеальным. Налицо триединый парадокс:

- * Технологическая база, похоже, сыграла свою роль, но когда дело дошло до измерений, куда-то исчезла.
- ** Протоколируя найденное “хорошее” отклонение формы профиля, контролёр совершает подлог: это не та величина, которую нормирует конструктор.
- *** Подлог всех устраивает, в том числе конструктора и заказчика.

Самое любопытное здесь — как с такой базой удалось сделать хороший профиль? Следствие установило: базирование детали на станках является не математическим (минимальные погрешности), а физическим; межцентровое расстояние на заготовках исполняется довольно грубо, что не позволяет выполнить жесткую посадку отверстия B на оснастку; посадка осуществляется на 4-угольный штифт, что является основным источником случайной погрешности: ось детали (линия центров отверстий) не совпадает с осью координат станка. *К оси станка*, а не к оси детали оказывается в итоге привязанным профиль. Первая обработка производится с припуском (серая полоса на рис. 1б); из рисунка видно, что грубость базирования

не мешает отшлифовать затем идеальный профиль. Но узнать об этом непросто: приходится угадывать и воспроизводить погрешность базирования на стадии измерений. Чтобы отверстие могло служить измерительной базой (и только для этого) грубость базирования следовало устранить, усложнив технологию.

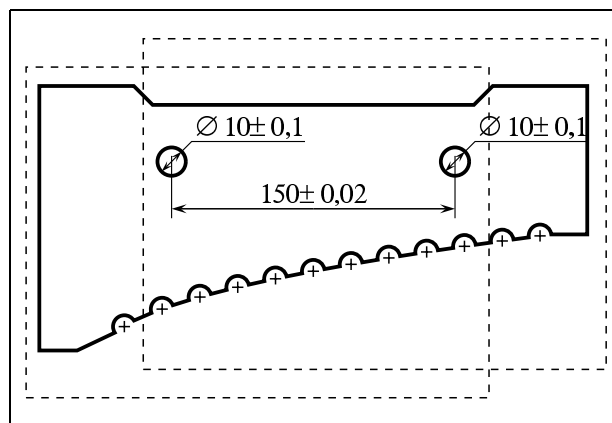


Рис. 2.

Таким образом, конструктора, проигнорировавшего установочное отверстие, нельзя упрекнуть в создании *неметрологичной* конструкции. Другое дело, что деталь может оказаться *неконтролепригодной* — ввиду отсутствия на предприятии координатной измерительной машины (КИМ) либо отсутствия в программном обеспечении КИМ такой функции (действительно, довольно редкой). Однако вряд ли следует ставить в вину конструктору то, что он не удосужился об этом узнать: чистота выражения конструкторского замысла, не-

замутненная сиюминутными и местными обстоятельствами, имеет несомненную ценность^[3]. Вводя отверстие и придавая ему статус базового, конструктор допускает искажение замысла. У детали на рис. 2 отверстия добавлены с целью изготовить её на станке, рабочая зона которого (пунктир на рисунке) несколько меньше габаритов детали. Видимо, конструктор при этом догматически следовал принципу совмещения конструкторских, технологических и измерительных баз. Кто же из трех персонажей, затрагиваемых этим принципом, и в какой мере должен ему следовать? И так ли уж принципиален этот принцип?

Базирующие свойства поверхностей, привлекаемые конструктором *для реализации замысла*, в большинстве случаев удастся использовать и при изготовлении, и при контроле изделия. Поэтому отступления от принципа совмещения баз — скорее исключение, чем правило.

Конструктор, вводя комплект баз, делает законными и определёнными размеры типа “координаты” — декартовы, полярные и пр.; другие размеры (ширины, радиусы, углы между прямыми) определены и без этого. Введение комплекта баз можно рассматривать и как один из возможных *стилей* описания конструкции, позволяющий упростить описание, обойтись без громоздких размерных цепей (рис. 3) и пр.

Для технолога совмещение баз — приём, позволяющий уменьшить погрешности изготовления. Невозможность совмещения не фатальна; проблема решается в пределах компетенции технолога. Навязывание технологических баз конструктору порочно.

Для контролёра *несовмещение баз* — это просто измерение не того размера-координаты, который предполагал конструктор. Но так приходится иногда

поступать и с другими размерами — ширинами, радиусами, углами. Обоснованно заменяя прямые измерения косвенными, контролёр обязан оценить дополнительную погрешность и значимость результата. В этом смысле принцип совмещения баз является частным случаем принципа предпочтительности прямых (непосредственных) измерений, примененным к измерению конкретного размера — координаты.

На рис.3 изображён фрагмент старой версии чертежа воротника сверхпроводящего диполя (толщина детали 2мм, неуказанные допуски линейных размеров 0,025мм). Базы В и С, бóльшая часть размеров и отклонений остаётся на этом чертеже неопределённой и принципиально неизмеримой с требуемой точностью (66; 32; 32,1; 88,5h8; 2,8; 14,43; 49 и др.). Даже без анализа замысла видно, что речь идёт о размерах типа “координата”. Координатный способ описания снял бы все проблемы. Конкретный выбор комплекта баз этой детали — непростая задача, но это задача конструктора. Её сложность вполне соответствует сложности за-

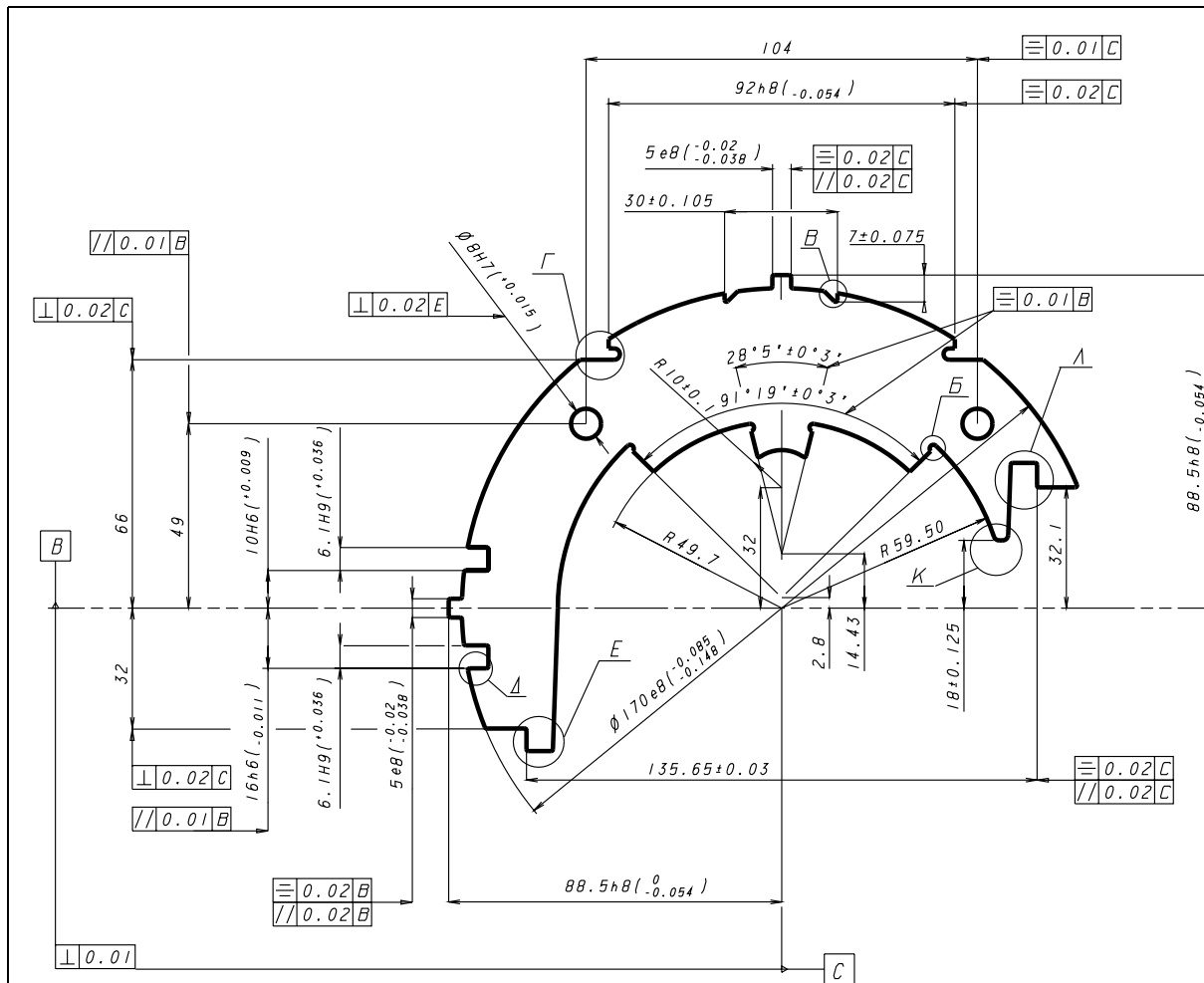


Рис. 3.

