



Автоматизация получения параметров детали для задач конструкторско-технологической параметризации

А. В. Щёкин

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

schekin@inbox.ru

Введение. Автоматизация получения конструкторских параметров обрабатываемой детали является одним из этапов интеграции конструкторских систем автоматизированного проектирования с системами технологической подготовки производства. Целью данной работы является получение параметров детали, значения которых могут использоваться в составе информационных связей, реализуемых с применением технологической параметризации.

Материалы и методы. Работа является развитием концепции сквозной конструкторско-технологической параметризации применительно к автоматизированному программированию станков с числовым программным управлением. В основе теоретических исследований лежат формальная теория представления и обработки данных, теория множеств, теория иерархических многоуровневых систем. Программная реализация выполнена в среде Visual Studio C++ с использованием интерфейсов прикладного программирования КОМПАС-3D и геометрического ядра C3D.

Результаты исследования. Разработан способ получения исходных параметров обрабатываемой детали при передаче информации из конструкторских систем автоматизированного проектирования в системы технологической подготовки производства. Приведена логическая структура данных в реляционной форме, которая позволяет исключить избыточность и обеспечить непротиворечивость представления параметров детали с учетом приоритетов источников данных, связанных с конструкторской 3D-моделью. Способ программного реализован в составе коммерческой системы автоматизированного программирования станков с числовым программным управлением для платформы КОМПАС-3D. Исходные параметры (метаданные, свойства материала, параметры аннотаций, параметрические переменные) извлекаются из 3D-модели с использованием прикладного программного интерфейса. Для получения свойств материала реализована интеграция со справочником материалов системы КОМПАС-3D.

Обсуждение и заключение. Автоматизация подготовки исходной информации о детали является первым этапом в реализации сквозной параметризации в задачах конструкторского и технологического проектирования. Благодаря конструкторско-технологической параметризации и ассоциативности траекторий обработки можно построить сквозное проектное решение, когда изменения, внесенные конструктором в деталь, будут автоматически передаваться в технологическую модель и далее через постпроцессор в управляющую программу для станка с числовым программным управлением. Сквозную параметризацию наиболее эффективно использовать для деталей, имеющих несколько размерных модификаций. Дальнейшее развитие конструкторско-технологической параметризации в составе интегрированной системы автоматизированного программирования станков с программным управлением планируется направить на решение задач автоматического подбора режущих инструментов и приспособлений на основе алгоритмов, реализуемых пользователями посредством параметрических информационных связей.

© Щёкин А. В., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: параметризация, система автоматизированного проектирования, КОМПАС-3D, управляющая программа, 3D-модель, интеграция, интерфейс прикладного программирования

Для цитирования: Щёкин А. В. Автоматизация получения параметров детали для задач конструкторско-технологической параметризации // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 345–365. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.345-365>

Automation of Obtaining Parts Parameters for Tasks of Design-Technological Parametrization

A.V. Shchekin

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

schekin@inbox.ru

Introduction. Automation of obtaining design parameters of the part is the most important step in the integration of the design, process planning and manufacturing. The aim of this work is to obtain part parameters, the numerical values of which can be used in parametric calculations.

Materials and Methods. The work is the development of the concept of end-to-end design and technological parametrization in Computer-Aided Manufacturing. The theoretical research is based on the formal theory of data representation and processing, the set theory, and the theory of hierarchical multilevel systems. The software implementation was carried out in the Visual Studio C++ environment using KOMPAS-3D application program interface and the C3D geometric kernel application program interface.

Results. A method has been developed for obtaining the initial part parameters during the transfer of information from the design engineering Computer-Aided Manufacturing systems to the technological preparation of production. A logical data structure in a relational form was developed, which made it possible to eliminate redundancy and ensure the consistency of the presentation of part parameters, taking into account the priorities of the sources of design information. The software method is implemented as part of the commercial Computer-Aided Manufacturing system for the KOMPAS-3D platform. Source parameters (metadata, material properties, annotation parameters, parametric variables) are extracted from the 3D-model using application program interface. Integration with the KOMPAS-3D materials directory has been implemented to obtain material properties.

Discussion and Conclusion. The obtaining of initial information about the part is the first step in the implementation of the end-to-end design and technological parameterization in the field of Computer-Aided Manufacturing. Due to the design and technological parameterization and associativity of the toolpath, a through technological project can be built when changes made by the designer to the part will be automatically transferred to the technological model and to the control program for the CNC machine. End-to-end parametrization is most efficiently used for parametrized parts that have several dimensional modifications. Further development of the technological parameterization is expected to focus on the tasks of the automatic workpiece selection, cutting tools and devices.

Keywords: parametrization, Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing, KOMPAS-3D, control program, 3D-model, integration, Application Program Interface

For citation: Shchekin A.V. Automation of Obtaining Parts Parameters for Tasks of Design-Technological Parametrization. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):345-365. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.345-365>

Введение

Конструкторско-технологическая параметризация является мощным инструментом повышения уровня автоматизации технологической подготовки производства. Устанавливая информационные связи между параметрами конструкторской модели и параметрами технологического процесса, инженеры-технологи могут самостоятельно автоматизировать типовые расчетные методики, сократить время разработки технологической документации, достичь повторного использования технологического проекта.

Конструкторско-технологическая параметризация обычно применяется в системах автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) для автоматизированного заполнения шаблонов технологической документации, являясь эффективным инструментом инженеров-технологов [1; 2]. Например, используя штатные параметрические возможности САПР ТП и готовый редактор переменных, современные исследователи запрограммировали простейшие алгоритмы для вычисления значений параметров в ячейках технологической документации [3–6].

В одной из предыдущих работ автором данной статьи впервые был предложен подход к организации подсистемы конструкторско-технологической параметризации для задач в области автоматизированного программирования станков с числовым программным управлением (ЧПУ) [7]. Начальным этапом работы подсистемы является этап подготовки исходной информации об обрабатываемой детали. Числовые значения исходных параметров детали в дальнейшем могут использоваться в параметрических расчетах, например, свойства материала – для расчета режимов резания, размеры и шероховатости поверхностей – для создания параметризованных траекторий, а параметры конструкторско-технологических эле-

ментов – для программирования постпроцессоров.

Автоматизация получения конструкторских параметров обрабатываемой детали является важнейшим этапом интеграции конструкторских систем автоматизированного проектирования (САПР) с системами технологической подготовки производства. Она позволяет свести к минимуму или полностью исключить повторный ввод информации и обеспечить сквозную передачу данных по цепочке «конструкторская 3D-модель» – «программирование обработки» – «изготовление на станке с ЧПУ» (CAD-CAM-CNC).

В контексте CAD/CAM-интеграции выделяют две задачи: распознавание конструкторско-технологических элементов (задача *feature recognition* [8–10]) и получение негеометрических параметров детали (задача *technical information processing* [11–13]). Задача *feature recognition* представляет собой отдельную сложную тему и выходит за рамки настоящей публикации. Целью данной работы является получение негеометрических (инженерных) параметров детали, числовые значения которых в дальнейшем могут использоваться в составе параметрических расчетов, а текстовые значения передаваться в управляющую программу.

Обзор литературы

Как в САПР технологической подготовки производства, так и в системах автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ параметры обрабатываемой детали могут быть получены различными способами. Например, в работе Д. Е. Максимовского приведены пять групп методов преобразования конструкторской информации к табличному виду, пригодному «для использования в технологических САПР»:

- непосредственное кодирование таблиц с чертежа;
- использование конструкторской и технологической параметризации

при проектировании технологических процессов (ТП) на основе унификации (деталей аналогов, типизации и группирования);

- идентификация поверхностей (конструктивно-технологических элементов) на основе использования OLE- или API-функций;

- установление свойств поверхностей в активном режиме на основе диалога;

- использование универсальных методов группировки чертежных элементов (примитивов) в классы (поверхностями) при обработке геометрических форматов» [14].

Похожие группы методов преобразования конструкторской информации рассматриваются и в обзорной части диссертации С. Ю. Калякулина:

«1-я группа. Математические, связанные с распознаванием свойств поверхностей для 2D и 3D графических моделей;

2-я группа. Использование специальных языков описания деталей;

3-я группа. Диалоговые средства преобразования одномерных примитивов в свойства поверхностей;

4-я группа. Средства параметризации;

5-я группа. Обычное кодирование таблиц с помощью текстовых редакторов»¹.

