

1.6. БЕСЧЕРТЕЖНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Цель лекции: изучение бесчертежной технологии подготовки конструкторской документации.

Одной из важных современных тенденций автоматизированного проектирования изделий является переход на т.н. моделиориентированное проектирование (англ. MBD – Model Based Definition). В других терминах такой подход может именоваться «Информация об изделии на основе модели» или «Цифровое описание изделия». Основным смыслом подхода заключается в том, что вся необходимая для подготовки производства и непосредственно производства информация закладывается непосредственно в 3D-модель изделия.

Подход базируется на использовании видов модели, снабженных 3D аннотациями (PMI - Product & Manufacturing Information), ассоциативно связанными с геометрическими объектами этой модели. Это дает возможность сделать 3D-модель главным конструкторским документом и источником данных для изготовления и контроля изделия и позволяет отказаться от чертежа, как обязательного документа. Пример набора видов модели с расставленными PMI представлен на рис. 1.44.

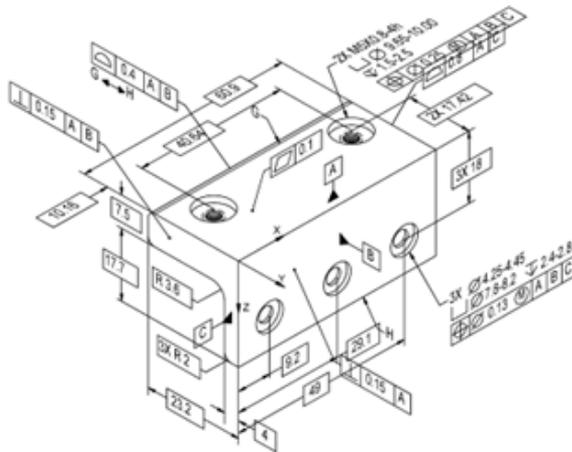


Рис. 1.44. Примеры набора видов 3D-модели детали с расставленными PMI

Ключевым моментом в MBD является то, что 3D-модель с PMI должна быть как читаемой человеком, так и машиночитаемой с полной автоматизированной прослеживаемостью по процессам.

В модель в виде 3D аннотаций можно заложить и затем считать при подготовке производства и контроля следующую информацию:

- размеры с допусками, отклонениями размеров;
 - посадки в сборке;
 - допуски формы и расположения;
 - базовые поверхности;
 - обозначения резьбовых отверстий и резьб;
 - обозначения шероховатостей поверхностей;
 - обозначения текстовые (таблицы, заметки, примечания);
 - обозначения неразъемных соединений (сварка, пайка, склеивание);
 - обозначение зон покрытий;
 - позиционные обозначения в сборке и пр.
- Также механизмы цифрового описания изделия позволяют выполнять различного рода анализы безошибочности проектирования:
- анализ размерных цепей;
 - анализ достаточности нанесения трехмерных аннотаций для полного описания изделия;
 - анализ геометрической целостности на соответствие критериям точности геометрии;
 - анализ технологичности изготовления по определенной технологии по специальным алгоритмам.

Условно можно выделить пять уровней развития процессов цифровизации проектирования и производства с последовательным повышением их эффективности (см. рис. 1.45).

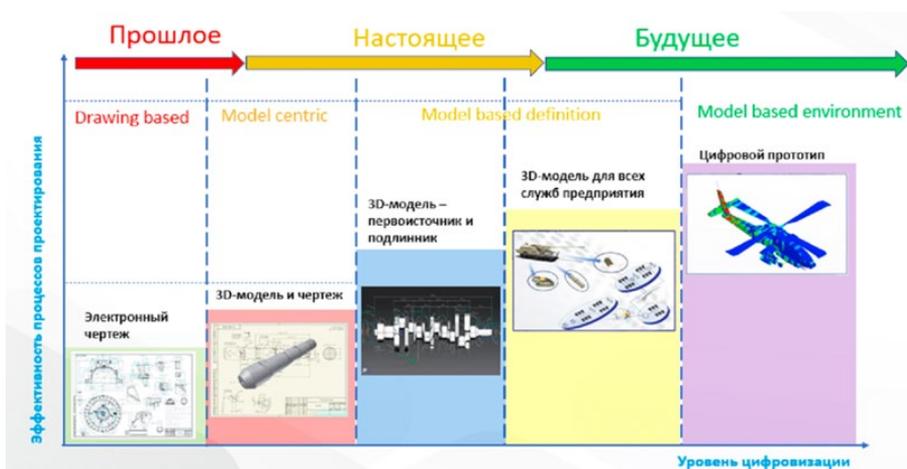


Рис. 1.45. Эффективность процессов проектирования в зависимости от уровней цифровизации