мысла — необходимости собрать из тонких пластин шестиметровую “трубу” с жесткими функциональными характеристиками.

В литературе по допусковому контролю и метрологической экспертизе [1,3] приводятся примеры “метрологических” ошибок в описаниях конструкций. Несколько дополнив их типологию, мы уделим основное внимание их происхождению и живучести. Хорошей иллюстрацией роли этих ошибок в производственных отношениях послужит нам изложение реальной беседы автора (А.) с начальником ОТК одного предприятия (Н.).

Н. Как Вы контролируете профиль кулачка?

А. Как велено на чертеже: устанавливаем начало координат в центре посадочного отверстия А, строим ось, проходящую через центр отверстия В; определяем расстояния от измеренных точек до номинального профиля с поправкой на радиус зонда.

Н. Но ведь это неправильно!

А. ???

Н. А можете ли вы немного повернуть ось? Я не раз замечал, что результат от этого становится лучше.

А. Но это “лучше” — совсем другая величина. Контролёр так бы и поступил, если бы в качестве базы был указан сам профиль кулачка. Он не вправе подменять требуемую характеристику чем-то другим.

Н. Это отверстие никому не нужно, оно не рабочее.

А. Тогда почему бы эту проблему не решить конструктору?

А. хитрит: он полагает что, решение должно существовать — согласно духу и букве теории взаимозаменяемости. Но найти нужную букву не может, не знает, как выразить решение в рамках существующих стандартов.

Н. (ласковая снисходительная улыбка) Но ведь конструктор находится в Швеции!

А. Ну и что? Для того и придуманы стандарты описания конструкции, чтобы проектировать можно было в Швеции, комплектующие изготавливать в Протвино, а сборку проводить у вас в Подольске.

Н. Вы хотите работать по ГОСТам, а я — по реальной жизни. Я вот, прежде чем проверять деталь, посмотрю, где она стоит и как работает.

А. Контролёр работает не только с кулачками. Что Вы будете делать, если Вам дадут, скажем, воротник сверхпроводящего магнита (рис. 3)?

Н. Все посмотрю, выясню, что как стоит, разберусь и с магнитом.

Только “что как стоит”? А как насчёт качества магнитного поля? Особенностей работы при сверхнизких температурах? *Н.* навязывает контролёру несвойственную ему компетенцию и дублирование деятельности конструктора. Все проблемы функциональности, в том числе и посадки (“что где стоит”), для того и описаны в чертеже, чтобы контролёр работал в пределах своих знаний.

Благие намерения *Н.* — попытка “спасти” деталь — не вызвали бы протеста и упрямства *А.*, если бы *Н.* хотя бы понимал, что именно он нарушает формальности, что его требования не могут иметь форму претензий, а лишь форму просьбы (поэкспериментировать) либо форму технологического документа.

А. И как же Вы предлагаете проверять вот эту Вашу деталь (рис. 4)?

Н. А что здесь сложного?

Сложного ничего, вот только базовая ось *М* — просто прямая, параллельная краю листа бумаги. На реальной детали от этого края не осталось и следа. (Быть может, в учебных целях полезно чертить на обрывках?) Как контролёру восстановить ось? Как ось симметрии линий *А* и *В*? Или *С* и *Д*? *Е* и *Ф*? Может, построить общую ось симметрии (4 варианта)? Или использовать центр окружности? Но какой из двух? Ведь их центры совпадают только на чертеже, а у реальной детали различаются. Наконец, 6 отверстий дают ещё несколько способов построения вожделенной оси.

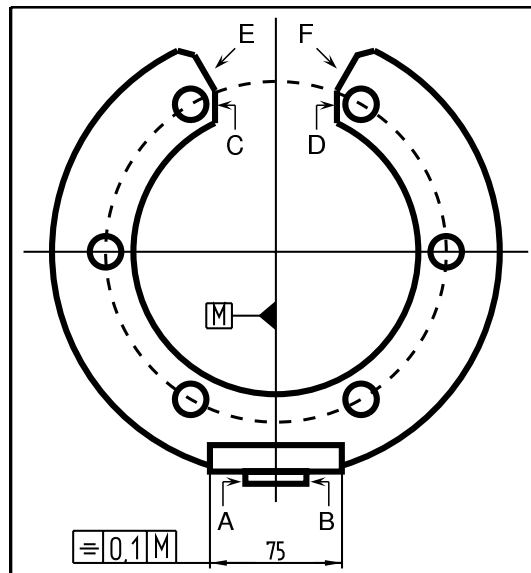


Рис. 4.

*А. Образно выражаясь, я должен “процарапать” на детали ось *М* и относительно неё измерить положение боковых сторон выступа — “размера 75”. Но как мне её провести?*

А. ожидает обычного в таких случаях анализа размеров, допусков, гипотез о назначении элементов и прочих измышлений, суть которых — угадывание исходного замысла, вызванное отсутствием правильной записи конструкции.

Н. Но у вас ведь есть компьютер!

1:0 в пользу *Н.* Ответить трудно. Заблуждение весьма распространённое: многим кажется, что достаточно иметь ЭВМ, и можно грабить банк, запускать ракету, проводить прямую не знаю откуда, не знаю куда. С другой стороны, оно вряд ли простительно человеку, который тратит “огромные деньги на покупку компьютеров, техники, чтобы навести порядок”. Впрочем, в данном случае решение спора тривиально — ссылка на Правила выполнения чертежей, запрещающие простановку значка базы на оси.

А. Но ГОСТ явно запрещает ставить такую базу. Любая метрологическая экспертиза отметила бы это. И Ваша обязанность — провести её до запуска изделия в производство, а не заставлять контролёра смотреть “что где как стоит”.

Н. По-вашему, я должен взять лупу, проверить толщину и длину выносных линий, наклон шрифта и всё прочее?

Если бы *Н.* догадался до этого тезиса, это было бы второе очко в его пользу. *И.*, наверное, он был бы отчасти прав. Один из недостатков не столько языка описания конструкций, сколько его традиционных изложений — смешение чисто оформительских правил (которыми можно слегка пренебречь, например, в угоду данному графопостроителю или САПР) с правилами принципиальными (которыми пренебречь нельзя). *Н.*, однако, сказал другое:

Н. Кто Вам платит зарплату?

И ушел наводить порядок на участке термообработки.

Некомпетентность — не самая большая беда на производстве: с ней можно бороться образованием. Гораздо опаснее воинствующий дилетантизм, прикрывающийся универсальностью и вооруженный демагогией. Такой стиль управления распространен и даже допустим: одни не делают своего дела, другие делают свое и чужое, *даже не зная, где проходит граница между своим и чужим*. Но производство на месте не стоит (предприятие, на котором работает *Н.*, выпускает отличные машины). Однако о какой-то автоматизации управления этой сферой деятельности при таком подходе не следует и помышлять. Это — не автоматизируется.

Ошибка, допущенная на рис. 4, довольно распространена. В.А. Чудов называет её *назначением размера от нереальной (графической, чертёжной, словесной) базы*. Её мы отнесём к первому типу “метрологических” ошибок. Того же типа ошибки — неуказание размеров либо простановка лишних размеров (недоопределение или переопределение), неуказание комплекта баз детали при использовании понятия “координата” в описании конструкции. Оси координат проводятся без всякой связи с будущей реальной деталью. Школьная привычка рисовать сначала оси, а затем изучаемую функцию, прочно сидит в сознании. Её усиливают и современные станки, позволяющие вырезать сложный профиль кулачка, воротника, не задумываясь о материализации осей. Не способствует правильному пониманию вопроса и его традиционная трактовка, переносящая акцент на акт измерения детали: многие конструкторы считают, что выбор баз — проблема технолога и измерителя, и любезно дают советы типа “возьмите самый точный паз”.

Назначение баз — проблема конструктора, ибо за этим стоит детерминированность описания конструкции. И дело не только в том, что различное угадывание неуказанных баз не дает возможности сравнить результаты разных измерений, принять однозначное решение о годности детали. Дело в том, что основанием для выбора баз служит функционирование изделия. Комплект баз детали, как и база конкретного размера или отклонения, назначается для того, чтобы чётко выразить замысел конструктора, чтобы оси координат шагнули с бумаги в жизнь вслед за ожившим изделием и работали с ним.