В работе Д. С. Шишигина сравниваются три способа интеграции научного программного обеспечения с системой AutoCAD: на основе обмена данными в формате DXF, COM-технология и программный интерфейс API ObjectARX (AutoCAD Runtime Extension) [15]. Перечисленные технологии также могут использоваться для получения исходных параметров обрабатываемой детали.

Как писал М. Месарович, один из основателей общей теории систем, «... классификацию не следует понимать

как строгое разделение; она лишь подчеркивает различия, но отнюдь не исключает возможности существования систем, принадлежащих одновременно к нескольким классам»². Это утверждение справедливо и для методов решения задач в области САПР.

Поэтому все методы преобразования конструкторской информации логичнее разделить в зависимости от степени участия человека на ручные, автоматические и автоматизированные. К ручным методам можно отнести непосредственное кодирование таблиц параметров с чертежа или с 3D-модели. При этом могут использоваться диалоговые средства САПР и специальные идентификаторы, коды или языки описания деталей. При автоматическом способе весь процесс извлечения информации полностью скрыт от пользователя: могут применяться как математические методы распознавания поверхностей по исходной геометрии, так и лингвистический анализ входной информации, представленной на специальных языках. Для извлечения данных могут использоваться как обменные форматы, так и COM-технология и разного рода API. Однако, вследствие того что технологические задачи являются трудноформализуемыми и многокритериальными, современные методы автоматического решения подобного класса задач не обеспечивают безупречного результата. Поэтому в САПР предпочтительнее использовать автоматизированные способы, которые сочетают в себе автоматические методы с их ручным управлением или корректировкой результата. Для этого могут применяться интерактивные средства, с помощью которых пользователь может задавать настройки распознавания информации или вводить вручную часть исходных параметров.

¹ Калякулин С. Ю. Система автоматизированной конструкторско-технологической параметризации процессов изготовления деталей типа тел вращения: дис. ... канд. тех. наук. М., 2016. 185 с.

² Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.

В современных САПР ведущая роль принадлежит твердотельному моделированию. 3D-модель может содержать в себе не только геометрию изделия, но и метаданные, состав изделия, технические требования и аннотации. Для извлечения информации из 3D-модели достаточно выделить две группы методов:

- на основе анализа открытых форматов CAD-систем, в том числе общеизвестных обменных форматов STEP, IGES, DWG, DFX, STL, SAT, X_T и т. д.;
- на основе прикладных интерфейсов API.

Использование файловых форматов является исторически первым способом передачи информации между компонентами PLM-среды. Наибольшее развитие получил протокол STEP, который изначально подразумевался как механизм обмена данными между разными этапами поддержки жизненного цикла изделия в рамках концепции CALS³. Нейтральные форматы экспорта/импорта наиболее активно используются технологическими САПР, работающими автономно от CAD-систем. Но у этого метода есть существенный недостаток – это потеря точности при передаче геометрической информации, если программа-приемник и программа-источник работают на разных математических ядрах. Эта проблема является особенно критичной для САМ-систем, математические задачи которых привязаны к геометрии 3D-модели. Но если даже рассматривать передачу только негеометрических параметров, то коммерческие САПР по причине своей

закрытости не позволяют и это делать в полной мере. Например, такие распространенные в России CAD-системы, как SolidWorks и КОМПАС-3D, не экспортируют в step-файл технологические параметры детали, хотя соответствующие спецификации в стандарте STEP давно предусмотрены⁴. Таким образом, использование обменных форматов влечет за собой потерю не только геометрической точности, но и большей части инженерных параметров.

Рассмотрим некоторые работы, связанные с анализом нейтральных форматов.

Например, в диссертации Э. В. Митина, выполняется ручной разбор файла ядра Parasolid в формате xmt_txt с целью формирования общего описания детали, определения ориентации и положения поверхностей для задачи автоматического выбора технологических баз⁵ [16; 17]. Но при этом не приведены ни алгоритм автоматического разбора формата xmt_txt, ни его программная реализация. Результаты, полученные в этой работе, являются сомнительными для практического применения, поскольку не известны самостоятельные работы автора в части разработки интегрированного программного обеспечения в области САПР. Источником данной работы является диссертация Э. В. Элементова, в которой выполнен аналогичный разбор файла dxf с целью установления технологических свойств поверхностей детали⁶.

В диссертации А. В. Аверченкова предлагается способ автоматического

³ Судов Е. В., Левин А. И. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России // НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика». М., 2002. URL: http://cals.ru/sites/default/files/downloads/mdocs/concept_ipi.pdf (дата обращения: 23.04.2019).

⁴ ISO 10303-224. Industrial Automation Systems and Integration. Product Data Representation and Exchange // Part 224: Application Protocol: Mechanical Product Definition for Process Planning Using Machining Features. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 2006. URL: <https://www.iso.org/standard/36000.html> (дата обращения: 23.04.2019).

⁵ Митин Э. В. Автоматизация выбора технологических баз корпусных деталей на основе трехмерных моделей: дис. ... канд. тех. наук. М., 2005. 192 с.

⁶ Элементов М. В. Установление точности показателей пространственных технологических размерных связей при проектировании технологических процессов механической обработки: дис. ... канд. тех. наук. М., 2001. 192 с.

распознавания КТЭ на основе 3D-моделей и чертежей в формате IGES⁷. На основе данного метода разработан программный комплекс на языке JAVA2, позволяющий независимо от CAD-системы производить декомпозицию чертежа и 3D-модели на КТЭ с последующей передачей конструкторской информации в САПР ТП «ТехноПро». Предлагаемый метод подходит только для тел вращения, а распознавание конструкторских обозначений (аннотаций) возможно только по чертежам в формате IGES.

В работе иностранных коллег описывается система автоматического извлечения геометрической и негеометрической информации из чертежей, представленных в форматах DXF или IGES [12]. Для распознавания параметров размерных обозначений (линейных, диаметральных, радиальных и угловых), допусков и установления их связи с геометрическими объектами чертежа используются эвристические правила. Текстовые выноски интерпретируются методами обработки естественного языка с использованием конечных автоматов. Распознанная информация представлена в виде иерархии объектно-ориентированных классов.

Методы на основе API подразумевают доступ к внутренним возможностям базовой CAD-системы. Доступ к ним может быть реализован как на основе макросов (например, в КОМПАС-3D в качестве языка для написания макросов используется язык Python, в SolidWorks – Basic, в AutoCAD – AutoLisp), так и на основе компилируемых языков высокого уровня (Pascal, C++ и т. д.). Механизм доступа тоже может быть различным: например, на основе экспортных функций, COM, CORBA или .NET. Для интегрированных CAD/CAM-систем, построенных на базе единой CAD-платформы, использование API является наиболее функциональным

и производительным способом анализа конструкторской модели. Недостатками этого метода являются сложность программирования API и необходимость постоянного согласования версий API, используемых прикладной программой, с версиями базовой CAD-системы.

На практике различные методы обмена информацией переплетаются между собой. Могут использоваться одновременно как обменные форматы, так и API базовой САПР (и даже API геометрического ядра). Между этими двумя подходами нет четкой границы, и их следует рассматривать только как крайние случаи в практике разработки и интеграции САПР. Например, в одной из работ зарубежных исследователей представлено программное обеспечение, которое экспортирует исходную геометрическую модель (созданную в любой CAD-системе) из формата STEP AP203 в файл STEP AP224, добавляя к исходной геометрии технологическую информацию [13]. Для этого реализовано считывание входного файла в формате STEP AP203, извлечение геометрии и перевод ее в структуру данных геометрического ядра Parasolid и визуализация модели Parasolid на экране компьютера средствами OpenGL. Далее пользователь в диалоговом режиме задает свойства материала, геометрические и размерные допуски, шероховатости поверхностей и другие дополнительную информацию. Структура данных детали вместе с технологической информацией и распознанными конструкторско-технологическими элементами записывается в файл в формате AP224. Для импорта и экспорта файлов STEP и интерпретации информационной модели EXPRESS используется библиотека классов C++ ROSE, для преобразования структуры BRep в модель данных Parasolid – функции API ядра Parasolid. Однако данная схема интеграции не устраняет участия че-

⁷ **Аверченков А. В.** Автоматизация распознавания и идентификации конструкторско-технологических элементов деталей в интегрированных САПР: дис. ... канд. тех. наук. Брянск, 2004. 260 с.

ловека в подготовке исходных данных и не избавляет от потери точности при передаче геометрии через нейтральный формат между системами, работающими на разных математических ядрах.

