

УДК 004.624

DOI 10.18698/0536-1044-2017-4-47-56

Методы программирования комбинированной аддитивно-субтрактивной обработки

Г.Б. Евгеньев

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

Programming Methods for Combined Additive-Subtractive Processing

G.B. EvgenevBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: g.evgenev@mail.ru

i Происходящие в настоящее время революционные преобразования в области машиностроения привели к созданию прорывных технологий, основанных на комбинированной аддитивно-субтрактивной обработке. До сих пор формирование изделия по трехмерным моделям проводилось с помощью 3D-принтеров, однако они имеют ограничения по габаритам и точности печатаемых изделий. Станки с ЧПУ и роботы при наличии соответствующего инструмента позволяют исключить проблему с размерами, а механическая обработка помогает решить вопрос точности. Благодаря комбинированным операциям стало возможным проводить на оборудовании с ЧПУ как генерацию заготовок путем наплавки с формированием многослойных покрытий из различных материалов, так и их обработку с получением деталей в соответствии с требованиями чертежей. Применение таких операций значительно сокращает материалоемкость и трудоемкость изготовления изделий. В статье приведено описание методов программирования комбинированных аддитивно-субтрактивных операций.

Ключевые слова: комбинированная аддитивно-субтрактивная обработка, гибридные обрабатывающие центры, оборудование с ЧПУ, программирование комбинированных операций.

i Recent revolutionary changes in the field of engineering have led to the emergence of truly breakthrough technologies based on combined additive-subtractive processing. Up until now 3D part formation has been performed using 3D printers which, however, have limitations with regards to the dimensions and accuracy of the printed pieces. CNC machines and robots, if equipped with appropriate tools, can solve the problem of dimensions, while machining work can improve the accuracy. Combined operations allow the generation of workpieces on CNC machines by depositing various materials to form multilayered surfaces as well as machining to produce parts in accordance with drawings requirements. This results in a significant reduction in material and labour intensity of the manufacturing process. This paper describes programming methods of combined additive-subtractive operations.

Keywords: combined additive-subtractive processing, hybrid machining centers, CNC equipment, programming for combined operations.

Основные цели при разработке технологических процессов — снижение трудоемкости и материалоемкости. Для достижения первой из них необходимо выбирать заготовку, максимально приближенную по конфигурации к готовой детали. Простейший выбор — заготовка из проката. Для единичного и мелкосерийного производства этот вариант, к сожалению, единственный. Поэтому большой объем материала превращается в стружку, которую приходится собирать и отправлять на переплавку. Улучшить коэффициент использования материала можно с помощью штампованных и литых заготовок. Однако в этом случае возрастает трудоемкость технологической подготовки производства, так как необходимо разработать заготовку, а также спроектировать и изготовить соответствующую оснастку.

Самым эффективным направлением сокращения трудоемкости рабочего процесса до недавнего времени была интеграция операций. Например, токарно-фрезерные обрабатывающие центры с противопинделем за одну операцию способны провести полную обработку детали с двух сторон.

На сегодняшний день кардинальным способом снижения материалоемкости и трудоемкости представляется применение комбинированных аддитивно-субтрактивных операций, позволяющих на одном оборудовании с ЧПУ получать полностью или частично заготовки с максимальным приближением к требуемой форме, а также проводить их обработку. По этой причине в 2014 г. крупнейшие компании-производители станков начали изготавливать гибридные обрабатывающие центры, оснащенные опцией лазерной наплавки. Например, фирма DMG MORI (Германия) выпустила первую такую машину Lasertec 65, сочетающую в себе гибкость лазерной наплавки, точность металлообработки и возможность переключения между опциями в процессе создания детали. Аналогичный станок INTEGREX i-400AM разработала компания Mazak (Япония).

По тематике данной статьи имеется достаточно много публикаций, например пособие для инженеров по применению аддитивных технологий в машиностроении [1]. В нем приведены их классификация, а также общие сведения об основных видах АМ-технологий (с примерами их практического использования) и производителях АМ-машин. Однако во-

просы программирования аддитивных операций на оборудовании с ЧПУ там не были рассмотрены как и в работах [2–7]. Некоторые публикации посвящены комбинированной аддитивно-субтрактивной обработке [8–11], но и в них проблемы программирования не раскрыты. Поэтому настоящая статья, так же является весьма актуальной.

Цель работы — описание методов программирования комбинированных операций на оборудовании с ЧПУ.

Аддитивные операции. В качестве такой операции рассмотрим наплавку — нанесение слоя металла на поверхность заготовки или изделия посредством сварки плавлением [1–3].

Изготовительная наплавка служит для получения новых биметаллических (многослойных) изделий, состоящих из основы (основного металла), обеспечивающей необходимую конструкционную прочность, и наплавленного рабочего слоя (наплавленного металла) с особыми свойствами (износостойкость, термостойкость, коррозионная стойкость и т. д.).