И вовсе не для того, чтобы дать возможность измерить изделие.

Функциональность конструкции не может вступить в противоречие с её метрологичностью в принятом нами высоком смысле этого термина. И наоборот — **неметрологичность означает либо недетерминированность конструкции, либо её неспособность выполнять заданные функции.**

В свете этого заявления и “идеального” распределения компетенции интересно исследовать примеры создания в конструкции специальных метрологических поверхностей (измерительных баз, метрологических поясков-свидетелей и т. п.). Анализ позволяет разделить эти ситуации на два класса.

1. Введение в конструкцию таких элементов упрощает, иногда весьма существенно, технологию изготовления и контроля. Важность этого неоспорима. И всё же это вопросы технологичности, контролепригодности, а не принципиальной измеримости.

2. При проектировании приспособлений, станков, средств измерений введение таких поверхностей вообще лежит в сфере основного конструкторского замысла, обеспечения удобства и самой возможности использования изделия.

Таким образом, речь идёт либо о типовых приёмах, которые входят в компетенцию технолога или конструктора (а не метролога) наряду с приёмами повышения прочности, облегчения конструкции и т. п., либо о целой области конструкторской специализации.

Ошибки, отнесенные нами к первому типу, носят *качественный* характер. Они легко описываются набором правил выполнения чертежей и столь же легко детектируются. Ошибки второго типа требуют *количественного* анализа. Например, какова бы ни была функция пары отверстий у детали на рис. 2 (в данном случае чисто технологическая), её исполнение не будет гарантировано, пока не будут обеспечены параметры *круглости* отверстий, меньшие, чем допуск 0,02 мм расстояния между ними. Забывая об этом, конструктор (технолог) отдаёт на волю случая и измеримость межцентрового расстояния, и выполнение парой отверстий отведённой им роли.

Более сложный пример ошибки такого рода — нормирование торцового или радиального биения, несогласованное с длиной базового цилиндра и его допуском цилиндричности [3]. Обычно критика этой ситуации состоит в указании на большие погрешности измерения (базирования)^[4]. Но невозможность точно измерить означает необеспеченность точной посадки, отсутствие гарантии того, что два разных акта посадки дадут если не одинаковый, то хотя бы близкий результат, что, наконец, посадка на измерительном приборе эквивалентна посадке при сборке. Это также означает, что конструктор оставил возможность биения не в геометрическом, а в кинематическом смысле, ту самую возможность, которую он хотел ограничить. Он не справился с реализацией своего замысла.

Эту ситуацию игнорирует и *Н.* в своих измерениях: его совершенно не интересует круглость центрального посадочного отверстия кулачка. Однако не проанализировав отклонения от круглости, обсуждать величину и характер отклонений формы профиля вообще не имеет смысла.

К третьему типу “метрологических” ошибок мы относим использование сильно скоррелированных параметров при описании расположения поверхностей. Эта тема практически не описана в литературе и требует более подробного анализа.

Рассмотрим деталь (рис. 5а), у которой положение прямых задано углом $A \pm \delta$ и расстоянием $H \pm h$ от точки-вершины до точки-центра. Подходя формально к контролю этих параметров, контролёр определит их реальные значения и проверит, выполнены ли для них допусковые неравенства. Скорее всего, это будет не так из-за огромных погрешностей такого расчёта, *запрограммированных конструктором*. Погрешность базирования (“установки в нуль”) есть по сути погрешность определения координаты центра дуги. Она тем больше (квадратично!), чем меньше дуга [4]. И это не проблема измерения — это отражение геометрической природы окружности, в силу которой такой центр не может быть измерительной базой

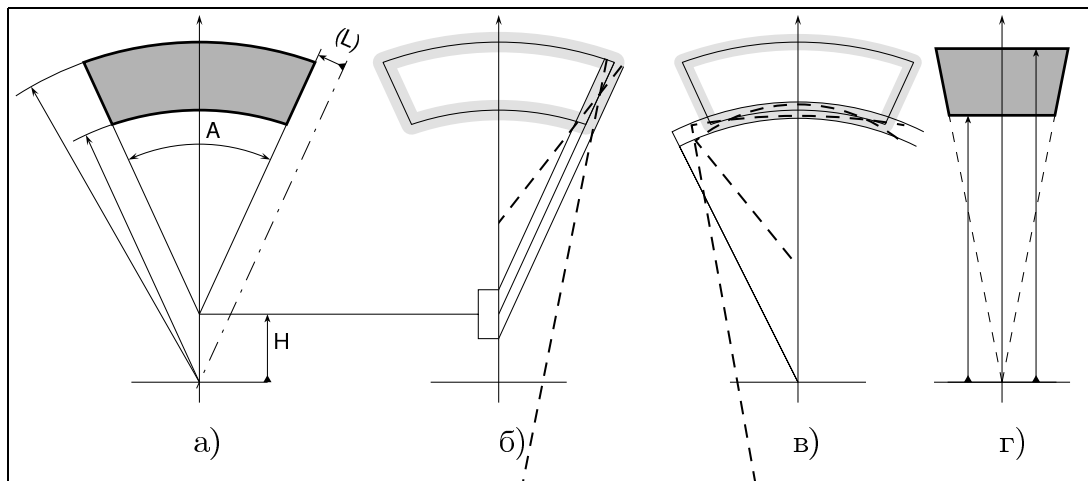


Рис. 5.

(но это вторично) и не сможет адекватно функционировать (а это — первично!): функцию центрирования на него возложить невозможно.

Источник погрешности — высокая корреляция радиуса и положения центра. Иными словами, можно значительно увеличить радиус и *скоррелированно* изменить положение центра так, что реальная поверхность останется практически на прежнем месте. На рис. 5в это показано на фоне условного поля допуска (серая полоса). Если сюда добавить неидеальность формы, то обнаружить эти махинации какими-либо измерительными приборами не удастся: все приборы — калибр, зонд, поворотный стол с индикатором — будут тестировать почти не изменившуюся реальную поверхность. Это утверждение можно изложить и так: по данным параметрам оценить точность изготовления невозможно. Или так: сектор радиуса $(100, 0 \pm 0, 1)$ мм при достаточно малом угле можно вырезать из заготовки радиуса 95 или 105 и никто не заметит разницы.

Корреляции уменьшаются до приемлемых величин, когда дуга превосходит 180° . Тут-то и появляются и возможность центрирования, и частичная измеримость штангенциркулем. Корреляции параметров формы и расположения исчезают у полной окружности.

Чтобы всё же иметь возможность восстановить центр малой дуги, необходимо обеспечить параметры круглости, сравнимые с параметрами шероховатости. Такая ситуация нехарактерна для машиностроения. Однако есть область техники, где работают именно центры и фокусы малых участков поверхностей. Эта область — оптика; хорошо известно, насколько сложны и точны технологии шлифовки линз.

Два типа функционирования дуги отражаются в двух способах нормирования её положения и измерения радиуса (диаметра).

- В первом случае определяются расстояния от точек реальной поверхности до некой точки, *этой же поверхностью порожденной*. Так действует штангенциркуль, такой алгоритм имитации калибра заложен в КИМ, такую точку контролёр будет искать и на поворотном столе; в этой точке фокусирует лучи линза. Определенный таким образом радиус есть *размер-форма*. В этом

случае нормирование трех параметров дуги с углом меньше 180° должно сопровождаться обязательным и явным⁴ ограничением круглости (цилиндричности).

- Во втором случае точка отсчета радиуса не является центром данной окружности и совпадает с ним лишь номинально: её порождают другие геометрические элементы. Это может быть центр другой окружности (радиальное биение), произвольно заданная точка в СКД и т. п. Определенный таким образом радиус есть *размер-расположение*.

Аналогична и ситуация с размерами A и H (рис. 5б): корреляция между ними выражается в том, что, сильно исказив угол, прямую можно вернуть практически в номинальное положение (с точностью до отклонений формы) за счет величины H . Разумеется, это никак не означает, что на эти размеры можно установить широкий допуск.

Но, может быть, конструктор, назначая допуск угла, исходил из ширины угловой зоны с вершиной в точке $(0, H)$? Тогда этот размер **не** есть угол между прямыми, а что-то вроде полярного угла, тогда он **не** измерим синусной линейкой, тогда необходимо уточнить происхождение точки $(0, H)$. Намеком на такое понимание углового размера могло бы служить указание линейного параметра \boxed{H} в рамке без допуска, но все ли это однозначно воспримут?

