

УДК 621:658.512

Н.Н. ПОПОК, д-р техн. наук

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Республика Беларусь

Н.В. БЕЛЯКОВ, канд. техн. наук

Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь

Е.М. ТИХОН

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Республика Беларусь

ГЕНЕЗИС ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В работе показано, что в своем развитии теория базирования прошла четыре основных этапа. Особенность современного этапа заключается в том, что в эпоху Индустрии 4.0, характеризующуюся цифровой трансформацией бизнес-процессов, автоматизацией процессов проектирования и производства, развитием аддитивных технологий, теория базирования, изложенная 50 лет назад в ГОСТ 21495-77, часто не отвечает актуальным потребностям. Решение современных задач автоматизации процессов проектирования вызывает необходимость модернизации понятийного аппарата теории базирования, а на его основе алгоритмического сопровождения. Поэтому целью работы является совершенствование теории базирования и превращение ее в инструмент формализации процедур проектного базирования для обеспечения точности размеров и допусков расположения при аддитивном синтезе. Для достижения указанной цели была поставлена и решена задача уточнения и формулирования основных положений, терминов и определений теории базирования применительно к аддитивному производству.

Ключевые слова: базирование, теория базирования, качество, допуск расположения, размер, термины и определения, алгоритм, проектирование, автоматизация, машиностроение

Введение. Вопросы обеспечения качества машиностроительных изделий решаются на различных этапах их жизненного цикла. Особое значение имеют этапы проектирования конструкций изделий и технологий изготовления. Инженеру на этих этапах приходится решать задачи ориентации (базирования): деталей и сборочных единиц при конструировании изделия и разработке технологии его сборки; заготовки детали в рабочей зоне металлорежущего станка при проектировании технологии ее обработки; измерительного инструмента и детали или заготовки при назначении методов контроля; модели детали или заготовки в рабочей зоне 3D-принтера при подготовке процессов печати. При решении указанных задач определяются и обеспечиваются такие показатели качества, как точность линейных и угловых размеров, а также допуски расположения. Решать эти задачи призвана теория базирования.

В ходе становления технологии машиностроения теорией базирования занимались многие известные ученые. Анализ работ в различные хронологические периоды показывает, что в своем развитии теория базирования прошла четыре основных этапа.

На первом этапе (до 1930-х гг.) в опубликованных работах в контексте обобщения опыта резания металлов приводится описание изготовления деталей различных видов. При этом описываются и приводятся иллюстрации применяемых приспособлений для базирования заготовок на металлорежущих станках (И.А. Двигубский, И.А. Тиме, А.П. Гавриленко, Ф.У. Тейлор).

На втором этапе (до 1970-х годов) авторы предлагали различные понятия и определения базирования, по-разному классифицировали базы, приводили разнообразные определения установочных элементов, баз и базовых поверхностей. Выбор технологических баз для механической обработки некоторых типов деталей рекомендо-

валось осуществлять на основе рассуждений общего характера (А.П. Соколовский, А.И. Каширин, В.М. Кован, А.М. Каратыгин, М.О. Якобсон, А.В. Эттель, Д.П. Маслов, Б.Л. Беспалов).

Третий этап (после 1970-х гг.) характеризуется разработкой общих научных основ теории базирования. Выдающуюся роль здесь сыграл Б.С. Балакшин. Под его руководством в 1976 году был издан ГОСТ 21495-77 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения», в котором изложены и проиллюстрированы 24 общих понятия (базирование, база, проектная база, комплект баз, опорная точка, схема базирования, установка, закрепление и др.). В виде приложения приводятся основные положения теории базирования, суть которых заключается в необходимости наложения на твердое тело (изделие машиностроения на всех стадиях создания) шести геометрических или кинематических связей согласно теоретической механике для лишения его перемещений и поворотов вокруг осей. Также впервые приводится иерархическая классификация баз (по назначению, степеням свободы и характеру проявления). Ученники и последователи Б.С. Балакшина (Л.Н. Воробьев, А.М. Дальский, А.А. Гусев, Ю.М. Соломенцев, И.М. Колесов и др.) в своих исследованиях часто использовали и используют основные положения ГОСТ 21495-77.

Современное машиностроение развивается в эпоху четвертой индустриальной революции, характеризующейся цифровой трансформацией бизнес-процессов, формализацией, алгоритмизацией и автоматизацией процессов проектирования и производства изделий, кастомизацией продукции, гибкостью производства, развитием аддитивных технологий. Однако теория базирования, изложенная 50 лет назад в ГОСТ 21495-77, часто не отвечает актуальным потребностям сегодняшнего дня. Поэтому современный четвертый этап в развитии

теории базирования можно охарактеризовать тем, что на страницах ведущих научно-технических изданий машиностроительного профиля ведется полемика об основных положениях теории [1–10].