Анализ приведенных источников показывает, что в них используются различные модели данных для промежуточного представления параметров детали, но при этом не обращается внимание на то обстоятельство, что параметры могут быть получены из разных источников, связанных с конструкторской моделью, и потенциально могут дублировать друг друга, создавая избыточность и противоречивость исходной информации.

Материалы и методы

В одной из предыдущих работ автором впервые был предложен подход для построения подсистемы конструкторско-технологической параметризации в контексте задач, решаемых пользователями в процессе моделирования обработки в САМ-системе [7]. В рамках данного подхода подсистема технологической параметризации рассматривается как иерархическая система, элементами которой являются параметры, структурно организованные на пяти уровнях подчиненности:

- параметры обрабатываемой детали;
- общие параметры плана обработки;
- параметры инструментальных переходов;
- параметры конструкторско-технологических элементов;
- параметры инструкций управляющей программы.

Такое разделение параметров соответствует реальной структуре технологического процесса и модульному принципу обработки поверхностей на станках с ЧПУ.

На самом верхнем уровне иерархии находятся конструкторские параметры детали, которые доступны для использования на всех нижних уровнях,

в частности, для расчета режимов резания, программирования параметризованных траекторий, разработки постпроцессоров. Доступ к параметрам детали в составе математических выражений реализуется посредством синтаксической конструкции *MODEL.имя параметра*. В общем случае к исходным параметрам детали можно отнести метаданные 3D-модели (наименование, обозначение, масса детали и т. д.), свойства материала, параметры аннотаций 3D-модели, параметрические переменные 3D-модели.

Как правило, эти данные неструктурированы, а параметры детали могут дублировать друг друга. Например, твердость материала может присутствовать как в свойствах материала, так и в технических требованиях. В разных местах твердость может быть указана как в единицах HRC, так и HB. При этом конструктор или технолог могут дополнительно создать параметрические переменные, совпадающие с именами других параметров. Поэтому в первую очередь необходимо разработать непротиворечивую модель данных, которая должна описать логическую структуру параметров детали, обеспечить целостность и устранить избыточность информации.

В основе теоретических исследований лежат формальная теория представления и обработки данных, теория множеств, теория иерархических многоуровневых систем. Для графического отображения процессов передачи и обработки информации использовалась методология IDEF0. Программная реализация САМ-системы выполнена в среде Visual Studio C++ с использованием программных интерфейсов API КОМПАС-3D и API геометрического ядра C3D. Тестирование выполнялось в среде КОМПАС-3D V18.1.

Результаты исследования

Для моделирования обработки в САМ-системе в качестве источника конструкторской информации рассма-

тривается 3D-модель детали. С этой точки зрения, используя теорию множеств, конструкторскую 3D-модель можно представить следующей формулой:

$$Model = \langle P_{Attr}, P_{Geom} \rangle, \quad (1)$$

где P_{Attr} – множество атрибутивных (негеометрических) параметров; P_{Geom} – множество геометрических параметров (к которым, в частности, относятся параметры конструкторско-технологических элементов).

Распознавание конструкторско-технологических элементов и извлечение их числовых параметров из 3D-модели в настоящей работе не рассматриваются (это тема отдельной публикации). Негеометрические параметры представим в виде кортежа четырех упорядоченных множеств:

$$P_{Attr} = \langle P_{Par}, P_{Meta}, P_{D\&T}, P_{Mtrl} \rangle, \quad (2)$$

где P_{Par} – множество параметрических переменных 3D-модели; P_{Meta} – множество метаданных 3D-модели; $P_{D\&T}$ – множество параметров аннотаций (размеры, допуски, шероховатости поверхностей, обозначение D&T от англ. dimensions and tolerances); P_{Mtrl} – свойства материала (твердость, показатели обрабатываемости).

Все параметры должны иметь единое описание, допускающее их хранение как во внутреннем представлении

САМ-системы, так и при необходимости во внешней базе данных. Для структурирования параметров детали используется реляционная модель данных, графически представленная в таблице 1.

Для однозначной идентификации параметра применяется его уникальное имя. Параметр может принимать либо числовое, либо текстовое значение. Большинство параметров являются числовыми (они могут входить в состав математических формул). Но деталь может содержать и текстовые данные, например, наименование детали, обозначение материала, фамилию разработчика, которые необходимы для передачи в управляющую программу в качестве сопроводительной информации. Числовые и текстовые значения параметра размещены в разных полях таблицы. Тогда принимается следующая схема отношения:

$$P = R(Name, Value, Text, Type, Comment), \quad (3)$$

где *Name* – уникальное имя параметра, которое является одновременно и первичным ключом для идентификации строки таблицы; *Value* содержит значение параметра типа *double*; *Text* – строку с текстовым значением параметра; *Type* – тип параметра (*d* – число, *s* – строка); *Comment* – комментарий к параметру.

Таблица 1
Table 1

Реляционная форма представления параметров детали
Relational form of the representation of the detail parameters

Имя (ключ) / Name (key)	Значение / Value	Текст / Text	Тип / Type	Комментарий / Comment
Наименование / Name	0	Фланец	s	Наименование детали / Name of part
Материал / Material	0	Сталь 20X	s	Материал / Material
Масса / Mass	5,73	–	d	Масса детали, кг / Mass of part, kg
Плотность / Density	7,83	–	d	Плотность материала, г/см ³ / Density of material, g/sm ³

Некоторые параметры могут быть связаны с дополнительными структурами данных, например, размеры могут содержать допуск и предельные отклонения. Дополнительные структуры данных целесообразно хранить в отдельных отношениях, связывая их с таблицей параметров детали посредством внешних ключей.

Информация о детали извлекается из разных источников, связанных с 3D-моделью. Для исключения избыточности данных установлены следующие приоритеты (в порядке их уменьшения) для пяти источников информации: параметрические переменные 3D-модели, метаданные, аннотации, справочник материалов, технические требования. На рисунке 1 приведена последовательность считывания параметров детали в порядке уменьшения приоритета их источников. Для исключения дублирования информации параметр добавляется в список только в том случае, если в списке нет параметра с таким же именем. Любой параметр может быть вручную переопределен пользователем CAD/CAM-системы путем создания одноименной параметрической переменной 3D-модели, благодаря чему обеспечивается возможность ручного управления составом параметров.

Способ получения конструкторских параметров детали на основе API программно реализован в составе коммерческой САМ-системы для платформы КОМПАС-3D. С общим описанием функциональных возможностей модулей САМ-системы и примерами их использования можно ознакомиться по ссылкам в Интернете⁸, а также в рекламных публикациях [18–21]. САМ-система интегрирована в рабочую среду КОМПАС-3D по принципу одного окна с использованием эле-

ментов пользовательского интерфейса САД-системы (рис. 2). Ассоциативность траекторий обеспечивает автоматическую актуализацию управляющей программы для станка с ЧПУ при изменении размеров или положения опорных объектов обрабатываемой детали [22]. Интеграция на уровне интерфейса пользователя выполнена с помощью API КОМПАС-3D, на уровне геометрических расчетов посредством API математического ядра C3D [23].

Перед началом моделирования обработки технолог должен поставить на 3D-модель как минимум одну локальную систему координат (ЛСК), задающую ноль детали и направление осей станка. Далее порядок работы пользователя в рассматриваемой САМ-системе включает в себя следующие действия:

- выбор ЛСК и системы ЧПУ (постпроцессора), задание заготовки, формирование таблицы инструментов, выбор приспособлений;

- формирование последовательности инструментальных переходов (плана обработки). Для каждого перехода технолог должен задать область обработки, выбрать инструмент, настроить параметры траектории, назначить режимы резания. На данном этапе инициализируются параметры инструментальных переходов и параметры конструкторско-технологических элементов;

- постпроцессирование. На данном этапе в процессе создания управляющей программы инициализируются параметры пятого уровня иерархии переменных (параметры инструкций УП) и создается управляющая программа в кодах системы ЧПУ;

- визуализация обработки, в ходе которой технолог может проверить траекторию перемещения инструментов,

⁸ Компас-3D: Модуль ЧПУ. Токарная обработка [Электронный ресурс]. URL: <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu>; Компас-3D: Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка [Электронный ресурс]. URL <https://kompas.ru/kompas-3d/application/machinery/module-chpu-fo>; Модуль ЧПУ. Фрезерная обработка [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NI-FH8uyjNU> (дата обращения: 23.04.2019).