1. **Электронный чертеж (Drawing based)**. На этом этапе происходит замена инструмента проектирования – кульмана на компьютер, но носителем информации все равно является 2D-чертеж.
2. **Электронная модель и чертеж (Model centric)**. Конструктор создаёт электронную 3D-модель изделия, но все равно выпускает чертежи, как привычный узаконенный ЕСКД документ. Информация в технологические, производственные, плановые и другие подразделения передается в виде бумажных чертежей и ведомостей. Компьютерная модель остается нелегитимной, при этом достигается повышение производительности не более чем на 30%.
3. **Электронная модель с информацией для изготовления (Model based definition I)** – первоисточник (узаконенный носитель) конструкторской и технологической информации. Конструктор создаёт электронную модель изделия, нанося на нее также и информацию для подготовки производства и контроля в виде 3D аннотаций.
4. **Электронная модель и электронный состав (Model based definition II)** применяется уже не локально в подразделениях, а **распространяется на все службы предприятия**, включая склад, сбыт, закупки, комплектацию, сервис, маркетинг. Это существенно экономит время на повторный ввод данных и значительно сокращает число ошибок.
5. **Электронная модель – «цифровой двойник» (Model based environment)**. Если на предыдущих этапах компьютерная модель была только «геометрической», то на этом этапе она насыщается физическими свойствами, что позволяет создавать идентичный реальному изделию «цифровой двойник» в целях проведения виртуальных расчётов и испытаний, а также для моделирования процессов производства. Это кардинально другой, высокоэффективный уровень конструкторско-технологической подготовки производства, обеспечивающий существенное сокращение сроков выпуска изделий на рынок, повышение качества и снижение себестоимости, в особенности при выпуске технически сложной продукции.

Здесь важно отметить, что цифровое описание изделия (MBD) – не синоним бесчертежной технологии. MBD не запрещает использование 2D-чертежей, но даже если они используются, то являются вторичными. Главным конструкторско-технологическим документом является 3D-модель с аннотациями (PMI) и физическими характеристиками-атрибутами (рис. 1.46). При необходимости можно в любой момент выпускать чертежи, но с ограниченным периодом годности.

Системы поддержки жизненного цикла изделия (PLM) способны хранить такую документацию, отображать ее в реальном времени авторизованным пользователям, обрабатывать для получения различных отчетов, передавать по производственным процессам, то есть управлять всем массивом конструкторско-технологических данных.

3D аннотации далее могут использоваться в следующих процессах:

- наследование в технологические документы;
- автоматическое программирование станков с ЧПУ для ряда задач;
- автоматическое формирование контрольных характеристик для планов контроля качества;
- автоматическое программирование координатно-измерительных машин (КИМ).



Рис. 1.46. Условное изображение 3D-модели изделия с PMI и атрибутами

В настоящее время принят ряд отечественных стандартов, нацеленных на использование 3D-модели как законного и главного конструкторско-технологического документа. Среди таких стандартов можно выделить следующие:

- ГОСТ 2.051-2013 Электронные документы;
- ГОСТ 2.052-2021 Электронная модель изделия;
- ГОСТ 2.053-2013 Электронная структура изделия;
- ГОСТ 2.054-2013 Электронное описание изделия;
- ГОСТ 2.055-2013 Электронная спецификация;
- ГОСТ 2.056-2021 Электронная модель детали;
- ГОСТ 2.057-2019 Электронная модель сборочной единицы;
- ГОСТ 2.058-2016 Правила выполнения реквизитной части электронных конструкторских документов.

Краткое описание назначения данных стандартов приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Стандарты РФ в области подготовки бесчертежной КД

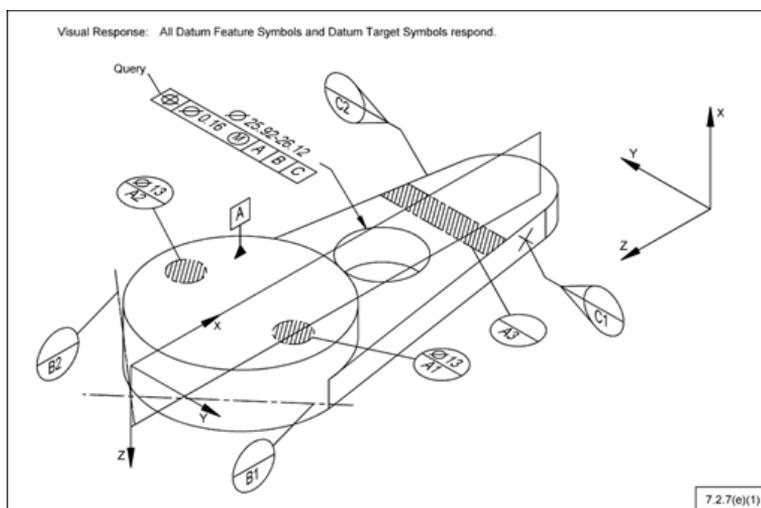
Наименование	Описание
ГОСТ 2.102-2013 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов	В этом стандарте вводятся понятия электронной модели детали, электронной модели сборочной единицы, электронной структуры изделия. Эти документы определяются как обязательные в комплекте основной конструкторской документации (далее КД) на стадии разработки рабочей конструкторской документации. Требования к данным документам предъявляются в ГОСТ 2.056-2014, ГОСТ 2.057-2014, ГОСТ 2.053-2013.
ГОСТ 2.051-2013 ЕСКД. Электронные документы.	Стандарт устанавливает общие требования к выполнению электронных конструкторских документов. Приводится описание, из каких частей должен состоять электронный документ, какие существуют виды электронных документов. Декларируется, что конструкторские документы в принципе можно разрабатывать, согласовывать, учитывать и хранить в электронном виде.
ГОСТ 2.052-2015 ЕСКД. Электронная модель изделия.	Стандарт устанавливает общие требования к выполнению электронных моделей изделия (деталей и сборочных единиц). Здесь определяются основные понятия и терминология компьютерного моделирования, виды электронных моделей изделия.
ГОСТ 2.053-2013 ЕСКД. Электронная структура изделия.	Стандарт устанавливает общие требования к электронной структуре изделия (ЭСИ). На основе ЭСИ формируются отчеты по изделию, которые традиционно в бумаге выполнялись в виде спецификаций и ведомостей.
ГОСТ 2.054-2013 ЕСКД. Электронное описание изделия.	Стандарт дает понятия об информационных технических системах (PLM, PDM и других), с помощью которых можно вести хранение, учет и описание электронной конструкторской документации.
ГОСТ 2.055-2014 ЕСКД. Электронная спецификация.	Стандарт определяет понятия электронной спецификации и сводных ведомостей, определяет параметры хранения содержательной части с использованием PDM-систем.
ГОСТ 2.056-2014 ЕСКД. Электронная модель детали.	Стандарт устанавливает некоторые требования к выполнению и оформлению моделей деталей и представлению их с помощью САД-систем, дополняя требования ГОСТ 2.052-2015.