Восстановительную наплавку применяют для придания первоначальных размеров изношенным или поврежденным деталям. В этом случае состав и свойства наплавленного металла могут быть близки к таковым для основного (восстановительная размерная наплавка) или отличаться от них (восстановительная износостойкая наплавка).

Наплавленный металл вследствие перемешивания с основным и взаимодействия с атмосферой дуги и шлаком отличается по составу от электродного (присадочного) металла.

Наиболее перспективной является модульная технология лазерной наплавки, или LENS-технология, которая в основном предназначена для ремонта и восстановления дорогостоящих изношенных или разрушенных деталей: валов, опорных втулок, прокатных валков, деталей пресс-форм и др. [3].

Такую технологию можно использовать как гибридную, т. е. совмещать в одной установке возможности станка или робота с ЧПУ для металлообработки и опцию лазерной наплавки для нанесения дополнительных элементов на готовые детали или для восстановления утраченных и изношенных фрагментов деталей.

В соответствии с LENS-технологией (рис. 1), разработанной компанией Optomec (США)

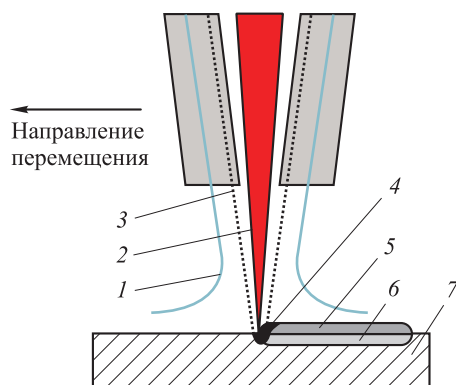


Рис. 1. Схема наплавки:

1 — защитный/транспортный газ; 2 — луч лазера;
3 — порошок; 4 — расплавленная зона; 5 — наносимый материал; 6 — зона наплавки; 7 — деталь

в конце 90-х годов, металлический порошок поступает в зону наплавки одновременно с лучом лазера (мощностью 0,5...4,0 кВт). Оператор может изменять состав наносимого порошка (за счет подключаемых питателей, до 8 шт.), скорость перемещения головки, размер пятна лазерного луча, защитную атмосферу в зоне расплава, что обеспечивает получение необходимой структуры наплавленной зоны [3].

При лазерной наплавке допустимо использовать практически любые металлы, сплавы на основе титана, никеля, кобальта, алюминия, меди и цинка, нержавеющие стали, жаропрочные и тугоплавкие материалы на основе вольфрама, молибдена и ниобия, а также композитные материалы с использованием карбидов титана, вольфрама и хрома [3].

Требования к порошкам для технологии-LENS помимо нужного химического состава следующие: сферическая форма, размеры частиц 45...150 мкм, отсутствие сателлитов и газовых включений [3].

К достоинствам такой технологии относятся [3]:

- возможность добавления материала или элементов к существующей структуре;
- правильная микроструктура и контроль за свойствами материала, процессом и газовой средой, а следовательно, гарантированное качество наплавки;
- возможность использования нескольких материалов, а также сплавов, которые нельзя получить другим способом;
- минимальное воздействие на микроструктуру материала подложки и малая зона теплового воздействия;
- прямое цифровое производство;

- малые припуски на обработку (точное выращивание) и сравнительно небольшое время, затрачиваемое на финишную обработку;
- полный компьютерный контроль, гибкое проектирование путей инструмента (автоматизация и повторяемость);
- зависимость скорости наплавки металлических порошков от мощности лазера (0,5 кВт — 0,1 кг/ч; 4 кВт — 1,0 кг/ч);
- шероховатость поверхности наплавки 12...25 мкм.

Испытания, проведенные в США (компанией Boeing), Европе (корпорацией EADS) и России (ООО НТО «ИРЭ-Полюс»), показали, что по основным прочностным характеристикам детали с наплавкой превосходят аналоги, полученные литьем или литьем с горячим изостатическим прессованием (HIP), и сопоставимы с коваными деталями [3].

Уникальной особенностью лазерной наплавки является возможность получать изменяющиеся по толщине наносимого слоя состав и структуру материала. Это так называемая градиентная наплавка. Например, сначала можно наносить материал, близкий по свойствам к подложке, а ближе к поверхности наплавки — более твердые или износостойкие сплавы. Причем в объем наплавляемого слоя можно вводить и биосовместимые материалы в виде интерметаллидов, которые другими методами не соединить. По прочностным характеристикам и сцеплению с основой градиентная наплавка превосходит основной материал. Поэтому ее можно использовать при ремонте изношенных или разрушенных деталей, а также для упрочнения их критически важных зон [3].