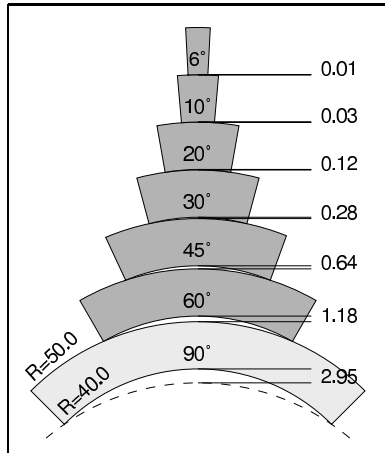


Рис. 6.

Использование конструктором умозрительных удалённых точек позволяет предположить, что он имел в виду просто координатный способ описания номинального профиля (без указания каких-либо допусков) и нормирование отклонений от него⁵. Этот вывод метролог сделает, не интересуясь ни назначением изделия, ни технологией. Узнав, что это некий калибр или вставка, он лишь убедится в своей правоте: все функциональные свойства детали концентрируются на её поверхности, центр не “работает”. Чтобы убедить в этом и конструктора он, во-первых, слегка трансформирует чертёж, сделав из него трапецию; абсурдность базирования и назначения размеров станет очевидной (рис. 5г). Во-вторых, взяв пару калибров, он предложит проверить внутренний радиус (40 мм) с помощью наружной поверхности (50 мм, рис. 6). Означает ли зазор в 0,01–1 мм, что радиусы отличаются на эту величину? Нет, это означает, что при отклонениях формы порядка 0.01 мм радиусы 40 и 50 мм у дуги в 6° *неразличимы*.

Предложенный конструктором чертёж есть не более чем технологическая инструкция для исполнителя (“взять цилиндрическую заготовку радиуса ... и т. д.”), но никак не адекватное описание конструкторского замысла. Проблема корреляций

⁴То есть без каких-либо ссылок типа “неуказанные допуски определяются по ...”

решается фиксацией всех или части параметров^[6]. Именно это и предлагает язык описания чертежей вариантом \boxed{A} , \boxed{R} , \boxed{H} ; подразумевается и $X, Y_{\text{центра}} = \boxed{0}$.

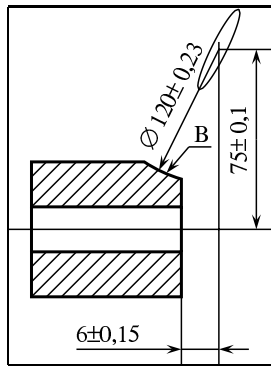


Рис. 7.

Трудно согласиться с изложением аналогичной ситуации в книге [3] (стр.110), где контроль малой дуги рассматривается лишь в связи с трудоёмкостью, наличием КИМ, высокой квалификацией оператора (рис.7). На наш взгляд, это в первую очередь проблема интерпретации размеров и допусков. Описывая маленькую дугу тремя параметрами, каждый (!) из которых подвержен вариациям, конструктор создаёт просто запутанную ситуацию. Можно ли считать, что любая кривая, находящаяся в круговом поясе углового сектора φ с центром строго в $X_{nom}=6,00$, $Y_{nom}=75,00$ и радиусами $(R \pm \rho) = (120,00 \pm 0,23)/2$ устраивает конструктора? Если да (что естественно), то геометрическое место возможных центров окружностей, удовлетворяющих этому условию, есть эллипсообразная зона с осями $a = \frac{4\rho}{1 - \cos(\varphi/2)} \sim 35 \text{ мм}$ и $b = \frac{2\rho}{\sin(\varphi/2)} \sim 1,5 \text{ мм}$ ($\varphi \simeq 20^\circ$), вытянутая в определённом направлении. Должен ли допуск координат центра быть согласован с размерами и направлением этой зоны? Или для интерпретации зоны допуска следует исходить из модели фрезы, считая указанные допуски поверхности допустимыми вариациями движения и размеров фрезы⁵? Но как тогда по столь малому следу восстановить три параметра фрезы и разделить ответственность между ними? Это можно было бы сделать достаточно надёжно при круглости порядка $\rho \cdot \sin^2(\varphi/4) \simeq 0,002 \text{ мм}$. Отшлифовать? Или ^{просто} ~~лучше~~ построить заменяющую поверхность и проверить три допусковых неравенства, так и не прояснив загадочного конструкторского замысла? Можно, наконец, предположить, что эта деталь в паре с другой, симметричной, поддерживает некий цилиндр, положение оси которого и описано на чертеже; только так можно оправдать использование понятия диаметра для описания дуги. Но вправе ли конструктор ставить перед контролёром такую задачу, или он должен сам найти адекватное описание?

Ещё один класс задач, решаемых метрологом или контролёром — интерпретация размеров, допускающих неоднозначное толкование. Выше мы продемонстрировали неоднозначность понятия “радиус”. Приведём ещё два примера такого рода.

Рассмотрим задачу измерения расстояния между торцами цилиндра (рис.8). Один из вариантов решения — нажать кнопку “расстояние между плоскостями” на пульте КИМ, т.е. обратиться к процедуре-функции двух переменных $D(P_1, P_2)$. Эта функция в согласии с определением в [6] предполагает следующие действия: построение заменяющей плоскости P'_1 по точкам зондирования плоскости P_1 и расчёт расстояний от точек P_2 до P'_1 . В силу различного статуса плоскостей, одна

⁵... что, видимо, и подразумевают авторы, предлагая обеспечить необходимую точность технологически и уходя от проблемы интерпретации.

из которых является базовой, эта функция несимметрична: $D(P_1, P_2) \neq D(P_2, P_1)$. Поэтому результат измерения может сильно зависеть от того, какая из плоскостей измерена первой (рис. 8б,в). Это не есть недостаток упомянутого определения: если искомое расстояние меньше габаритов плоскостей, различие между результатами невелико. В других случаях выбор базовой плоскости определяется, например, наличием сопряжения, а угадывается по габаритам, допуску формы. Но в идеальной записи конструкции он должен просто *считываться* с чертежа!

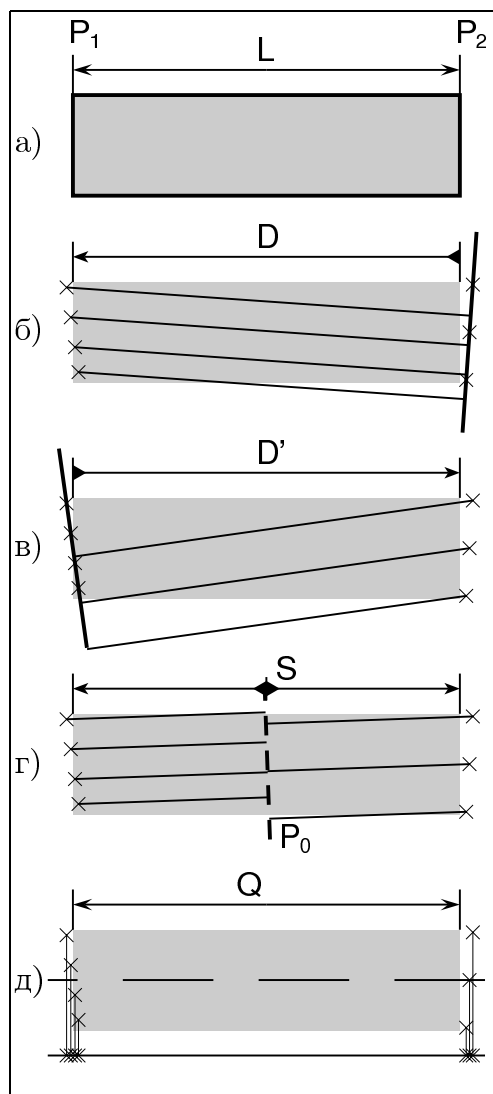


Рис. 8.

ски сложилось”) и не вписывается в идеальную схему производственных отношений.

Устранению неоднозначностей способствовало бы простое указание на них в *описании языка*, сопровождаемое правилами их разрешения по умолчанию (подобно тому, как ГОСТ 25069–81 определяет неуказанные допуски формы и расположения). Любопытно, что отчасти и неявно это сделано: конструкторский язык, не

Возможно и симметричное определение этого размера:

$$S(P_1, P_2) = S(P_2, P_1) = D(P_0, P_1) + D(P_0, P_2),$$

где P_0 — плоскость симметрии P_1 и P_2 (рис. 8г). Однако скорее всего в данном случае следует применить третий вариант, также симметричный: $Q(P_1, P_2, \vec{A})$ — расстояние вдоль заданного направления \vec{A} , а именно оси цилиндра. Иными словами, точки, измеренные на обеих плоскостях, надо спроектировать на ось и определить расстояние между двумя полученными кластерами (рис. 8д).

