

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624783>

Оригинальное исследование



Анализ систем автоматического проектирования

С.С. Гусев¹, В.В. Макаров²¹ Ростелеком, Москва, Российская Федерация;² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Процесс проектирования и разработки управляющей программы начинается после того, как был осуществлён предыдущий этап жизненного цикла изделия, и начинается он с работы конструкторского бюро. В нём проводится разработка новых конструкторских решений, согласовывается с заказчиком техническое задание на требуемое изделие.

Целью работы является процесс проектирования и разработки управляющей программы, который начинается после того, как был осуществлён предыдущий этап жизненного цикла изделия, и начинается он с работы конструкторского бюро.

Материалы и методы. На основании этого создаётся чертёж изделия с техническими требованиями, который передаётся, как правило, в отдел (технологов-программистов), который занимается непосредственно проектированием и разработкой управления процессом для изделия. На данном этапе, как правило, технолог консультируется с разработчиком чертежа на требуемое изделие для получения полной информации об изделии, с целью устранения каких-либо ошибок. Не исключаются такие случаи, когда уже с этого момента чертёж возвращается на доработку в отдел конструкторского бюро в связи с невозможностью реализации продукта в металле из-за недостатка промышленных мощностей или плохих конструкторских решений, которые делают описание технологии изготовления невозможным.

Результаты. Результатом исследовательской работы является то, что после получения технического задания следующим пунктом идёт разработка технологического процесса. Технологический процесс должен быть составлен технически грамотно в соответствии с внутренними стандартами предприятия (у каждого могут быть свои, но структура составления одна) и быть достаточно информативным хотя бы для того, чтобы исключить высокую вероятность брака в ходе изготовления. Как показывает статистика, на многих предприятиях подавляющий процент брака, появляется вследствие халатного отношения операторов станков с ЧПУ из-за отклонений от технологического процесса.

Заключение. По результатам моделирования металлообработки изделий была сформулирована методика, направленная на оптимизацию стратегии механической высокоскоростной металлообработки при разработке управляющей программы.

Ключевые слова: управляющая программа; конструкторское бюро; технологический процесс; техническое задание; ЧПУ; предприятия.

Как цитировать:

Гусев С.С., Макаров В.В. Анализ систем автоматического проектирования // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, №1. С. 63–74.

DOI <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624783>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624783>

Original Study Article

Analysis of computer-aided manufacturing systems

Sergey S. Gusev¹, Vadim V. Makarov²

¹ Rostelecom, Moscow, Russian Federation;

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Science of the RAS, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Process of design and development of a controlling program starts after the conclusion of the previous stage of the product life cycle and it begins with the work of an engineering center. At this stage, development of new design solutions takes place and technical requirements specification for the developed product is approved with the customer.

AIM: Process of design and development of a controlling program starting after the conclusion of the previous stage of the product life cycle and beginning with the work of an engineering center.

METHODS: Based on that, the drawing of the product including technical requirements is prepared. Then, generally, this drawing is handed over to the department of process engineers-programmers where the design and development of the process control for the product takes place. As a rule of thumb, at this stage, a process engineer seeks advice from a drawing developer to obtain a full information about the product in order to eliminate any mistakes. There are possible cases where at this moment the drawing is given back to the engineering department due to impossibility of product manufacturing caused by lack of manufacturing abilities or poor design solutions making describing of manufacturing technology impossible.

RESULTS: The study result is the fact that the next stage that follows obtaining the technical requirements specification is development of technological process. The technological process should be formulated properly in terms of technology in accordance with internal enterprise standards (each enterprise can have own standards but the formulation structure is unite) and be sufficiently informative for the sake of exclusion of high chances of rejects during manufacturing. As the statistics shows, many enterprises suffer from high reject rate caused by improper behavior of CNC operators because of disappointments to the technological process.

CONCLUSIONS: Based on results of metalworking simulation, the method aimed to optimization of the strategy of machining high-speed metalworking at development of a controlling program has been formulated.

Keywords: controlling program; engineering center; technological process; technical requirements specification; CNC; enterprises.

To cite this article:

Gusev SS, Makarov VV. Analysis of computer-aided manufacturing systems. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(1):63–74.

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-624783>

Received: 18.12.2023

Accepted: 01.02.2024

Published online: 30.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

После получения технического задания (ТЗ) следующим пунктом идёт разработка технологического процесса (ТП). ТП должен быть составлен технически грамотно в соответствии с внутренними стандартами предприятия (у каждого могут быть свои, но структура составления одна) на карте эскизов (рис. 1) и быть достаточно информативным хотя бы для того, чтобы исключить высокую вероятность брака в ходе изготовления. Как показывает статистика, на многих предприятиях подавляющий процент брака, появляется вследствие халатного отношения операторов станков с ЧПУ из-за отклонений от ТП.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является процесс проектирования и разработки управляющей программы, который начинается после того, как был осуществлён предыдущий этап жизненного цикла изделия, и начинается он с работы конструкторского бюро.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ТП составляется на различных форматках (в соответствии с ГОСТ 3.1105-84 [1]), содержащих в себе подробную информацию о базировании и креплении заготовки (детали) на координатном столе станка с ЧПУ или в патроне шпинделя между техническими установками. Дополнительно указываются линейные, диаметральные размеры,

шероховатости и прочее в зависимости от требований. Жирной линией выделяются контуры, которые подвергнутся механической обработке на станке.

Далее следует непосредственная работа в САПР. В модуле CAD разрабатывается электронный чертёж изделия (рис. 2) путём работы с геометрическими параметрами, построение может быть выполнено с помощью других САПР, главное, чтобы файл был сохранён в одном формате. Затем получают твердотельную 3D-модель изделия с помощью различных инструментов интерфейса (рис. 3).

После того, как 3D-модель детали построена, осуществляется работа с помощью модуля САМ. Проводя работу в нем, технолог-программист определяет основные и вспомогательные поверхности и геометрические элементы разрабатываемого изделия для последующего составления ТП (где осуществляется выбор стратегий обработки и настройка режимов для инструментов). Система автоматически в зависимости от установок вычисляет траекторию перемещений инструмента (рис. 4).

После настройки параметров обработки конкретного участка детали в САМ системе проводятся визуальный анализ возникших траекторий (рис. 5) и моделирование (верификация) механической обработки (рис. 6). Программист имеет возможность легко исправить возникшие ошибки, которые могут быть обнаружены на этом этапе. Достаточно вернуться к предыдущему этапу.

Завершающим результатом работы в САПР является получение управляющей программы (УП). Такой код создаётся с помощью постпроцессора, который преобразует УП под требуемые характеристики конечного станка с ЧПУ.