Комбинированные операции. В качестве примера выбрана комбинированная обработка на станке INTEGREX i-400AM компании Mazak (Япония), включающая в себя наплавку (рис. 2)



Рис. 2. Наплавка на поверхность тестовой детали

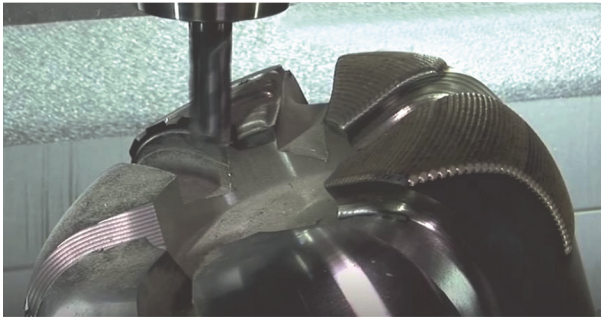


Рис. 3. Пятикоординатное фрезерование тестовой детали

и пятикоординатное фрезерование тестовой детали (рис. 3).

Методы программирования комбинированных операций на оборудовании с ЧПУ опишем с использованием отечественной системы SprutCAM [12, 13]. Чтобы запрограммировать такую операцию, необходимо задать те виды обработки, которые входят в ее состав. Для рассматриваемого примера это фрезерование и аддитивная обработка, что отмечено во вкладке «Поддерживаемые применения» (рис. 4).

Программирование аддитивной обработки. Аддитивные операции, реализованные в САМ-системе, являются универсальными, т. е. не привязанными к конкретной технологии наплавки и используемому типу оборудования. Они лишь реализуют геометрию процесса и генерируют траекторию, которая последовательно, слой за слоем, проходит над заданной поверхностью и воспроизводит ее снизу вверх.

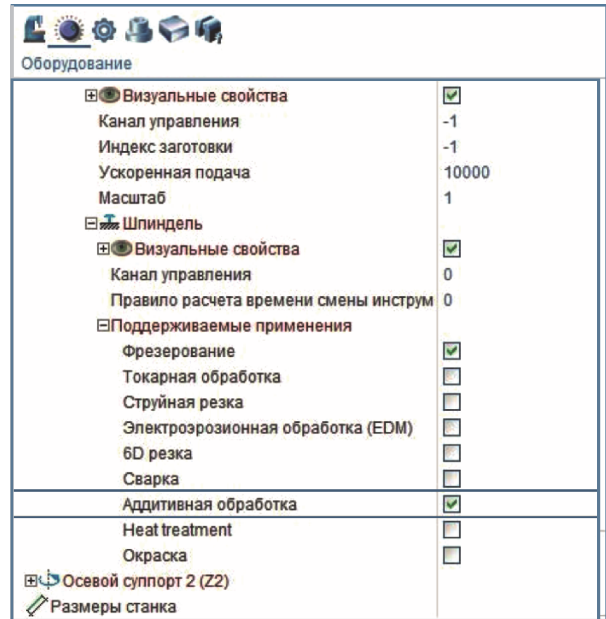


Рис. 4. Выбор видов обработки

Настройку на конкретные технологию и оборудование проводят либо написанием специального постпроцессора, либо (если первого недостаточно) созданием специальных адаптированных версий операций на основе универсальных операций наплавки, реализующих особенности конкретной технологии и специфическое управление оборудованием.

Чтобы сделать операции наплавки доступными для создания, необходимо выбрать станок или робот, который поддерживает такой

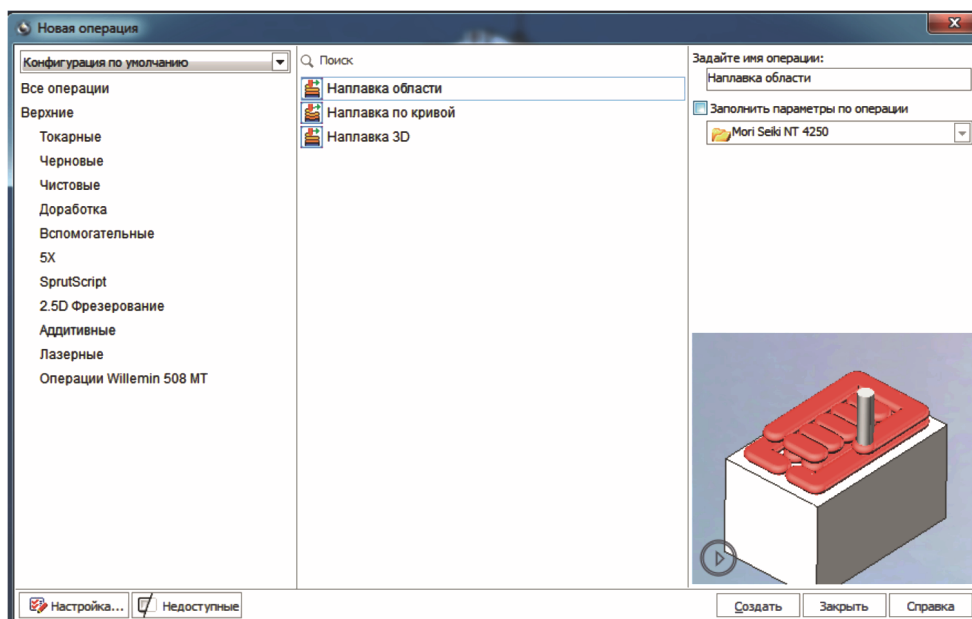


Рис. 5. Задание аддитивной обработки

тип обработки. Для этого следует поставить галочку в настройках держателя инструмента «Аддитивная обработка» (см. рис. 4). Далее нужно выбрать вид обработки: наплавку области, наплавку по кривой или наплавку 3D (рис. 5).