Таким образом, язык описания конструкций предлагает для геометрически различных размеров одинаковое изображение и не уточняет терминологию. Принятие решения основано на неких дополнительных соображениях, далеко не всегда очевидных. Обычно метролог находит решение путем выяснения конструкторского замысла (как “более грамотный конструктор”), но не всегда имеет возможность записать его средствами языка. Именно неоднозначности языка позволяют конструктору не задумываться о существовании различий в природе размеров; они лишают документацию качества *полноты*, провоцируют “неметрологичные конструкции” и арбитражные ситуации, навязывают контролёру и метрологу несвойственную их профессии компетенцию. Это поле деятельности метролога порождено искусственно (“исторически сложилось”) и не вписывается в идеальную схему производственных отношений.

проводя различий между самими размерами, тем не менее проводит их на уровне отклонений формы и расположения. И если последние нормируются, то это также может служить подсказкой для правильного выбора расчётной функции. Так, если для расстояния между плоскостями P_2 и P_1 помимо значений L_{min}^{max} задан дополнительно допуск δL параллельности P_1 относительно базы P_2 , это явно указывает как на функцию $D(P_2, P_1)$, так и на порядок её аргументов. Нормирование торцового биения указывает на функцию $Q(P_1, P_2, \vec{A})$. (Отклонение, соответствующее функции-размеру S в теории взаимозаменяемости не определяется^[7].) Подобным же образом указание позиционного допуска для центра отверстия ⊕ подсказывает, что под соответствующими размерами подразумеваются координаты; допуск радиального биения снимает неоднозначность радиуса^[8].

На наш взгляд, ГОСТ 24642–81, определяющий отклонения формы и расположения поверхностей, представляет собой *вторую часть* некоего документа, *первая часть* которого — такая же полная классификация размеров и имеющая такой же статус — отсутствует.

Учебные пособия по черчению настойчиво напоминают: простановке размера должен предшествовать выбор базы размера. Гораздо эффективнее этих напоминаний было бы введение различий в самом способе изображения *размеров-форм* — в виде \longleftrightarrow , и *размеров-расположений* — в виде $\blacktriangleright\rightarrow$ с признаком базы размера. Устранить ряд неоднозначностей могло бы приписывание значков отклонений к самим размерам подобно тому, как знак \oslash предваряет диаметр.

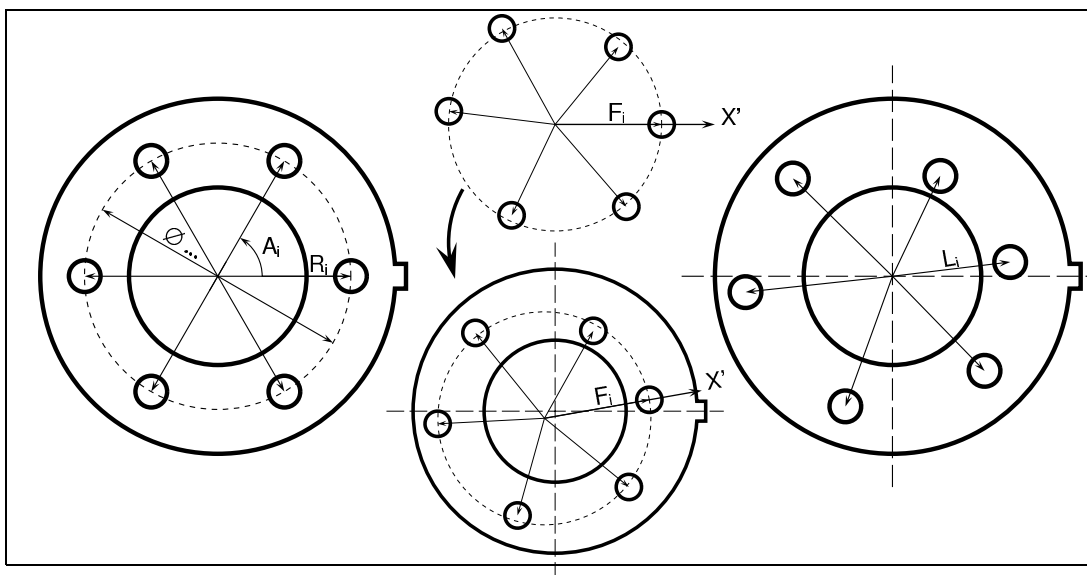


Рис. 9.

Исследуем, наконец, деталь на рис. 9 и вопрос о контроле расположения шести отверстий относительно основного профиля, определяющего СКД тем или иным способом (на рисунке не уточняется). Объединение серии отверстий в окружность центров *позволяет* (или *требует?*) рассматривать их как единый объект (вверху на рисунке), имеющий свою собственную систему координат; измеренные значения

каждой из величин F_i неинтересны: из F_{max} и F_{min} формируется значение диаметра фиктивной окружности. Углы между центрами отверстий, будучи, с одной стороны, параметрами расположения, с точки зрения единого объекта являются его внутренними параметрами формы (наряду с диаметрами самих отверстий). Допустимое расположение объекта относительно основного профиля естественно описать через положение его собственной оси — луча X' .

Такая интерпретация — пример структурного мышления; конструктор обычно применяет его, когда описывает сборку. Но оно редко наблюдается при описании булевских операций построения модели твердого тела (компьютерной или бумажной) в рамках одной детали. Близкое по сути понятие *блока* в САПР связано скорее с *оптимизацией черчения*, нежели с *логикой конструирования*.

Другая трактовка — определение полярных радиусов L_i и углов исходя из начала координат (рис. 9, справа) — также допустима. В этом случае 6 отверстий следует рассматривать как 6 однотипно описанных независимых объектов.

Тот или иной способ измерений метролог выберет после анализа ответной детали или способа сборки. Использование знака диаметра вряд ли можно рассматривать как четкое указание на первую схему. Однако смешение двух толкований — определения диаметра по первой схеме и углов по второй — представляется алогичным и неверным хотя бы потому, что восстановление геометрии реальной детали по таким данным — весьма непростая задача.

Позволим себе в связи с этим примером весьма сильное заявление: язык описания **конструкций** должен предоставить возможность ясного выражения **структуры** объекта и *навязать структурное мышление развивающимся системам автоматизированного проектирования*; последние пока являются скорее инструментом чертёжника, нежели конструктора^[9].

Заметим, что, исправляя ошибки всех упомянутых типов, давая ту или иную трактовку размеров, эксперт-метролог выступает всего лишь как *более грамотный конструктор*; этот аспект его деятельности не содержит ничего сугубо “метрологического”. Именно в качестве *метролога* он выступит, например, при разработке стратегии измерения детали как в экономическом, так и в алгоритмическом смысле. Так, для получения характеристик, адекватных предложенному им же координатному способу описания калибра, потребуется, несмотря на кажущуюся простоту задачи, далеко не простая измерительная схема^[10].

Реализация конструкторского замысла основана на тех же свойствах поверхностей, которые используются при математическом анализе измеримости. В силу этого результаты такого анализа эквивалентны проверке функциональности.

Эту мысль теория взаимозаменяемости не доносит до практиков. У В.А. Чудова она лишь проскальзывает: “*Издавна существовавшая практика оценки конструкции с точки зрения последующего контроля начала формализоваться с ...*”. То есть исследование измеримости, метрологичности есть методика оценки качества конструкции, её просто *логичности*. Забвение и игнорирование этого положения в

литературе, образовании и, как следствие, в практике конструирования и производства мы и называем “метрологическим подходом”. Именно в нём нам видится причина живучести и непобедимости “метрологических ошибок”, именно он преобладает в традиционной практике. Проиллюстрируем его несколькими примерами.