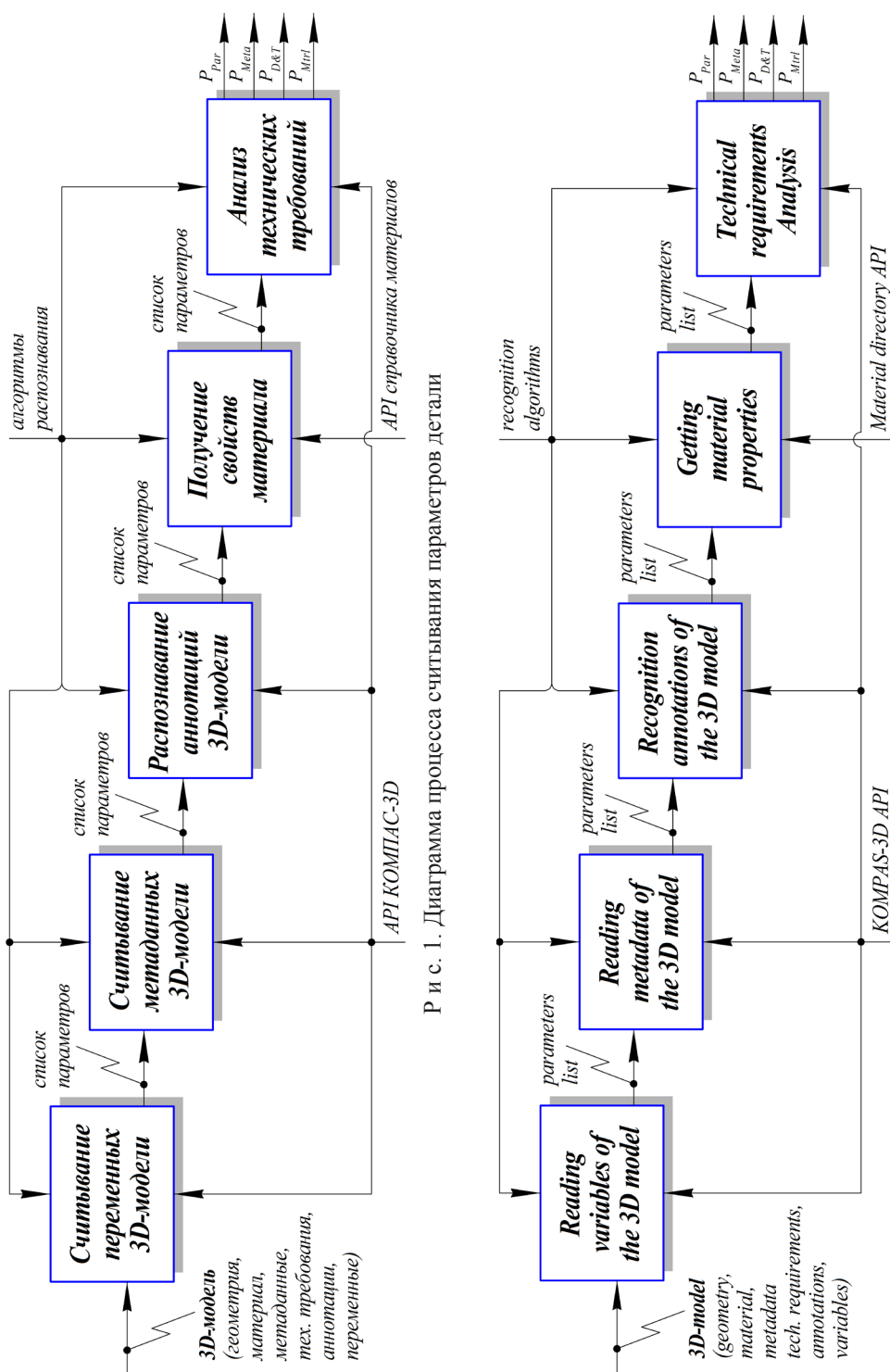
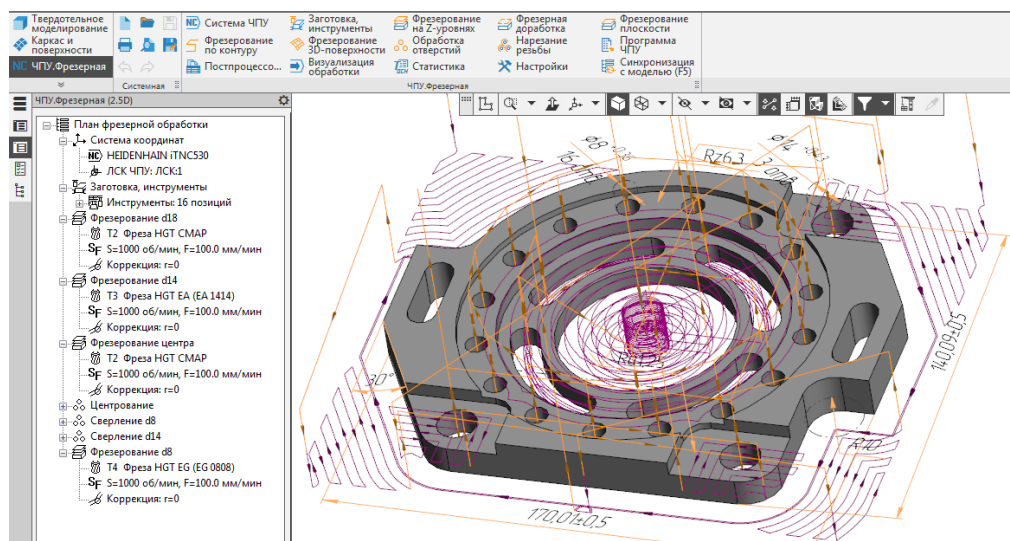


Fig. 1. Diagram of the process of reading part parameters



Р и с. 2. Моделирование фрезерной обработки в КОМПАС-3D

Fig. 2. Modeling milling in KOMPAS-3D

обнаружить столкновения инструментов с приспособлениями, врезания в заготовку на ускоренной подаче.

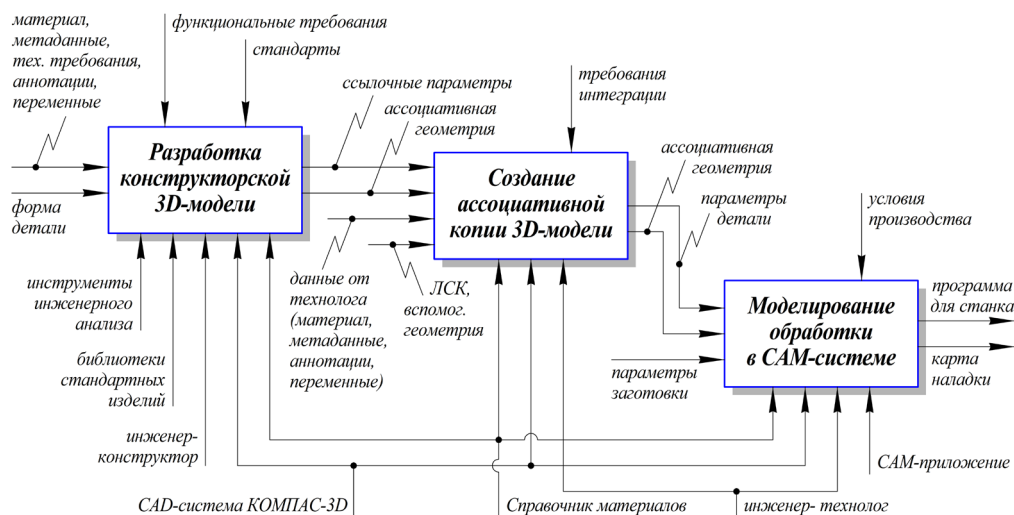
Результатом работы САМ-системы является управляющая программа, которая записывается технологом в отдельный текстовый файл и передается оператору станка с ЧПУ.

Обработка детали возможна с использованием нескольких планов обработки (например, на нескольких станках). Поэтому технологом рекомендуется работать не напрямую с моделью конструктора, а с ее ассоциативной копией (рис. 3). Причем для каждого плана обработки рекомендуется использовать отдельную копию конструкторской модели. В этом случае технолог, работая со своей моделью, не будет нагружать исходную конструкторскую модель вспомогательными построениями и затрагивать сферу деятельности конструктора.

