

УДК 004.624

DOI 10.18698/0536-1044-2017-5-60-71

Обрабатывающие робототехнологические комплексы в машиностроении

Г.Б. Евгениев¹, С.С. Крюков¹, А.В. Частухин²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ООО «Центр СПРУТ-Т», 111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 3, стр. 5

Machining Robotic Technology Systems in Mechanical Engineering

G.B. Evgenev¹, S.S. Kryukov¹, A.V. Chastukhin²

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² OOO SPRUT-T Centre, 111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 3, Block 5

@ e-mail: g.evgenev@mail.ru, stask@sprut.ru, chastuhin@sprut.ru

i В настоящее время в индустриально развитых странах начинается четвертая промышленная революция, целью которой является создание цифровых производств. В Германии, где эта революция получила название «Индустрия 4.0», имеется точка зрения, что само существование производства в стране может зависеть от успехов создания цифровых производств, призванных обеспечить значительное повышение эффективности и качества производства. Аналоги такой программы есть и в других странах Европы, Америки и Азии. Индустрия 4.0 в значительной степени основана на внедрении роботов во все технологические переделы. Повышение эффективности и качества отечественного машиностроения также требует широкого использования робототехнических комплексов. Настало время теоретического обобщения методов и средств в этой области. В связи с этим дано четкое определение понятия «робототехнологический комплекс», построена его концептуальная модель и описаны наиболее эффективные области его применения.

Ключевые слова: механическая обработка, промышленные роботы, робототехнологические комплексы, гибкие производственные системы.

i At present, the developed countries are at the beginning of the fourth industrial revolution aimed at developing digital manufacturing. In Germany, where this revolution is known as «Industry 4.0», there is a point of view that the whole existence of manufacturing in the country depends on the ability to create digital technologies that would increase efficiency and quality of manufacturing. Similar programmes exist in other countries in Europe, the Americas and Asia. «Industry 4.0» largely depends on the increasing use of robots in all technological conversions. Extensive use of robotic systems is also required to improve the efficiency and quality of domestic machine-building. It is now necessary to theoretically generalize methods and means in this area. In this paper, the authors present a clear definition of a robotic technology system, build its conceptual model and describe the most effective applications of such systems.

Keywords: machining, industrial robotics, robotic technology systems, flexible manufacturing systems.

В зарубежной литературе существует термин «промышленный робот» (industrial robot). Согласно стандарту [1], это автоматически управляемый многоцелевой манипулятор, программируемый по трем или более осям с возможностью перепрограммирования. В функции таких роботов включены все операции, которые могут потребоваться для работы промышленного предприятия. При этом отсутствует разделение операций на основные (обрабатывающие) и вспомогательные (транспортно-манипуляционные и складирования) [2–7].

Существует множество публикаций, посвященных применению роботов во внепроизводственной сфере. В статье [8] описано их использование в биомедицинской инженерии, а в работах [9–11] — так называемый Интернет вещей, в котором роботы находят применение в домашнем хозяйстве, транспорте, здравоохранении, торговле, системах безопасности и энергетике.

Однако детальных исследований использования промышленных роботов как основы для создания гибких производственных систем нет, что представляется неправильным, так как методы программирования обрабатывающих и задействованных в логистике транспортно-манипуляционных роботов существенно различаются. Комплексы, построенные на базе обрабатывающих роботов, целесообразно называть робототехнологическими комплексами (РТК).

До настоящего времени среди обрабатывающих роботов в машиностроении доминирующее положение занимали сварочные. В операциях механической обработки роботы применялись преимущественно для выполнения вспомогательных переходов, связанных с установкой и съемом деталей со станка. Такой подход является вполне удовлетворительным при изготовлении осесимметричных изделий на токарно-фрезерных обрабатывающих центрах с ЧПУ. Совершенствование технических характеристик роботов в части повышения их жесткости и точности проведения фрезерно-сверлильных переходов расширяет возможности их использования для реализации операций этого класса.

Цель работы — анализ методов и средств в области робототехники для обобщения и рационального применения РТК.

Концептуальная метамодель РТК в машиностроении. Основой для проведения анализа в целях обобщения является концептуальная

метамодель на языке UML, представленная на рис. 1.

На машиностроительном предприятии, как правило, имеется множество различных роботов. Комплекс технических средств, в состав которого входит робот, называют робототехническим. Чтобы из всех робототехнических комплексов выделить РТК, следует воспользоваться определениями стандартов. Согласно ГОСТ 3.1109–82, технологический процесс представляет собой часть производственного процесса, содержащую целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. Отсюда следует, что РТК должен реализовывать упомянутые действия. Например, автоматизированная транспортно-складская система не выполняет их и, являясь робототехническим комплексом, не может быть отнесена к числу РТК.

Для более глубокого анализа необходимо рассмотреть структуру оперативного времени (см. рис. 1), включающую в себя основное и вспомогательное время. Первое направлено на достижение непосредственной цели технологической операции по качественному и (или) количественному изменению предмета труда. Второе время связано с действиями, дающими возможность выполнения основной работы, которая является целью технологической операции. Робот в составе РТК должен быть связан как минимум с основным временем, хотя его можно использовать и для реализации вспомогательных действий, покрывая полностью все оперативное время.