- Введение в конструкторский язык понятий “общая ось”, “общая плоскость симметрии” нередко обосновывается тем, что эти элементы представляют собой надёжную базу для измерения отклонений расположения. Но при этом не упоминается функциональная роль общей оси (плоскости): обычно она состоит в фиксации определённого направления в пространстве. Достаточно очевидно, насколько лучше справляются с этой ролью два разнесённых паза или цилиндра, нежели каждый из них в отдельности. Без такой функциональной необходимости не появится и “метрологическая” нужда в такого рода элементах.
- Апелляция к неизмеримости конструкции даёт её автору право заявить: “Деталь делалась не для того, чтобы её измеряли. Лишь бы летало (пахало и т. д.). Возьмите более точные приборы.” Не так важно, прав ли он, заблуждается ли, занимается ли демагогией. Важно, что повод для этого ему даёт “метрологический” подход, скрывающий суть проблемы. Если же спорную ситуацию рассматривать с позиций (не)детерминированности геометрии, то не возникает и речи об объекте изготовления и тем более измерения.
- Стандартная рекомендация из учебника по машиностроительному черчению: базой для назначения размера служит *наиболее точно обрабатываемая поверхность*. Но для чего она так обрабатывается? Чтобы служить базой для назначения размера? Или чтобы обеспечить функционирование?
- На вопрос, применить ли в чертеже отклонение от круглости^[11] или отклонение от цилиндричности, часто отвечают: смотря как оно будет измеряться. Если в одном сечении — круглость, если в нескольких — цилиндричность. *Но не может стратегия будущих измерений определять запись конструкции!*
- Прочитаем ещё раз В.А. Чудова: “*Конструирование нельзя считать законченным, пока нет полной ясности относительно принципиальной возможности измерения всех размеров детали с допустимой погрешностью измерения.*” Казалось бы, естественное требование. Более того, исполненное большими белыми буквами на красном кумаче, оно должно висеть на стене каждого КБ. Но это естественно лишь в рамках традиционной практики. Аналогичный призыв в редакции журнала звучал бы так: “*Написание статьи нельзя считать законченным, пока в тексте не проставлены знаки препинания...*” Абсурд ситуации проистекает отнюдь не от надуманности аналогии. Просто учебники по грамматике конструирования опускают целый круг проблем, оставляя их изложение редким пособиям по метрологической экспертизе. Переводов же с языка метрологичности на язык функциональности практически нет.

Аналогия между конструированием, программированием и разного рода писательством глубока, интересна и поучительна.

- * Во всех случаях речь идёт о проектировании и воплощении некоего замысла средствами некоего языка; присутствуют понятия стиля изложения, структуры (композиции) “изделия” — чертежа, программы, статьи, повести.
- ** Редактор издательства нивникая в суть статьи исправил бы ашипки в этой фразе. Геометр (не лучшая замена для слова “метролог”, всё более здесь неуместного), не зная назначения изделия, сочтёт недопустимым чертежи на рис. 4 без подлежащего-базы и на рис. 2 с несогласованными допусками. Транслятор выполнит подобную функцию и для бухгалтерской, и для шахматной программ, не проверяя, ходит ли конь буквой Г и не упадёт ли он за пределы доски. Во всех случаях “обобщенный редактор” исправит только ошибки, связанные с невнимательностью или неграмотностью “обобщенного автора”^[12].
- *** Для проверки воплощения замысла потребуется другой персонаж — эксперт или рецензент. Дублирование деятельности автора-конструктора здесь оправдано, но поручается оно не контролёру, как того требовал *Н.*, а человеку той же компетенции и близкой квалификации.

В традиционной производственной практике его упорно называют “метрологом”, хотя заодно возлагают на него функции, ничего общего с метрологией не имеющие. Так, пример *метрологической* экспертизы чертежа в книге [3] содержит упреки типа “... указана марка стали 40Х, которая не применяется в сварных конструкциях”, “... отсутствует канавка для выхода шлифовального круга” (стр.117). Речь, конечно, идёт о чем-то вроде *комплексной* экспертизы. Наука, столь скрупулёзно ратующая за точность терминов, допускает здесь далеко не безобидную терминологическую путаницу.

Рассматривая идеальную и традиционную схемы, следует упомянуть и о третьем варианте, пример которого даёт метрологическая практика родного предприятия. Таковая почти отсутствует. В роли метрологов выступают администраторы, конструкторы, технологи, программисты. Метрология эта получается весьма ограниченной: такого понятия, как, например, погрешности косвенных измерений, в ней нет. Решения проблем чаще направлены на исправление, нежели предупреждение ошибок. Для контролёров конструкторский чертёж незыблем; вопрос “*ну как же это измерить?*” никогда не решается в плане “*так чертить нельзя!*”.

Ситуацию, как и на некоторых других предприятиях, частично спасает ряд факторов. Современные станки “интересуются” только номинальным профилем, и многие ошибки до них “не доходят”. Деталь может получиться хорошей, правда, узнать об этом, измеряя заданные конструктором параметры, очень трудно. Хотя местный архаичный диалект языка описания конструкций не развивается, но зато он всем понятен. Геометрическое мышление успешно (без иронии) заменяется технологическим и функциональным; все, включая контролёра, знают, как собирается и работает изделие. В какой мере такая схема деятельности повлияла на развитие основных экспериментальных и производственных программ ИФВЭ — сказать трудно^[13]. Ясно лишь, что ни росту квалификации участников производства, ни эффективной автоматизации она не способствовала. Впоследствии на пути начав-

шихся положительных сдвигов в этой области встали новые факторы — отсутствие финансирования, сокращение программ, отток специалистов.

Резюмируем сказанное наброском идеальной схемы взаимоотношений конструктора и метролога. Она получается очень простой⁶: конструктору — конструкторово, метрологу — метрологово. Базис схемы составляют понятие конструкторского замысла, роль и статус языка описания конструкций. Требование технологичности (в том числе контролепригодности) вторично по отношению к требованию реализации замысла и не должно его искажать; возникающие проблемы могут быть разрешены, например, в отдельной документации. Серьёзное противоречие будет снято не редакцией замысла, а созданием новой технологии.

Понятие метрологичности не может присутствовать в идеальной схеме в виде оправдания конструкторских ошибок. Вряд ли приемлем термин “метрологическая экспертиза” в его традиционном наполнении. Сфера деятельности “чистого” метролога при этом остается весьма обширной. Стратегию итогового контроля определяет именно изложение конструкторского замысла. Особенности промежуточного контроля на конкретном этапе изготовления вытекают из технологических документов. Дальнейшая детализация схемы заслуживает того, чтобы быть первой главой свода знаний, называемого технологией машиностроения.

Реальная практика, несомненно, потребует отклонений от идеальной схемы. Чаще всего они будут носить “бытовой” характер — проблемы квалификации, отсутствия техники, адекватной решаемой задаче и пр. (см. эпиграф). Однако трудно смириться с наличием принципиального препятствия — неоднозначности языка описания конструкций.

Его совершенствование не обязательно предполагает новые стандарты. Но и мысль об их изменении не так уж и страшна. Оставим без обсуждения возмущение конструктора, которому навязывают “думание” о базах, о природе радиусов и ширин, о том, о чём он никогда не думал и думать не хочет. Нам ближе другая позиция: “... язык записи системы и конструкции обязательно должен быть однозначным” и “... задача обеспечения записи конструкции постоянно требует новых решений в быстроизменяющемся мире” [7]. Современный язык, несомненно, в высокой степени совершенен. Приближение его по строгости к языкам программирования было бы оправдано уже тем, что компьютеризация стала составной частью самой технологии машиностроения.

* * *

Автор признателен В.А. Чудову (ин-т Машиноведения РАН), давшему невольный толчок к этим исследованиям и одобрительный отзыв об их итоге, М.А.Палею (ВНИИ измерения) за консультации в этой непростой области. Благодарность многим коллегам, прочитавшим и обсудившим статью, автор вынужден сопроводить извинениями: некоторые пожелания, ввиду их противоречивости, учесть не удалось.

Автору приятно поблагодарить контролёров ГТК ОЭП и мастера Е.И. Гудкову за многолетнее терпеливое сотрудничество.

⁶ “Господь Бог сделал всё нужное простым, а всё сложное — ненужным.” (Григорий Сковорода)

¹ Задача, которую решает язык описания конструкций, требует от него полноты и непротиворечивости — качеств, присущих всем формальным языкам. *Лексика* языка (набор примитивов) и его *синтаксис* (допустимые комбинации лексем) в основном сформулированы в Правилах выполнения чертежей. *Семантика* языка, т. е. его смысловое наполнение, — в ГОСТах группы “Основные нормы взаимозаменяемости” (ГОСТ 24642–81 “Допуски формы и расположения поверхностей. Термины и определения”, ГОСТ 21495–76 “Базирование и базы в машиностроении”, ГОСТ 25069–81 “Неуказанные допуски формы и расположения поверхностей”). Основное его отличие от других формальных языков состоит в том, что примитивы языка чертежа *не являются алфавитно-цифровыми*. Это обстоятельство не позволяет использовать для анализа языка чертежей методы математической лингвистики.