Операция наплавки области (рис. 6) предназначена для добавления слоя материала на локальный участок заготовки, ограниченный кривыми. Область для наплавки указывается в окне «Рабочее задание» (рис. 7).

Сначала в окне «Рабочее задание» определяется базовая поверхность, на которую будет наплавлен материал, для чего следует нажать одноименную кнопку и выбрать в открывшемся графическом окне необходимую поверхность: плоскость, цилиндр или тело вращения. САМ-система сама внесет нужные параметры, но при желании их можно подкорректировать в свойствах базовой поверхности и затем нажать кнопку «Да».

Чтобы указать локальную область, следует выделить кривые на экране, либо ребра 3D-модели по периметру желаемой области и добавить их, нажав кнопку «Выступ». Аналогично можно добавить карманы (отверстия) внутри выступа. Чтобы ограничить верхний или нижний уровни, можно выделить на экране любой элемент геометрии, лежащий на нужном уровне, и нажать на кнопку «Верхний уровень» или «Нижний уровень» соответственно. Также верхний и нижний уровни можно задать числовыми значениями в инспекторе свойств операции.

Помимо уровней в инспекторе свойств можно задать следующие параметры и опции.

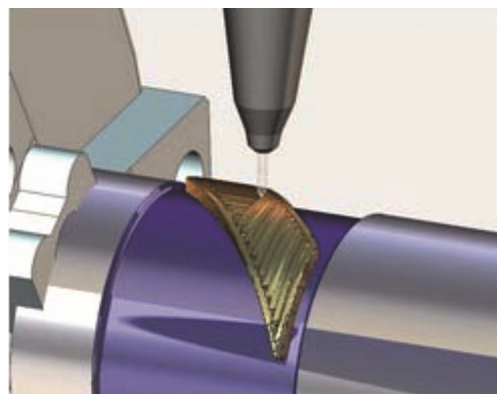


Рис. 6. Операция наплавки области

- *Стратегия обработки.* Доступны два варианта стратегии: параллельная и эквидистантная.
- *Угол ходов* для параллельной стратегии. При включении опции «Поворачивать угол между слоями» для каждого нового слоя он будет увеличиваться на 90°.
- *Количество эквидистантных проходов* для параллельной стратегии. Оно позволяет улучшить качество наружной поверхности, если задано количество, большее нуля.
- *Шаг.* Между соседними строками его можно задать в текущих единицах измерения (мм, дюйм) или в процентах от диаметра инструмента (наплавляемого пятна).
- *Зазор для предотвращения нахлеста.* Если выполняется проход вдоль замкнутой кривой, то для исключения наплавления слоев друг на друга в месте соединения начала и конца необходимо оставить зазор, приблизительно равный диаметру наплавляемого пятна.
- *Шаг в глубину.* Он определяет, за сколько слоев нужно наплавить материал от нижнего

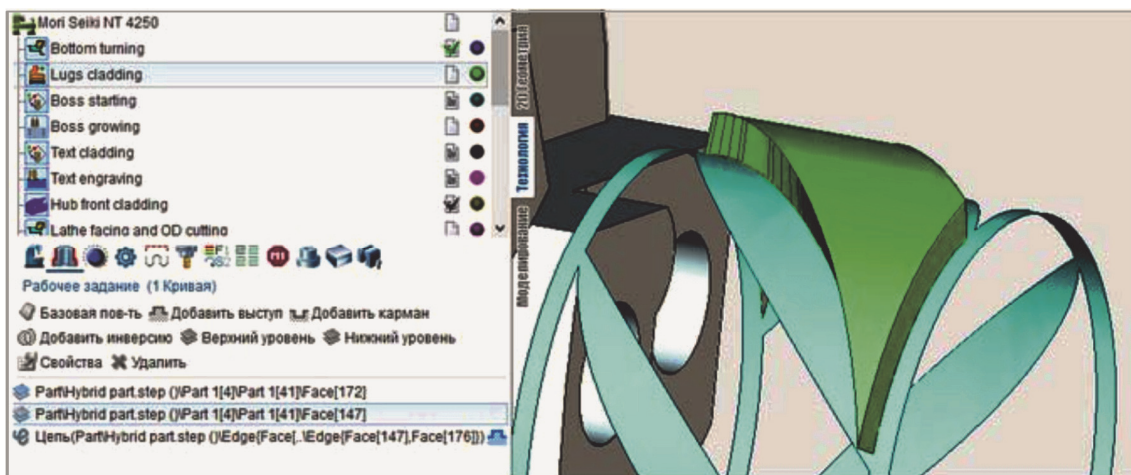


Рис. 7. Окно «Рабочее задание» операции наплавки области

уровня к верхнему. Можно либо указать этот шаг в текущих единицах (мм, дюйм) или процентах от рабочей длины инструмента, либо задать количество слоев, и шаг будет рассчитан автоматически.

