



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Модуль интеллектуальной обработки САМ-системы

Олег Михалев<sup>а, \*</sup>, Александр Янюшкин<sup>б</sup>

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр-т Московский, д. 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1223-486X>, [Mih\\_tm@mail.ru](mailto:Mih_tm@mail.ru), <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>, [yanyushkinas@mail.ru](mailto:yanyushkinas@mail.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91

*История статьи:*

Поступила: 01 марта 2019  
 Рецензирование: 23 июля 2019  
 Принята к печати: 15 августа 2019  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2019

*Ключевые слова:*

Интеллектуальная обработка  
 САД/САМ-система  
 Управляющая программа  
 Проектирование обработки  
 Обработка на станках с ЧПУ

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ракетно-космическая отрасль является одной из самых серьезных отраслей промышленности. Она непрерывно ставит все более сложные задачи, решение которых возможно только с появлением новых и уникальных технологий. Сегодня, как и прежде, перед ракетно-космической отраслью стоят сверхамбициозные задачи как по совершенствованию самих космических аппаратов, так и по удешевлению их производства. Стоимость одного запуска космического корабля исчисляется миллиардами рублей, что резко тормозит развитие отрасли и поэтому требует максимального внимания. Высокая стоимость обработки деталей ракетно-космической отрасли обусловлена множеством сложностей, заключающихся в усложнении конструкции деталей, в использовании суперсплавов, способных работать в экстремальных условиях высоких температур и нагрузок, а потому и трудно поддающихся обработке, а также и в возросших требованиях к качеству изготовления. В связи с этим сегодня появляются, а также и наиболее остро требуются новые подходы к обработке, которые, в свою очередь, находят отражение в высокой трудоемкости технологического проектирования и огромных сроках производства. **Цель работы:** разработка способа максимального снижения трудоемкости и сроков проектирования эффективной обработки сложных деталей ракетно-космической отрасли. **Методы исследования.** Большие резервы по совершенствованию технологии обработки деталей, а также сокращению сроков производства лежат в области цифровых технологий. Поэтому основным методом исследования является анализ существующих решений в области новых стратегий обработки сложных деталей и автоматизации их проектирования, нахождение узких мест в современных САМ-системах (*Computer-Aided Manufacturing*), а также разбор успешных кейсов по автоматизации задач проектирования эффективной обработки особенно деталей из материалов, трудно поддающихся обработке. **Результаты и обсуждение.** Анализ вопроса показал, что при проектировании обработки в САМ-системе отсутствуют тесные связи управляющей программы с технологией, станком, инструментом и деталью. Эти связи по-прежнему реализуются человеком и напрямую зависят от его опыта, что делает проектирование некачественным, неэффективным и все больше нерентабельным. Автоматизация подобных связей повысит качество проектирования и самой обработки, высвободит человеческие ресурсы из рутинной работы, а также снизит сроки и трудоемкость проектирования, что позитивно скажется на результатах и стоимости производства ракетно-космической и другой техники. Результатом подобной автоматизации является модуль интеллектуальной обработки для САМ-системы. Часть задач, решаемые модулем и реализованные в виде самостоятельных библиотек, уже сегодня успешно зарекомендовали себя и используются на различных предприятиях.

**Для цитирования:** Михалев О.Н., Янюшкин А.С. Модуль интеллектуальной обработки САМ-системы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 28–41. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-28-41.

## Введение

Ракетно-космическая отрасль всегда была и будет одной из самых передовых отраслей промышленности, ее заслуги по покорению космоса демонстрируют безграничные возможности все-

го человечества. В то же время это одна из самых сложных и технологичных отраслей, она аккумулирует все передовые достижения из множества сфер знаний. Ракеты-носители, спутники, международная космическая станция и множество других космических аппаратов представляют собой самые высокотехнологичные изделия, совершенство человеческой мысли на определенный период времени развития общества.

Непрерывный процесс совершенствования космических аппаратов расширяет их возмож-

\*Адрес для переписки

Михалев Олег Николаевич, к.т.н., инженер  
 Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова,  
 пр-т Московский, д. 15,  
 428015, г. Чебоксары, Чувашская Республика, Россия  
 Тел.: +7 (985) 55-333-48, e-mail: [mih\\_tm@mail.ru](mailto:mih_tm@mail.ru)

ности, но вместе с тем повышает их сложность. В современном ракетостроении используются новые материалы, более современные конструкции деталей, к которым предъявляются высокие требования к точности, шероховатости, твердости и другим качественным характеристикам. Такие детали отличаются высокими эксплуатационными свойствами, но вместе с тем и трудностями, связанными с их обработкой.

На фоне новых научных открытий и совершенствований космической техники перед ракетно-космической отраслью ставятся новые амбициозные планы по созданию сверхтяжелой ракеты, ракеты с многоразовой первой ступенью и полностью многоразовой возвращаемой ракеты, многоразового беспилотного космического летательного аппарата по реализации лунной программы, а также множество других глобальных проектов. Однако самой главной задачей является удешевление производства космических кораблей и аппаратов. Высокая стоимость ракет не дает возможности для реализации современных проектов. Для решения данной задачи необходимо значительное совершенствование как технологии производства сложных ракетно-космических деталей, так и процесса технологического проектирования.

Современные производства оснащены станками с ЧПУ, роботизированными ячейками и другим автоматизированным оборудованием, работающим по управляющей программе (УП). Под влиянием усложнения деталей ракетно-космической отрасли разрабатываются новые станки со сложными кинематическими схемами наподобие пятикоординатных токарно-фрезерных станков, позволяющих вести обработку деталей со сложными поверхностями за один установ. Кроме того, станки оснащаются аддитивными технологиями. Программирование подобного оборудования для выпуска деталей со сложными криволинейными поверхностями, требующими переменные оси инструментов во время резания высокой точности и качества, являются непростой задачей, решение которой возможно только с использованием современных САМ-систем, обладающих серьезным математическим обеспечением. Не все САМ-системы могут справиться с данной задачей ввиду сложности математического моделирования подобных процессов обработки.

Добавочную сложность создают свойства обрабатываемых материалов. Кроме новых композиционных материалов, в ракетно-космической отрасли широко используются титановые и жаропрочные сплавы, обладающие уникальными свойствами. Например, титановые сплавы имеют небольшую плотность, но высокую удельную прочность и высокую коррозионную стойкость, а жаропрочные сплавы обладают особо высокими свойствами по жаропрочности и жаростойкости, они способны выдерживать механические нагрузки при высоких температурах в течение продолжительного времени. Такие способности металлического материала нашли широкое применение в ракетно-космической отрасли. Примером могут служить детали, представленные на рис. 1. Однако из-за этих свойств материалов, их химического состава и легирующих элементов данные материалы плохо поддаются механической обработке.