² Формулировка соответствующего алгоритма дана в ГОСТ 24642–81 в пояснениях к термину “Отклонение формы заданного профиля (поверхности)”: “В тех случаях, когда базы не заданы, расположение номинального профиля относительно реального определяется условием получения минимального отклонения формы профиля”. Однако эта формулировка страдает неполнотой, не учитывая случая, когда базы заданы лишь частично (торцевая плоскость и посадочное отверстие кулачка) и не отмечая того, что это и *есть способ задания баз*.

Такой подход не дает возможности адекватно описать деталь, состоящую из функционально важного профиля (поверхности) и второстепенных элементов (ручек, ножек, дырочек): приходится придавать этим элементам необоснованно высокий статус баз, дабы использовать простые традиционные приёмы базирования с тремя линейными базовыми элементами. При использовании нелинейных элементов число баз может сократиться до 1–2: так, эллиптическое отверстие полностью определяет СКД на плоскости. Эта ситуация не предусмотрена в языке описания конструкций, не затрагивает её и ГОСТ 21495–76. Между тем современное технологическое оборудование, опережая стандарты, вынужденно решает эту задачу: процедуры “best-fit” в поисках отклонения формы профиля выполняют именно базирование по “сложной”, т. е. нелинейной поверхности.

³ Единომышленника автор нашел не в книге “Основы конструирования”, а в книге по САПР: “Нанесение размеров должно предоставлять свободу выбора способа производства и не должно быть ориентировано на конкретное технологическое оборудование или, вообще говоря, требовать специальной технологии производства.” [2]

⁴ Пример В.А. Чудова: “На детали типа диск (рис. 10) задан допуск 0,02 мм торцевого биения от оси отверстия. При длине 20 мм отверстия $\varnothing 25h7$ и диаметре торца $\varnothing 200$ мм получаем отношение базы к проверяемому параметру 1:10. При неоговоренном допуске формы отверстия возможны отклонения формы в пределах всего допуска размера — 0,021 мм. Такая неопределённость базы, увеличиваемая десятикратно за счет указанного отношения, чревата возникновением погрешности измерения, на порядок превышающей допуск, и, соответственно, в 35 раз превосходящей допустимую.”

⁵ Размер в рамке без допуска описывает некоторый вспомогательный графический элемент (ось, точку, дугу) в СКД, относительно которого задаются предельные положения реальных или фиктивных элементов. Эти вспомогательные элементы наследуют точность определения базовых элементов и обоснованы в той же мере,

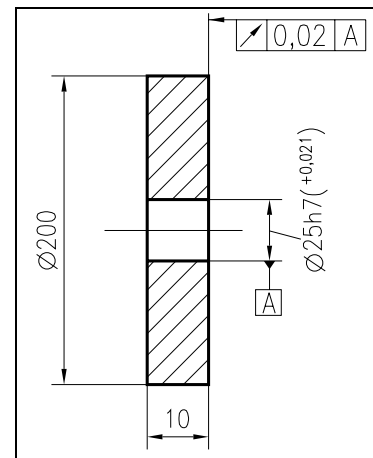


Рис. 10.

в какой обоснованы сами оси и начало координат СКД. Так, если мы вправе построить ось OY под углом $(90^\circ \pm 0^\circ)$ к оси OX , то мы вправе построить и ось под углом $\boxed{68^\circ 25'}$ (пунктир на рис. 5а) и расстоянием $L \pm l$ задать положение прямой. При контроле с помощью поворотного стола этот размер измеряется непосредственно, без вычислений. $\boxed{\text{Угол}}$ поворота “без допуска” имеет простую интерпретацию: измерительный прибор всегда точнее, чем контролируемый допуск; в данном случае он должен обеспечивать заведомо меньшую, чем допуск l , линейную погрешность при повороте. Ошибка в исполнении угла войдет как составляющая в измеренные значения L .

Неиспользование конструкторами в подобных случаях координатного способа нормирования отклонений связано скорее всего с тем, что:

- конструктору психологически трудно написать размеры типа $A=22^\circ 25'$ или $H=5,59_{мм}$ без указания допуска, зато он легко забыл бы о нормировании размера $H=0$, если бы прямые проходили через центр; так же легко и на вполне законных основаниях он обходится без углового допуска для прямого угла;
- в учебных пособиях такой способ нормирования демонстрируется только на примере сложных кривых, где он является единственно возможным;
- более простая модель имеет более громоздкую запись;
- такого рода отклонения традиционно считаются трудноизмеримыми, что далеко не всегда справедливо; просто методы их измерения менее известны.

$\boxed{6}$ Фиксация части параметров модели — стандартный приём построения многопараметрических моделей при недостатке информации, используемый в физике, криминалистике, во множестве других областей, занимающихся обработкой данных. Пример — решение знаменитого сыщика Ниро Вульфа из романа Рекса Стаута “Гамбит”. Сравним ситуации:

Отец мисс Блаунт посажен в тюрьму по обвинению в убийстве. Мотивы, улики — всё налицо и говорит не в его пользу. Но дочь не верит результатам следствия: её отец просто не мог этого совершить.

Она обращается к частному детективу.

Ниро Вульф поначалу не представляет, как взяться за дело. Он не участвовал в раннем этапе следствия, а то малое количество информации, которое есть в его распоряжении, допускает множество различных версий.

Детектив решает исходить из *невиновности* Блаунта. Тем самым отбрасывается большая часть возможных версий убийства; остальные он в состоянии переварить и исследовать.

— Я согласен, — произнес он. — Размышлять о его вине или невиновности — тщетно. Либо мы начинаем действовать, исходя из предположения, что он невиновен, либо отказываемся от дела. Ты готов вернуть деньги?

— Нет. Мы обнадёжили её.

Фрезеровщик Пичугин лишен премии за брак. Сам компьютер по координатам точек дуги выдал дикое значение радиуса. Но он не верит результатам контроля: заготовка была проверена, станок тщательно настроен.

Он обращается к частному метрологу.

Метролог поначалу не представляет, как взяться за дело. Он не проверял заготовку, а с малой дугой, которая теперь в его распоряжении, хорошо совмещается множество разных калибров.

Метролог решает исходить из “невиновности” окружности. Он берёт (или имитирует на ЭВМ) *единственный* калибр $\boxed{\text{номинального}}$ радиуса и использует его центр как базу для дальнейшего следствия.

$\boxed{7}$..., но это, скорее, недосмотр теории. Среди элементов, из которых конструктор “набирает” чертёж, после прямой и окружности на третьем месте по частоте использования стоит *пара параллельных прямых* — “полоса”; в геометрии она рассматривается как единая кривая, состоящая из двух ветвей. Разумеется, не каждая пара прямых подлежит такой трактовке: это относится лишь к функционально симметричным парам типа паза (шпоночного, например) и ответного выступа.

Аналогия между окружностью и “полосой” очень глубока и является следствием общей математической природы этих кривых. Обе они являются (дважды) вырожденными линиями второго порядка, имеют постоянную кривизну, один параметр формы (диаметр D — ширина W), к обоим применимы понятия вал–отверстие. Положение реальных поверхностей “полосы” задаётся относительно порождаемой ими оси симметрии подобно тому, как положение дуги окружности задаётся относительно её центра. Принцип Тейлора и определения заменяющих поверхностей для “полосы” можно списывать с аналогичных формулировок для окружности. Похожи даже канонические уравнения этих кривых:

$$x^2+y^2-\frac{D^2}{4}=0 \quad \text{и} \quad x^2-\frac{W^2}{4}=0 \quad .$$

Единство двух ветвей в составе “полосы” проявляется и в том, что обычно конструктора не интересуют отклонения формы каждой из сторон паза: для обеспечения посадки важны максимальное и минимальное значения ширины. Теория взаимозаменяемости, проигнорировав понятие пары прямых (плоскостей) как фундаментального геометрического объекта, вынуждена для описания этой ситуации привлечь сложное понятие *зависимого допуска*: отклонение справа можно компенсировать отклонением слева. Другой способ описания отклонений формы паза — через параллельность каждой из сторон оси симметрии паза —

не универсален, ибо не покрывает возможных искажений: непараллельность сторон паза аналогична конусообразности цилиндра, т. е. *частному* виду отклонения формы;

громоздок, ибо может потребовать ещё и нормирования формы (прямолинейности) сторон для исключения, например, “бочкообразности” паза;

электричен, ибо для описания, по сути, формы привлекаются отклонения расположения.