Среди недостатков указанных стандартов можно отметить недостаточный объем примеров оформления электронных моделей изделий, снабженных 3D-

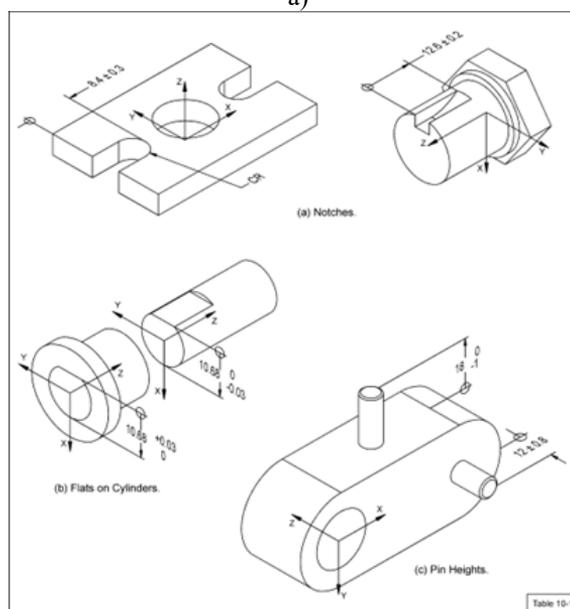
аннотациями (PMI). Примеры таких построений можно найти в ряде зарубежных стандартов, среди которых:

- ASME Y14.41 – 2019 Digital Product Definition Data Practices;
- ASME Y14.47 – 2019 Model Organization Practices;
- ASME Y14.5 – 2018 Dimensioning and Tolerancing.

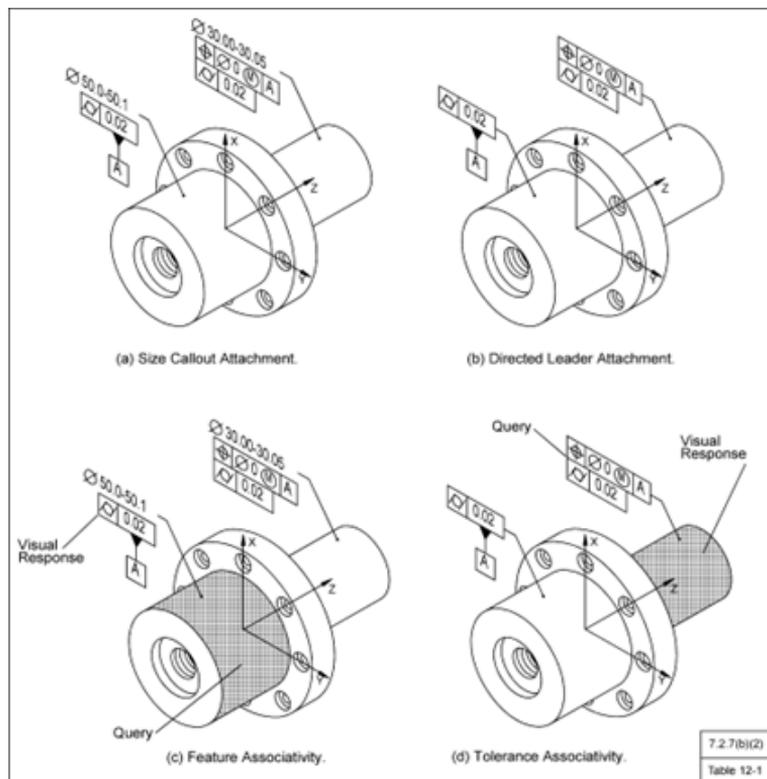
Несколько взятых из стандарта ASME Y14.41 примеров приведены на рис. 1.47.



a)



б)



в)

Рис. 1.47. Некоторые примеры оформления 3D-моделей деталей из стандарта ASME Y14.41: представление и размещение символов баз (а); размещение и присоединение размеров (б); задание геометрических допусков формы и расположения (в)

Отечественные компании, поставляющие и внедряющие программное обеспечение для проектирования и производства, ведут дополнительную работу над стандартизацией в области цифрового описания изделий, расширяя тем самым наполнение и возможности стандартов ЕСКД. В качестве примеров таких работ можно, в частности, выделить документы, разработанные ГК «PLM Урал» [30], [31].