Рис. 1. Детали ракетно-космической отрасли

Fig. 1. Details of the rocket and space industry

При обработке таких материалов в силу их низкой теплопроводности затруднен отвод тепла из зоны резания, таким образом, тепловая нагрузка ложится на инструмент, что приводит к его быстрому изнашиванию. Кроме того, создаются большие силы резания, происходит налипание частиц материала на инструмент, что дополнительно способствует повышению силы трения и также быстрому износу инструмента. В итоге традиционные стратегии обработки приводят к снижению режимов резания и производительности обработки, а также к усложнению получения высокого качества обрабатываемых поверхностей.

Для обработки подобных материалов требуется новый подход, необходимо эффективно

использовать инструмент, не перегружать его, чтобы не допускать быстрого износа, но при этом обеспечивать максимальные объемы удаления материала. Это возможно за счет построения максимально сглаженной траектории перемещения инструмента, обеспечения оптимальных режимов резания, равномерной нагрузки на инструмент в любой точке траектории, и все это с учетом определенных условий обработки – конкретного станка, материала, инструмента. Это возможно только с помощью систем автоматизированного проектирования – САМ-систем, так как человек не способен быстро выполнять множество сложных расчетов.

Однако при разработке УП в САМ-системе наблюдается отсутствие ее тесной связи с технологическим процессом, характеристиками станков, инструментов и деталью, организация подобной связи осуществляется силами программиста и полностью зависит от его знаний и опыта. Как следствие, обработка получается не максимально эффективной, так как учесть все вручную довольно сложно.

Необходимо создание специального интеллектуального модуля для САМ-системы, позволяющего учитывать характеристики станка, инструмента, обрабатываемого материала и других характеристик технологической системы при генерации траектории перемещения инструмента. Одной из сложностей является создание математического обеспечения, позволяющего производить расчеты как сложных кривых траектории, так и множество других параметров обработки в целях максимальной производительности и благоприятных условий для резания в любой точке траектории [1, 2].

Если обработка обычных конструкционных материалов не вызывает столько сложностей, то при обработке труднообрабатываемых материалов, таких как нержавеющие, титановые, жаропрочные и другие новейшие сплавы, широко применяемых в ракетно-космической и авиационной промышленности, потребность в подобном интеллектуальном модуле стоит наиболее остро [3].

Отдельной задачей является задача сокращения времени перехода от проектирования к производству новых деталей и изделий. При том, что хотя конструк-

торская и технологическая подготовка и идут с использованием систем автоматизированного проектирования, однако этого становится недостаточным в условиях низких сроков по реализации амбициозных проектов ракетно-космической отрасли, требующих огромного количества новых деталей.

Необходимо совершенствование 3d-моделей деталей, так как они уже сегодня становятся исходной информацией для проектирования технологии и УП. Современная 3d-модель кроме трехмерной геометрии должна нести еще и целый ряд дополнительной информации по ее точности и качеству (рис. 2), благодаря которым система автоматизированно будет способна распознавать элементы детали, подбирать инструменты, рассчитывать режимы резания и обрабатывать множество других данных. Таким образом, по конструкторской 3d-модели технолог сможет быстро сформировать прогрессивную технологию обработки, а также создать эффективную УП. Ввиду такой тесной работы конструкторско-технологическая подготовка должна вестись в едином цифровом пространстве [4].

Таким образом, между тем как осуществляется сегодня технологическое проектирование и как оно должно осуществляться есть большой разрыв. С учетом резкой необходимости в удешевлении производства ракет, а также возросшей сложности деталей задача по совершенствованию автоматизированного проектирования становится одной из самых важных.

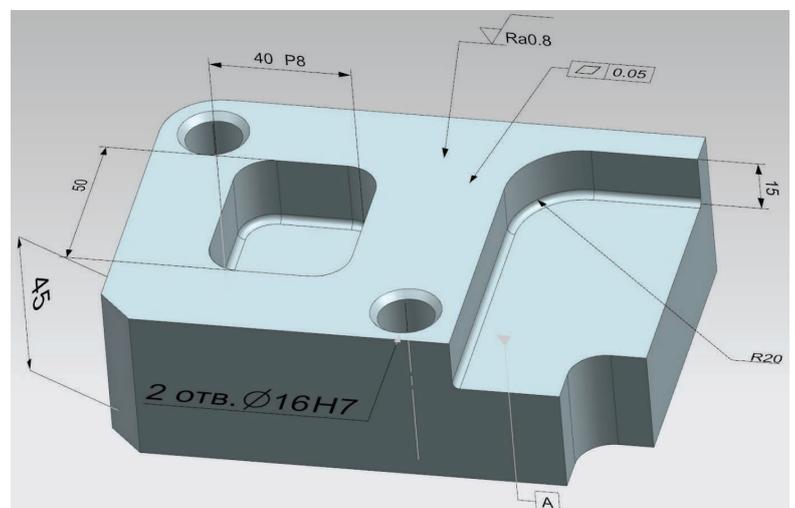


Рис. 2. 3d-модель с параметрами точности элементов

Fig. 2. 3d-model with parameters of elements accuracy

## Методика исследований

Решение задачи интеллектуальной обработки деталей и снижения сроков от чертежа до готовой продукции по большей части лежит в области цифровых технологий.

В настоящее время все больше задач при проектировании УП для станков с ЧПУ решается более автоматизированно, практически у каждой САМ-системы наблюдаются свои инновации в данном направлении.

Анализ CAD/CAM-систем показал, что множество решений лежит в области оцифровывания или цифровизации различных данных, таким образом, появляются библиотеки 3d-моделей различных компонентов технологической системы, интегрированные базы данных всех видов информации и любых форматов, новые динамически подключаемые библиотеки и т. д.

Одним из успешных примеров подобной автоматизации может служить кейс совместной работы MasterCAM и Sandvik Coromant, в ходе которой была интегрирована библиотека инструментов CoroPlus ToolLibrary в систему MasterCAM. Благодаря этому значительно сократилось время на подбор инструментов, а также стало возможным создание любых 3d-сборок инструментов в считанные секунды путем вызова нужных компонентов из библиотеки. Подобная 3d-модель инструмента имеет более точную геометрию, чем упрощенная, созданная вручную по каталогам, впоследствии эта 3d-модель участвует в процессе разработки УП, её симуляции, а также генерации технологической документации и других данных. Еще одним преимуществом данного кейса служит обновление базы данных инструментов, поэтому пропустить появление новых инструментов становится невозможным. MasterCAM же при этом вынужден выпускать новые расчетные модули для работы с современными инструментами, автоматизирующими новые задачи.

Этот кейс показал, что подбор инструментов путем online подборщиков или отдельных offline программ не лучший вариант для разработчиков УП, так как найденного обозначения инструмента недостаточно, так как его нужно занести в САМ-систему, что является двойной работой. Необходимо интегрировать подборщики инструментов в САМ-систему, таким образом, подбор

инструмента будет проходить один раз и более автоматизированно, при этом информация об инструменте может быть использована различными модулями системы для решения сопутствующих задач автоматически без участия человека. Кроме того, данный кейс показал, что совершенствование самой САМ-системы под новые методы обработки новыми инструментами проходит быстрее, как это и произошло с технологией PrimeTurning.