Так в работе [10] впервые высказывается идея о совершенствовании теории базирования с учетом аддитивных технологий. Предлагается делить базы на «материальные» и «нематериальные». Утверждается, что опорная точка должна по аналогии с механикой показывать лишение предмета одной степени, т. е. перемещения по одной координате. Приводятся новые обозначения опорной точки. Вводится понятие тройной опорной базы.

Однако в ранее опубликованных работах по теории базирования не приводятся какие-либо правила проектирования схем базирования и установки, ориентации заготовки, выдачи задания на проектирование приспособлений с целью обеспечения точности размеров и допусков расположения как для традиционного субтрактивного производства, так и для аддитивных технологий. Решение современных задач автоматизации процессов проектирования вызывает необходимость совершенствования понятийного аппарата теории базирования, а на его основе — алгоритмического сопровождения.

Поэтому *целью работы* является совершенствование теории базирования для превращения ее в инструмент формализации процедур проектного базирования для обеспечения точности размеров и допусков расположения при аддитивном синтезе.

Для достижения указанной цели была поставлена и решена задача уточнения и формулирования основных положений, терминов и определений теории базирования применительно к аддитивному производству.

Основная часть. Для исследования и решения поставленных в работе задач использовались методы теории базирования, теории автоматизации, системно-структурного анализа и моделирования. Проводился анализ литературных источников, электронных изданий, опыта использования теории базирования на предприятиях, а также анализ конструкторской и технологической документации в соответствующих бюро предприятий. Объект разработки — теория базирования в машиностроении.

Ранее в работе [11] авторами настоящей статьи предложено на самом высоком уровне классификации базирование (и базы) в машиностроении делить на реальное и проектное. Проектное базирование предшествует реальному и служит для построения моделей реальных процессов. В свою очередь, проектные базы предлагается делить на конструкторские (используются при проектировании моделей деталей и сборочных единиц) и технологические (используются для проектирования технологических процессов, а также станочных, сборочных, измерительных приспособлений). Базы на более низких уровнях классификации предложено делить по виду (ось и плоскость), характеру проявления (явная и скрытая), числу связей (установочная, направляющая, опорная и т. д.) и способу задания (размер и допуск расположения). Такой подход, в отличие от ранее используемых, систематизировал процессы базирования по времени, назначению и локализации, а также позволил предложить ряд формализованных проектных процедур для ориентации заготовок в традиционном субтрактивном производстве и разработать

систему автоматизированного проектирования универсально-сборных приспособлений.

На основе этого концептуального подхода и с учетом того, что проектное технологическое базирование при аддитивном синтезе используется для определения ориентации модели детали в рабочей зоне 3D-принтера, разработана система терминов и определений проектного базирования для аддитивного производства. Ниже приводятся некоторые основные элементы этой системы.

Геометрическая модель детали (исходной заготовки) (ГМД (ГМИЗ)) — модель, отражающая поверхности (в том числе плоскости, оси и точки симметрии) и их расположение с помощью размерных связей (линейных и угловых) и допусков расположения согласно чертежу (графов линейных размерных связей по трем осям и угловых расположений). Модель представляет собой абсолютно твердое тело, в котором все поверхности идеальны (не имеют погрешностей формы и микронеуровностей).

Базирование — ориентация рассматриваемого объекта (поверхности, совокупности поверхностей, ГМД, ГМИЗ) относительно системы координат.

База — поверхность или сочетание поверхностей, используемых для базирования.

Конструкторская база — поверхность (или сочетание поверхностей) на чертеже или ГМД (ГМИЗ), по отношению к которой (-ому) задается ориентация рассматриваемой поверхности (совокупности поверхностей) и определяющая компонент (компоненты) состава баз ориентации. Ориентация задается с помощью размерных связей (линейных и угловых) и допусков расположения.

Состав баз ориентации — совокупность поверхностей (в общем случае плоскостей и (или) осей) ГМД (ГМИЗ), по отношению к которой однозначно и корректно может быть задана ориентация рассматриваемой поверхности (совокупности поверхностей) и проведена система координат. Возможны четыре варианта составов [11].

Технологическое базирование — определение ориентации поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения относительно базовой (собственной) системы координат ГМД (ГМИЗ), построенной на поверхностях составов баз ориентации путем наложения на них шести геометрических связей. Цель технологического базирования — обеспечение, в том числе на стадии проектирования, требуемых показателей допусков расположения поверхностей.