Приведенные в этих и подобных документах практические рекомендации могут существенно облегчить конструктору работу по правильному оформлению цифровой модели изделия. Далее в этом разделе курса приведем наиболее важные из этих рекомендаций и требований. Так, например, существенное внимание следует уделять правильному расположению плоскости обозначений и указаний (ПОУ) (см. рис. 1.48).

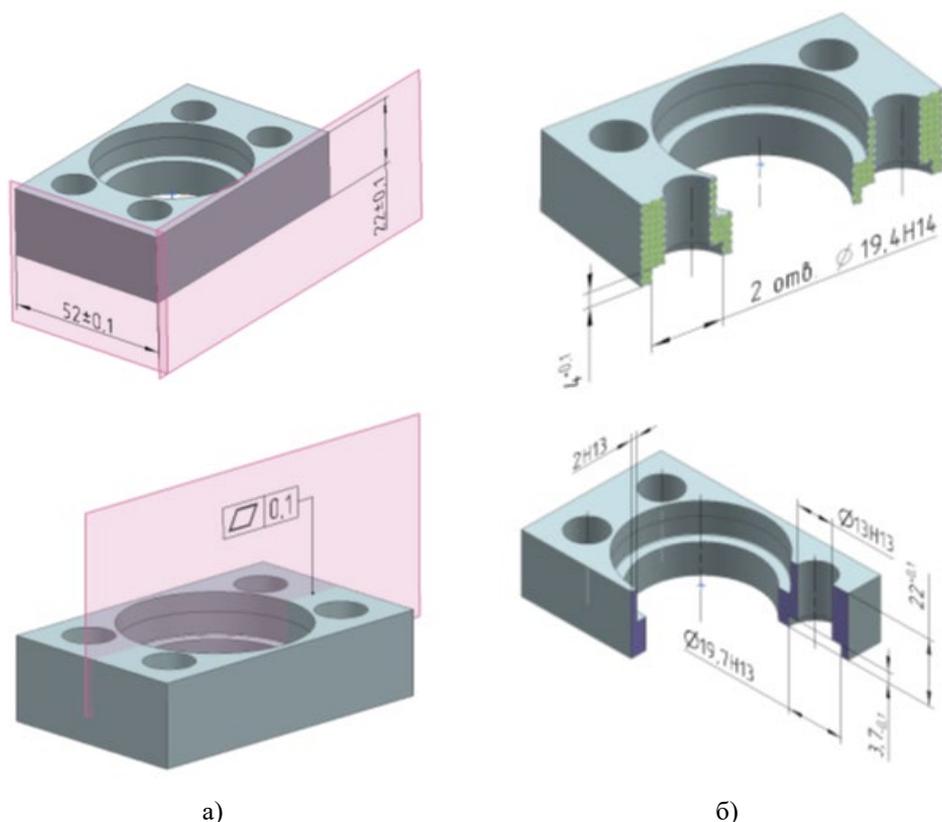


Рис. 1.48. Некоторые примеры расположения плоскости обозначений и указаний (ПОУ): ПОУ, совпадающая с гранью или перпендикулярная ей (а); ПОУ, образованная сечением детали одной или несколькими плоскостями (б)

Рассмотрим оформление электронной модели изделия (ЭМИ). ЭМИ состоит из геометрической 3D-модели изделия, произвольного необходимого количества атрибутов и технических требований к изготовлению и контролю в виде 3D аннотаций, нанесенных на модель в модельном пространстве (см. рис. 1.49).

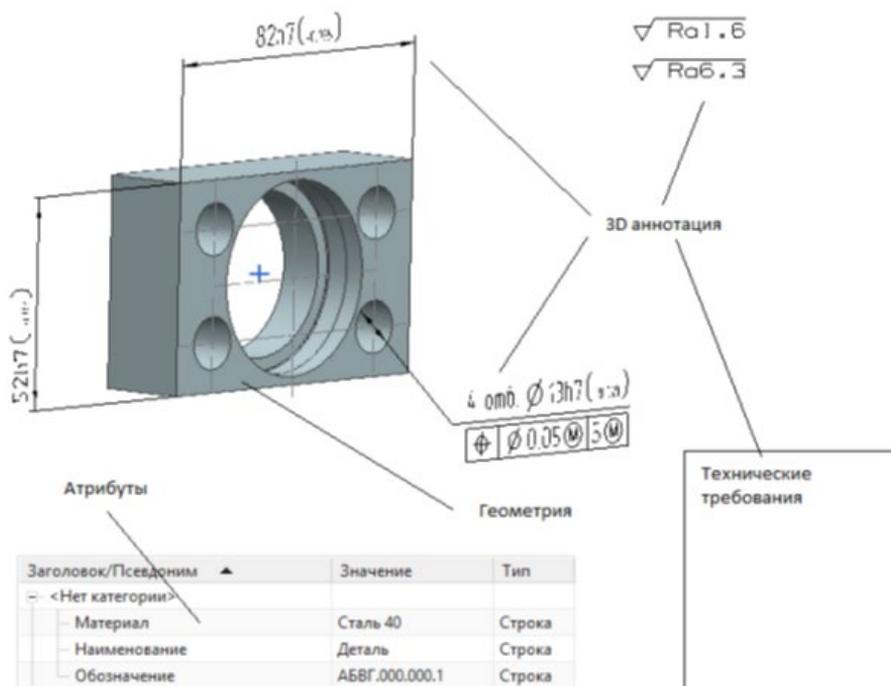


Рис. 1.49. Оформление ЭМИ

К ЭМИ как к электронному документу предъявляется ряд требований. Перечислим наиболее существенные из них:

- все номинальные значения размеров должны получаться из геометрической модели, то есть каждая точка геометрии ЭМИ должна быть измеряема в выбранной системе измерения;
- 3D аннотации, выполненные в модели, должны быть необходимыми и достаточными для указанной цели выпуска ЭМИ (например, изготовления изделия, контроля изготовления изделия);
- если в геометрии ЭМИ и 3D аннотациях, ассоциированных с моделью, не содержатся все необходимые данные, то это должно быть указано в технических требованиях (например: «Маркировать заводской номер с внутренней стороны корпуса по ТУ...»);
- в ЭМ допускается включать ссылки на стандарты и технические условия, если они полностью и однозначно определяют соответствующие требования. Допускается давать ссылки на технологические инструкции, когда требования, установленные этими инструкциями, являются единственными, гарантирующими требуемое качество изделия. Данные ссылки размещаются в технических требованиях;
- не допускается давать ссылки на нормативные документы, определяющие форму и размеры конструктивных элементов (отверстия, фаски,

канавки и т.п.), если в этих документах нет геометрического описания этих элементов. В этом случаи все данные для изготовления должны быть приведены в ЭМИ;

- допускается включать ссылки на документы другого вида в технические требования ЭМ при условии, что ссылочный документ выполнен в электронной форме. При передаче конструкторской документации другому предприятию эти документы должны быть включены в комплект КД на изделие. Комплектность КД определена в ГОСТ 2.102.

С точки зрения читаемости РМІ человеком к расположению 3D-аннотаций также предъявляется ряд требований. Наглядность должна обеспечиваться таким образом, чтобы при различной ориентации модели все РМІ сохраняли читаемость (см. рис. 1.50).

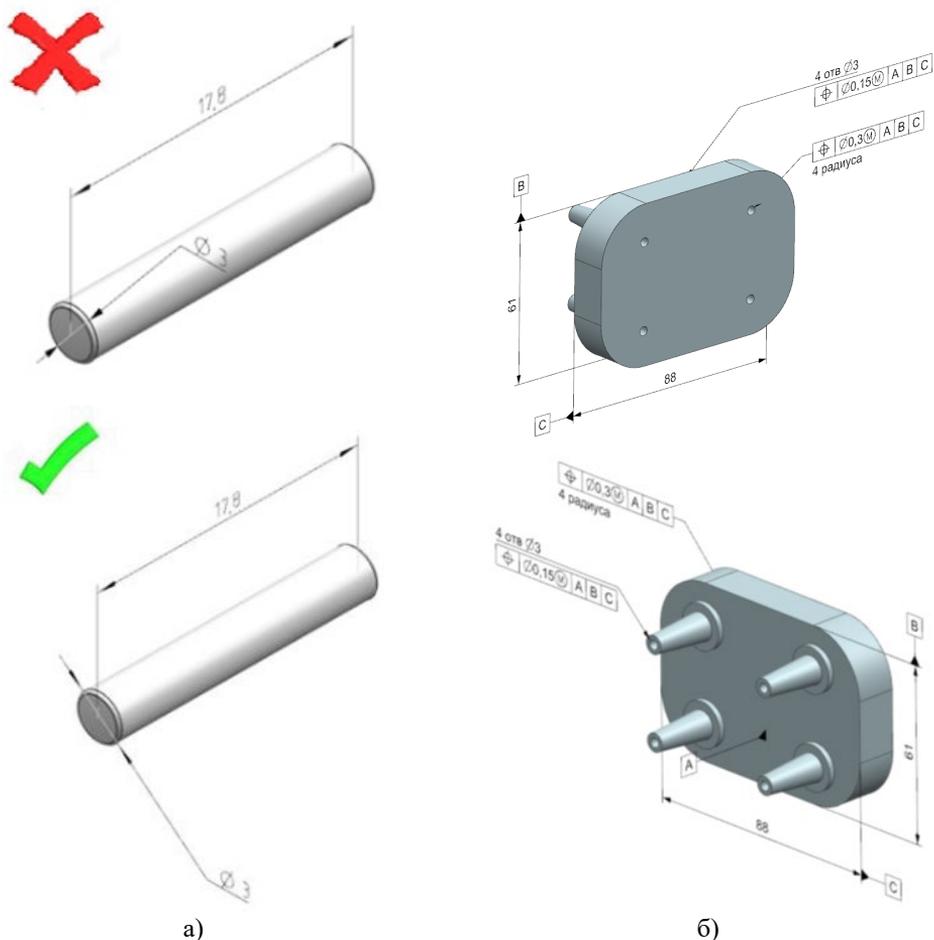


Рис. 1.50. Реализация некоторых требований к аннотированию ЭМИ с точки зрения читаемости и наглядности: наглядность расположения 3D аннотаций (а); читаемость 3D аннотаций при поворотах модели (б)