Отчасти понятие полосы принято в конструировании, что отражается в нормировании положения паза через положение его оси симметрии. Однако если быть последовательным до конца, для описания формы паза следовало бы ввести ряд значений {ширина – допуск ширины – допуск “полосатости”}, аналогичный ряду {диаметр – допуск диаметра – допуск круглости}. Введенная в основном тексте величина S и даёт ширину и “отклонение формы полосы”.

8 Ограничение радиального биения наружного вала относительно посадочного отверстия есть, по сути, описание вырожденного кулачка с простейшим “законом движения толкателя” — *покоем*. Решением соответствующих уравнений является в этом случае и простейшая кривая $R(\varphi)=const$, не требующая, в отличие от кулачка на рис. 1, табличного описания профиля. Размер R , базой которого является центр отверстия, и именно в *радиальном выражении*, наиболее точно соответствует конструкторскому замыслу; именно так он и измеряется, и действует; величина $R_{max}-R_{min}$ есть величина радиального биения (частный случай отклонения формы заданного профиля). Более общепринятое диаметрально выраженное биение есть искусственное удвоение этой величины, от чего она иногда теряет наглядность.

Вряд ли конструктор будет использовать и знак радиуса (рис. 11) в таком описании: размер наружного вала он традиционно опишет диаметром. Это уступка изготовителю и якобы забота об измеримости: диаметр, мол, измеряется просто и непосредственно. Но если конструктора действительно интересуют биения, то это не забота, а сокрытие более сложного измерения отклонения от концентричности, необходимого наряду с измерением диаметра.

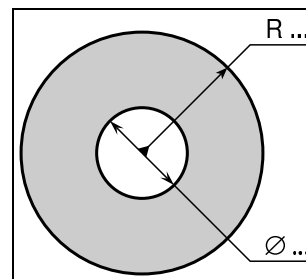


Рис. 11.

9 К такому же выводу приходит и Л.О. Балиев в рукописи “Перспективная САПР объектов машиностроения. Концепция” (baliev@mx.iher.su). В качестве средства построения перспективной САПР он видит формализацию конструкторского замысла в терминах производства (заготовка, деталь, станок, мощность производства, стоимость обработки и т. д.).

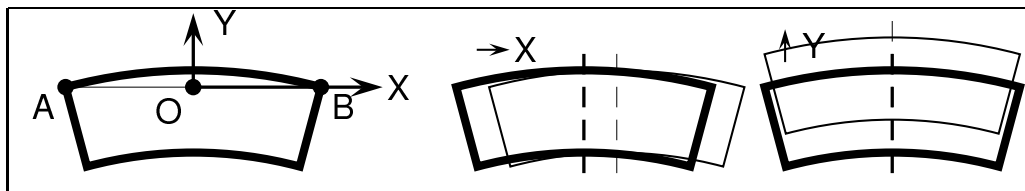


Рис. 12.

¹⁰ Задача состоит в том, чтобы наилучшим образом “притянуть” реальную дугу и две прямые к их номинальному положению. В чистом виде эту задачу решает алгоритм, предложенный в [5]. В данном случае её можно решить и более простыми средствами. Как бы ни “гуляли” удалённые точки (центр и вершина угла) вследствие незначительных отклонений формы и погрешностей измерений, положение точек пересечения прямых с дугой стабильно. Линия AB (рис. 12), соединяющая эти точки, и средняя точка O позволяют реализовать надёжное базирование обычными методами.

Но это не всё: показав лишь поперечное сечение детали, мы скрыли продольный размер (порядка большого радиуса) и молча свели задачу к плоской. Обеспечить вертикальную установку детали как физически, так и математически, непросто. На рис. 12 показано смещение верхнего торца относительно нижнего при небольшом наклоне. Ось цилиндра хорошо чувствует только наклон в сторону Y , но *практически не чувствует* наклона в X -направлении. “Практически не чувствует” означает, что на фоне небольших отклонений формы цилиндра наклон если и замечен, то определяется с большой погрешностью. Боковые стороны чувствуют только X - и практически не чувствуют Y -наклон. Их плоскость симметрии *совсем не детектирует* Y -наклон. Легко видеть, что новая ось, образованная проектированием оси цилиндра на плоскость симметрии, наследует от родителей *только* их достоинства — высокую чувствительность в обоих направлениях.

В роли конструкторской базы здесь фактически выступает составной профиль, образованный тремя поверхностями. Не имея возможности реализовать такой способ базирования, метролог подменяет конструкторскую базу некоей измерительной базой, представляющей собой, на первый взгляд, весьма странное, чисто геометрическое, построение. На второй взгляд, более внимательный, это практически эквивалентная замена сложного алгоритма более простым. Если у метролога нет такой возможности, он будет базироваться по торцевой плоскости, для чего потребует (от технолога, не от конструктора) значительно ужесточить допуск перпендикулярности торцов и оси цилиндрической заготовки.

¹¹ В отличие от большинства определений ГОСТ 24642–81, определение отклонения от круглости оставляет чувство неудовлетворенности. Оно оперирует с некоей абстракцией — плоской кривой, а значит, неявно подразумевает некую базу, задающую направление плоскости или серии параллельных плоскостей сечения. Просматривается несколько вариантов его трактовки.

1. Установочной базой СКД является плоскость; толщина конструкции, какой бы она ни была, игнорируется. Неперпендикулярность оси исследуемого цилиндра даёт вклад в отклонение от круглости вместе с отклонением формы; выделение каждой компоненты и затруднительно, и неинтересно; измерение *желательно* в нескольких сечениях. Хотя такое толкование и кажется наиболее естественным, ему соответствует другой термин (из группы суммарных отклонений формы и расположения).
2. Определение предназначено для нормирования формы поверхностей вращения и как бы упрощает, наряду с измерением локальных радиусов, сложную задачу измерения отклонения формы заданной поверхности, которое как раз и интересует конструктора. Сведение к более простой процедуре есть чисто метрологический приём. Искомая база — ось исследуемой поверхности. Но честное базирование как раз и предполагает предварительное проведение упомянутой сложной процедуры! Из этой ситуации есть простой выход: ось можно “выставить” приближенно; угловая погрешность направления оси $\delta\phi$ вызовет незначительную относительную погрешность в отклонении от круглости порядка $1 - \cos(\delta\phi) \sim (\delta\phi)^2$. Но если определение

полагается на этот факт, об этом следовало упомянуть хотя бы в разделе “Пояснения к терминам”.

3. Определение предназначено для нормирования формы *поверхностей вращения* и задает уже сточающий допуск по отношению к допуску формы заданной поверхности. А как сделать это для *произвольной поверхности*? Проблему базы эта трактовка также не снимает.

¹² Деятельность “эксперта-геометра” в части определения *ожидаемых измерительных погрешностей*, а по сути — *степени недетерминированности конструкции*, — не требует экспертиза и под силу формальному исполнителю типа программы-транслятора. Отсутствие ошибок, отнесённых нами к первому типу, может быть гарантировано самим процессом описания конструкции. Разумеется, это станет возможным при наличии адекватной компьютерной модели — не просто *модели твёрдого тела*, с помощью которой легко рассчитать, например, прочность, не *модели чертежа*, снабжённой размерными стрелками и надписями, а *модели конструкторского замысла*. Она появится как только позволит состояние языка.

¹³ Подобный вопрос, на который автор не смог полностью ответить, был задан ему на семинаре: “Так ли уж важна эта метрология? Турбины для двигателей самолётов всегда делали “на коленке” и измеряли лекалом”. Приведём ответ В.А. Чудова: “Так иногда делают и сейчас. Следствие — увеличение потребления топлива (до полутора раз) и, конечно, дополнительный процент аварийности.”

Список литературы

- [1] Чудов В.А., Цидулко Ф.В., Фредгейм Н.И. Размерный контроль в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982.
- [2] Райан Д. Инженерная графика в САПР. – М.: Мир, 1989.
- [3] Яковлев Ю.Н., Глушкова Н.Г. и др. Метрологическая экспертиза технической документации. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
- [4] Курносенко А.И. Об алгоритмах обработки результатов координатных измерений круглых профилей и сферических поверхностей. //Измерительная техника, 1992, N1.
- [5] Курносенко А.И., Михайлов О.И. Методика комплексного исследования отклонений формы и расположения элементов плоских контуров. //Измерительная техника, 1991, N2.
- [6] РД2 БВОО–9–90. Координатные измерения размерных и геометрических параметров. Основные положения. Терминология. – М., 1990.
- [7] Дитрих Я. Проектирование и конструирование: системный подход. – М.: Мир, 1981.

Рукопись поступила 29 мая 1996 г.