Недостатком этого решения является то, что в базе присутствует только один производитель инструментов. Ввиду этого необходимо интегрировать инструменты и других производителей по подобной схеме. Такую интеграцию новинкой назвать сложно, но в качестве примера оцифровки данных она подходит как проверенное решение.

Кроме оцифровки и переработки данных появляются также и более «продвинутые» возможности в современных CAD/CAM-системах, например, разработка симуляции обработки на станке с большой детализацией процесса с целью контроля спроектированной управляющей программы. Для этого разрабатываются цифровые двойники изделий, механизмов, станков, оборудования и других элементов.

Еще один кейс – распознавание конструктивных элементов 3d-модели детали с автоматической генерацией обработки данных элементов, в том числе с подбором инструментов. Подобная возможность имеется в системе NX (Siemens) и получает все большее распространение в других САМ-системах. Основные принципы данной концепции заложены в работе «Модульной технологии», для ее реализации требуется более масштабный подход, в котором систематизируются и классифицируются все конструктивные элементы (КЭ) деталей [5]. Так, все САМ-системы будут использовать единые определения КЭ и развиваться в одном направлении.

Модульная технология накладывает определенные требования к созданию 3d-моделей, конструкторы должны указывать все допуски размеров и расположения КЭ, параметры шероховатости в свойствах элементов 3d-модели. Это добавляет работы для конструкторов по созданию такой подробной 3d-модели деталей, но в дальнейшем она даст намного больший результат, упростив работу множества специали-

стов и исключит повторные работы. Благодаря этому системы автоматизированного проектирования технологической подготовки производства – САРР-системы (Computer-Aided Process Planning), а также и САМ-системы будут использовать эти параметры модели при создании как техпроцессов, так и УП.

На примере системы NX распознавание элементов выглядит следующим образом (рис. 3). Для выбранной детали задаются параметры поиска элементов – это может быть параметр, выбирающий КЭ, расположенные только вдоль оси Z, что полезно при их обработке на трехкоординатном станке, а также возможно множество других фильтров. После этого задается команда поиска элементов, и система находит все элементы, подходящие под фильтр поиска. Дерево элементов (рис. 3) сформировано системой самостоятельно. Выбрав курсором необходимые элементы или все элементы целиком, можно уже задать команду их обработки, для примера выбран элемент «карман». Система, использующая параметры точности и шероховатости, указанные на рис. 2, подберет инструменты и сгенерирует траекторию их перемещения. При этом имеется приоритет видов обработки, всегда предлагается более экономичная обработка в данном конкретном случае. Система хорошо справляется даже с элементами, требующими нескольких инструментов – многопроходной обработки. Сегодня разработка УП происходит подобным образом,

такой метод позитивно сказывается на сроках проектирования, а также подчеркивает актуальность и важность развития данного направления в САМ-системах. Несмотря на хорошие результаты данный способ все же не идеален, так как фильтр нахождения КЭ и множество других решений принимает человек.

Таких кейсов или возможностей автоматизации в САМ-системах становится всё больше и больше, они значительно ускоряют разработку УП, хотя принятие большинства решений все еще остается по-прежнему за человеком [6–11].

Поэтому наибольший интерес на сегодняшний день представляют именно САМ-системы, которые самостоятельно могут принимать большинство решений за человека. Среди успешных кейсов можно отметить модуль для высокоэффективной обработки iMachining компании SolidCAM и похожий модуль от Siemens в системе NX. В данных модулях налажена связь между УП и станком, инструментом, обрабатываемым материалом. Таким образом, используются ресурсы с максимальной отдачей, например, инструмент работает по возможности всей рабочей частью фрезы, что продлевает его стойкость и увеличивает производительность, а станок работает на максимальных, но благоприятных нагрузках, что также продлевает его срок службы. Для обработки используются плавные траектории и другие эффективные стратегии. Все это в совокупности ускоряет процесс как разработки

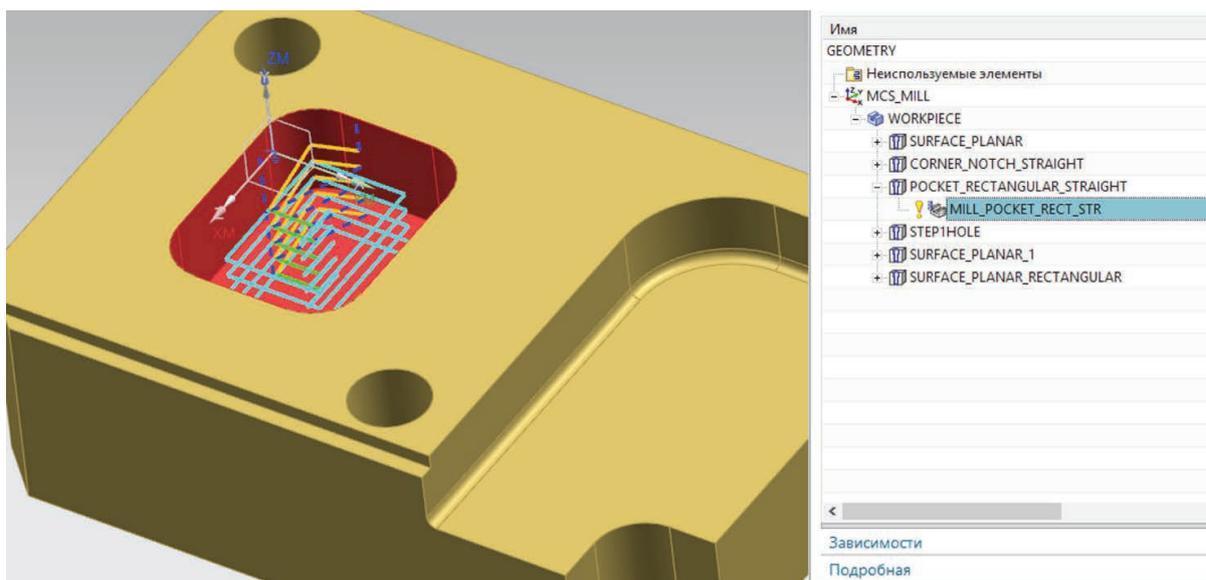


Рис. 3. Распознавание элементов в системе NX

Fig. 3. Recognition of elements in the NX system

УП, так и самой обработки в сравнении с традиционными методами проектирования и обработки детали. Рассмотрим подобный модуль для высокоэффективной обработки более подробно.

Все станки с ЧПУ обладают различными техническими характеристиками, динамическими и статическими свойствами, качеством, конструкцией и множеством других параметров. Ввиду данных различий обработка одной и той же детали на каждом станке происходит по-разному – с различными режимами, стратегиями и другими показателями обработки, которые указываются в САМ-системе на этапе программирования УП.