Электронная модель детали (ЭМД) на стадии рабочей конструкторской документации (РКД) должна содержать:

- технические требования к изготовлению и контролю;
- обозначения классов точности размеров и их отклонений, допусков размеров;
- обозначения шероховатостей поверхностей;
- обозначения допусков формы и расположения, и базовых поверхностей;
- обозначения стандартизованных элементов, при их наличии (подсечки, выштамповки);
- обозначение покрытий;
- обозначения резьб;
- указания зон термообработки и покрытий;
- указания о клеймении и маркировке;
- другие данные (при необходимости).

Основные требования к ЭМД:

- ЭМД следует выполнять в натуральную величину по номинальным (без допусков) размерам в масштабе 1:1;
- конечная форма ЭМД стадии РКД должна быть представлена одним твердым телом;
- моделирование технологических припусков в ЭМД не допускается;
- в процессе разработки, на ранних этапах проектирования, ЭМИ может содержать ассоциативные ссылки на пограничные (соседние) ЭМИ и размеры, определяющие их взаимное расположение («контекст»). При этом следует обеспечить, чтобы в разработанную ЭМД на этапе РКД изделия «контекста» не входили;
- ЭМД, геометрия которых зависит от базовой геометрии и окружающего контекста, необходимо выполнять в системе координат изделия;
- ЭМД, геометрия которых не зависит от базовой геометрии и окружающего контекста, могут выполняться в собственной (рабочей) системе координат;
- на стадии оформления РКД ЭМД должна содержать все конструктивные элементы, включая фаски, скругления и т. д. ЭМД на этой стадии должна быть аннотирована для целей изготовления;
- в ЭМД допускается выполнять упрощенное представление частей модели типа резьбовых отверстий, резьб, лент, пружин и др., используя частичное определение геометрии модели, атрибуты модели или их комбинацию;
- в ЭМД указываются все размеры с классом точности и размеры с допусками. Размеры, имеющие неуказанные предельные отклонения, определенные в технических требованиях, показывать не требуется;

Пример ЭМСЕ с проставленными позиционными обозначениями представлен на рис. 1.53.

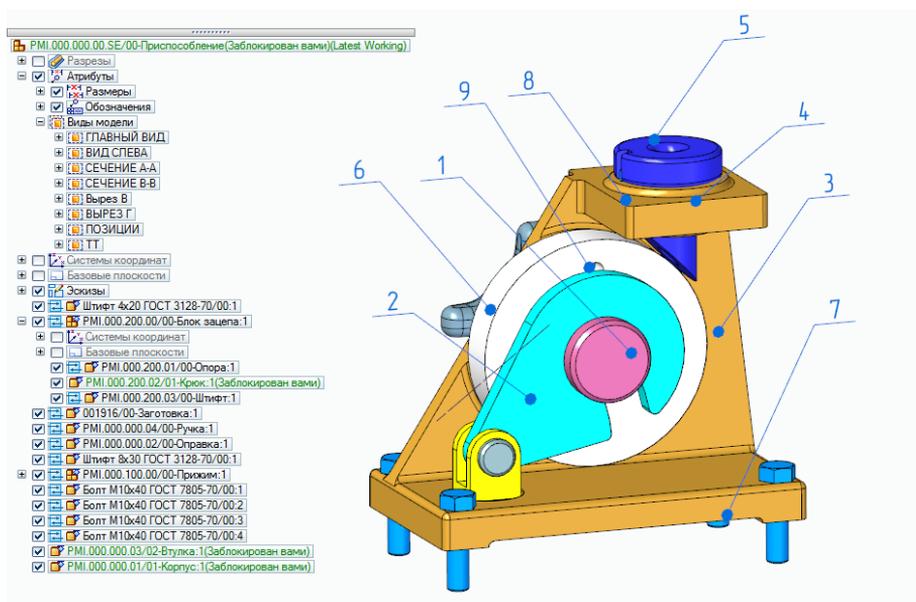


Рис. 1.53. Оформление позиционных обозначений ЭМСЕ

К ЭМСЕ предъявляются следующие основные требования:

- В ЭМСЕ должны быть заданы необходимые базы, оси, привязочные плоскости для позиционирования составных частей изделия (СЧ);
- без привязки к системе координат изделия с последующим позиционированием в ЭМСЕ допускается выполнять электронные модели покупных (в т. ч. стандартных) деталей (например, крепежных изделий) и деталей, выполняемых без привязки к расчетным (теоретическим) плоскостям и осям разрабатываемой сборочной единицы;
- добавление элементов обстановки в ЭМСЕ рекомендуется выполнять в виде ссылочных копий ЭМИ обстановки, либо в виде их части, создаваемой методом ассоциативного копирования геометрии;
- ЭМСЕ не должны содержать ГЭ, кроме объектов обстановки и ссылочной геометрии. Наличие собственных твердых тел основной геометрии в файле ЭМСЕ недопустимо;
- в ЭМСЕ компоненты должны быть зафиксированы или полностью сопряжены. Исключения составляют элементы механизмов, степень свободы которых определена конструкцией.
- после позиционирования всех ЭМД в модельном пространстве ЭМСЕ разработчик должен проверить пересечения СЧ ЭМСЕ;