- *Направление обработки.* Доступны варианты: зигзаг, вперед, назад. Если выбран зигзаг, то направление прохода будет меняться для каждой следующей строки. Иначе все проходы будут выполнены в строго заданном направлении.

- *Проецировать траекторию на деталь.* Эта опция позволяет проводить наплавку на поверхность сложной геометрической формы. Сформированная на базовой поверхности исходная траектория проецируется на 3D-модель, указанную в качестве детали операции.

- *Ориентация оси инструмента.* Доступны варианты: зафиксировано, по нормали к поверхности 4D, по нормали к поверхности 5D, по нормали к базовой поверхности. Эта опция определяет закон расчета нормали инструмента в каждой точке траектории. Первый вариант — ориентация нормали инструмента будет оставаться неизменной, совпадающей с осью Z системы координат операции; второй — нормаль будет взята с детали, а наклон учтен только вдоль одной из поворотных осей; третий — нормаль совпадает с нормалью к детали; четвертый — нормаль будет взята с заданной базовой поверхности.

- *Безопасный уровень.* Определяет уровень, на котором следует совершать длинные ускоренные перемещения.

- *Максимальное расстояние короткого перехода.* Определяет расстояние, при превышении которого переход считается длинным.

- *Тип короткого перехода, тип длинного перехода.* Доступны варианты: напрямую, через безопасный уровень.

- *Переход между соседними проходами на ускоренной подаче.* Если эта опция выключена, то переход между смежными проходами будет выполнен на рабочей подаче (с включенной подачей наплавляемого материала, горелкой, лазером и т. п.). Если опция включена, то переход будет проведен на ускоренной подаче, т. е. без наплавления материала.

После настройки свойств операции можно нажать кнопку «Пуск» для расчета траектории, перейти в режим моделирования и увидеть симуляцию наплавления материала в месте прохода кончика инструмента. Толщина

наращиваемого в моделировании слоя определяется параметром «Рабочая длина» инструмента, а если он не задан (больше диаметра инструмента), то толщина принимается равной диаметру инструмента.

Программирование субтрактивной обработки. В системе SprutCAM имеется возможность программирования всех видов субтрактивной обработки на оборудовании с ЧПУ. Поскольку в примере, приведенном на рис. 3, использована пятикоординатная фрезерная обработка, рассмотрим этот вариант программирования субтрактивной обработки.

Обработка типа 5D контур предназначена для формирования непрерывной пятикоординатной траектории перемещения инструмента. Пример такой обработки приведен на рис. 8.

Инструмент, режимы резания, подходы и отходы задаются так же, как и во всех фрезерных операциях. Рабочий инструмент выбирают из базы данных с помощью интерфейсных окон (рис. 9).

На рис. 9 показаны эскиз инструмента, его имя (концевая фреза диаметром 20 мм), значения размерных параметров в соответствии с эскизом, направление резания (правый или левый инструмент), параметры резания (стойкость, число зубьев, вылет инструмента, максимальный угол врезания), номера корректоров на длину инструмента и его радиус. Инструменты следует выбирать из библиотеки.

Режимы резания текущего прохода (обороты вращения шпинделя, значения ускоренной подачи и подач для различных участков траектории инструмента) определяются на панели «Подача» в окне параметров операции (рис. 10).