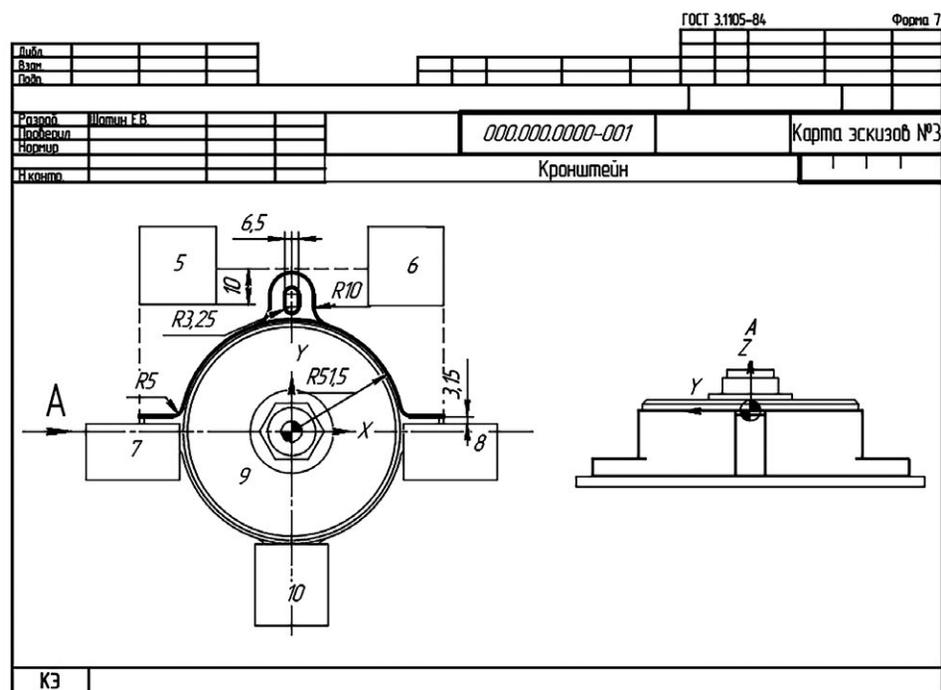


Рис. 1. Пример карты эскизов.

Fig. 1. An example of a sketch chart.

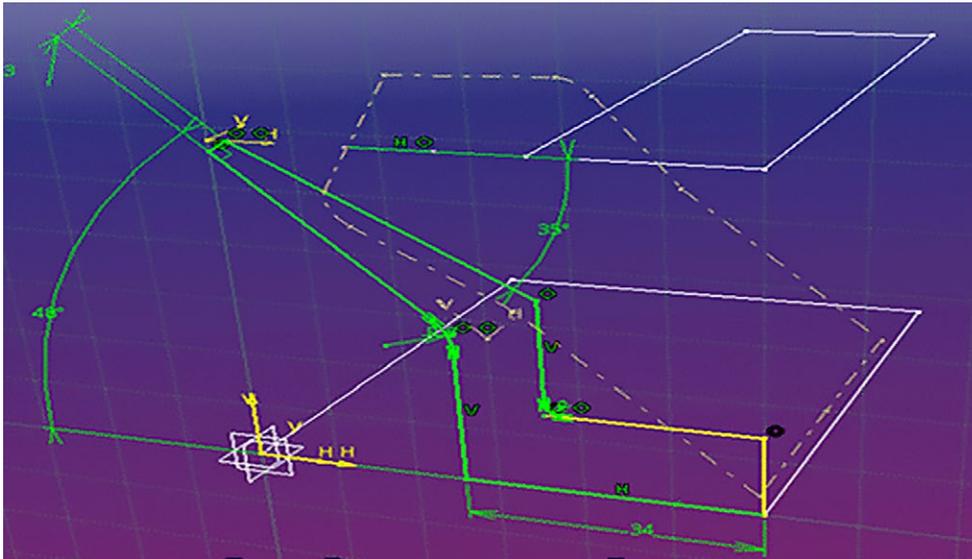


Рис. 2. Построение геометрии в электронном чертеже.
Fig. 2. Geometry building in an electronic drawing.

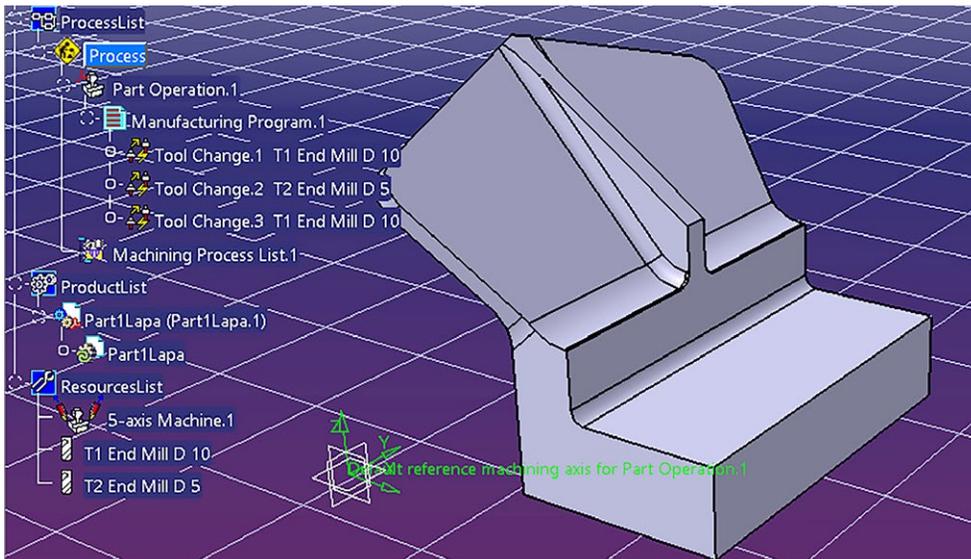


Рис. 3. Построение 3D-модели.
Fig. 3. The 3D model building.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Система автоматизированного проектирования (САПР) специализированное программное обеспечение, состоящее из различных модулей, наличие которых позволяет проводить работы по разработке цифровых чертежей и твердотельных 3D-моделей разной сложности, а также проводить разработку конструкторской и технологической документации в различных отраслях промышленности.

В некоторых САПР также используется модуль CAE, функциональные возможности которого нужны

для проведения инженерного анализа по различным параметрам [2].

В рамках ЖЦ изделий данные системы решают различные задачи, направленные на автоматизацию работ, выполняющихся на стадии проектирования и подготовки производства [3].