Приоритетный допуск расположения — минимальный допуск расположения, определенный ранжированием численных значений допусков по поверхностям составов баз и их приведением к одной базовой длине.

Базовая система координат — система координат (как правило декартова), построенная на поверхностях ГМД (ГМИЗ) путем наложения на поверхности баз ориентации шести геометрических связей.

Технологическая база — поверхность (или сочетание поверхностей) ГМД (ГМИЗ) по отношению к которой (-ому) задается ориентация поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения, накладывающая на ГМД (ГМИЗ) определенные геометрические связи и идентифицирующая одну из плоскостей или (и) осей базовой (собственной) системы координат. Ориентация задается с помощью размерных связей и допусков расположения.

Геометрическая связь — связь, отражающая отсутствие неопределенности линейного (3 связи) и углового (3 связи) положения рассматриваемой поверхности (совокупности поверхностей) относительно осей базовой системы координат и определяющая положение точки сопряжения (соприкосновения) поверхностей ГМД (ГМИЗ) с базовой системой координат.

Точка сопряжения — условная точка, отражающая наличие геометрической связи, расположенная одновременно на поверхности ГМД (ГМИЗ) и плоскости базовой системы координат.

Направляющий вектор — единичный вектор с началом в точке сопряжения, перпендикулярный соответствующей плоскости базовой системы координат и имеющий одинаковое направление с осью базовой системы координат. Направляющий вектор определяет направление оси базовой системы координат. Поэтому формирование базовой системы координат осуществляется одновременно с заданием направляющих векторов.

Тройная однонаправленная база — база, накладываемая на ГМД (ГМИЗ) три связи (одну линейную и две угловые), условно представляющая собой три точки сопряжения, не лежащие на одной прямой, имеющие одинаковый курс направляющих векторов, и идентифицирующая плоскость в составе баз ориентации. Аналогично определяются понятия: двойная однонаправленная, одиночная, двойная разнонаправленная, четверная, тройная разнонаправленная база.

Комплект технологических баз — совокупность технологических баз, полностью идентифицирующих состав баз ориентации и накладываемых на ГМД (ГМИЗ) шесть геометрических связей относительно осей базовой системы координат. Технологические базы могут сочетаться между собой в комплект девятью различными способами [11].

Обозначение технологических баз — нанесение на ГМЗ (или ГМД (ГМИЗ)) условных значков, интерпретирующих точки сопряжения и направляющие векторы. При этом ГМЗ принимается прозрачной.

Схема базирования — графическое изображение ГМД (ГМИЗ), на которой: выделены поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения; проставлены размерные связи и допуски расположения; обозначены технологические базы; проведена базовая система координат.

Установка — взаимная ориентация поверхностей технологических баз ГМД (ГМИЗ) и установочных элементов (чаще всего стола) 3D-принтера в программе-слайсере, или базирование ГМД (ГМИЗ) относительно системы координат стола 3D-принтера.

Схема установки — графическое изображение ГМД (ГМИЗ), на которой: выделены поверхности (совокупности поверхностей) с приоритетным допуском расположения; проставлены размерные связи и допуски расположения; нанесены условные обозначения установочных элементов (по ГОСТ 3.1107-81). Схема установки — задание пользователю программы-слайсера для ориентации ГМД (ГМИЗ) в рабочей зоне 3D-принтера.

Сформулированные термины и определения теории базирования в аддитивном производстве позволили предложить следующий порядок формализованных процедур для построения моделей базирования детали в рабочей зоне 3D-принтера для обеспечения заданных чертежом допусков расположения и размеров: формиро-

вание геометрической модели детали (исходной заготовки); определение составов баз ориентации; идентификация состава баз ориентации; определение приоритета в обеспечении допуска расположения; синтез схемы базирования; определение компоновочно-кинематической схемы и задание системы координат 3D-принтера; определение достижимой геометрической точности 3D-принтера; ориентация системы координат ГМД (ГМИЗ) в системе координат 3D-принтера; формирование схемы установки и операционного эскиза [12–14].

Заключение. В результате исследований установлено, что на современном этапе развития технологии машиностроения теория базирования, изложенная пятьдесят лет назад в ГОСТ 21495-77, не дает подходов к решению актуальных задач автоматизации проектирования моделей установки заготовок на станках в традиционном субтрактивном производстве, а также задач ориентации моделей деталей и заготовок при проектировании процессов 3D-печати в аддитивном производстве. Решение задач автоматизации процессов проектирования диктует необходимость модернизации понятийного аппарата теории базирования, а на его основе — алгоритмическое сопровождение.

Для превращения теории базирования в инструмент автоматизации проектирования уточнены и сформулированы основные положения, термины и определения теории, а на их основе предложен алгоритм проектного базирования, позволяющий с помощью реализации формальных процедур прогнозировать и обеспечивать точность размеров и допусков расположения при аддитивном синтезе.

Результаты работы могут использоваться для модернизации ГОСТ 21495-77, а также в технологических бюро предприятий для проектирования процессов 3D-печати, в IT-компаниях для создания и совершенствования САПР, а также в учебном процессе для подготовки специалистов в области производства изделий на основе трехмерных технологий.

Список литературы

1. Байор, Б.Н. О развитии методологии базирования / Б.Н. Байор // СТИН. — 2000. — № 3. — С. 24–26.
2. Емельянов, В.Н. О разработке теоретических схем базирования / В.Н. Емельянов // СТИН. — М., 2002. — № 1. — С. 32–34.
3. Кольбынко, Е.Н. Системные знания теории базирования в машиностроении / Е.Н. Кольбынко, Н.Ю. Богданова // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 75–79.
4. Абрамов, Ф.Н. О разработке терминологии базирования в машиностроении / Ф.Н. Абрамов // Вестник машиностроения. — 2006. — № 2. — С. 67–72.
5. Сысоев, Ю.С. Предложение по совершенствованию ГОСТ 21495-76 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения» / Ю.С. Сысоев, С.А. Томилин // Вестник машиностроения. — 2008. — № 1. — С. 48–51.
6. Новоселов, Ю.А. Альтернативная концепция теории базирования в машиностроении / Ю.А. Новоселов // Вестник машиностроения. — 2009. — № 2. — С. 48–55.
7. Аникеева, Ю.А. Базирование заготовок в машиностроении / Ю.А. Аникеева, Б.М. Изнаиров // Вестник СГТУ. — 2013. — № 1(69). — С. 84–88.
8. Базров, Б.М. К вопросу развития теории базирования в машиностроении / Б.М. Базров // Научные технологии в машиностроении. — 2016. — № 11. — С. 20–25.
9. Базров, Б.М. Теория и практика базирования в машиностроении / Б.М. Базров // Вестник машиностроения. — 2017. — № 4. — С. 5–10.
10. Базров, Б.М. Совершенствование основ теории базирования с учетом развития традиционных и аддитивных техно-

- логий / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. — 2020. — Т. 64, № 5. — С. 617–623. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-617-623>.
11. Практическое приложение теории базирования для синтеза универсально-сборных приспособлений / Н.Н. Попок [и др.] // Вестник ПГУ. — 2020. — № 11, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — С. 11–21.
 12. Беляков, Н.В. Практическое приложение теории базирования для ориентации моделей деталей машин при их аддитивном синтезе на 3D-принтерах / Н.В. Беляков, Н.Н. Попок, Д.А. Яснев // Вестник ВГТУ. — 2022. — № 1(42). — С. 19–34.
 13. Попок, Н.Н. Система поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров / Н.Н. Попок, Н.В. Беляков, Д.А. Яснев // Вестник ПГУ. — 2022. — № 3, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — С. 9–20.
 14. Технологическое обеспечение допусков взаимного расположения поверхностей при печати деталей машин на 3D-принтерах / Н.Н. Попок [и др.] // Менеджмент качества производственных, социально-экономических и технических систем: развитие и совершенствование / под ред. А.С. Проскурина, А.З. Симкина, Т.П. Можяевой. — Брянск: БГТУ, 2022. — С. 80–87.

Popok N.N., Belyakov N.V., Tikhon E.M.

Genesis of the locating theory in mechanical engineering

The paper shows that the locating theory has passed four main stages in its development. The peculiarity of the modern stage is that in the era of Industry 4.0, characterized by the digital transformation of business processes, automation of design and production processes, the development of additive technologies, the locating theory outlined 50 years ago in GOST 21495-77 often does not meet current needs. The solution of modern problems of automation of design processes necessitates the modernization of the conceptual apparatus of the locating theory, and on its basis the algorithmic support. Therefore, the aim of the work is to improve the locating theory in order to turn it into a tool for formalizing design-based procedures to ensure the accuracy of dimensions and location tolerances in additive synthesis. To achieve this goal, the task of clarifying and formulating the main provisions, terms and definitions of the locating theory as applied to additive manufacturing was set and solved.

Поступила в редакцию 29.06.2023.