В большинстве модулей для разработки управляющих программ в САМ-системе все показатели обработки устанавливаются на усмотрение технолога-программиста, что чаще всего является неоптимально. В момент обработки происходит либо перегрузка станка и инструмента, что ведет к снижению их срока службы, либо неиспользование всех их возможностей, что, в свою очередь, ведет к низкой производительности. Как видно, и тот и другой случай являются неоптимальными, а найти ту золотую середину, когда обработка будет происходить максимально быстро и при этом обеспечивать долгий срок службы станка и инструмента, вручную довольно сложно, практически невозможно и нерентабельно.

Этот процесс и подвергся автоматизации в модулях для высокоэффективной обработки, в которых в ходе проектирования учитываются все характеристики оборудования, инструмента и обрабатываемого материала. Таким образом, спроектированная обработка будет протекать быстро и в благоприятных условиях без перегрузок, модуль рассчитывает нагрузки и делает их в каждой части траектории одинаковыми. За счет плавности траектории и отсутствия скачков нагрузок будет достигаться и максимальная производительность, необходимое качество обработки, максимальный срок службы станка, а также и максимальная стойкость инструмента, т. е. будет найдена та самая золотая середина.

Все режимы резания модуль рассчитывает самостоятельно с учетом нагрузки на инструмент и станок, причем делает это автоматически. Поэтому УП, созданная в таком модуле, максимально соответствует

конкретному станку, инструменту и обрабатываемому материалу.

Для плавности хода инструмента используются полиморфные спирали (рис. 4), возможно, местами они похожи на трохойды, однако имеют более сложную геометрию, что также сказывается на сложности кода УП. Ручной или полуавтоматизированный расчет траектории в виде данных спиралей и написание по ним УП (рис. 5) потребует много сил и времени, что также является нерентабельным.

Особое значение подобные модули имеют при проектировании обработки труднообрабатываемых материалов, например, титана, аустенитной нержавеющей стали, жаропрочных сплавов, закаленных сталей и многих других [3]. Традиционная обработка с большой глубиной и шириной резания на низких режимах таких материалов вызывает сложности в силу множества причин, а именно высоких сил резания, в том числе и неиспользования всей режущей части инструмента, что сказывается на низкой стойкости и нерациональном использовании инструмента. Применение подобных модулей обработки не только делает обработку труднообрабатываемых материалов более стабильной и производительной, но увеличивает стойкость инструмента, позволяет использовать его эффективно, что всесторонне ведет к экономической выгоде. При этом происходит и снижение трудоемкости самого проектирования обработки деталей.

Реализация различных возможностей или кейсов автоматизации приводит к развитию САМ-систем. Следующим шагом к построению цифрового производства в разрезе САМ-систем

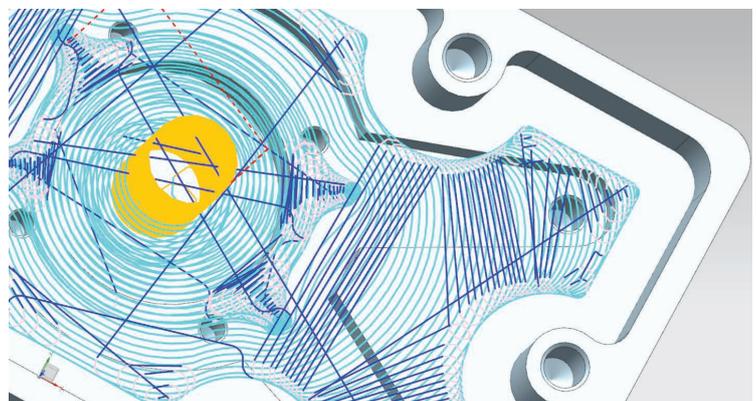


Рис. 4. Плавная траектория модуля iMachining

Fig. 4. Smooth trajectory of the iMachining module

```

N3020 X3.1818 Y2.519 I1.4968 J-.4567 F44.1
N3030 X3.1647 Y2.3711 I.8366 J-.1713
N3040 X3.1715 Y2.2594 I.8884 J-.0025
N3050 X3.1928 Y2.1567 I.8261 J.1181
N3060 X3.2246 Y2.0674 I1.6568 J.5402 F44.9
N3070 X3.2574 Y1.998 I1.2595 J.552
N3080 X3.3396 Y1.8734 I.8714 J.4853
N3090 X3.4433 Y1.7663 I.6573 J.5327
N3100 X3.6481 Y1.6419 I.5016 J.5955 F44.2
N3110 X3.6975 Y1.6236 I.3924 J.9831
N3120 X3.9316 Y1.5849 I.2473 J.767
N3130 X4.1356 Y1.61 I.0033 J.8142
N3140 X4.3064 Y1.677 I-.212 J.7915 F44.3
N3150 X4.4928 Y1.8177 I-.3891 J.7094
N3160 X4.5769 Y1.9198 I-.621 J.5968
N3170 X4.6284 Y2.0067 I-1.3129 J.837
N3180 X4.6621 Y2.0792 I-1.2816 J.6389 F44.9
N3190 X4.7052 Y2.2204 I-.9612 J.3707
N3200 X4.7202 Y2.3192 I-.8979 J.1869
N3210 X4.7006 Y2.5702 I-.7733 J.0658
N3220 X4.6695 Y2.6669 I-1.5037 J-.429 F45.3
N3230 X4.6356 Y2.7437 I-1.2139 J-.4903
    
```

Рис. 5. Управляющая программа модуля iMachining

Fig. 5. The control program of the iMachining module

является получение обратной связи от инструмента и оборудования. Современное оборудование все больше наделяется возможностями для общения как с другими устройствами, так и с человеком, начинает входить в мир интернет-вещей. Для этого в оборудовании устанавливаются различные датчики, способные собирать всевозможные данные и анализировать их в момент работы станка. Вся эта информация систематизируется и представляется человеку в удобном для него виде, так мы можем получить больше информации о ходе обработки, чем сейчас.

Мы можем знать реальные нагрузки на инструмент и узлах оборудования в различных моментах времени, корректировать и оптимизировать процесс обработки, находить золотую середину между стойкостью инструмента и производительностью обработки в конкретных случаях.

Подобное оборудование самостоятельно предупредит о возможных поломках, а также плановых ремонтах, что снизит время простоя оборудования. Кроме того, это открывает множество других возможностей для аналитики, диспетчеризации и других отделов предприятия. Для технолога-программиста такая возможность полезна в плане совершенствования процесса

обработки и всего технологического процесса. Тем не менее необходимо стремиться к получению эффективной обработки еще на этапе проектирования, а обратная связь – лишь проверка и доведение результатов проектирования до совершенства. Поэтому так важно научить САМ-систему принимать множество правильных решений самостоятельно.

Сложность изделий в ракетно-космической отрасли в ряде случаев не позволяет использовать стандартные металлорежущие инструменты. Практически все изделия данной отрасли изготавливаются из цельного металла и отсутствует возможность сделать сборную или сварную конструкцию детали из нескольких частей. В связи с этим частой задачей для таких деталей является обработка глубоких карманов, глубоких отверстий, глубоких канавок, полузакрытых каналов, замков и других элементов, доступ к которым для инструмента затруднен.

Необходимо использование специальных инструментов (рис. 6) под данные элементы. Проектирование специальных инструментов имеет множество различных особенностей, требует от проектировщика большого опыта и богатых знаний, кроме того, значительного времени для проектирования специального инструмента.

Богатым опытом в области специальных инструментов для обработки труднообрабатываемых деталей обладает компания Sandvik

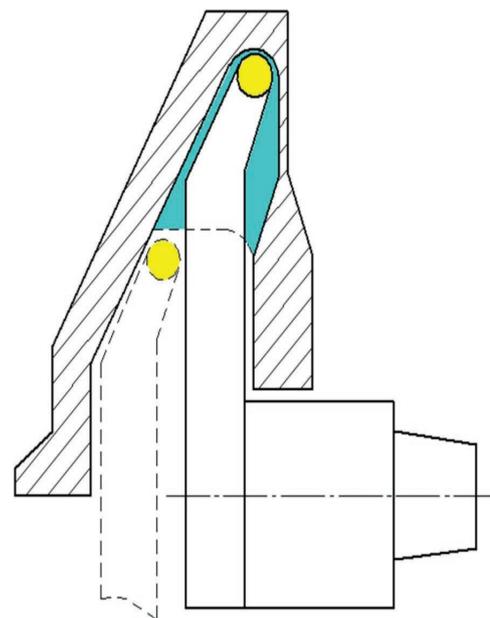


Рис. 6. Специальный инструмент

Fig. 6. Special tool

Cornant. Ее мировой опыт решения различных задач в космической отрасли показывает, что необходимо к задаче подходить комплексно, учитывать стружкоудаление, жесткость конструкции, стратегию обработки, режимы резания, экономичность, подвод СОЖ в зону резания, применение демпферной части и множество других данных. Автоматизировать такой процесс пока довольно сложно и возможно только на уровне искусственного интеллекта. Однако основы для автоматизации этого процесса закладываются уже сегодня. Большинство специальных инструментов поддается автоматизации и все больше предприятий используют такую возможность.

Автоматизация проектирования металлорежущих инструментов является одной из важных задач, тесно связанной с задачей снижения сроков выпуска новой продукции. Задача довольно обширная и включает в себя множество модулей, таких как САПР сверл, САПР фрез, САПР зенкеров и других видов инструментов, включая вспомогательные инструменты [12–14]. После расчета основных параметров инструмента система автоматически строит его 3d-модель и чертеж в САД-системе с оптимальными характеристиками, рассчитанными на заданную нагрузку.

Отличным примером автоматического получения чертежа инструмента служит модуль «Инструмент» системы САПР ТПП ЧПУ (рис. 7) [15]. Данный модуль создан в виде библиотеки для системы Компас-3D. После выбора нужного инструмента модуль автоматически построит его

чертеж в графическом окне. Аналогичным образом можно создавать инструмент нестандартных размеров и тут же передавать его в отдел планирования и в инструментальный цех предприятия для его быстрого производства. Время от разработки нового инструмента до производства сокращается в разы. В модуле реализованы решения автоматизации геометрических и графических задач [16].

## Результаты и их обсуждение

Рассмотренные выше кейсы обнаруживают большой прогресс в области автоматизации в САМ-системах, однако стоит отметить, что все они носят точечный характер: в каждой САМ-системе реализована только часть возможностей, поэтому, работая в одной САМ-системе, остается ощущение ее ограниченности. Но самым главным недостатком таких систем является низкая степень автоматизации принятия решений.

Причина данного недостатка – в отсутствии в них четких взаимосвязей между обработкой, станком, инструментами и обрабатываемым материалом, что серьезно ограничивает их возможности.

Кроме того, каждый кейс имеет как значительные преимущества, так и недостатки, например, модули для прогрессивной обработки требуют ввода данных об инструменте, что опять-таки обязывает технолога-программиста подбирать инструмент вручную, опираясь на

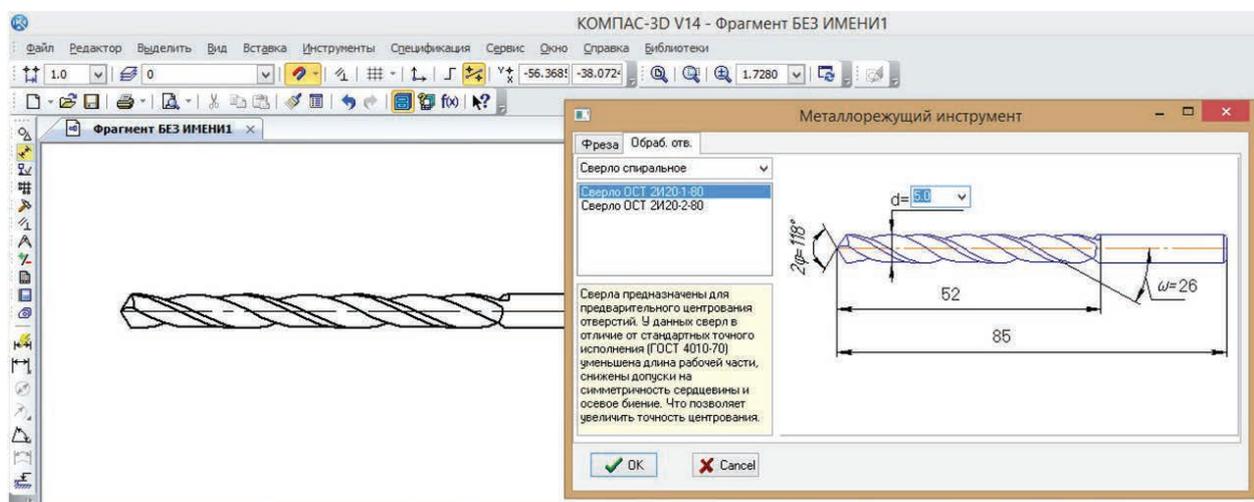


Рис. 7. Модуль Инструмент для Компас-3D

Fig. 7. Tool module for Compress-3D

свой опыт. После подбора инструмента модуль сможет продолжать работу, выполняя множество сложнейших расчетов полностью в автоматическом режиме.

Использование библиотеки для поиска инструментальных наладок и построения их 3d-модели удобно, но выбор осуществляется опять на основе опыта человека под индивидуальную задачу технолога-программиста, что также является недостатком.

Проектирование технологических процессов или последовательности обработки элементов детали также осуществляется по большей части человеком.

Как видно, доля человеческого труда остается достаточно большой в общем процессе проектирования. Поэтому только дальнейшее развитие и объединение всех подобных возможностей может дать колоссальный синергетический эффект [17]. Задача состоит в том, чтобы САМ-система самостоятельно строила эффективную последовательность обработки детали, подбирала инструменты по 3d-модели детали из базы данных, рассчитывала режимы резания и строила траекторию для максимальной производительности под конкретный станок на основе различных расчетов. При этом необходимо, чтобы система в ходе проектирования опиралась на различный опыт и самостоятельно решала множество задач. Таким образом, задача выходит на уровень искусственного интеллекта, позволяющего самостоятельно принимать сложные решения при проектировании.

Однако стоит отметить, что цифровое представление данных, интегрированные базы данных, новые библиотеки, цифровые двойники, возможность распознавания конструктивных элементов, модули адаптивной обработки, датчики и продвинутая аналитика, а также множество других кейсов автоматизации – это всего лишь этап на пути к решению нашей задачи. Важнейшей частью является установление тесных взаимосвязей между УП, станком, инструментом, деталью и технологией, благодаря которым САМ-система сможет самостоятельно принимать все необходимые решения. Данные взаимосвязи были описаны в виде блок-схемы, представленной на рис. 8.

Таким образом, исследования свелись к разработке алгоритма и математического обе-

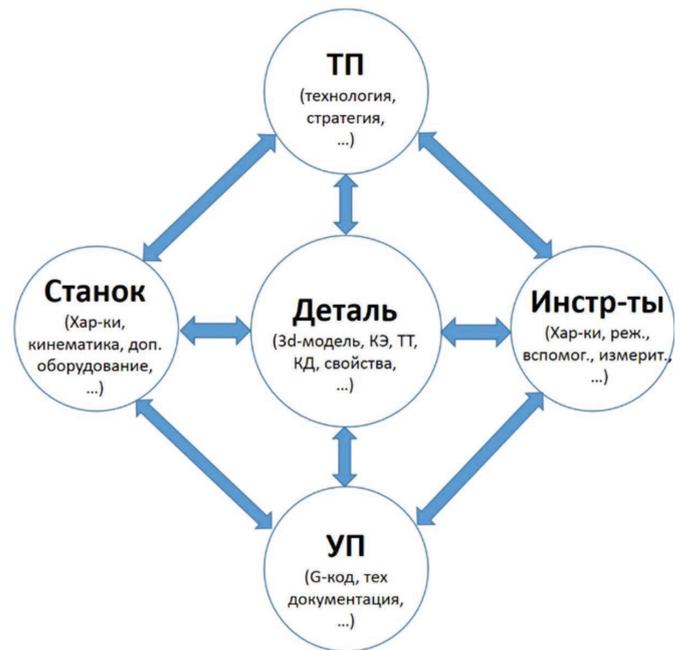


Рис. 8. Взаимосвязи УП с элементами проектирования

Fig. 8. The relationship of CNC-program with design elements

спечения модуля интеллектуальной обработки САМ-системы, которые позволят установить подобные взаимосвязи и наделят систему свойствами автоматического принятия большинства решений. Подобный алгоритм должен отвечать множествам требований, в том числе и требованиям самообучения.

Разработанный на основе данной теории модуль для интеллектуальной обработки точных отверстий системы САПР ТПП ЧПУ показал значительный прогресс. С его помощью проектирование обработки точных сложных отверстий происходит минимум в два раза быстрее существующих решений по автоматизации обработки, в том числе передовых систем [15], что доказывает правильность теории установления взаимосвязей и верность построения алгоритмов модуля.

Обработка точного ступенчатого отверстия, например представленного на рис. 9, является достаточно трудоемкой операцией, состоящей из нескольких переходов. Для ее проектирования необходимо подобрать множество инструментов, рассчитать режимы резания, последовательность обработки и продумать множество других данных для каждого перехода [18, 19].

После указания размеров и показателей точности отверстия модуль самостоятельно сфор-

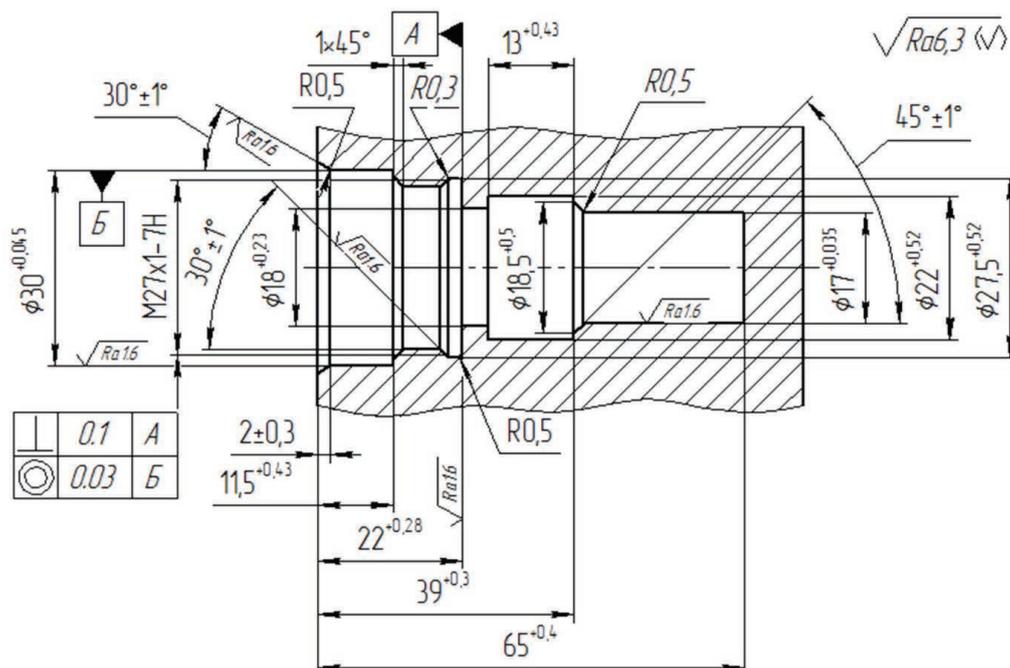


Рис. 9. Точное ступенчатое отверстие

Fig. 9. Precise stepped hole

мирует технологию обработки отверстия, подберет необходимые инструменты, подготовит данные для постпроцессирования УП под необходимую стойку ЧПУ, а также сформирует графическую карту наладки инструментов в системе Компас-3D в считанные секунды по принципу одной кнопки.

В существующих САМ-системах для программирования обработки данного отверстия даже в режиме распознавания элементов потребуется множество ручной работы, так как в базе системы нет правил для обработки подобных сложных элементов. Таким образом, получается полуавтоматический процесс программирования, где большинство задач придется решать человеку самостоятельно. Стоит отметить, что многие системы можно научить подобному алгоритму через правила обработки, однако, это целый дополнительный комплекс работ.

Хотя доля человеческого вовлечения в процесс проектирования в разработанном модуле снижена до 60...80 %, что является хорошим результатом, но этого недостаточно для достижения полностью автоматического режима, однако, реализованные в нем алгоритмы закладывают основу для реализации модуля с элементами искусственного интеллекта для обработки

не только точных отверстий, но и других элементов деталей.

Как работают данные взаимосвязи? Подобные связи задают последовательность решения задач автоматизированного проектирования, считывают исходные данные, создают определенные условия, ограничивающие выбор для решения индивидуальных задач, формируют запросы баз данных, анализируют множество информации, находят нужные данные, рассчитывают параметры, а также осуществляют множество других операций, и все это в автоматическом режиме в соответствии с заложенной логикой, а также с использованием богатого информационного обеспечения в виде оцифрованных данных.

Например, сложное ступенчатое точное отверстие модуль раздробит на отдельные элементарные элементы, сформирует последовательность их обработки с учетом показателей точности из базы данных, произведет обобщение всех маршрутов и сформирует один общий маршрут обработки сложного отверстия, подберет необходимые инструменты для каждого перехода, рассчитает множество параметров с учетом возможностей станка.

Уникальность любого интеллектуального модуля в том, что логику или мышление модуля можно реализовать гибко, ее можно развивать,

настраивать или обучать для решения уникальных задач проектирования. Когда модуль обучится множеству приемов, он сможет применять их в совершенно различных ситуациях даже там, где человек не догадался их применить. Кроме того, устранится функция подтверждения человеком различных этапов проектирования, а также ручного выбора различных вариантов развития событий, решения будут приниматься полностью интеллектуальным модулем САМ-системы.

Разработанный модуль обработки отверстий экономит до 80 % времени на проектирование обработки точных отверстий, тем самым снизятся сроки технологической подготовки производства [17, 20, 21]. Конечным результатом решения данной задачи станет еще большее высвобождение человеческих ресурсов из рутинных задач и перенаправление их в творческую область для разработки более совершенных устройств, средств автоматизации и других полезных объектов. Еще одним результатом станет возможность разработки качественной УП человеком с более низкой квалификацией, т. е. значительное снижение трудоемкости и сроков проведения проектных работ, что в итоге отразится на снижении себестоимости выпускаемых изделий.

### Выводы

Разработанные взаимосвязи проектируемой обработки детали с данными о станках, инструментах и обрабатываемых материалах показали свое право на существование. Они были внедрены и опробованы в модуле обработки точных отверстий, а также интегрированы в систему Компас-3D, показали снижение сроков и трудоемкости проектирования до 80 % в зависимости от сложности решаемой задачи. Развитие данной теории обработки детали позволит снизить сроки и трудоемкость проектирования обработки всей детали в целом.

Создание модулей интеллектуальной обработки позволяет значительно повысить степень автоматизации современных САД/САМ-систем, снизить трудоемкость и сроки разработки УП, а также повысить эффективность и качество обработки и тем самым привести к удешевлению производства, что является наиболее важной и перспективной задачей при обработке сложных

деталей в ракетно-космической отрасли. С помощью данных модулей проектировать качественные УП смогут специалисты более низкой квалификации, не имеющие богатого опыта работы.

Совершенствование САД/САМ-систем является одним из ключевых направлений в области обработки на станках с ЧПУ, и модули для интеллектуального проектирования обработки являются важным составляющим данного развития.

Как и все проекты Четвертой промышленной революции, интеллектуальная обработка направлена на повышение производительности и рентабельности предприятий, а также их конкурентоспособности на мировом уровне. Интеллектуальная обработка имеет важное значение, так как напрямую влияет на производительность обработки и повышение срока службы оборудования и инструментов.

Внедрение Индустрии 4.0, в частности модулей для интеллектуальной обработки, в скором времени станет одним из главных инструментов конкурентоспособности предприятий, так как они напрямую влияют на себестоимость продукции.

Модули интеллектуальной обработки для САМ-систем, построенные на принципе взаимосвязей с данными об элементах технологической системы и, таким образом, способные автоматически принимать решения без участия человека, являются главным решением задачи снижения трудоемкости и сроков проектирования.

### Список литературы

1. Алтатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: БрГТУ, 2004. – 96 с.
2. Дружинский И.А. Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение: справочник. – Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с.
3. Михалёв О.Н., Янюшкин А.С. Высокопроизводительная механическая обработка труднообрабатываемых материалов на станках с ЧПУ // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. – Курск: Университетская книга, 2018. – Вып. 3. – С. 232–235.
4. Михалёв О.Н., Янюшкин А.С. Единая среда для автоматизированного проектирования технологических процессов и генерации УП для станков с ЧПУ // Механика XXI века. – 2006. – № 5. – С. 230–232.

5. *Базров Б.М.* Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.

6. *Аверченков В.И., Каптальян И.А., Пархутик А.П.* САПР технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов: учебное пособие для вузов. – Минск: Высшая школа, 1993. – 288 с.

7. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / В.С. Корсаков, Н.М. Капустин, К.-Х. Темпельгоф, Х. Лихтенберг; под общ. ред. Н.М. Капустина. – М.: Машиностроение, 1985. – 304 с.

8. *Бабук В.В., Шкред В.А.* Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении. – Минск: Высшая школа, 1983. – 256 с.

9. *Дерябин А.П.* Программирование технологических процессов для станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1984. – 223 с.

10. Диалоговое проектирование технологических процессов / Н.М. Капустин, В.В. Павлов, Л.А. Козлов и др. – М.: Машиностроение, 1983. – 255 с.

11. Диалоговая САПР технологических процессов: учебное пособие для вузов / В.Г. Митрофанов, Ю.М. Соломенцев, А.Г. Схиртладзе и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 232 с.

12. Автоматизированное проектирование металлорежущего инструмента / В.А. Гречишников, Г.Н. Кирсанов, А.В. Катаев и др. – М.: Мосстанкин, 1984. – 107 с.

13. *Иноземцев Г.Г.* Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1984. – 270 с.

14. Инструментальное обеспечение автоматизированного производства: учебник для машиностро-

ительных специальностей вузов / В.А. Гречишников, А.Р. Маслов, Ю.М. Соломенцев и др.; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высшая школа, 2001. – 271 с.

15. Патент на полезную модель 2008615315 Российская Федерация. Система автоматизированного проектирования технологической подготовки производства на станках с ЧПУ (САПР ТПП ЧПУ v. 1.0) / А.С. Янюшкин, О.Н. Михалев. – № 2008614323; заявл. 06.11.2008.

16. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи / В.С. Полозов, О.А. Будеков, С.И. Ротков, Л.В. Широкова. – М.: Машиностроение, 1983. – 280 с.

17. *Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S.* Perfection of the automated systems of machine-building manufactures // Proceedings of the 12th International Symposium “Materials, Methods & Technologies”. – Bulgaria, 2011. – P. 76.–81.

18. *Баранов А.В.* Повышение эффективности процессов лезвийной обработки отверстий осевым инструментом // Вестник машиностроения. – 1999. – № 6. – С. 40–42.

19. Инструменты для обработки точных отверстий / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе, В.И. Кокарев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 336 с. – (Библиотека инструментальщика).

20. *Михалёв О.Н., Янюшкин А.С.* Повышение степени автоматизации CAD/CAM-систем при проектировании обработки точных отверстий на многоцелевых станках с ЧПУ // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – № 5. – С. 33.–38.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### CAM–Systems Intelligent Processing Module

Oleg Mikhalev<sup>a, \*</sup>, Alexander Yanyushkin<sup>2, b</sup>

I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1223-486X>, [Mih\\_tm@mail.ru](mailto:Mih_tm@mail.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>, [yanyushkinas@mail.ru](mailto:yanyushkinas@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 01 March 2019

Revised: 23 July 2019

Accepted: 15 August 2019

Available online: 15 September 2019

##### Keywords:

Intelligent machining

CAD/CAM-system

CNC-program

Machining design

Machining on CNC machines

#### ABSTRACT

**Introduction.** The rocket and space industry is one of the most complex industries, it continuously poses more and more complex tasks, the solution of which is possible only with the advent of new and unique technologies. Today, as before, the space rocket industry faces super-ambitious tasks both to improve the spacecraft themselves and to reduce the cost of their production. The cost of a single spacecraft launch is estimated at billions of rubles; this dramatically slows down the development of the industry and therefore requires maximum attention. The high cost of machining parts of the rocket and space industry is due to the many complexities involved in complicating the design of parts, in the use of superalloys capable of operating under extreme conditions of high temperatures and loads, and therefore difficult to process, as well as in increased requirements for quality. In this connection, today, as well as the most urgently needed, new approaches to processing, which in turn are reflected in the high complexity of technological design and the long production time. **The purpose of the work:** the development of a method for the maximum reduction of labor-intensiveness and terms of designing effective processing of complex parts of the rocket and space industry. **Research methods:** Large reserves to improve the technology of processing parts, as well as reducing production time lie in the field of digital technology. Therefore, the main research method is finding bottlenecks in CAM-systems, as well as successful cases on automating the design tasks for efficient processing of especially parts from materials that are difficult to process. **Results and discussion:** Analysis of the issue showed that when designing the processing in the CAM system there are no close links between the control program and technology, machine, tool and detail, these links are still implemented by a person and directly depend on his experience, which makes the design not quality, not effective and increasingly not profitable. Automating such connections will improve the quality of the design and the processing itself, free up human resources from routine work, and also reduce the time and complexity of the design, which will positively affect the results and cost of production of rocket and space technology. The result of this automation is an intelligent processing module for the CAM system. Some of the tasks solved by the module, and implemented as independent libraries, have already successfully established themselves and are being used in various enterprises.

**For citation:** Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S. CAM-systems intelligent processing module. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 28–41. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-28-41. (In Russian).

#### References

1. Alpatov Yu.N. *Matematicheskoe modelirovanie proizvodstvennykh protsessov* [Mathematical modeling of production processes]. 2<sup>nd</sup> ed. Bratsk, BrGTU Publ., 2004. 96 p.
2. Druzhinskii I.A. *Slozhnye poverkhnosti: matematicheskoe opisanie i tekhnologicheskoe obespechenie: spravochnik* [Complex surfaces: mathematical description and technological support: reference book]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985. 263 p.
3. Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S. [High-performance machining of hard-to-machine materials on CNC machines]. *Perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii* [Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering]. Kursk, 2018, no. 3, pp. 232–235.

#### \* Corresponding author

Mikhalev Oleg N., Ph.D. (Engineering), Engineer

I.N. Ulianov Chuvash State University

15 Moskovsky Prospekt,

428015, Cheboksary, Russian Federation

Tel.: +7 (985) 55-333-48, e-mail: [mih\\_tm@mail.ru](mailto:mih_tm@mail.ru)

4. Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S. Edinaya sreda dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov i generatsii UP dlya stankov s ChPU [Unified environment for computer-aided design of technological processes and generation of control programs for CNC machines]. *Mekhaniki XXI veku = Mechanics of the XXI century*, 2006, no. 5, pp. 230–232.
5. Bazrov B.M. *Modul'naya tekhnologiya v mashinostroenii* [Modular technology in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 368 p.
6. Averchenkov V.I., Kashtal'yan I.A., Parkhutik A.P. *SAPR tekhnologicheskikh protsessov, prispoblenii i rezhushchikh instrumentov* [CAD of technological processes, devices and cutting tools]. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1993. 288 p.
7. Korsakov V.S., Kapustin N.M., Tempel'gof K.-Kh., Likhtenberg Kh. *Avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii* [Automation of the design of technological processes in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 304 p.
8. Babuk V.V., Shkred V.A. *Proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoi obrabotki v mashinostroenii* [The design of technological processes of machining in engineering]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1983. 256 p.
9. Deryabin A.P. *Programmirovaniye tekhnologicheskikh protsessov dlya stankov s ChPU* [Programming of technological processes for CNC machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 223 p.
10. Kapustin N.M., Pavlov V.V., Kozlov L.A., et al. *Dialogovoe proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov* [Dialogue design of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 255 p.
11. Mitrofanov V.G., Solomentsev Yu.M., Skhirtladze A.G., et al. *Dialogovaya SAPR tekhnologicheskikh protsessov* [Dialogue CAD of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 232 p.
12. Grechishnikov V.A., Kirsanov G.N., Kataev A.V., et al. *Avtomatizirovannoe proektirovanie metallorezhushchego instrumenta* [Automated design of metal-cutting tools]. Moscow, Mosstankin Publ., 1984. 107 p.
13. Inozemtsev G.G. *Proektirovanie metallorezhushchikh instrumentov* [Design of metal-cutting tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 270 p.
14. Grechishnikov V.A., Maslov A.R., Solomentsev Yu.M., et al. *Instrumental'noye obespecheniye avtomatizirovannogo proizvodstva* [Instrumental support of automated production]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 271 p.
15. Yanyushkin A.S., Mikhalev O.N. *Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na stankakh s ChPU (SAPR TPP ChPU v. 1.0)* [The system of computer-aided design of technological preparation of production on CNC machines (CAD CAD CCI v. 1.0)]. Patent RF, no. 2008615315, 2008.
16. Polozov V.S., Budekov O.A., Rotkov S.I., Shirokova L.V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie. Geometricheskie i graficheskie zadachi* [Computer-aided design. Geometric and graphic tasks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 280 p.
17. Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S. Perfection of the automated systems of machine-building manufactures. *Proceedings of the 12th International Symposium "Materials, Methods & Technologies"*, Bulgaria, 2011, pp. 76.–81.
18. Baranov A.V. Povysheniye effektivnosti protsessov lezviinoi obrabotki otverstii osevykh instrumentov [Improving the efficiency of blade hole machining processes for axial tools]. *Vestnik mashinostroyeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 1999, no. 6, pp. 40–42.
19. Kirsanov S.V., Grechishnikov V.A., Skhirtladze A.G., Kokarev V.I. *Instrumenty dlya obrabotki tochnykh otverstii* [Tools for machining precise holes]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 336 p.
20. Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S. Povysheniye stepeni avtomatizatsii CAD/CAM-sistem pri proektirovanii obrabotki tochnykh otverstii na mnogotselevykh stankakh s ChPU [Increasing of the CAD/CAM-systems automation level in designing of precise holes processing on multipurpose machine tools with CNC-system]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of computer and information technologies*, 2008, no. 5, pp. 33–38.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.