Основной целью применения САПР является повышение эффективности труда человека, куда входят работы направленные на:

- сокращение трудоёмкости процесса по проектированию изделий и планированию производства;
- сокращение общих сроков на проектирование изделий;

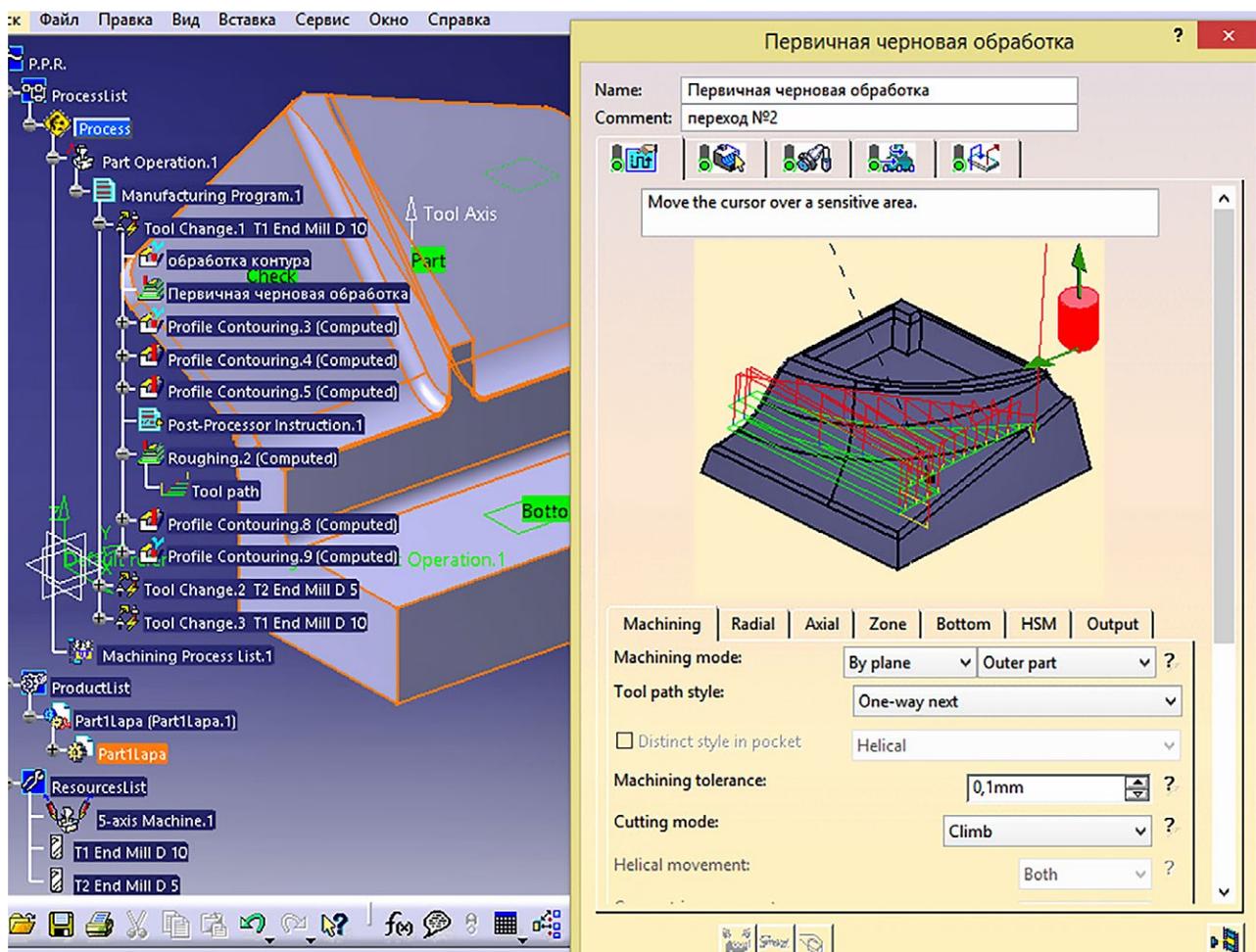


Рис. 4. Пример настройки параметров обработки.
Fig. 4. An example of processing parameters setting-up.

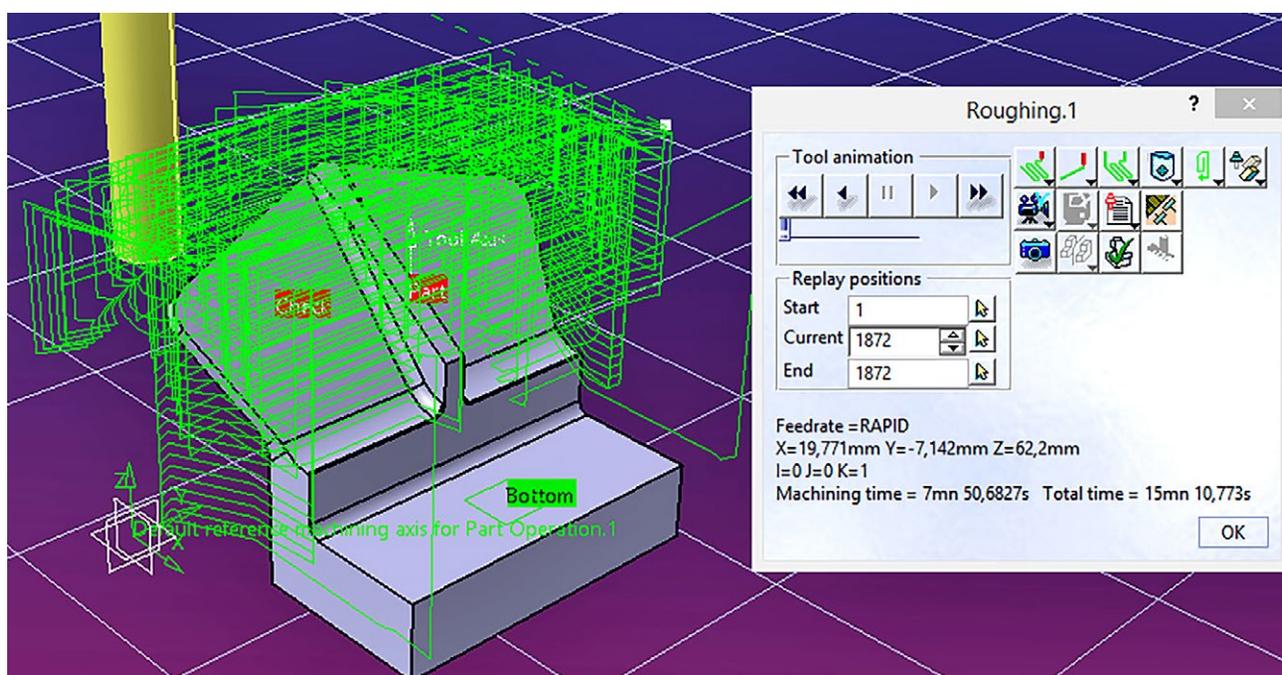


Рис. 5. Анализ траектории перемещения инструмента.
Fig. 5. Analysis of the tool motion path.