Нормы оперативного времени зависят от применяемых технологических методов (см. рис. 1), включающих в себя раскрой материала, обработку резанием, электрофизическую обработку, сварку и пайку, а также сборку, наплавку и окраску.

Примеры использования РТК. Среди перечисленных методов есть такие, которые доступны только для роботов. К операциям раскроя материала относится резка ножом 6D (рис. 2), осуществляемая на сложных пространственных поверхностях [12].

В каждой точке траектории лезвие ножа должно разворачиваться вдоль направления движения, для чего необходимы шесть степеней свободы: три линейные и три угловые.

Для программирования обработки резанием при движении исполнительного органа ро-

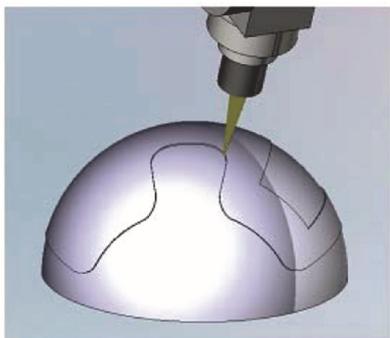


Рис. 2. Резка ножом 6D

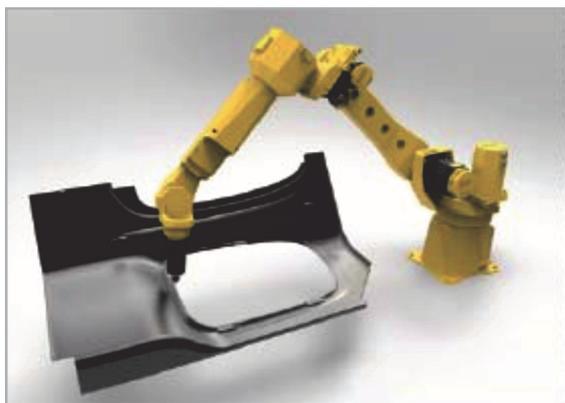


Рис. 3. Обрезка кромок криволинейных формообразующих деталей

Сварку, как правило, выполняют с помощью роботов. Программировать сварочное оборудование (рис. 4) можно с помощью универсального метода [12]. Для расчета управляющих программ по пяти координатам достаточно добавить ребро, проходящее вдоль соединяемых деталей. При этом в каждой точке кривой будут рассчитаны углы наклона сварочной головки так, чтобы она проходила как можно ближе к середине между соседними стенками и не сталкивалась с ними.

Традиционная обработка резанием связана с удалением лишнего материала из заготовки, а противоположная ей аддитивная обработка — с добавлением материала к заготовке в месте прохождения рабочего инструмента [12]. Наплавка — частный случай аддитивной обработки, заключающийся в нанесении слоя металла или сплава на поверхность изделия путем сварки плавлением. Это позволяет наращивать на поверхности детали слой материала, обладающего особыми характеристиками: высокой прочностью, износостойкостью, антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью, жаропрочностью и т. п. Наплавка дает

возможность восстанавливать геометрические размеры дорогостоящих деталей и инструмента, осуществлять ремонт лопаток, штампов, пресс-форм, шестерней, валов и т. д.

Наплавку можно осуществлять как на станках с ЧПУ, так и с помощью роботов (рис. 5).

Программирование операций РТК можно проводить двумя способами: обучением и аналитически. Аналитическое программирование является предпочтительным при обработке резанием. В этом случае можно использовать высокоразвитые системы программирования для станков с ЧПУ.

Корневым классом объектов в метамодели, представленной на рис. 1, служит РТК. Отметим области механической обработки, в которых РТК будут иметь преимущества перед станками с ЧПУ.

Во-первых, это многоинструментальная фрезерно-сверлильная обработка деталей, которую в токарно-фрезерных обрабатывающих центрах проводят при одновременном применении нескольких суппортов. Включение в состав РТК нескольких параллельно работающих