- герметик, клей и наполнитель толщиной до 0,3 мм; смазка, лакокрасочные и другие покрытия толщиной до 0,1 мм в ЭМСЕ моделировать не следует. При этом позиционирование деталей, подбор длины крепежных изделий и т. д. выполняются с учетом величин зазоров между деталями и толщины слоя не моделируемого материала. В состав ЭСИ материал включается через PDM-систему;
- в случае, если материалы в ЭМСЕ принимают форму, влияющую на расположение и увязку деталей или их толщина более 0.1 мм для клея, смазки, лакокрасочных покрытий и более 0,3 мм для наполнителей, контровочной проволоки и т. п., то они должны представляться в виде ЭМ.

Требования к составу 3D-аннотаций ЭМСЕ:

- установочные и присоединительные размеры;
- габаритные размеры;
- обозначение размеров и классов точности, посадок, необходимых для сборки;
- размеры, достигаемые при регулировке, настройке, юстировке;
- размеры, необходимые для увязки проектируемой конструкции с конструкцией вышестоящих сборок, агрегатов и устанавливаемым оборудованием, если необходимо;
- информацию о выполняемых соединениях (в том числе неразъемных, например, сварные, паяные, клееные соединения);
- информацию о массо-инерционных и массо-центровочных характеристиках сборочной единицы;
- технические требования;
- позиционные обозначения СЧ ЭМСЕ;
- информацию о шероховатостях поверхностей, обрабатываемых при сборке;
- указание и обозначение зон обработки и покрытий;
- указание о клеймении и маркировке сборочной единицы.

В качестве формата данных, где используются 3D аннотации, активно используется 3D PDF. Подход с использованием цифрового описания модели в данном формате дополнительно позволяет:

- создавать, редактировать, хранить и использовать шаблоны публикации 3D PDF;
- передавать в 3D PDF PMI (ТУ) и виды 3D модели с PMI;
- создавать 3D PDF с машиночитаемыми PMI (ТУ) согласно протоколу STEP AP242;
- опционально сохранять дополнительные документы (требования, JT или STEP файлы);
- выпускать электронную КД согласно промышленным стандартам (MIL-STD-31000A, ASME 14.41, ГОСТ 2.05х).

Пример страницы документа в формате 3D PDF со структурой изделия, видами изделия с 3D аннотациями, а также техническими требованиями представлен на рис. 1.54.



Рис. 1.54. Аннотированная документация по изделию в формате 3D PDF

В дальнейшем в задачах технологической подготовки производства (ТПП) цифровое описание изделий можно применять следующим образом. Разработка технологии в электронном виде использует электронную модель технологической операции (ЭМТО) путём ассоциативного копирования геометрии и необходимых PMI с конструкторской модели. Нанесённые на конструкторскую модель или ЭМТО PMI можно использовать в тексте перехода. Если этот параметр в дальнейшем необходимо контролировать, то у него ставится соответствующий признак и под операцией создаётся контролируемый параметр в отдельном объекте, который в дальнейшем можно передавать в другие системы, например, управления качеством (QMS). В итоге формируется комплект технологической документации, созданный эскиз с электронной модели технологической операции попадает в карту эскизов, а контролируемые параметры – в операционную карту контроля.

После того, как подготовлена конструкторская документация и написан техпроцесс, задача инженера по качеству или, иногда, технолога – спланировать перечень значимых параметров, которые будут подвергаться контролю в процессе производства и после него (составить планы контроля для производства).

Эту работу может облегчить работа с 3D моделями, на которые нанесены PMI (3D-аннотации). Атрибуты 3D-аннотаций используются для формирова-

ния списка характеристик, который далее используется в инструкциях плана испытаний. Соответствующий графический эскиз может выводиться в карту контроля. Этот функционал расширяет подходы безбумажного проектирования на стадию производства.

Используя подсистемы управления качеством в составе систем поддержки жизненного цикла изделий, можно спланировать контроль на основе электронного состава изделия и технологии, а также данных 3D-модели. Используя ручной ввод или связку с автоматизированными средствами измерений, можно собрать данные, далее проанализировать неудовлетворительные параметры, определить причины и разработать мероприятия по их устранению, таким образом реализовав известный в области качества цикл PDCA («Plan-Do-Check-Act» — планирование-действие-проверка-корректировка). При этом все данные будут привязаны к параметрам, изначально взятым из 3D-модели.

Как показала практика, простое нанесение 3D аннотаций на модель вместо чертежа может, напротив, увеличивать трудоемкость подготовки производства.

Для получения эффекта от этой технологии надо оптимизировать объем и тип наносимой информации, а также обеспечить ее считывание машинными способами.

Отсюда и появились подходы, развивающие MBD до уровня MBE (см. рис. 1.55).

В качестве примера оценки трудоемкости можно привести исследование «THE ROI OF MBD», в рамках которого были оценены четыре варианта организации выпуска КД на предприятии.