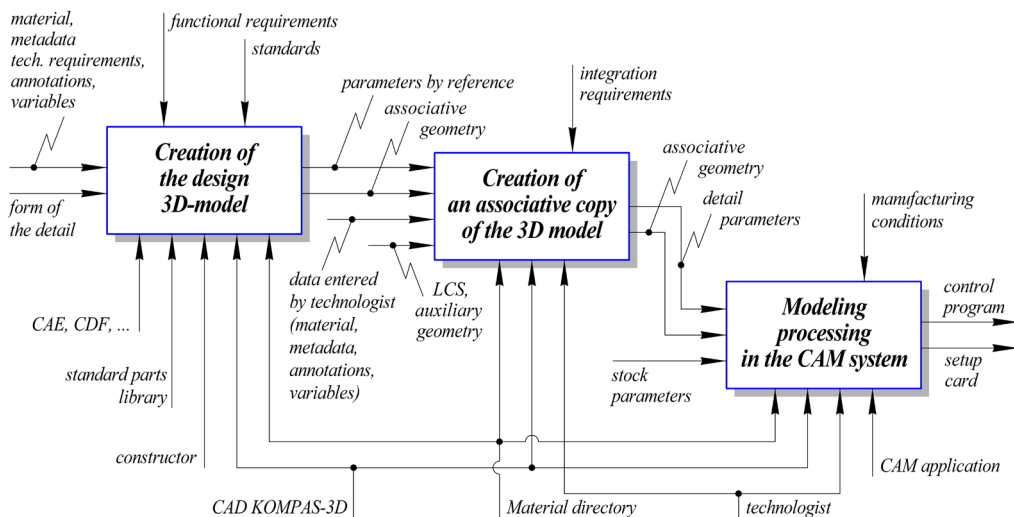
Способ взаимодействия технолога с конструктором через ассоциативную копию 3D-модели можно использовать при работе как в рамках единого информационного пространства промышленного предприятия, так и в рамках учеб-

но-научного виртуального предприятия (УНВП) в вузе [24].

Создание ассоциативной копии в КОМПАС-3D занимает у технолога минимум времени: для этого он должен открыть новый документ, вызвать команду КОМПАС-3D «Копировать объекты» и указать на исходной модели объекты для копирования. Технолог может использовать ассоциативную копию модели любым способом: упростить ее, создать дополнительные построения, добавить собственные аннотации и параметрические переменные. Если конструктор внесет изменения в свою модель, то перестроится и ассоциативная копия у технолога, а вместе с ней и траектории обработки для станка с ЧПУ. Через команду «Копировать объекты» в ассоциативную копию наследуется только геометрия детали. Для установления связи с переменными и аннотациями исходной модели технолог может создать внутри своей ассоциативной копии собственные параметрические переменные, содержащие ссылки на переменные и аннотации модели-источника.



Р и с. 3. Диаграмма процесса передачи параметров детали из конструкторской модели в САМ-систему



F i g. 3. Diagram of the process of transferring part parameters from the design model to the CAM system

Принципы функционирования подсистемы конструкторско-технологической параметризации, ее архитектура, UML-диаграмма иерархии классов, отображающих уровни параметров САМ-системы, подробно описаны в одной из наших работ [7]. В данной статье детализируется процесс считывания параметров обрабатываемой

3D-модели (начальный этап работы подсистемы).

Таблица параметров описывается классом `DETAIL_PARAMETERS` (рис. 4). Класс `DETAIL_PARAMETERS` является производным от абстрактного класса `PARAMETERS`, который содержит данные и методы, общие для всех уровней иерархии параметров

```

struct Parameter
{
    ~Parameter() { if( pRef ) delete pRef; }
    _bstr_t sName; // имя параметра
    double Value; // числовое значение параметра
    _bstr_t sText; // текстовое значение параметра
    char type; // тип параметра
    _bstr_t sNote; // комментарий к параметру
    RefParameters* pRef; // указатель на структуру дополнительных параметров
};

struct DETAIL_PARAMETERS : public PARAMETERS
{
    ~DETAIL_PARAMETERS();
    _bstr_t sMaterial;
    FILETIME timeCopy;
    TArray<Parameter*> MP; // динамический список параметров 3D-модели
    double* GetParameter( char* s );
    char* GetParameterS( char* s );
    bool ReadModelParameters( bool isSM );
    bool GetMaterial( IPart7Ptr& pPart7 );
};

```

Р и с. 4. Структуры данных для описания таблицы параметров
F i g. 4. Data structures for describing the parameters table

САМ-системы, в том числе средства для синтаксического анализа и вычисления математических формул. Класс DETAIL_PARAMETERS инкапсулирует динамический список MP указателей на экземпляры параметров.

Формулы, связывающие параметрические переменные, могут содержать алгебраические и тригонометрические функции, логические операции и скобки. В результате лексического анализа распознаются последовательности символов (лексемы), которые потенциально могут являться именами параметров. Для получения числового значения

параметра используется виртуальная функция GetParameter базового класса, которая переопределяется в производных классах. Метод DETAIL_PARAMETERS::GetParameter (рис. 5) принимает на вход лексему и возвращает адрес соответствующей переменной типа double. Использование указателей на переменные обеспечивает получение актуальных значений параметров. Нулевое значение адреса означает, что параметр по входному имени не обнаружен. Аналогично работает и метод DETAIL_PARAMETERS::GetParameterStr, возвращая адрес первого символа стро-

```

double* DETAIL_PARAMETERS::GetParameter( char* s )
{
    if( ::strstr( s, "MODEL." ) )
    {
        for( int i=0; i<MP.Count(); i++ )
            if( MP[i]->type == 'd' )
                if( !strcmp( s+6, (char*)(MP[i]->sName) ) ) return &MP[i]->Value;
                else if( MP[i]->pRef )
                    { if( double* p = MP[i]->pRef->GetParameter( s+6 ) ) return p; }
    }
    return NULL;
}

```

Р и с. 5. Функция получения числового значения параметра
F i g. 5. Function for getting the numeric value of a parameter

ки, если параметр содержит текстовое значение.

Метод ReadModelParameters() класса DETAIL_PARAMETERS реализует считывание параметров из 3D-модели в порядке их приоритета от наибольшего к наименьшему (рис. 1). Считывание параметров выполняется в момент синхронизации внутренних данных САМ-системы с 3D-моделью.

Сначала посредством API КОМПАС-3D извлекаются параметрические переменные. Чтобы переменные были доступны для САМ-системы, они должны быть предварительно объявлены со статусом «внешние». Переменные 3D-модели могут быть как геометрическими, то есть ассоциативно связанными с какими-либо объектами 3D-модели (например, с аннотациями или размерами эскиза), так и негеометрическими (например, свойства материала). Твердость материала (HВ или HRC), предел прочности и иные параметры могут быть заданы конструктором или технологом как параметрические переменные детали, тогда они будут иметь приоритет над свойствами материала, хранящимися в справочнике материалов. Параметры выводятся на панель параметров САМ-системы, чтобы пользователь мог ви-

деть, какие параметры детали можно применить в параметрических расчетах (рис. 6).

Далее с помощью API КОМПАС-3D считываются метаданные и аннотации 3D-модели (рис. 7). Метаданные извлекаются из свойств 3D-документа, параметры аннотаций – из обозначений размеров и шероховатостей. При получении параметра шероховатости распознается ее условное обозначение *Ra* или *Rz*. Размеры распознаются вместе с их предельными отклонениями и допусками. Аннотации, значения которых планируется использовать в параметрических расчетах, должны быть предварительно проставлены на 3D-модели.

Для автоматического получения свойств материала реализована интеграция САМ-приложения с библиотекой «Материалы и Сортаменты» системы КОМПАС-3D. Из справочника автоматически извлекаются предел прочности σ_b , МПа (*SigmaV*), коэффициенты обрабатываемости *KVMet* и *Xmat* (рис. 8), твердость (HRC или HВ).

Материал должен быть предварительно назначен конструктором детали или технологом. При обращении к справочнику происходит его загрузка в память, и это занимает некоторое

The screenshot displays the COMPAS-3D environment. On the left, a 'Parameters' (Параметры) panel is visible, showing a tree view of the model's structure. The 'Parameters of the part' (Параметры детали) section is expanded, and a table of extracted variables is shown. The table has columns for Name (Имя), Value (Значение), and Comment (Комментарий). The extracted variables are listed below.