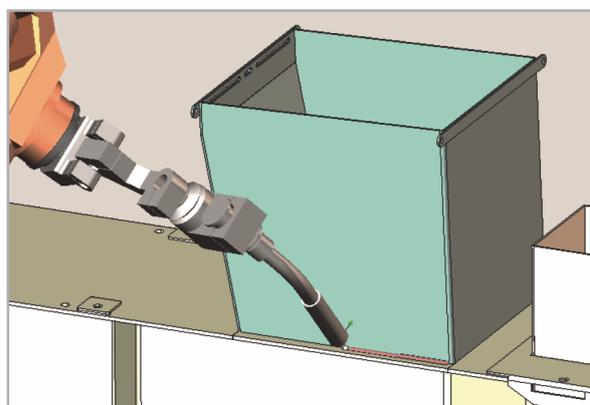


Рис. 4. Пятикоординатное программирование сварочных роботов

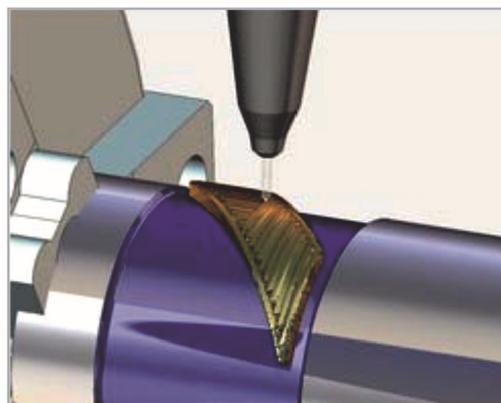


Рис. 5. Операция наплавки

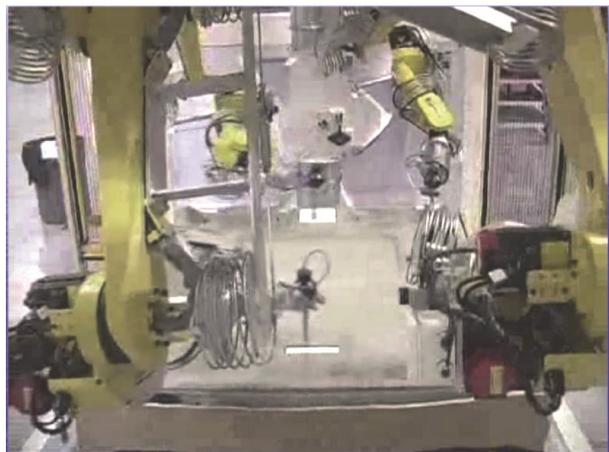


Рис. 6. Фрезерно-сверлильная обработка детали четырьмя роботами

роботов обеспечивает повышение производительности обработки в несколько раз. На рис. 1 эта особенность отмечена наличием нескольких узлов движения инструмента, входящих в состав РТК. Пример фрезерно-сверлильной обработки детали четырьмя роботами приведен на рис. 6.

Во-вторых, можно использовать подвижность роботов для сложной многокоординатной фрезерно-сверлильной обработки крупногабаритных деталей, что позволит избежать необходимости применения дорогостоящих пятикоординатных станков с ЧПУ. На концептуальной метамодели (см. рис. 1) такая возможность обеспечена включением в состав РТК транспортера для перемещения узла движения инструмента или обрабатываемого объекта. Последний узел может как присутствовать, так и отсутствовать в РТК. Для крупногабаритных деталей нецелесообразно включать в состав РТК узел движения обрабатываемого объекта.

В целях повышения эффективности РТК должен обеспечивать выполнение всех вспомогательных переходов, необходимых для операции, к которым традиционно относятся установка и съем обрабатываемого объекта, а также смена рабочего инструмента. Для реализации переходов первого типа в состав РТК могут быть включены склады объектов обработки — заготовок и готовых изделий. Смену таких объектов традиционно выполняют обслуживающие роботы, в качестве которых в РТК можно использовать узел движения обрабатываемого объекта, оснащенный соответствующими схватами.

Для удобства обработки осесимметричных деталей часто применяют поворотные столы,

которые также могут быть включены в состав РТК (рис. 7). С помощью таких РТК обеспечивается пятикоординатная обработка пространственносложных деталей [12].

Основными компонентами РТК являются узлы движения инструмента и обрабатываемого объекта, первый из которых может состоять из нескольких экземпляров, а второй — отсутствовать. Каждый из узлов по сути представляет собой робот. Согласованная работа этих роботов обеспечивается системой управления РТК.

Узел движения инструмента включает в себя инструментальный блок и закрепляемый на нем инструмент и, как правило, имеет основание и некоторое множество координатных осей. Как показано на комплексной диаграмме (см. рис. 1), каждая из осей может входить или не входить в состав робота. Здесь представлены последовательные роботы, взаимосвязь осей отмечена пунктирными стрелками.

Рассмотрим РТК для пятикоординатной фрезерной обработки длинномерных объектов на примере аэродинамического крыла длиной 4 400 мм, шириной 600 мм и высотой 68 мм. На рис. 8 показано подмножество концептуальной метамодели применительно к этому случаю. Из основных технологических методов на диаграмме осталась обработка резанием. РТК