ВЫПУСК ЧЕРТЕЖЕЙ С АННОТАЦИЯМИ – трудоемкость 8,8 часа (базовая оценка для сравнения с другими способами).

ПЕРЕХОД от модели К ЧЕРТЕЖУ С МИНИМАЛЬНЫМ ЧИСЛОМ АННОТАЦИЙ – трудоемкость 5,2 часа.

Недостаток: 2D-чертеж, экспортированный или сохраненный в нейтральном или другом формате, можно отредактировать без обновления 3D-модели. Такой подход приводит к различию в определениях 3D-модели и 2D-чертежа и дорогостоящим ошибкам в процессе производства. Переход выгоден только проектным отделам, поскольку сокращает время на создание инженерной документации, но для компании данный подход выгоды не приносит.

ВЫПУСК 3D-МОДЕЛЕЙ С АННОТАЦИЯМИ при сохранении подхода как к чертежу – трудоемкость 11,7 часа. Почему создание 3D-модели с аннотациями занимает больше времени по сравнению с созданием чертежа? Разработка определения изделия на основе модели является более сложным процессом (необходимо ориентировать размеры и допуски на представлениях плоскостей, сгруппировать их в наборы, которые можно скрыть). Недостаток – попытка снабдить модель аннотациями так же, как чертеж, что повторяет традиционный способ добавления размеров для точной передачи геометрической формы детали несмотря на то, что геометрия 3D-модели уже выполняет

эту функцию. В итоге, переход от чертежа с аннотациями к модели с аннотациями выгоден для компании, так как приводит к снижению проблем в производстве, но не для проектных отделов, которые затрачивают больше времени на создание такого вида документации.

ВЫПУСК 3D-МОДЕЛЕЙ С МИНИМУМОМ АННОТАЦИЙ – трудоемкость 6,7 часа. За счет чего получено снижение трудоемкости? Теоретически для детали, которая будет обрабатываться на станке с ЧПУ с использованием управляющих программ, автоматически сгенерированных в САМ-программе, аннотировать размеры не нужно. С другой стороны, в некоторых случаях размеры и примечания необходимы и должны быть добавлены в модель. Их тип и количество как раз и определяется технологиями, которые их используют в дальнейшем. Модель с сокращенным числом аннотаций выполняет все функции инженерной документации и требует меньше затрат.

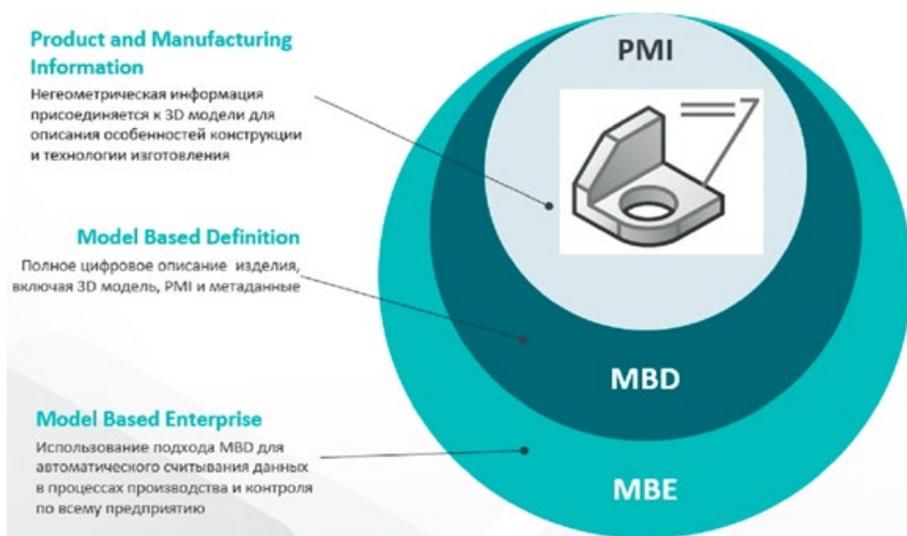


Рис. 1.55. Расширение концепции MBD на предприятие в целом

Тесты к лекции 6

1. PMI – это:

- а) цифровая модель изделия;
- б) 3D аннотации, размещаемые на видах модели и ассоциативно связанные с геометрическими объектами этой модели;
- в) конструкторский документ в электронном виде.

2. Запрещает ли MBD использование 2D-чертежей?

- а) не запрещает; если 2D-чертежи используются, то являются вторичными с ограниченным периодом годности;
- б) полностью запрещает;

в) 2D-чертеж является главным конструкторским документом наряду с 3D-моделью.

3. Что входит в перечень требований к составу 3D-аннотаций ЭМСЕ? (Выберите один или больше правильных ответов.)

а) обозначение размеров и классов точности, посадок, необходимых для сборки;

б) технические требования;

в) позиционные обозначения.

4. Возможно ли создавать 3D PDF документы с машиночитаемыми PMI?

а) нет;

б) да, в рамках протокола STEP AP242;

в) да, в рамках любых действующих протоколов STEP.

5. 3D-модель с PMI должна быть читаемой:

а) человеком;

б) машиночитаемой;

в) машиночитаемой с полной автоматизированной прослеживаемостью по процессам.