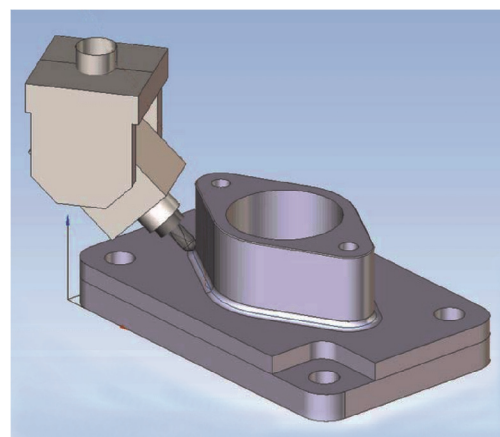


Рис. 8. Пятикоординатная обработка

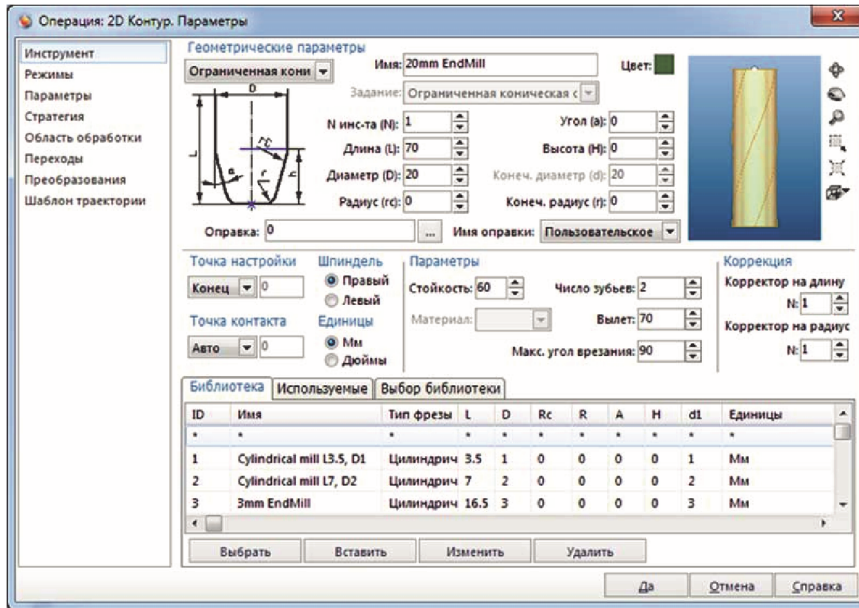


Рис. 9. Выбор фрезерного инструмента

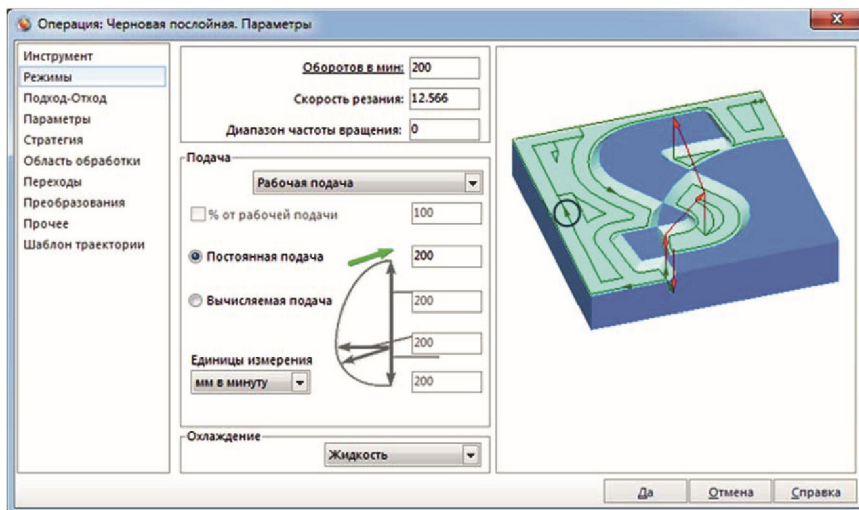


Рис. 10. Режимы фрезерной обработки

Скорость вращения шпинделя можно задать указанием частоты вращения или скорости резания. В этом же окне устанавливаются подачи для различных участков траектории.

Способы формирования черновых рабочих ходов и стратегия объединения всех ходов операции размещены во вкладке «Стратегия» окна параметров (рис. 11).

Панели «Уровни» и «Чистовой проход по Z» позволяют сформировать дополнительные рабочие ходы для каждого чистового прохода. Параметр «Нижний уровень» определяет расстояние до обрабатываемой поверхности. Если указано положительное значение, то при чистовом проходе инструмент не будет доходить

до детали указанное расстояние, а при отрицательном значении он будет погружаться в деталь на это расстояние. Параметр «Верхний уровень» определяет максимальный припуск, который необходимо снимать при черновых проходах, а «Шаг» — ширину фрезерования или толщину снимаемого за один проход слоя. Припуск чистового прохода позволяет задать толщину снимаемого материала на этой операции. Параметр «Припуск» обеспечивает сдвиг всех рабочих ходов (чистовых и черновых) от поверхности на заданное расстояние. Положительное значение соответствует удалению от поверхности, отрицательное — углублению в нее.