Имя	Значение	Комментарий
HRC	45	Твердость HRC
HВ	275	Твердость HВ
L1	150	Размер L1
A	10	Переменная A
Name	Фланец	Наименование детали
Mark	МКЦС-1 157005	Обозначение детали

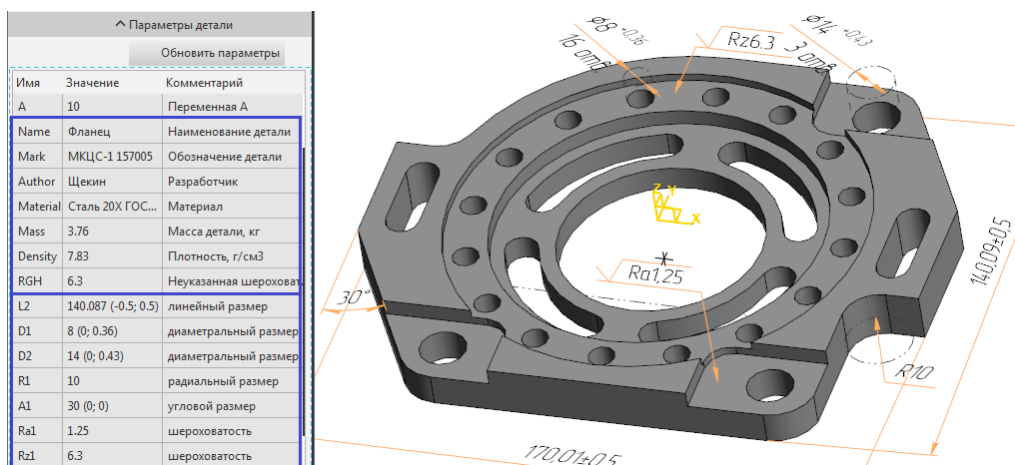
On the right, a 'Variables' (Переменные) panel is also visible, showing a table with columns for Name (Имя), Expression (Выражение), Value (Значение), and Comment (Комментарий). The variables listed are:

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
МКЦС-1 157005 Фланец (Тел-3)			
HRC		45	Твердость HRC
HВ		275	Твердость HВ
L1		150	Размер L1
A		10	Переменная A
B		1	

The 3D model in the background shows a mechanical part with various dimensions and annotations, including a 30° angle and a 16 mm dimension.

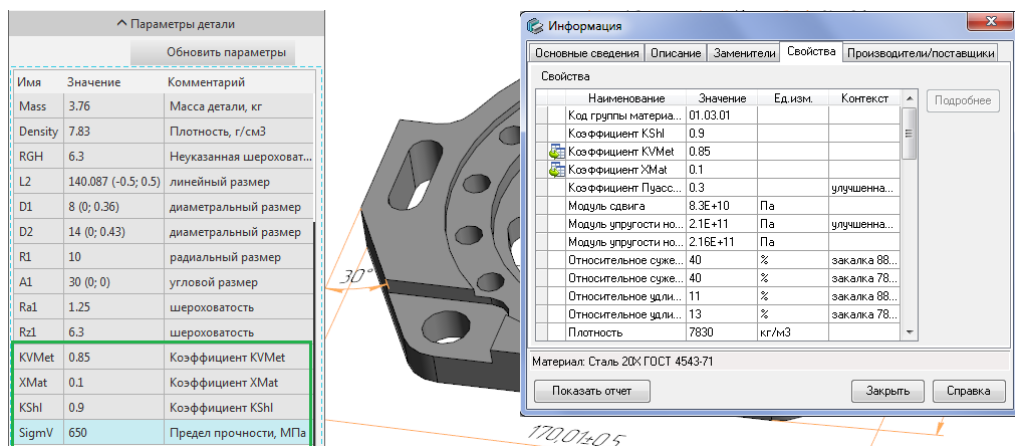
Р и с. 6. Извлечение внешних параметрических переменных 3D-модели

F i g. 6. Extraction of external parametric variables of the 3D model



Р и с. 7. Извлечение метаданных и параметров аннотаций 3D-модели

F i g. 7. Extracting metadata and annotation parameters of a 3D model



Р и с. 8. Извлечение свойств материала из справочника материалов

F i g. 8. Extraction of material properties from the directory of materials

время. Поэтому процесс считывания свойств материала из справочника запускается только в том случае, если изменился материал с момента последней записи 3D-модели на диск компьютера. Обозначение материала и время сохранения файла 3D-модели запоминаются в переменных sMaterial и time класса DETAIL_PARAMETERS (рис. 4).

Твердости материала соответствуют два параметра (HRC и HB). При считывании одного из них второй параметр рассчитывается автоматически

по таблице соответствия между единицами измерения HRC и HB, и в список параметров добавляются сразу оба параметра. Наличие двух параметров для твердости представляет собой пример контролируемой избыточности. Их одновременное присутствие в списке параметров объясняется тем, что разные методики расчета режимов резания используют либо HRC, либо HB (для быстрорежущих инструментальных сталей обычно используется HB, для обработки закаленных сталей – HRC, в каталогах

современных твердосплавных инструментов обычно приводятся формулы, в состав которых входит HRC).

Справочник материалов может содержать свойства материала для нескольких контекстов, связанных с состоянием поставки или термообработки, что может являться причиной семантической несогласованности параметров материала. В данной программной реализации выбирается контекст, соответствующий минимальной твердости материала.

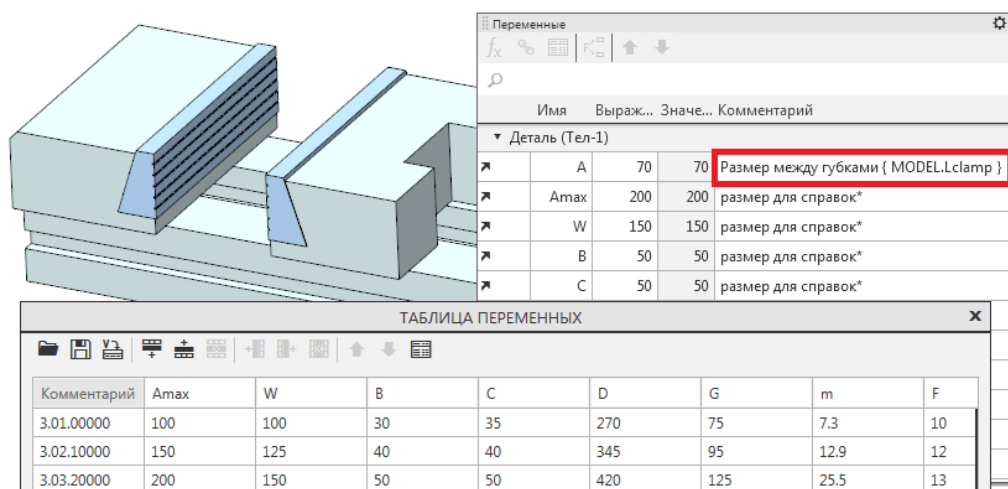
Имена параметрам (кроме переменных 3D-модели) назначаются автоматически. Линейным размерам имена присваиваются в формате Li , где i – порядковый номер линейного размера. Доступ к предельным отклонениям размеров и их допускам пользователь может получить посредством символов h (верхнее отклонение), l (нижнее отклонение) и t (допуск). Например, синтаксическая конструкция $MODEL.L1.h$ возвращает верхнее отклонение размера $L1$, а формула $MODEL.L1+MODEL.L1.h$ вычисляет его максимальное значение.

Для параметрических переменных 3D-модели имена и комментарии берут-

ся такими, какими они были назначены пользователем. В случае совпадения имен параметров приоритет отдается параметрическим переменным 3D-модели. Создав одноименную переменную 3D-модели, пользователь может переопределить значение любого параметра. Допустим, параметр HRC , извлеченный из справочника материала, не согласуется с его реальным значением во время механической обработки, тогда пользователь может объявить внешнюю параметрическую переменную с таким же именем, и значение параметра $MODEL.HRC$ будет определяться параметрической переменной 3D-модели.