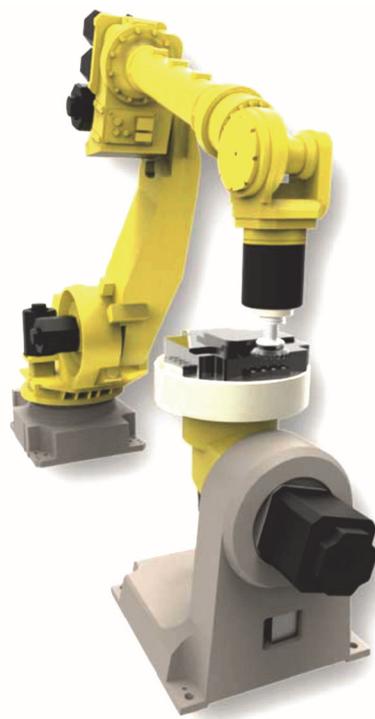


Рис. 7. РТК с поворотным столом

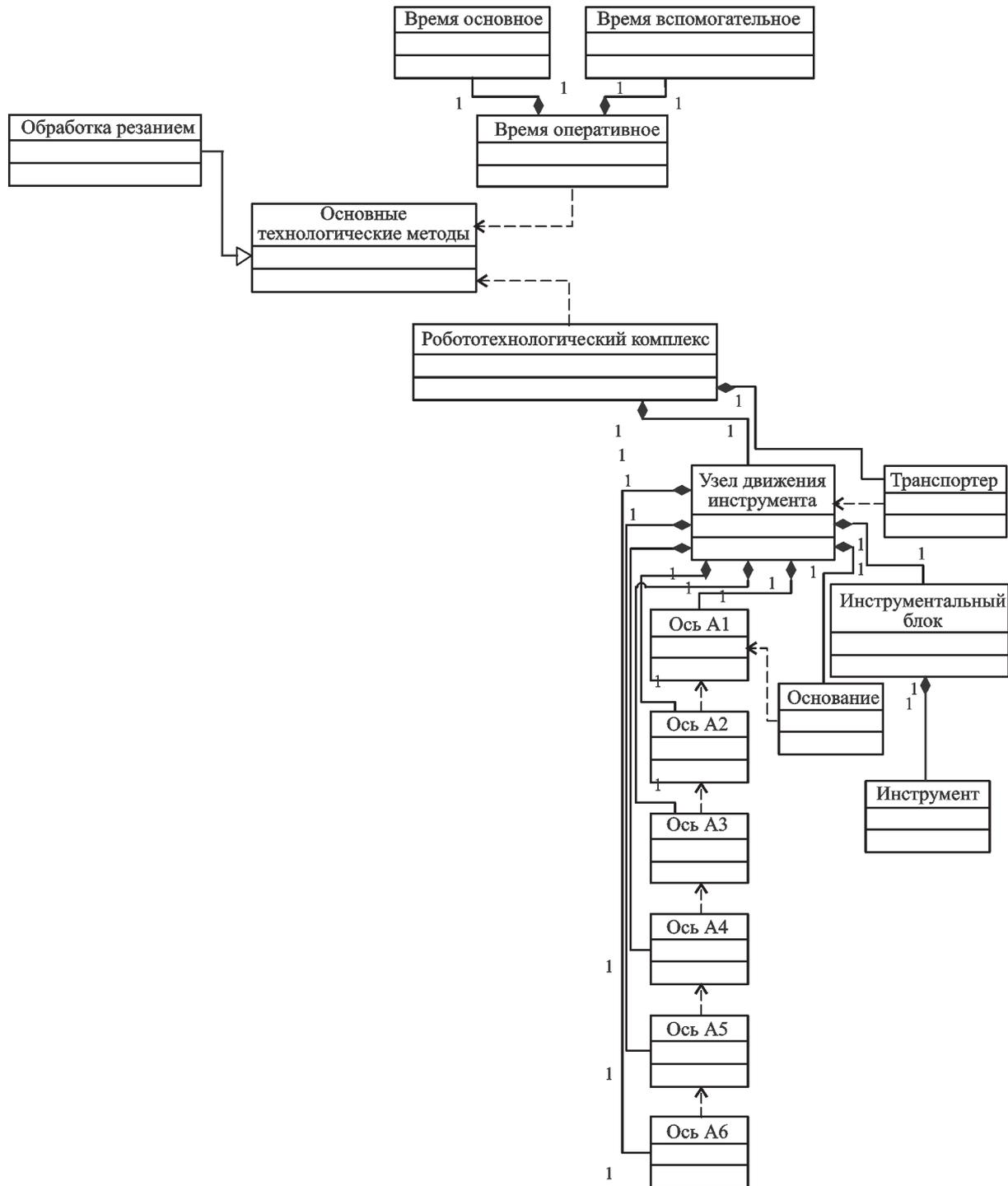


Рис. 8. Пример диаграммы классов РТК обработки длинномерных деталей

включает в себя только один шестикоординатный узел движения инструмента и транспортер. На рис. 9 приведено представление трехмерной модели для построения кинематической схемы такого РТК, а на рис. 10 — пример обработки с использованием этого РТК. Обработка проведена в инжиниринговой компании «Камское

общество развития автомобилестроения» (ООО «КОРА») с использованием робота Fanuc M710i.

Технология обработки резанием на РТК. Одним из важных направлений в машиностроении является высокоскоростная обработка