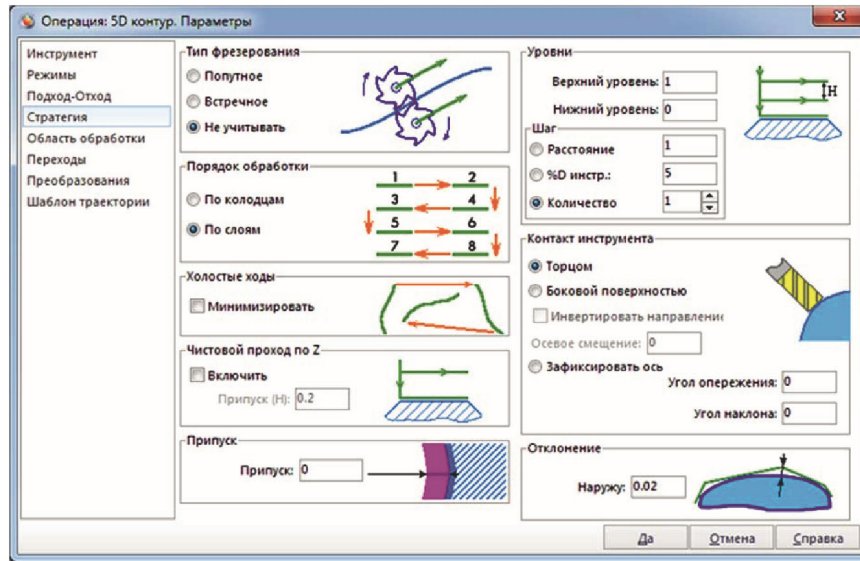


Рис. 11. Стратегия обработки типа 5D контур

Параметр «Отклонение» определяет точность формируемой траектории, а «Тип фрезерования» — стратегию объединения рабочих ходов в единую траекторию. При выборе попутного фрезерования направление обработки определяется геометрией кривых или поверхностей. При встречном фрезеровании все проходы инвертируются. Режим «Не учитывать» обеспечивает формирование зигзагообразной траектории.

При формировании проходов операции могут образовываться петли. По умолчанию эти коллизии не контролируются. На панели «Область обработки» можно установить режим «Учитывать деталь» (рис. 12). В этом случае каждая точка рабочего хода будет контролироваться, т. е. если его фрагмент резает де-

таль, то он исключается из результирующей траектории. Опция «Учитывать заготовку» работает так же, как в остальных фрезерных операциях.

На панели «Переходы» можно выбрать способ формирования переходов между рабочими ходами обработки (рис. 13).

Ключевым параметром является безопасная координата. Она определяет наименование оси и ее значение, где можно осуществлять быстрые перемещения. Например, если выбрана «Позиция оси X» и значение уровня равно 100, то это означает, что безопасная плоскость определяется как $X = 100$. Параметры «Способ перехода» и «Короткий переход» действуют так же, как и во всех остальных фрезерных операциях.

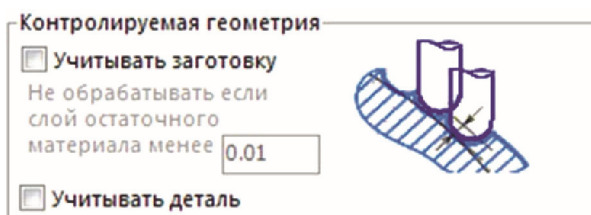


Рис. 12. Контроль геометрии

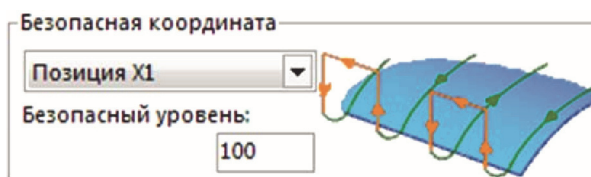


Рис. 13. Способ формирования переходов между рабочими ходами обработки

Выводы

1. Кардинальным способом снижения общей трудоемкости производства деталей и повышения коэффициента использования материала является применение комбинированных аддитивно-субтрактивных операций, позволяющих на одном оборудовании с ЧПУ получать полностью или частично заготовки с максимальным приближением к требуемой форме, а также проводить их обработку.

2. В качестве аддитивной операции для этих целей целесообразно использовать изготовительную наплавку — нанесение слоя металла на поверхность заготовки или изделия посредством сварки плавлением.

3. При лазерной наплавке можно использовать практически любые металлы, сплавы на основе титана, никеля, кобальта, алюминия, меди и цинка, нержавеющие стали, жаропрочные и тугоплавкие материалы на основе вольфрама, молибдена и ниобия, а также композитные материалы с применением карбидов титана, вольфрама и хрома.

4. Уникальной особенностью лазерной наплавки является возможность получать изменяющиеся по толщине наносимого слоя состав и структуру материала. Отечественная система SprutCAM позволяет с высокой эффективностью программировать комбинированные аддитивно-субтрактивные операции на оборудовании с ЧПУ.