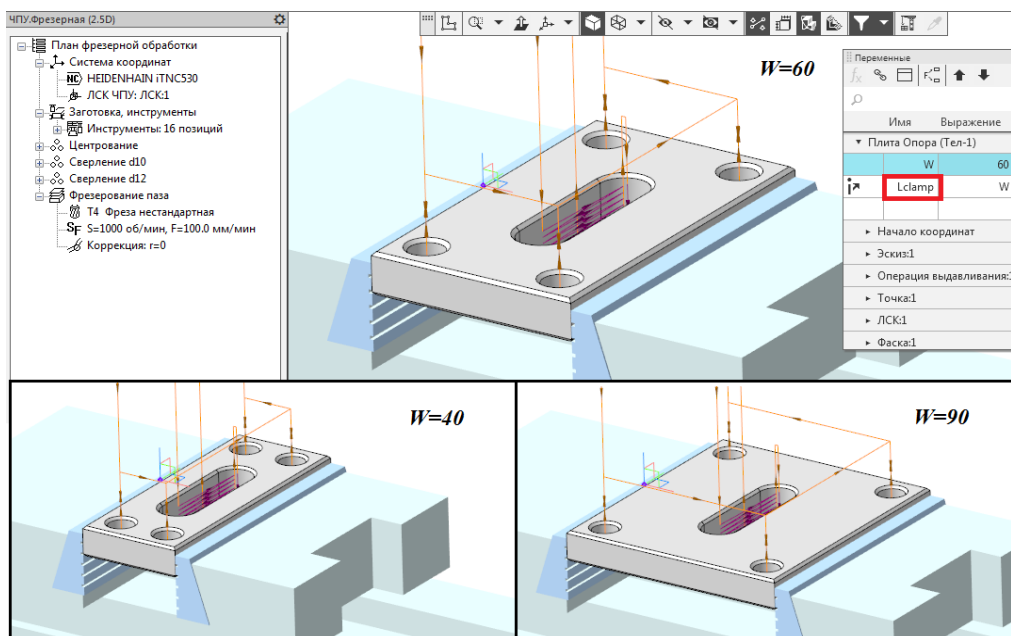
Последними считаются технические требования. В данном варианте программной реализации из технических требований извлекается только твердость материала, если она не была получена из других источников.

Ниже на рисунках 9 и 10 показан пример автоматической настройки зажимного размера станочного приспособления. В системе КОМПАС-3D создается деталь в виде параллелепипеда (рис. 10). Ширины детали ставится в соответствие параметрическая переменная W . Для закрепления детали



Р и с. 9. Параметризованная 3D-модель станочных тисков

F i g. 9. Parameterized 3D-model of the machine vice



Р и с. 10. Автоматическая настройка зажимного размера тисков
 F i g. 10. Automatic adjustment of clamping device size

используются тиски фирмы GERARDI (рис. 9). Стандартные размеры тисков по каталогу GERARDI хранятся в таблице переменных 3D-модели, а зажимному размеру поставлен в соответствие параметр детали *MODEL.Lclamp*.

Приспособления в рассматриваемой САМ-системе представляют собой параметризованные 3D-модели, которые можно выбрать из каталога, поставляемого в дистрибутиве САМ-системы. Пользователь может создать также собственные модели приспособлений и подключить их к САМ-приложению. Взаимодействие между САМ-системой и 3D-моделью приспособления реализовано посредством API КОМПАС-3D. Пользователь может управлять конфигурацией приспособления, выбирая строку стандартных размеров или задавая вручную размеры, непосредственно из САМ-системы. При подключении модели приспособления к САМ-системе, текст в комментариях к переменным модели, заключен-

ный в фигурные скобки, распознается САМ-системой как параметрическая формула. В данном случае при наличии в составе параметров детали переменной с именем *Lclamp* на место значения расстояния между губками тисков будет подставляться значение переменной *Lclamp*.

В модели обрабатываемой детали создается параметрическая переменная *Lclamp*, которая приравнивается переменной *W*. Таким способом устанавливается информационная связь между шириной детали *W* и зажимным размером тисков. При изменении значения переменной *W* модель детали перестраивается, изменяя свою ширину, при этом автоматически подгоняется размер между губками тисков. На рисунке 10 показаны деталь и тиски при $W=60$; 40 и 90 мм.

Автоматизация настройки зажимного размера приспособления позволяет избавить технолога от лишних действий, связанных с ручным изменением

расстояния между губками тисков при каждом изменении ширины детали. Это особенно актуально, если деталь имеет несколько размерных модификаций.

Обсуждение и заключение

В статье приведен метод получения исходных параметров обрабатываемой детали при передаче информации из конструкторской модели в интегрированную САМ-систему для задач конструкторско-технологической параметризации. Метод программного реализован в составе интегрированной САМ-системы для платформы КОМПАС-3D. Проблема передачи данных из 3D-модели в технологические расчеты решается с помощью программного интерфейса API.

Конструкторско-технологическая параметризация является эффективным инструментом для конструкторов и технологов, с помощью которого они могут реализовать относительно несложные алгоритмы, не являясь при этом специ-

алистами в области программирования. Благодаря конструкторско-технологической параметризации и ассоциативности траекторий обработки можно построить сквозной конструкторско-технологический проект, когда изменения, внесенные конструктором в деталь, будут автоматически передаваться в технологическую модель и далее через постпроцессор в управляющую программу для станка с ЧПУ. При этом максимальный эффект от применения сквозных технологий передачи данных достигается для параметризованных деталей, имеющих несколько размерных модификаций.

Дальнейшее развитие подсистемы конструкторско-технологической параметризации планируется направить на решение задач автоматического подбора заготовки, режущих инструментов и приспособлений на основе алгоритмов, реализуемых пользователями посредством параметрических информационных связей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Максимовский Д. Е. Автоматизация проектирования технологических процессов на основе конструкторско-технологической параметризации // Вестник машиностроения. 2011. № 9. С. 63–66. URL: https://www.mashin.ru/files/2011/ve0911_web.pdf (дата обращения: 23.04.2019).
2. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В. Информационные модели связей как средство повышения автоматизации расчетов параметров технологического процесса // Вестник МГТУ «Станкин». 2015. № 2 (33). С. 89–92. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1243> (дата обращения: 23.04.2019).
3. Kalyakulin S. Yu. Algorithm for Calculating the Parameters of the Initial Blank in the SITEP MO Automated Design System // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, Issue 11. Pp. 713–715. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X14110082> (дата обращения: 23.04.2019).
4. Разработка математической модели детали на основе моделей графических систем / С. Ю. Калякулин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 1. С. 67–76. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.067-076>
5. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В. Автоматизация выбора мерительной оснастки на основе конструкторско-технологической параметризации в САПР ТП // Технология машиностроения. 2017. № 11. С. 46–49. URL: http://www.ic-tm.ru/info/11_22 (дата обращения: 23.04.2019).
6. Калякулин С. Ю., Кузьмин В. В. Разработка математической модели параметров технологического процесса // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 3 (30). С. 40–44. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1032> (дата обращения: 23.04.2019).
7. Щёкин А. В. Конструкторско-технологическая параметризация в составе интегрированной САМ-системы // Информационные технологии. 2019. Т. 25, № 7. С. 34–54. DOI: <https://doi.org/10.17587/it.25.387-396>