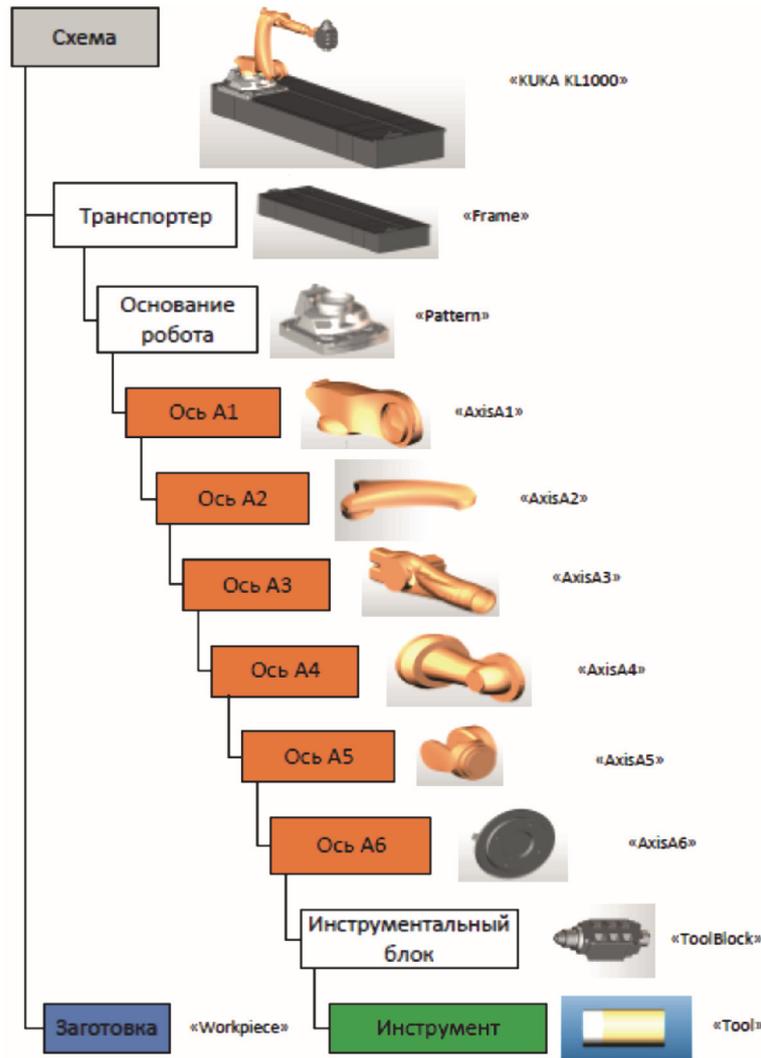


Рис. 9. Представление трехмерной модели для построения кинематической схемы РТК обработки аэродинамического крыла

(BCO — HSC, англ. High speed cutting), относящаяся к перспективным технологическим процессам.

Основная отличительная особенность BCO — малое сечение среза, снимаемое при высоких скорости резания и минутной подаче (рис. 11), значения которых в 5–10 раз больше, чем при обычной обработке. Рекомендуемая глубина резания не должна превышать 10 % диаметра фрезы. Кроме снижения крутящего момента в зоне высоких скоростей, наиболее важная особенность BCO состоит в перераспределении тепла в зоне резания. При такой обработке скорость подачи превышает скорость теплопроводности обрабатываемого материала, поэтому основная масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку и инструмент.

Таким образом, с помощью BCO можно фрезеровать закаленные стали, не опасаясь отпуса поверхностного слоя. Исследования показали, что 75 % тепла отводится со стружкой, 20 % — через инструмент и 5 % — через обрабатываемую деталь. Поэтому BCO базируется на сокращении тепла, которое обычно служит причиной износа инструмента.

BCO не всегда уменьшает машинное время за счет высоких режимов резания, так как это не является ее главным предназначением. Основные достоинства BCO заключаются в следующем: повышение качества обработки; возможность обработки материалов, чувствительных к перегреву; эффективное использование оборудования с ЧПУ; переход от электроэрозионной обработки и шлифования к лезвийной обработке.

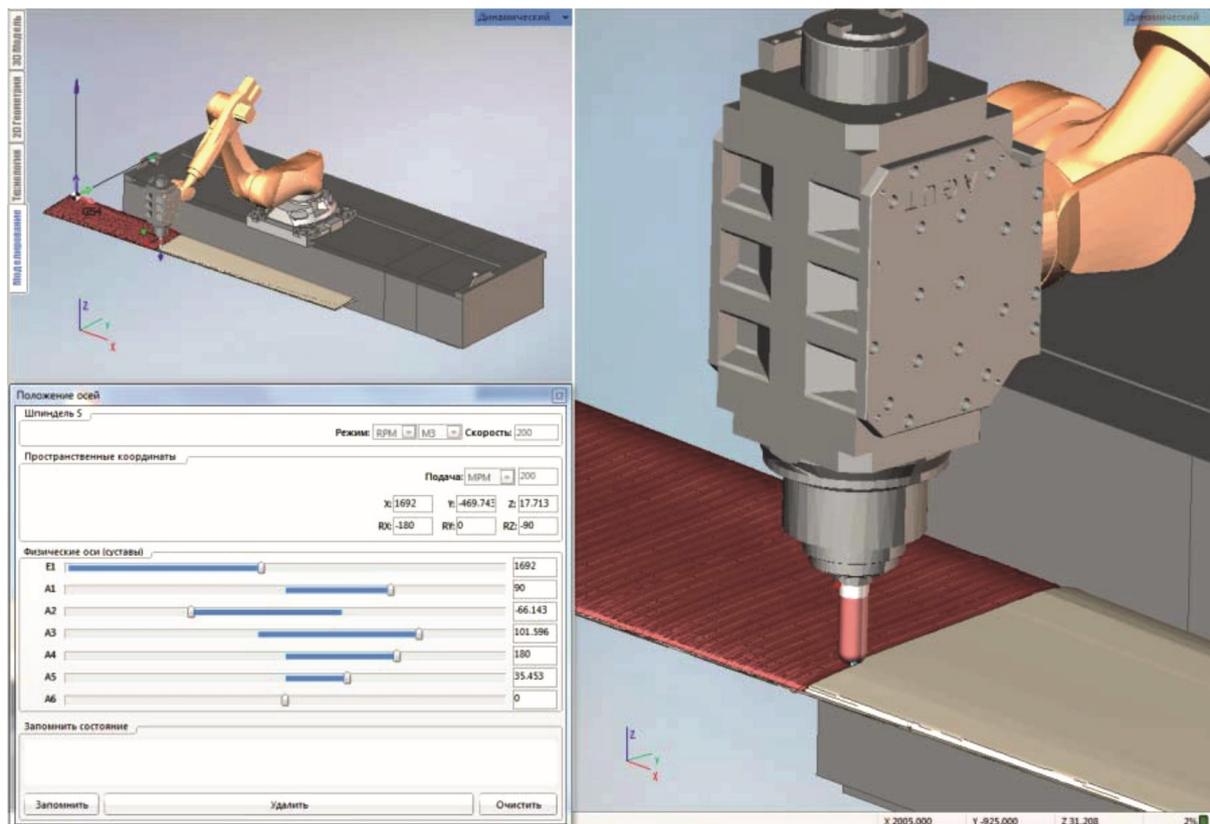


Рис. 10. Пример обработки длинномерного изделия с помощью РТК

ВСО применяют там, где необходимо быстро снять металл, а также при обработке различных сложных объектов:

- длинных тонкостенных алюминиевых деталей (например, деталей крыла и фюзеляжа самолетов), к качеству обработки которых обычно предъявляются высокие требования. Вследствие большого объема срезаемого металла добиться высокого качества таких деталей можно только путем применения ВСО (скорость резания — 1 500...3 000 м/мин, частота вращения шпинделя — 15 000...50 000 мин⁻¹ и высокая подача), так как благодаря небольшим сечениям среза силы резания невелики;
- изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов в аэрокосмической и автомобильной промышленности;
- штампов и пресс-форм, характеризующихся жесткими допусками, высокой точностью и низкой шероховатостью поверхности;
- деталей малых размеров и миниатюрных изделий, предназначенных для медицины и других отраслей, включая нанотехнологии.

Роботы, используемые для ВСО, оснащены высокоскоростным инструментальным шпинделем, частота вращения которого находится в пределах 12 000...40 000 мин⁻¹. Скорость подачи

составляет 40...60 м/мин, а скорость быстрого перемещения достигает 90 м/мин. При этом роботы обрабатывают малые перемещения (1...20 мкм).

Особые требования предъявляются и к системе ЧПУ. Она должна обеспечивать высокую скорость просмотра кадров вперед (100...200 кадров/с), чтобы успевать сделать расчеты для торможения на подходе к углу и разгона после поворота, а также обладать множеством других возможностей для отработки ВСО.

Производители режущего инструмента уже давно изготавливают твердосплавные режущие инструменты из мелкодисперсных сплавов, работающие преимущественно на больших ско-

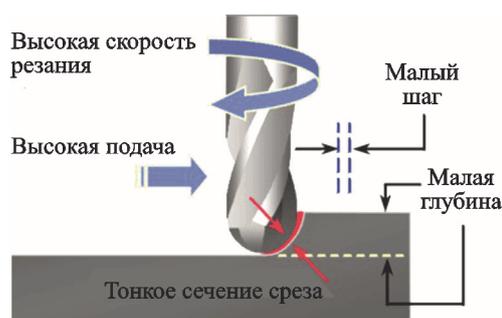


Рис. 11. Схема ВСО

ростях. Значительная частота вращения шпинделя ($40\,000\text{ мин}^{-1}$) предполагает применение инструментов малого диаметра (15...20 мм).

Для ВСО часто используют плунжерные фрезы (монокристаллические и с пластинами), инструменты с кубическим нитридом бора и поликристаллическим алмазом. Вследствие большого объема материала, срезаемого при ВСО на больших подачах, желательнее использовать двузубые фрезы, чтобы стружка могла свободно уместиться в канавке. Опыт показывает, что целесообразнее применять специальные фрезы и режущие пластины с большими передними углами заточки.

Вспомогательный инструмент для крепления инструментов должен иметь конус типа HSK (или типа VBT), обладающий высокой стабильностью (статической и динамической), точностью и возможностью самобалансирования на высоких скоростях, а также меньшей массой по сравнению с аналогами.

Назначение режимов резания вызывает трудности, связанные с тем, что хотя они и указаны в каталогах применяемого инструмента, но имеют предварительный характер. Окончательно же режимы резания устанавливают исходя из опыта и экспериментов для конкретно обрабатываемого материала.

Для самых труднообрабатываемых материалов подачу на зуб можно вычислить по формуле $f_z = 0,01D$ при выполнении условия $0,005D < f_z < 0,02D$, где D — номинальный диаметр фрезы

Наибольшая стойкость наблюдается при использовании обдува. Поскольку тепло концентрируется в стружке, ее надо просто удалить из зоны резания, а не охлаждать заготовку и инструмент. В случае применения смазочно-охлаждающей жидкости инструмент подвергается циклическим температурным нагрузкам на кромке, что приводит к преждевременному выкрашиванию. А как известно, для инструмента постоянная тепловая нагрузка даже при сред-

них температурах предпочтительнее, чем меняющаяся циклическая нагрузка.

Иногда при ВСО используют охлаждающую эмульсию, причем не для охлаждения, а для смазки, так как она помогает скольжению стружки по режущей кромке без теплообмена.

Самым эффективным является применение масляного тумана с обдувом воздушной струей под большим давлением. При этом масло должно иметь растительное происхождение и быть безвредным для здоровья.