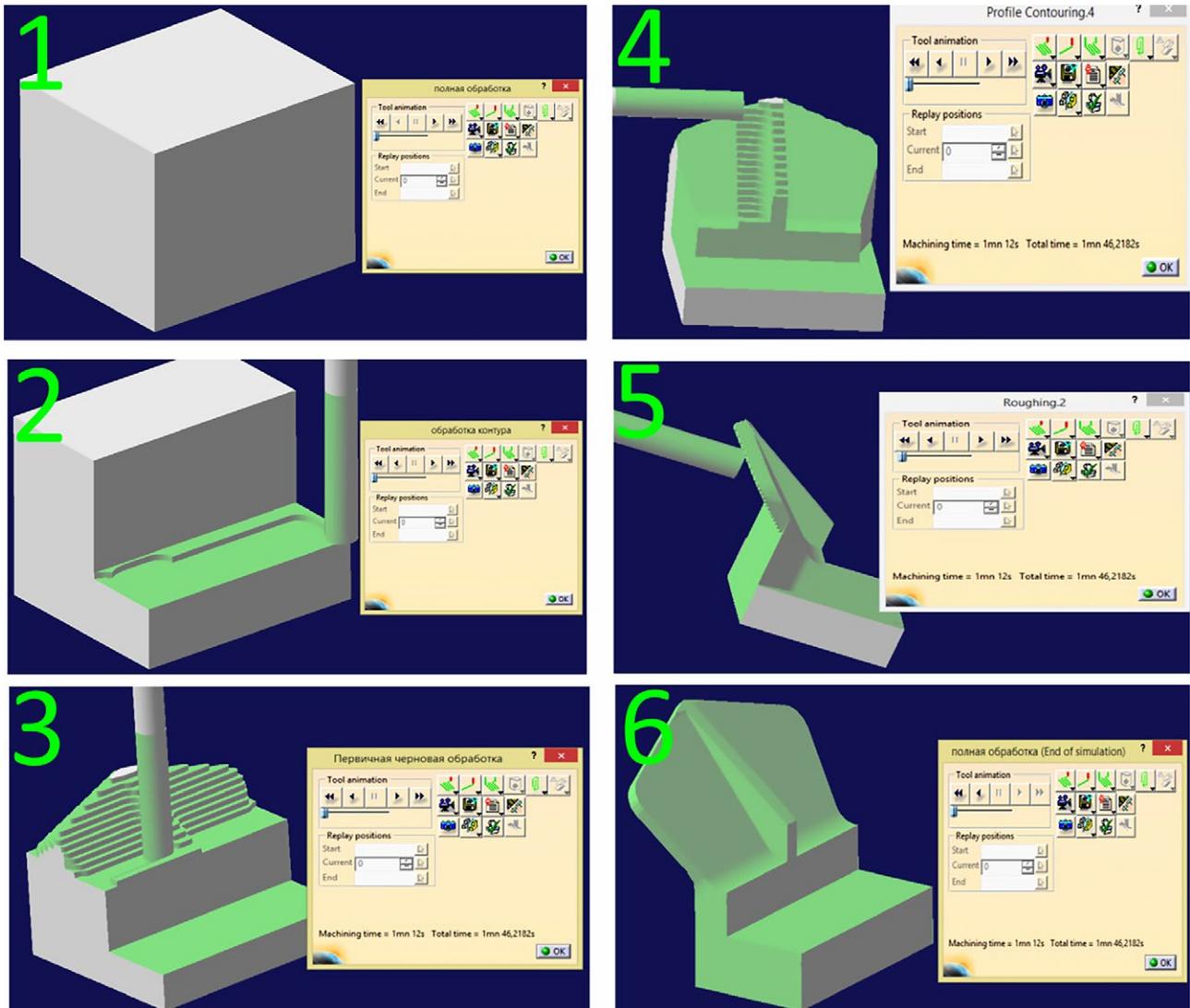


Рис. 6. Моделирование механической обработки.
Fig. 6. Simulation of machine processing.

- сокращение себестоимости проектирования и изготовления изделий, а также уменьшение затрат на эксплуатацию оборудования на производстве;
- повышение качества конечного продукта и контроль технико-экономического уровня результатов проектирования;
- сокращение затрат, направленных на проведение натурных испытаний и моделирование различных процессов, посвящённых инженерному анализу.

Достижение этих целей обеспечивается путём использования технологии параллельного проектирования, смысл которой заключается в проведении различных этапов работ одновременно, а не последовательно, что позволяет ускорить цикл разработки некоторого продукта.

Унификация, т.е. приведение к единой системе проектных решений и процессов проектирования, позволяет повторно использовать ранее разработанные проектные

решения и результаты стратегического проектирования, а также проводить замену натуральных испытаний на математическое моделирование (инженерный анализ) для различных процессов.

Довольно часто выбор систем автоматизированного проектирования для дальнейшей деятельности обусловлен следующими критериями:

1. Важна степень распространённости САПР.

В некоторой степени распространение ПО влияет на простоту заключения контракта по предоставлению для предприятия лицензии ПО. Широкое распространение системы также может сказываться на цене поддержки и сопровождении лицензии оперативного устранения некорректной работы программного софта и получения последних модификаций.

2. Удобство работы САПР и её освоения.

Несмотря на то, что многие производители позиционируют свои системы как довольно удобные в плане

взаимодействия, субъективно в них много различий. Если есть возможность выбирать из нескольких вариантов систем, направленных на работу в одной отрасли производства, следует учесть этот параметр и выбрать тот, с которым у сотрудников есть опыт работы, этот пункт переключается с первым пунктом.

3. Совместимость с другими САПР.

Совместимость с другими системами является обязательным пунктом, но если на предприятии есть несколько подразделений, которым приходится обмениваться файлами, включающими файлы, описывающие движение инструмента при описании механической обработки для станков с ЧПУ, тогда в этом есть некоторый смысл. Для конструкторской документации и подобных документов, как правило, не нужна совместимость. Большинство САПР обладают возможностью использовать для этих целей нейтральные форматы.

На данный момент существует большое множество САПР зарубежного и российского производства, специализирующихся на проектировании изделий в разных отраслях промышленности. Системы можно условно разделить на 3 категории (базовые, средние и тяжёлые). Разделение во многом основано на широте их функциональных возможностей, которое во многом определяется наличием различных модулей, а также специализацией и особенностью архитектуры как ПО [4].

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

После задания заготовки, для деталей в разделе механической обработки, начинается описание её технологии. Первой представлена обработка детали «втулка» для 2-х координатного станка, перед началом можно заранее создать комплект инструментария для проведения разных участков детали, но предпочтительно создавать их непосредственно во время работы [5].