8. **Babic B., Nesic N., Miljkovic Z.** A Review of Automated Feature Recognition with Rule-Based Pattern Recognition // Computers in Industry. 2008. Vol. 59, Issue 4. Pp. 321–337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.09.001>
9. **Mesbahi A. E., Jaider O., Rechia A.** Automatic Recognition of Isolated and Interacting Manufacturing Features in Milling Process // International Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4, Issue 10. Pp. 57–72. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/a7fe/c2705c5d76d2a396454a8e2cfe12993fd265.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
10. **Sanfilippo E. M., Borgo S.** What are Features? An Ontology-Based Review of the Literature // Computer-Aided Design. 2016. Vol. 80. Pp. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.07.001>
11. **Chlebus E., Krot K.** CAD 3D Models Decomposition in Manufacturing Processes // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. Vol. 16, Issue 1. Pp. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.008>
12. **Prabhu B. S., Biswas S., Pande S. S.** Intelligent System for Extraction of Product Data from CADD Models // Computers in Industry. 2001. Vol. 44, no. 1. Pp. 79–95. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/flc2/f08e1c94fb12e0373a9e9f08d4fefa06bd86.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
13. **Kang M., Han J., Moon J. G.** An Approach for Interlinking Design and Process Planning // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 139. Pp. 589–595. URL: <http://alvarestech.com/temp/nist2010/joao/CADCAPP1.pdf> (дата обращения: 23.04.2019).
14. **Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е.** Методы преобразования конструкторской информации машиностроительных деталей // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 2. С. 92–95. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/612> (дата обращения: 23.04.2019).
15. **Шишигин Д. С.** К выбору технологии интеграции прикладного программного обеспечения с САПР // Труды СПИИРАН. 2016. Вып. 4 (47). С. 211–224. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.47.11>
16. **Кузьмин В. В., Максимовский Д. Е.** Выбор технологических баз на основе решения прямой задачи размерного анализа // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 2. С. 64–69. URL: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590> (дата обращения: 23.04.2019).
17. **Кузьмин В. В.** Выбор технологических баз при обработке корпусных деталей // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 2. С. 10–14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17287428> (дата обращения: 23.04.2019).
18. **Паньков М.** Токарная обработка как начало САМ-истории в АСКОН // САПР и графика. 2013. № 7. С. 37–43. URL: <https://sapr.ru/article/23925> (дата обращения: 23.04.2019).
19. **Щёкин А. В., Сульдин С. П., Митин Э. В.** Постпроцессор системы ЧПУ «МАЯК 600Т» для САМ-приложения «Модуль ЧПУ Токарная обработка» // Вестник Мордовского университета. 2014. № 1. С. 161–164. URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles/38-14-12/208-10-15507-vmu-025-201502-67> (дата обращения: 23.04.2019).
20. Simulation of the Machining of a Bush in the KOMPAS-3D System / A. V. Shchekin [et al.] // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, no. 11. Pp. 987–990. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X17110156>
21. **Щёкин А. В., Сульдин С. П., Митин Э. В.** Особенности САМ-приложения «Модуль ЧПУ. Токарная обработка» // СТИН. 2017. № 8. С. 16–18. URL: <http://stinjournal.ru/soderzhanie-stin-2017/> (дата обращения: 23.04.2019).
22. **Щёкин А. В., Сульдин С. П.** Ассоциативность траекторий в САМ-приложении «Модуль ЧПУ. Токарная обработка» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 8. С. 570–575. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.16.570-575>
23. **Камнев А.** Интерфейс прикладного программирования геометрического ядра СЗД, его применение и главное отличие от API системы КОМПАС-3D // САПР и графика. 2016. № 5. С. 36–38. URL: <https://sapr.ru/article/25210> (дата обращения: 23.04.2019).
24. **Черепашков А. А.** Проектируем в среде учебного виртуального предприятия // САПР и графика. 2014. № 1. С. 76–78. URL: <https://sapr.ru/article/24352> (дата обращения: 23.04.2019).

Поступила 18.03.2019; принята к публикации 18.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019

Об авторе:

Щёкин Александр Васильевич, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Автоматизация программирования станков с ЧПУ» ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ResearcherID: F-4689-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5209-166X>, schekin@inbox.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Maksimovskiy D.E. Automation of Process Design by Design-Technological Parameterization. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Engineering Research. 2011; (9):63-66. Available at: https://www.mashin.ru/files/2011/ve0911_web.pdf (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
2. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V. Information Models as a Tool to Improve the Automation of Calculations of Process Parameters. *Vestnik MGTU «Stankin»* = MSTU Stankin Bulletin. 2015; (2):89-92. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1243> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
3. Kalyakulin S.Yu. Algorithm for Calculating the Parameters of the Initial Blank in the Sitep MO Automated Design System. *Vestnik mashinostroeniya* = Russian Engineering Research. 2014; 34(11):713-715. Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068798X14110082> (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
4. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V., Mitin E.V., et al. Developing a Mathematical Model of a Part Based on Graphics System Models. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technology and Systems. 2019; 29(1):67-76. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201901.067-076>
5. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V. Automation of the Selection of Measuring Equipment on the Basis of Design and Technological Parametrization in SAPR TP. *Tehnologiya mashinostroeniya* = Engineering Technology. 2017; (11):46-49. Available at: http://www.ic-tm.ru/info/11_22 (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
6. Kalyakulin S.Yu., Kuzmin V.V. Development of Mathematical Model of Process Parameters. *Vestnik MGTU «Stankin»* = MSTU Stankin Bulletin. 2014. (3):40-44. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/1032> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
7. Schekin A.V. Design and Technological Parametrization as Part of an Integrated CAM System. *Informatsionnyye tekhnologii* = Information Technologies. 2019; 25(7):34-54. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17587/it.25.387-396>
8. Babic B., Nestic N., Miljkovic Z. A Review of Automated Feature Recognition with Rule-Based Pattern Recognition. *Computers in Industry*. 2008; 59(4):321-337. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.09.001>
9. Mesbahi A.E., Jaider O., Rechia A. Automatic Recognition of Isolated and Interacting Manufacturing Features in Milling Process. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2014; 4(10):57-72. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/a7fe/c2705c5d76d2a396454a8e2cfe12993fd265.pdf> (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
10. Sanfilippo E.M., Borgo S. What are Features? An Ontology-Based Review of the Literature. *Computer-Aided Design*. 2016; 80:9-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.07.001>
11. Chlebus E., Krot K. CAD 3D Models Decomposition in Manufacturing Processes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016; 16(1):20-29. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.008>
12. Prabhu B.S., Biswas S., Pande S.S. Intelligent System for Extraction of Product Data from CADD Models. *Computers in Industry*. 2001; 44(1):79-95. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/f1c2/f08e1c94fb12e0373a9e9f08d4fefa06bd86.pdf> (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
13. Kang M., Han J., Moon J.G. An Approach for Interlinking Design and Process Planning. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003; 139:589-595. Available at: <http://alvarestech.com/temp/nist2010/joao/CADCAPP1.pdf> (accessed 23.04.2019). (In Eng.)
14. Kuzmin V.V., Maksimovskiy D.E. Methods of Transforming the Design Information of Engineering Components. *Vestnik MGTU «Stankin»* = MSTU «Stankin» Bulletin. 2012; (2):92-95. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/612> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)

15. Shishigin D.S. On Choosing the Technology of Application Software Integration with a CAD-system. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2016; (4):211-224. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.47.11>
16. Kuzmin V.V., Maksimovskiy D.E. Choice of Technological Bases on the Basis of the Decision of a Direct Problem of the Dimensional Analysis. *Vestnik MGTU «Stankin» = MSTU Stankin Bulletin*. 2012; 2:64-69. Available at: <http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/590> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
17. Kuzmin V.V. Selection of Technological Bases for Handling Details. *Vestnik MGTU «Stankin» = MSTU Stankin Bulletin*. 2008; (2):10-14. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17287428> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
18. Pankov M. Turning HIMSELF as the Beginning of the Story in Ascona. *SAPR i Grafika = CAD and Graphics*. 2013; (7):37-43. Available at: <https://sapr.ru/article/23925> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
19. Schekin A.V., Suldin S.P., Mitin E.V. Post-Processor of NC System «MAJaK 600T» for CAM-application. *Vestnik Mordovskogo Universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2014; (1):161-164. Available at: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/ru/articles/38-14-12/208-10-15507-vmu-025-201502-67> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
20. Shchekin A.V., Suldin S.P., Mitin E.V. Simulation of the Machining of a Bush in the KOMPAS-3D System. *Russian Engineering Research*. 2017; 37(11):987-990. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X17110156>
21. Shchekin A.V., Suldin S.P., Mitin E.V. CNC Module for Turning: a New CAM-Application. *Machine Tool*. 2017; (8):16-18. Available at: <http://stinyournal.ru/soderzhanie-stin-2017/> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
22. Schekin A.V., Suldin S.P. Associativity of the Tool Paths in the CAM-Application CNC-Module. Lathe Operation. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Management*. 2015; 16(8):570-575. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.16.570-575>
23. Kamnev A. The Application Programming Interface of the Geometric Kernel C3D, Its Application and the Main Difference from the API of the Kompas-3D System. *SAPR i grafika = CAD and Graphics*. 2016; (5):36-38. Available at: <https://sapr.ru/article/25210> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)
24. Cherepashkov A. Designed in the Academic Environment of a Virtual Enterprise. *SAPR i grafika = CAD and Graphics*. 2014; (1):76-78. Available at: <https://sapr.ru/article/24352> (accessed 23.04.2019). (In Russ.)

Received 18.03.2019; revised 18.04.2019; published online 30.09.2019

About author:

Alexander V. Shchekin, Chief of the Automation of CNC Programming Research Laboratory, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: F-4689-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5209-166X>, schekin@inbox.ru.

The author has read and approved the final manuscript.