ВСО нельзя использовать без инновационных САМ-систем, обеспечивающих программирование такой обработки. К САМ-системе для ВСО предъявляется множество требований, так как от качества управляющих программ во многом зависит износ дорогостоящего станка и инструмента, а также качество самой обработки. САМ-система должна обеспечивать равномерность снимаемого слоя и плавность движения инструмента, иначе он сломается. Для этого необходимо выбрать правильную стратегию обработки и специальную траекторию движения инструмента [12]. При определении стратегии обработки и построении траектории следует обеспечить отсутствие резких изменений направления движения инструмента. САМ-система должна иметь возможность генерации траектории, базирующейся на сплайнах (Nurbs-based machining) и трохойдальной обработке (рис. 12).

К построению траектории инструмента предъявляется ряд требований: инструмент не должен долбить деталь, режущая нагрузка должна находиться в определенных для него пределах, холостые ходы должны быть минимизированы, а время прохождения всей траектории — сведено к минимуму и др.

Кроме того, САМ-система должна обеспечивать:

- широкий выбор вариантов гладкого подвода-отвода и связей между проходами;
- набор стратегий спиральной и эквидистантной обработки для чистового и чернового проходов, а также поиск оптимальной из них в различных зонах;
- автоматическое сглаживание траекторий в углах;
- исключение проходов полной шириной фрезы и автоматическое применение трохойдального врезания в этих местах;
- оптимизацию подач для сглаживания нагрузки на инструмент.

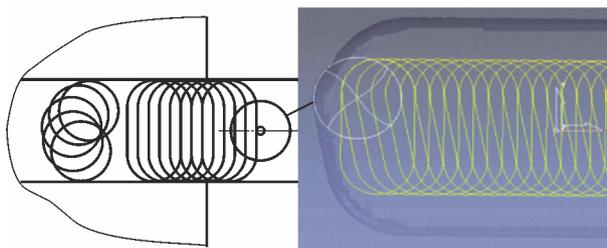


Рис. 12. Трохойдальная обработка

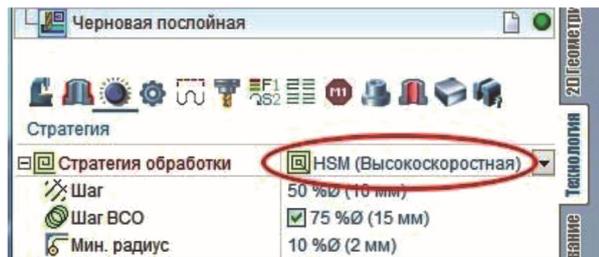


Рис. 13. Программирование ВСО

Для программирования ВСО с использованием роботов создана отечественная система SprutCAM, входящая в пятерку лучших мировых систем такого класса по функциональной эффективности и стоимости [12]. Модуль ВСО обеспечивает эффективное удаление материала заготовки из открытых и закрытых карманов с помощью различных схем построения траектории обработки (рис. 13). Существует возможность подготовки управляющих программ для роботов ведущих мировых производителей: Fanuc, KUKA, Staubli, ABB.

ВСО по сравнению с силовой (традиционной) обработкой обеспечивает следующие преимущества:

- сокращение времени производственного цикла на 50 % и более;
- повышение производительности и эффективности обработки;
- упрощение технологических процессов (отсутствие эрозионных и ручных доводочных операций);
- повышение качества обработки (получаемые поверхности — как после шлифования);
- увеличение экономичности (благодаря снижению времени обработки) и ресурса инструментов (смена инструмента или пластин происходит реже);
- уменьшение износа станка (постоянное усилие резания снижает переменные нагрузки двигателей);
- оптимальное использование времени;
- повышение эффективности использования станков с ЧПУ;

Литература

- [1] ISO 8373:2012. *Robots and robotic devices — Vocabulary*, 2012. 38 p.
- [2] Wallén J. *The history of industrial robot*. URL: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:316930/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения 17 апреля 2016).
- [3] *The continuing success story of industrial robots*. International Federation of Robotics. URL: [https://ifr.org/news/the-continuing-success-story-of-industrial-robots-](https://ifr.org/news/the-continuing-success-story-of-industrial-robots-1) (дата обращения 1 декабря 2016).

- возможность обработки:

- сложных тонкостенных деталей с обеспечением высокого качества;
- закаленных и труднообрабатываемых деталей твердостью 50 HRC и более;
- деталей малых размеров.

Несмотря на то что оборудование и инструменты для ВСО в несколько раз дороже стандартных аналогов, следует учитывать все преимущества ВСО перед традиционной обработкой. При грамотной настройке и большой загрузке оборудования (около 120 ч в неделю) стратегия ВСО способна довольно быстро окупить все затраты.

Выводы

1. Предложена формулировка понятия «робототехнологический комплекс», основанная на государственном стандарте. Для роботов последовательного действия разработана комплексная диаграмма классов РТК, основанная на моделях узлов движения обрабатываемого объекта и инструмента с добавлением необходимой оснастки. Диаграммы классов конкретных реализаций РТК, представляющие собой подмножества комплексной диаграммы, необходимы для формирования кинематических моделей РТК.

2. Приведены примеры использования РТК различного назначения: раскрой посредством шестикоординатной резки ножом, доступный только для соответствующих роботов, обрезка кромок криволинейных формообразующих деталей, пятикоординатная сварка и наплавка деталей. Отмечены такие преимущества роботов перед станками с ЧПУ, как использование параллельно работающих роботов и обработка длинномерных деталей.

3. Описана наиболее прогрессивная технология обработки резанием на РТК — ВСО. Приведены методы ее программирования.