Для тела вращения целесообразней начать обработку с точения торца и грубого точения внешнего контура. Необходимо настроить параметры обработки, включая рассчитанные режимы и др., а также указать элементы, принадлежащие детали, и заготовки для того, чтобы САПР корректно провела расчёт траектории инструмента. После грубого точения аналогично необходимо смоделировать чистовую обработку контура с 1 проходом по контуру и смоделировать результат (рис. 7).

После описания чернового точения проводится чистовая обработка контура втулки с другими режимами. Следом идёт задание проточки канавок, после описания исполнения одной следующие воспроизводятся путём копирования по длине детали [6] (рис. 8).

Завершающим переходом обработки данной детали является проведение операции глубокого сверления и растачивания центрального отверстия втулки (рис. 9).

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПО ОПТИМИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ

Далее рассматривается моделирование [7] обработки фрезерования деталей «кронштейн» и «корпус». Описание обработки следует начать с обработки основных поверхностей, переходя к вспомогательным.

Обработка детали кронштейн проведена в двух вариациях:

1. Рекомендованные параметры резания металла без использования уникальных подходов к стратегии фрезерования.
2. Изменённые параметры резания, реализована трохоидальное фрезерование (часть в технологии HSM).

Основное отличие обработки приходится на исполнения фрезерования карманов и отверстий детали. Если использовать простые стратегии для фрезерования инструмента потребуются провести больше переходов для получения качественной обработки поверхности детали.

Первым общим шагом в технологиях обработки идёт попутное черновое и чистовое фрезерование верхней половины детали. После проведения контурного фрезерования идёт черновое и чистовое фрезерование кармана и отверстия. Начиная с этого момента технологии разделяются по исполнению.

Если использовать классическое попутное фрезерование (рис. 10 слева) (фрезой $\varnothing 5$ мм в этом случае), при черновой обработке глубина погружения фрезы не должна превышать $1 \times D$, а врезание в металл режущей кромки — более чем на 50% от диаметра фрезы [8]. Данные режимы не следует превышать, так как это повышает динамическую ударную нагрузку на инструмент, что негативно сказывается на инструменте и качестве резания. Притом коэффициент контакта режущей кромки с зоной резания вибрирует очень сильно от 50 до 100%, где 100% является вся поверхность режущей кромки при 180° , чем выше этот коэффициент, тем больше нагрузка на режущую кромку, что ведёт к повышенному износу кромки.

С учётом этих рекомендаций, настроена технология для первого варианта исполнения обработки.

Вариант № 2 (рис. 10 справа) включает в себя исполнение обработки путём высокоскоростного фрезерования (HSM), для его реализации следует следить, чтобы коэффициент a_e принимал значения не более 10%, в данном случае используется значение 6–10%, что означает, что инструмент с каждым проходом врезается на глубину не более 0,5 мм (от диаметра 5 мм). Благодаря таким показателям, при построении оптимальных траекторий

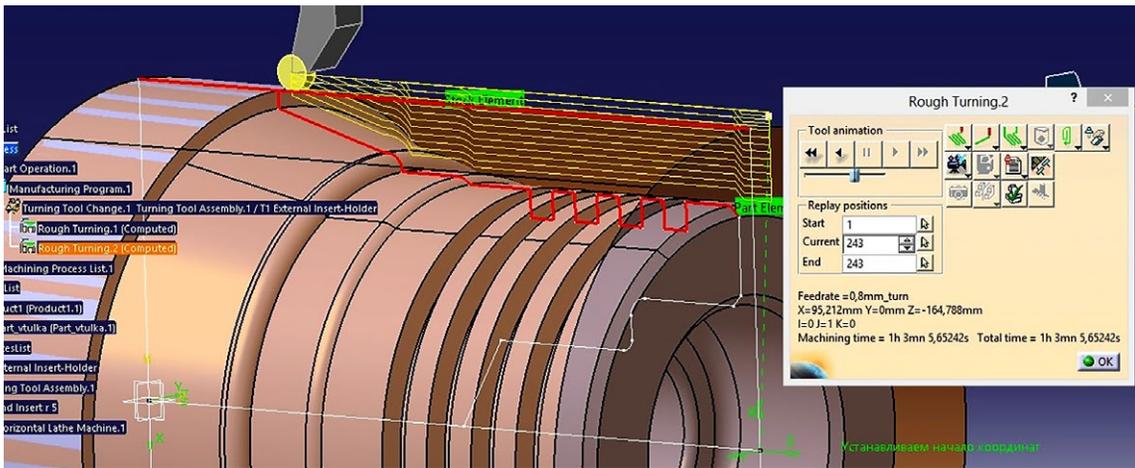


Рис. 7. Настройка точения контура.
Fig. 7. Profile turning setting-up.

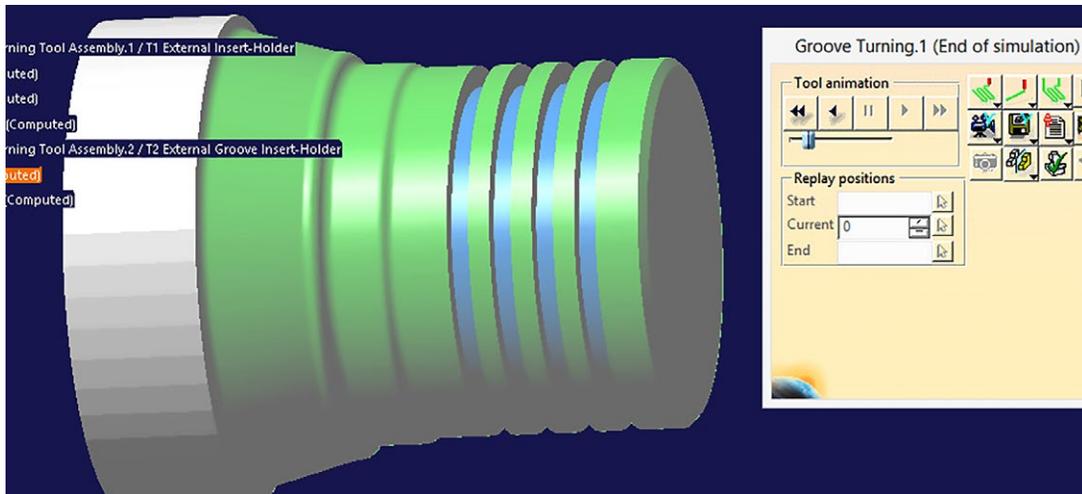


Рис. 8. Симуляция точения внешнего контура.
Fig. 8. Simulation of outer profile turning.

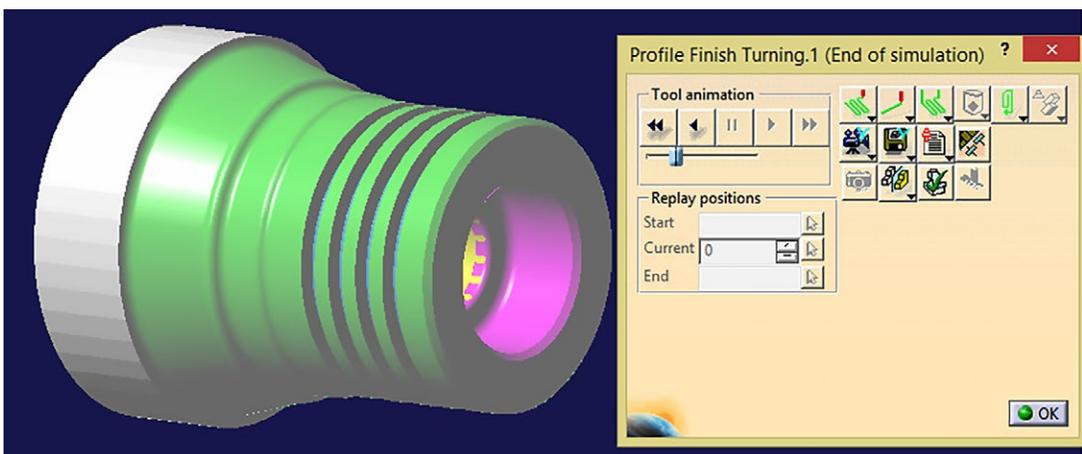


Рис. 9. Конечный результат моделирования.
Fig. 9. Result of the simulation.

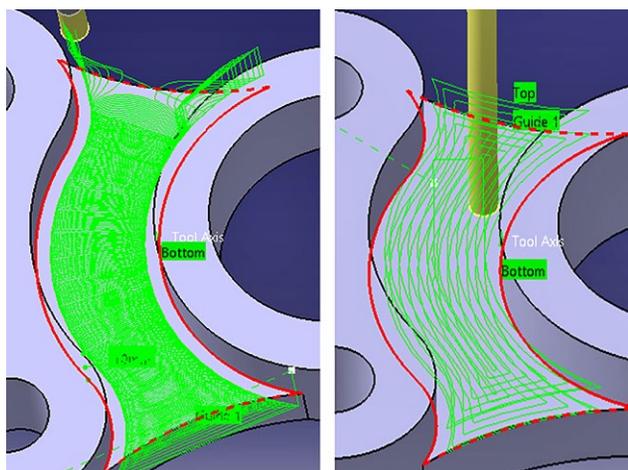


Рис. 10. Фрезерование кармана при обычных режимах (справа) и по HSM технологии (слева).
Fig. 10. Pocket milling with ordinary modes (at right) and with the HSM technology (at left).

движения (по спирали или трохоидам) можно использовать более высокую скорость резания без повышения ударных нагрузок [9].

Использование такого маленького значения этого коэффициента позволяет провести черновое фрезерование на полную глубину паза (10 мм), с наименьшей осевой и радиальной нагрузкой на инструмент, что повышает его стабильность. Также использование всей длины режущей

кромки равномерно её нагружает, обеспечивая равномерный более низкий износ. На рис. 10 представлены траектории каждого из подходов к фрезерованию кармана.

Далее проводится чистовое фрезерование данного участка, после чего — фрезерование отверстия, с аналогичным разделением технологии, где при высокоскоростном фрезеровании осуществляется расфрезеровка отверстия от центра по спирали (рис. 11 слева), и обычном фрезеровании по окружности.

После проведения этих переходов проводится технический останов для смены крепления заготовки. Затем проводится полная обработка нижней части кронштейна с исполнением оставшихся боковых карманов (рис. 12) с аналогичным разделением подходов к технологии обработки детали и других поверхностей.

По результату параллельного моделирования обработки детали в двух вариациях с последующим получением G-кода язык ISO-7bit в виде двух УП (и сбора статистики с помощью редактора УП) удалось добиться следующего.

Правильное использование подхода трохоидального и высокоскоростного фрезерования позволило уменьшить динамическое и тепловое воздействие на режущие кромки фрезы и обрабатываемую поверхность. Это позволило сразу провести получистовую обработку карманов детали без существенного снижения качества готовой поверхности и повышения ударных нагрузок.

Время полной обработки детали сокращено примерно на 26% (как видно из табл. 1), в сравнении с классической

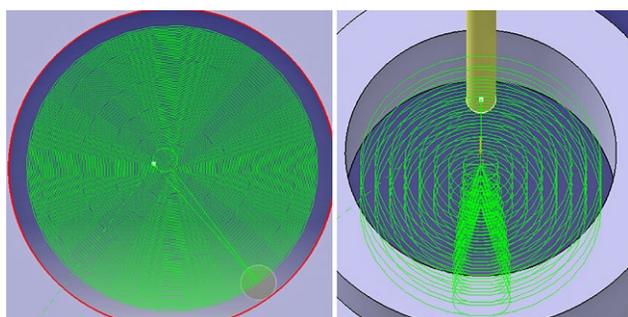


Рис. 11. Фрезеровка отверстий по двум технологиям.
Fig. 11. Hole milling with the two technologies.

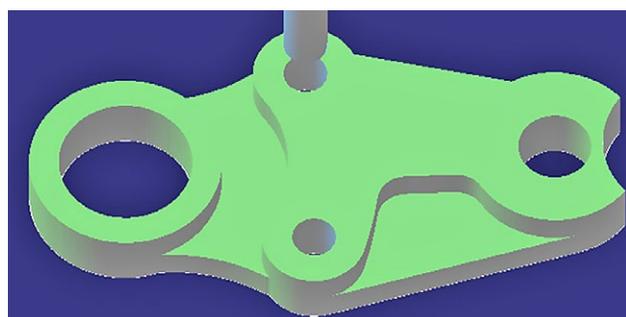


Рис. 12. Конечный результат моделирования.
Fig. 12. Result of the simulation.

Таблица 1. Статистика по технологиям

Table 1. Milling technology statistics

Кинематика станка	Трёхосевая	
	HSM	обычный
Тип технологии фрезерования	HSM	обычный
Машинное время	1:05:09	1:27:37
Время обработки	1:02:45	1:25:54
Быстрое перемещение	0:02:03	0:01:23
Полная длина траектории инструмента, мм	53935,5937	23094,1791
Длина рабочей подачи, мм	51878,282	21705,5164
Длина холостого хода, мм	2057,3118	1388,6627

обработкой детали (доп. операции и другая стратегия) при других режимах и траекториях [10]. Можно добиться ещё более высоких показателей сокращения времени при изменении диаметра инструмента, учитывая тип материала, геометрию детали и другие факторы. В масштабах серийного производства это позволит в некоторых случаях снизить экономические затраты и повысить выработку станка.

РАССМОТРЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

Для проведения более качественной оценки эффективности использования подходов HSM дополнительно представлена металлообработка другой детали из сплава алюминия, обработка которой должна осуществляться на станке с многоосевой кинематикой (3+2). Модель рассматриваемой детали типа «корпус» представлена на рис. 13.

Подготовка для описания технологии обработки этого изделия соответствует двум предыдущим (втулке и кронштейну), совершается переход внутри проекта в раздел, отвечающий за механическую обработку, и задаются инструменты, необходимые для её выполнения.

Общая стратегия включает в себя черновую обработку, формирующую внешний контур детали, и последующее фрезерование голубого кармана с последующим фрезерованием центрального паза и черновых, и чистовых проходов по вспомогательным поверхностям. Первое, на что стоит обратить внимание, это на то, какую стратегию использовать для обработки внешнего контура.

Так как стартовая заготовка имеет форму прямоугольного параллелепипеда, при классическом подходе к фрезерованию (с учётом режимов) необходимо пустить весь металл в стружку, что не всегда оправдано. Данная стратегия выделяется тем, что избавляет технолога-программиста от необходимости проводить технологический останов для удаления лишних кусков металла после обработки, на рис. 14 показана моделируемая траектория.

Особенности реализации технологического перехода:

1. Для снижения динамической нагрузки на инструмент радиальная глубина врезания взята 40% от диаметра инструмента, вместо 50%. Так как используемая фреза имеет очень большой вылет из патрона, необходимо следить за радиальной нагрузкой. Обработка проводилась фрезой с диаметром 16 мм и вылетом не менее 100 мм, это обусловлено глубиной кармана и геометрией изделия в целом.
2. Между проходами дополнительно добавлены шаги доработки с интервалом в 2 мм, это позволяет сделать черновое фрезерование менее грубым, так

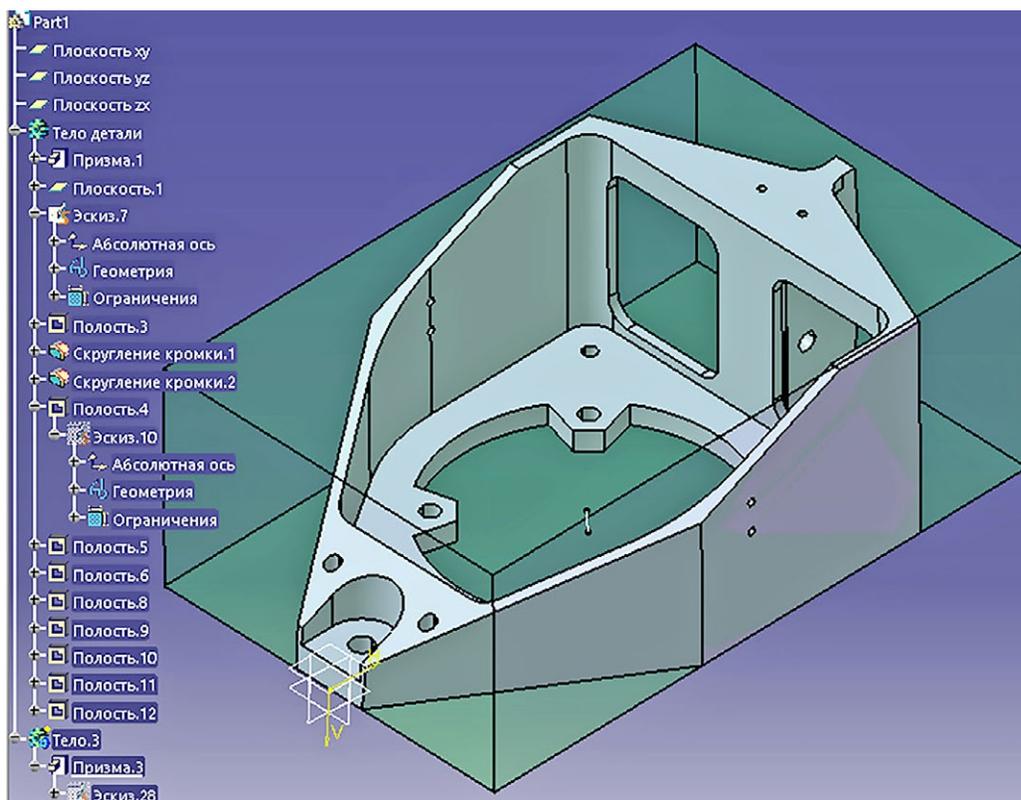


Рис. 13. Твердотельная модель детали «корпус».

Fig. 13. The solid model of the "body" detail.

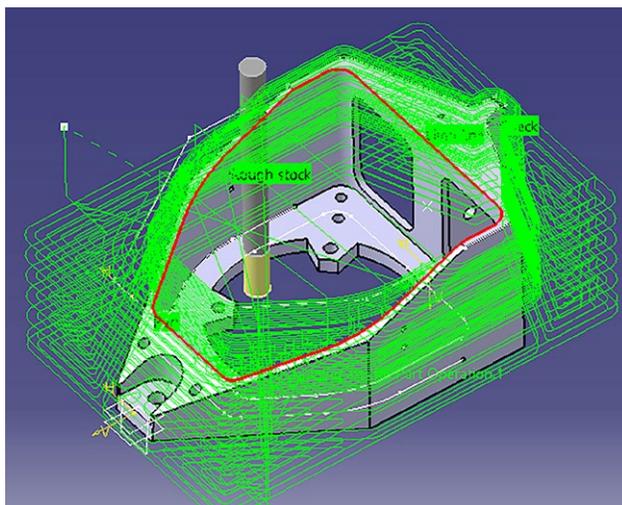


Рис. 14. Внешняя черновая контурная обработка.
Fig. 14. External rough profile machining.

как на вспомогательной наклонной поверхности не будет очень высоких ступенек оставшегося металла, что в свою очередь упрощает последующую до-работку этой поверхности.

Несмотря на то, что сплав алюминия обладает меньшей твёрдостью, глубина фрезерования взята не больше 1 диаметра инструмента, это снизит негативное воздействие на инструмент, в первую очередь, это уменьшит вибрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам моделирования металлообработки изделий была сформулирована методика, направленная на оптимизацию стратегии механической высокоскоростной металлообработки при разработке управляющей программы:

Пункт 1. Анализ технологических особенностей детали.

1.1. Разделение детали на основные и вспомогательные поверхности. Выбор этих элементов непосредственно влияет на последовательность технологических переходов при описании технологии обработки, если не учесть последовательность есть риск потерять время обработки на некоторых операциях при смене инструмента одного на другой. Некоторые технологические переходы могут быть выполнены не качественно или привести к поломке инструмента, в случае, если его траектория проходит участки, где ещё не убран металл.

1.2. Выбор оптимального способа крепления заготовки на столе станка. Осуществить базирование детали без вспомогательных элементов, которые могут перекрывать поверхности, подвергающиеся обработке, если станок и геометрия детали позволяют. Это обеспечит экономию времени на технических остановах.

Пункт 2. Выбор оптимального комплекта металлорежущего инструмента.

2.1. Характеристики инструмента должны обеспечить максимально допустимую технологическую эффективность. Использование каждого инструмента должно быть оправдано, если стоит выбор между 2 инструментами, следует выбрать тот, с помощью которого можно сделать максимальное количество технологических переходов.

2.2. Подобрать оптимальные режимы резания, соответствующие требованиям используемой стратегии для обработки материала. Напрямую влияет на качество детали и скорость исполнения УП.

Пункт 3. Моделирование технологичной стратегии механической обработки.

3.1. При генерации очень сложных траекторий движения инструмента проверять их на избыточность. При некоторых конфигурациях могут быть сгенерированы холостые ходы движения инструмента. Если время разработки позволяет, следует попробовать реализовать ту же технологию обработки участка, но с помощью детальной настройки или даже другого инструмента интерфейса САПР. В случае успеха можно немного сократить время обработки определённого участка.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.С. Гусев — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; В.В. Макаров — редактирование текста рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.S. Gusev — search for publications, writing the text of the manuscript; V.V. Makarov — editing the text of the manuscript. Authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE international criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С.Н., Мартинов Г.М. Концепция построения базовой системы числового программного управления мехатронными объектами // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011 № 2 С. 21–27.
2. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И. Современные тенденции в области числового программного управления станочными комплексами // СТИН. 2010 № 7 С. 7–10.
3. Григорьев С.Н., Андреев А.Г., Мартинов Г.М. Перспективы развития кроссплатформенных компьютерных систем числового программного управления высокотехнологичного оборудования // Автоматизация в промышленности. 2011 № 5 С. 3–8.
4. Мартинова Л.И., Мартинов Г.М. Организация межмодульного взаимодействия в распределенных системах ЧПУ. Модели и алгоритмы реализации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010 № 11 С. 50–55.
5. Мартинов Г.М., Нежметдинов Р.А., Козак Н.В., Пушков Р.Л. Прикладные решения в области управления электроавтоматикой станков с ЧПУ класса PCNC // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011 № 4 С. 48–53.
6. Мартинов Г.М., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л. Принцип построения распределенной системы ЧПУ с открытой модульной архитектурой // Вестник МГТУ «Стакин». 2010 № 4 (12). С. 116–122.
7. Мартинов Г.М., Козак Н.В., Нежметдинов Р. А., Любимов А.Б. Специфика построения панелей управления систем ЧПУ по типу универсальных программно-аппаратных компонентов // Автоматизация и современные технологии. 2010 № 7 С. 34–40.
8. Нежметдинов Р.А., Соколов С.В., Обухов А.И., Григорьев А.С. Расширение функциональных возможностей систем ЧПУ для управления механо-лазерной обработкой // Автоматизация в промышленности. 2011 № 5 С. 49–53.
9. Мартинова Л.И., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л. Реализация открытости управления электроавтоматикой станков в системе ЧПУ класса PCNC // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011 № 2 С. 11–16.
10. Мартинов Г.М., Обухов А.И., Пушков Р.Л. Принцип построения универсального интерпретатора языка программирования высокого уровня для систем ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010 № 6 С. 42–50.

REFERENCES

1. Grigor'ev SN, Martinov GM. The concept of building a basic numerical control system for mechatronic objects. *Informacionnyye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*. 2011;2:21–27.
2. Martinov GM, Martinova LI. Modern trends in the field of numerical control of machine tools. *STIN*. 2010;7:7–10.
3. Grigor'ev SN, Andreev AG, Martinov GM. Prospects for the development of cross-platform computer systems for numerical control of high-tech equipment. *Avtomatizaciya v promyshlennosti*. 2011;5:3–8.
4. Martinova LI, Martinov GM. Organization of intermodule interaction in distributed CNC systems. Models and algorithms of implementation. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*. 2010;11:50–55.
5. Martinov GM, Nezhmetdinov RA, Kozak NV, Pushkov RL. Applied solutions in the field of control of electroautomatics of CNC machines of the PCNC class. *Promyshlennyye ASU i kontroллery*. 2011;4:48–53.
6. Martinov GM, Kozak NV, Nezhmetdinov RA, Pushkov RL. The principle of building a distributed CNC system with an open modular architecture. *Vestnik MGТУ "Stankin"*. 2010;4(12): 116–122.
7. Martinov GM, Kozak NV, Nezhmetdinov RA, Lyubimov AB. The specifics of building control panels of CNC systems by the type of universal hardware and software components. *Avtomatizaciya i sovremennyye tekhnologii*. 2010;7:34–40.
8. Nezhmetdinov RA, Sokolov SV, Obukhov AI, Grigor'ev AS. Expanding the functionality of CNC systems for controlling mechanical laser processing. *Avtomatizaciya v promyshlennosti*. 2011;5:49–53.
9. Martinova LI, Kozak NV, Nezhmetdinov RA, Pushkov RL. Implementation of openness of control of electroautomatics of machine tools in the PCNC class CNC system. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. 2011;2:11–16.
10. Martinov GM, Obukhov AI, Pushkov RL. The principle of building a universal high-level programming language interpreter for CNC systems. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*. 2010;6:42–50.

ОБ АВТОРАХ

* Гусев Сергей Сергеевич,

инженер-энергетик отдела энергетиков,
адрес: Российская Федерация, 123298, Москва,
ул. 3-я Хорошевская, д. 17, корп. 1;
ORCID: 0000-0002-6070-9295;
eLibrary SPIN: 8934-1568;
e-mail: gs-serg@mail.ru

Макаров Вадим Владимирович, доцент, канд. техн. наук,
старший научный сотрудник лаборатория идентификации
систем управления;
ORCID: 0000-0003-4874-5418;
eLibrary SPIN: 5787-3977;
e-mail: makfone@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

* Sergey S. Gusev,

Energy Engineer of the Energy Department, Candidate for a Degree;
address: 17 bldg. 1 3rd Khoroshevskaya street, 123298 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-6070-9295;
eLibrary SPIN: 8934-1568;
e-mail: gs-serg@mail.ru

Vadim V. Makarov, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),
Senior Researcher of the Laboratory of Identification of Control
Systems;
ORCID: 0000-0003-4874-5418;
eLibrary SPIN: 5787-3977;
e-mail: makfone@mail.ru