Литература

- [1] Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. *Аддитивные технологии в машиностроении*. Москва, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
- [2] Bourella D.L., Beaman J.J., Jr., Leub M.C., Rosenc D.W. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. *US — TURKEY Workshop on Rapid Technologies*, 2009. URL: <http://www.turkcadcam.net/haber/2009/rapidtech-workshop/presentations/Presentation02.pdf> (дата обращения 15 декабря 2016).
- [3] Максимов Н.М. LENS-технология лазерной наплавки. *РИТМ*, 2015, № 5(103), с. 44–48.
- [4] Beyer E. *New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency*. Fraunhofer IWS, 2011. URL: <http://www.lia.org/blog/2011/05/high-performance-laser-cladding> (дата обращения 15 декабря 2016).
- [5] Dutta B., Palaniswamy S., Choi J., Song L.J., Mazumder J. Additive manufacturing by direct metal deposition. *Advanced Materials & Processing*, 2001, vol. 169(5), pp. 33–36.
- [6] *Additive Manufacturing Consortium*. URL: <http://ewi.org/additive-manufacturing-consortium/> (дата обращения 15 декабря 2016).
- [7] *Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Fort Collins, Wohlers associates, 2012. 286 p.
- [8] Rogers T. *Additive Manufacturing vs Subtractive Manufacturing*. Creative Mechanisms. 2016. URL: <https://www.creativemechanisms.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing> (дата обращения 15 декабря 2016).
- [9] Wright I. *The Battle Of Manufacturing: Additive vs Subtractive*, 2016. URL: <http://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13025/The-Battle-of-Manufacturing-Additive-vs-Subtractive.aspx> (дата обращения 15 декабря 2016).
- [10] Jonson J. *Will Hybrid Additive/Subtractive Fabrication Devices prove to be the Key to Unlocking an Even More Successful Manufacturing Future?* URL: <https://3dprintingindustry.com/news/hybrid-additivesubtractive-fabrication-devices-and-manufacturing-future-3237/> (дата обращения 15 декабря 2016).
- [11] Warfield B. *Hybrid Machining: Combining Additive and Subtractive in One Machine*. 2014, URL: <http://blog.cnccookbook.com/2014/08/18/hybrid-machining-combining-additive-subtractive-one-machine/> (дата обращения 15 декабря 2016).
- [12] СПРУТ-Технология. URL: www.sprut.ru (дата обращения 15 декабря 2016).
- [13] Евгеньев Г.Б., ред. *Основы автоматизации технологических процессов и производств*. В 2 т. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015, т. 1. 448 с., т. 2. 480 с.

References

- [1] Zlenko M.A., Nagaitsev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, NAMI publ., 2015. 220 p.
- [2] Bourella D.L., Beaman J.J., Jr., Leub M.C., Rosenc D.W. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. *US — TURKEY Workshop on Rapid Technologies*, 2009. Available at: <http://www.turkcadcam.net/haber/2009/rapidtech-workshop/presentations/Presentation02.pdf> (accessed 15 December 2016).

- [3] Maksimov N.M. LENS — tekhnologiia lazernoi naplavki [Lens — technology of laser cladding]. *RITM* [Rhythm]. 2015, no. 5(103), pp. 44–48.
- [4] Beyer E. *New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency*. Fraunhofer IWS, 2011. Available at: <http://www.lia.org/blog/2011/05/high-performance-laser-cladding> (accessed 15 December 2016).
- [5] Dutta B., Palaniswamy S., Choi J., Song L.J., Mazumder J. Additive manufacturing by direct metal deposition. *Advanced Materials & Processing*, 2001, vol. 169(5), pp. 33–36.
- [6] *Additive Manufacturing Consortium*. Available at: <http://ewi.org/additive-manufacturing-consortium/> (accessed 15 December 2016).
- [7] *Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Fort Collins, Wohlers associates, 2012. 286 p.
- [8] Rogers T. *Additive Manufacturing vs Subtractive Manufacturing. Creative Mechanisms*. 2016. Available at: <https://www.creativemechanisms.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing> (accessed 15 December 2016).
- [9] Wright I. *The Battle Of Manufacturing: additive vs Subtractive*. 2016. Available at: <http://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13025/The-Battle-of-Manufacturing-Additive-vs-Subtractive.aspx> (accessed 15 December 2016).
- [10] Jonson J. *Will Hybrid Additive/Subtractive Fabrication Devices prove to be the Key to Unlocking an Even More Successful Manufacturing Future?* Available at: <https://3dprintingindustry.com/news/hybrid-additivesubtractive-fabrication-devices-and-manufacturing-future-3237/> (accessed 15 December 2016).
- [11] Warfield B. *Hybrid Machining: Combining Additive and Subtractive in One Machine*. 2014. Available at: <http://blog.cnccookbook.com/2014/08/18/hybrid-machining-combining-additive-subtractive-one-machine/> (accessed 15 December 2016).
- [12] Available at: www.sprut.ru (accessed 15 December 2016).
- [13] *Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* [Basics of automation of technological processes and production]. Ed. Evgenev G.B. Moscow, Bauman Press, 2015, vol. 1. 448 p., vol. 2. 480 p.

Статья поступила в редакцию 09.01.2017

Информация об авторе

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.evgenev@mail.ru).

Information about the author

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