- [4] Tabuchi H. *Japan looks to a robot future*. URL: http://www.nbcnews.com/id/23438322/ns/technology_and_science-innovation/t/japan-looks-robot-future/#.WInLuVOLSp0 (дата обращения 17 апреля 2016).
- [5] *The new hire: How a new generation of robots is transforming manufacturing*. URL: <http://www.pwc.com/us/en/industrial-products/next-manufacturing/robotic-trends-changing-manufacturing.html> (дата обращения 10 декабря 2016).
- [6] Hagerty J.R. *Meet the New Generation of Robots for Manufacturing*. URL: <http://www.wsj.com/articles/meet-the-new-generation-of-robots-for-manufacturing-1433300884> (дата обращения 12 декабря 2016).
- [7] *Robotics in Manufacturing*. URL: <http://www.acieta.com/why-robotic-automation/robotics-manufacturing> (дата обращения 17 апреля 2016).
- [8] Саврасов Г.В., Максимова Т.Н. Манипуляционные системы для хирургии. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*, 2002, № 9, с. 68–72.
- [9] Dave Evans. *The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. URL: http://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf (дата обращения 11 апреля 2011).
- [10] Bonomi F., Milito R., Zhu Jiang, Addepalli S. *Fog Computing and Its Role in the Internet of Things*. URL: <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2012/paper/mcc/p13.pdf> (19 июня 2012).
- [11] Hersent O., Boswarthick D., Elloumi O. *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. NJ, Wiley, 2012. 370 p.
- [12] *СПРУТ-Технология*. URL: <http://www.sprut.ru> (дата обращения 15 декабря 2016).

References

- [1] ISO 8373:2012. *Robots and robotic devices — Vocabulary*, 2012. 38 p.
- [2] Wallén J. *The history of industrial robot*. Available at: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:316930/FULLTEXT01.pdf> (accessed 15 December 2016).
- [3] *The continuing success story of industrial robots*. International Federation of Robotics. Available at: <https://ifr.org/news/the-continuing-success-story-of-industrial-robots-> (accessed 1 December 2016).
- [4] Tabuchi H. *Japan looks to a robot future*. Available at: http://www.nbcnews.com/id/23438322/ns/technology_and_science-innovation/t/japan-looks-robot-future/#.WInLuVOLSp0 (accessed 17 April 2016).
- [5] *The new hire: How a new generation of robots is transforming manufacturing*. Available at: <http://www.pwc.com/us/en/industrial-products/next-manufacturing/robotic-trends-changing-manufacturing.html> (accessed 10 December 2016).
- [6] Hagerty J.R. *Meet the New Generation of Robots for Manufacturing*. Available at: <http://www.wsj.com/articles/meet-the-new-generation-of-robots-for-manufacturing-1433300884> (accessed 12 December 2016).
- [7] *Robotics in Manufacturing*. Available at: <http://www.acieta.com/why-robotic-automation/robotics-manufacturing> (accessed 17 April 2016).
- [8] Savrasov G.V., Maksimova T.N. Manipulatsionnye sistemy dlia khirurgii [Handling systems for surgery]. *Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika* [Biomedical Radioelectronics]. 2002, no. 9, pp. 68–72.
- [9] Dave Evans. *The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Available at: http://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf (accessed 11 April 2011).
- [10] Bonomi F., Milito R., Zhu Jiang, Addepalli S. *Fog Computing and Its Role in the Internet of Things*. Available at: <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2012/paper/mcc/p13.pdf> (accessed 19 June 2012).
- [11] Elloumi O., Boswarthick D., Hersent O. *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. NJ, John Wiley & Sons, 2012. 370 p.
- [12] *СПРУТ-Технология*. Available at: <http://www.sprut.ru> (accessed 15 December 2016).

Информация об авторах

ЕВГЕНЕВ Георгий Борисович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: g.evgenyev@mail.ru).

КРЮКОВ Станислав Сергеевич (Москва) — старший преподаватель кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: stask@sprut.ru)

ЧАСТУХИН Александр Валериевич (Москва) — руководитель отдела САПР ЧПУ. ООО «Центр СПРУТ-Т» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 3, стр. 5, e-mail: chastuhin@sprut.ru).

Information about the authors

EVGENEV Georgiy Borisovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Computer Systems of Production Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: g.evgenyev@mail.ru).

KRYUKOV Stanislav Sergeevich (Moscow) — Senior Lecturer, Department of Computer Systems of Production Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: stask@sprut.ru).

CHASTUKHIN Aleksandr Valerievich (Moscow) — Head of Department, CAD Systems and CNC. ООО SPRUT-T Centre (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 3, Block 5, e-mail: chastuhin@sprut.ru).

Проектирование и отработка
ракетно-прямоточных
двигателей на твердом топливе



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
под общей редакцией **В.А. Сорокина**

«Проектирование и отработка ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе»

Приведены основы расчета характеристик ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе и их узлов, позволяющих выполнять основные термодинамические, газодинамические, тепловые и прочностные расчеты для выбора конструктивной схемы и основных размеров ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе.

Для студентов старших курсов и аспирантов авиа- и ракетостроительных специальностей высших технических учебных заведений, научных работников и инженеров, занимающихся разработкой, проектированием и испытаниями высокоскоростных летательных аппаратов и двигательных установок на основе ракетно-прямоточного двигателя на твердом топливе.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru