

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

В.В. Зиняев, С.М. Балашов (ФГУП «ЦАГИ» им. Н.Е. Жуковского)

Рассматривается включение аддитивной технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков (SLM-технология) [1] в составе интегрированной автоматизированной системы проектирования и изготовления аэродинамических моделей летательных аппаратов (ЛА). Определены типовые детали, применение для которых SLM-технология является особенно эффективным. Показано, что качество изготовления и эффективность технологического процесса зависят от загрузки установки, рационального размещения деталей в технологической зоне¹.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление металлов, SLM-технология, проектирование и изготовление аэродинамических моделей.

Введение

В современных условиях аддитивная технология селективного лазерного сплавления металлических порошковых материалов (SLM-технология) [1], обеспечивающая изготовление деталей повышенной сложности в одном технологическом переходе с прочностными характеристиками, не уступающими деталям, изготавливаемым в традиционных технологиях, становится чрезвычайно перспективной при внедрении ее в опытное производство ответственных технических изделий. К ним в полной мере относится отраслевое производство аэродинамических моделей летательных аппаратов (ЛА), действующее в структуре ФГУП «ЦАГИ».

Основным назначением изготавливаемых моделей является обеспечение экспериментальной отработки разрабатываемых изделий авиационной техники, а также валидация методов аэродинамического расчета. Аэродинамические модели должны отвечать повышенным требованиям к точности изготовления и прочности конструкции при удовлетворении требований к снижению трудоемкости и стоимости изготовления, что определяет соответствующие требования к использованию инновационных технологий. С другой стороны, разработка и изготовление аэродинамических моделей, включающая широкое применение оборудования с ЧПУ, обеспечивается интегрированием систем автоматизации, охватывающих все

составляющие выполняемых проектно-технологических работ. Поэтому аддитивная SLM-технология должна быть включена в нее как компонент общей системы автоматизации производства.

Эффективность технологического процесса SLM-технологии определяется целым рядом факторов, в числе которых: стоимость используемых порошковых материалов; производительность процесса изготовления; условия размещения деталей в рабочей области установки: шероховатость и объемный припуск при изготовлении; конструкция поддерживающих элементов, соединяющих деталь и строительную платформу, удаляемых по завершению изготовления; финишной обработкой, проведение которой на оборудовании с ЧПУ или другом оборудовании требует добавление к конструкции изделия базирующих и установочных элементов.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на качество изготавливаемых с применением SLM-технологии деталей аэродинамических моделей, а также зависимость производительности от заполнения рабочего объема установки лазерного сплавления.

Область применения

На рис. 1 показана наиболее распространенная серийно выпускаемая установка лазерного сплавления типа EOSINT M280 и ее рабочая зона, в которой происходит послойное сплавление текущего слоя металлического порошкового материала лазерным лучом.

Основным ограничением в применении SLM-технологии являются размеры используемых установок и габариты рабочих зон, ограничивающие размеры изготавливаемых деталей. Для рассматриваемой установки рабочая зона ограничивается размерами 250x250x320 мм. Учитывая, что стоимость стальных порошковых материалов для SLM-технологии в 50...100 раз превосходит стоимость штатно поставляемых стальных заготовок [2], рациональным представляется применение аддитивной SLM-технологии в случае повышенной трудоемкости изготовления в традиционных процессах обработки, в частности, на оборудовании с ЧПУ. Число деталей в конструкции аэродинамических моделей сравнительно вели-

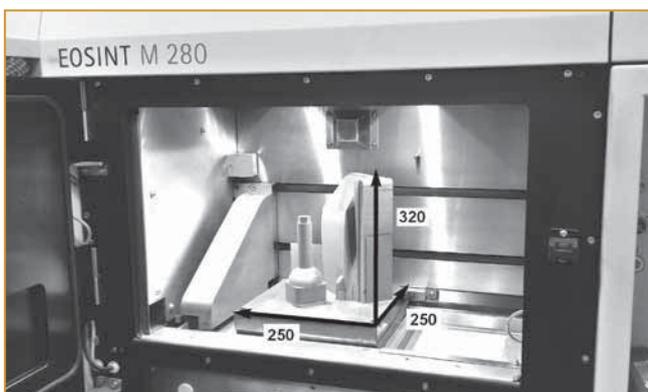


Рис. 1. Рабочая зона установки лазерного сплавления EOSINT M280

¹ Работа проведена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-29-03192/18.

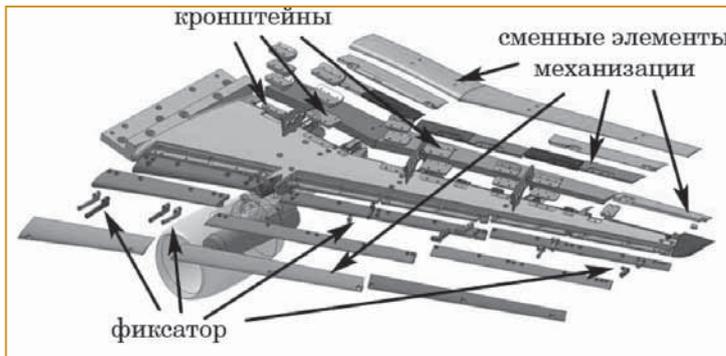


Рис. 2. Управляющие поверхности для механизированных консолей аэродинамической модели ЛА и фиксаторы их крепления

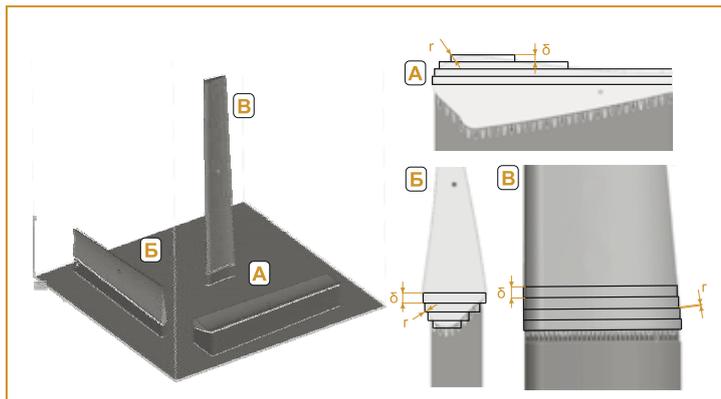


Рис. 3. Варианты размещения элемента механизации крыла на строительной платформе: а) на профиле, б) на ребре, в) на торце

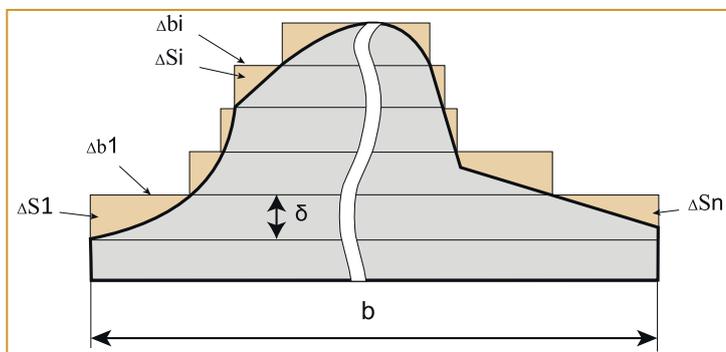


Рис. 4. Оценка припуска в контрольном сечении детали (δ - слой сплавления, b - ширина детали)

ко. Прежде всего, их составляют сменные элементы механизации крыла, кронштейны для их установки, аэродинамические законцовки консолей крыльев и др. (рис. 2). Предварительный анализ показал, что механические характеристики образцов, получаемых из широко распространенного порошка нержавеющей стали типа РН1, близки к применяемой в модельном производстве конструкционной стали типа 30ХГСА. Число элементов конструкции аэродинамической модели, приемлемых для изготовления по SLM-технологии, составляет ~100...300 единиц. С учетом уникальности каждой детали их изготовление в традиционном технологическом процессе, включа-

ющем изготовление заготовки, механической обработки деталей на станке с ЧПУ и ручную слесарную обработку потребует не менее трех рабочих дней, а изготовление полного объема — от 1...3 человеко-года.

В принципе применение SLM-технологии может позволить существенно сократить сроки изготовления. Однако оценка стоимости изготовления, определяющая целесообразность смены технологического процесса, требует специального анализа [2]. Отдельную группу составляют детали с особо сложной геометрической формой, изготовление которых в единичном производстве по традиционной технологии представляется чрезвычайно затруднительным или невозможным, что определяет их изготовление по SLM-технологии.

Размещение деталей на строительной платформе установки

Проведем исследование для характерной, особо точной детали аэродинамической модели — элерона крыла. Варианты возможного размещения модели на строительной платформе установки лазерного сплавления и их характерная шероховатость показаны на рис. 3.

Качество поверхности изготавливаемой детали определяется толщиной слоя сплавляемого порошка, а также локальной геометрией изготавливаемой детали, в частности, зависящей от ее установки [3]. При послойном сплавлении формирование шероховатости и объемный припуск иллюстрируются схемой на рис. 4.

В соответствии со схемой видно, что величина интегрального припуска в сечении детали может быть оценена по формуле:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\delta \Delta b_i) = \frac{1}{2} \delta \sum_{i=1}^n \Delta b_i = \frac{\delta b}{2},$$

где δ — толщина слоя сплавления.

Оценка объемного припуска для осредненного продольного размера L может быть осуществлена по формуле:

$$V_s \cong \delta b L.$$

Таким образом, минимизация объемного припуска соответствует размещению детали с минимальной проекцией на рабочую платформу. Зависимость шероховатости r от угла наклона касательной α к формируемой поверхности детали относительно рабочей платформы и толщины слоя сплавления δ показано на рис. 5.

Применительно к элерону наиболее рациональным для обеспечения минимального объемного припуска и минимальной шероховатости поверхности, получаемой после сплавления, является вертикальное размещение детали на торце (рис. 3, в), а наименее рациональное размещение — горизонтально на боковой

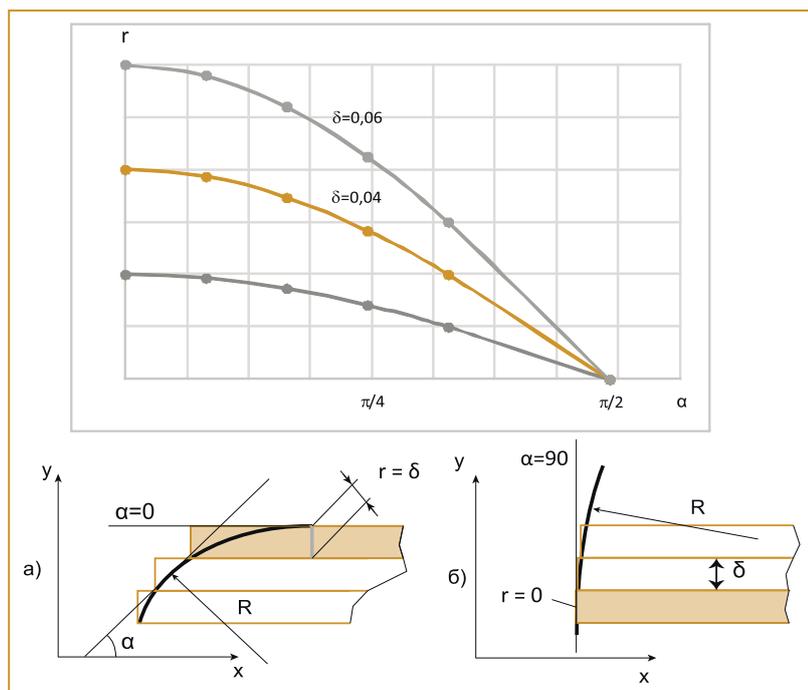


Рис. 5. Зависимость шероховатости r от угла касательной α к изготавливаемой поверхности и толщины слоя сплавления δ

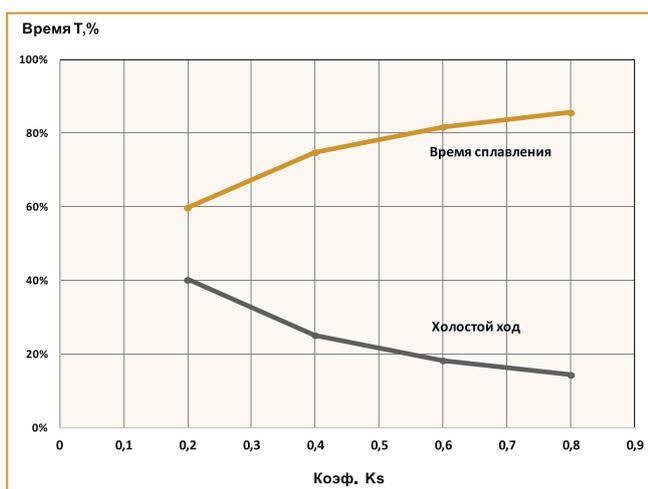


Рис. 6. Соотношение составляющих времени холостого и рабочего ходов от заполнения строительной платформы при селективном лазерном сплавлении

поверхности (рис. 3,а), хотя такое размещение является эффективным с точки зрения минимального времени сплавления. Компромиссным вариантом размещения является положение элерона на одном из ребер (рис. 3,б). Окончательный выбор размещения деталей на строительной платформе установки необходимо принимать исходя из общей трудоемкости, которая помимо времени процесса сплавления должна учитывать трудоемкость последующей пост-обработки, заключающейся в удалении поддерживающих конструкций и доработки профильных поверхностей.

Производительность процесса

Время изготовления деталей, установленных на строительной платформе, складывается из необхо-

димого перемещения рекоутера (выравнивающего ножа), при нанесении слоев порошка, и собственно времени сплавления при движении лазерного луча, сканирующего слои изготавливаемых деталей. Время перемещения рекоутера при нанесении слоя порошка $T_x=0,2$ мин фактически является холостым ходом технологического процесса. Рабочий ход составляет перемещение лазерного пятна, в пределах которого выполняется сплавление порошка. Площадь пятна составляет $\Delta l=0,1$ мм², а его скорость перемещения 7 м/с. Время сплавления слоя порошка для деталей, расположенных на строительной платформе, с суммарной площадью $S\delta$ будет определяться:

$$T_p = \frac{S\delta}{F\Delta l} * \frac{1}{6 * 10^4},$$

где $S\delta$ – площадь детали или сумма площадей всех деталей в сплавленном слое.

Введем коэффициент K_s заполнения площади строительной платформы изготавливаемыми деталями:

$$K_s = \frac{S\delta}{S},$$

где S – площадь платформы.

Тогда выражение для T_p приобретает вид:

$$T_p = \frac{K_s * S\delta * 10^{-4}}{6F\Delta l}$$

Соответствие графиков соотношения составляющих времени сплавления деталей и времени холостых ходов в зависимости от заполнения строительной платформы изготавливаемыми деталями, представлено на рис. 6. Соответствующая производительность изготовления деталей показана на рис. 7. Зависимость времени изготовления деталей от заполнения строительной платформы и их высоты представлена на рис. 8.

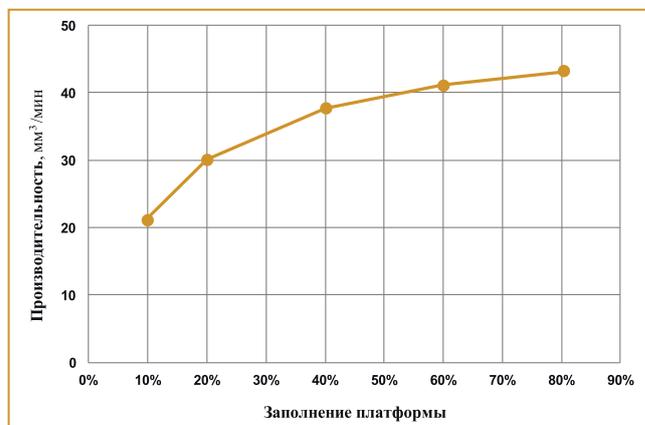


Рис. 7. Производительность изготовления деталей в зависимости от заполнения строительной платформы

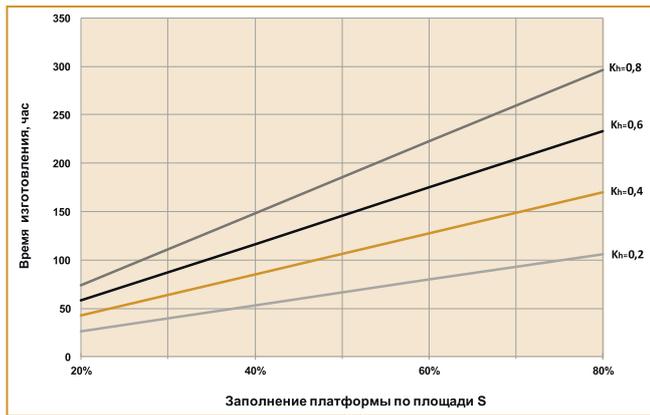


Рис. 8. Время изготовления деталей в зависимости от заполнения строительной платформы и высоты деталей

Анализ показывает, что при изготовлении необходимо проводить оценку как плотности размещения деталей на строительной платформе, так и обеспечение их равно высотности, что определяет как ориентацию детали, так и их возможное изготовление по частям с определенным снижением плотности заполнения.

Заключение

Качество деталей, изготавливаемых по аддитивной технологии селективного лазерного сплавления, в том числе и деталей аэродинамических моделей, зависят от шероховатости, представляющей собой «ступеньки» на поверхности (рис. 3), и величины объемного припуска, которые зависят от толщины слоя сплавления и ориентации деталей на строительной платформе установки. Рациональным размещением деталей на строительной платформе, исходя из геометрических ус-

ловий повышения их качества, является размещение, обеспечивающее минимальную площадь проекции на строительную платформу. Производительность процесса, связанная с циклом рабочего хода сплавления слоев порошка и холостого хода подачи и разравнивания порошка на платформе, также зависит от плотности размещения деталей на платформе (рис. 6). Повышение производительности изготовления растет за счет повышения плотности заполнения строительной платформы изготавливаемыми деталями. В этой связи целесообразно проводить их накопление для изготовления с рациональной ориентацией (рис. 3,в) и максимальным заполнением строительной платформы. Однако при этом возможно увеличение времени изготовления (рис. 8). Таким образом, может оказаться более целесообразным при изготовлении деталей моделей с аэродинамической профилировкой (элевоны, элероны, лонжероны, предкрылки, закрылки), размещение производить на «ребре» (рис. 3,б), несмотря на некоторое увеличение объемного припуска, удаляемого при ручной пост-обработке.

Список литературы

1. Powder bed based laser additive manufacturing process of stainless steel: A review Adeyemi A., Akinlabi E.T., Mahamood R.M. // Materials Today: Proceedings 5(9). 2018. с. 18510-18517.
2. Piili H., Happonen A., Väistö T., Venkataramanan V., Partanen J., Salminen A. Cost Estimation of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel // Physics Procedia. Vol. 78. 2015. с. 388-396.
3. Pal S., Gubeljak N., Hudak R. f, (...), Kokol V., Drstvensek I. Tensile properties of selective laser melting products affected by building orientation and energy density // Materials Science and Engineering A. 2019. 743. с. 637-647.

Зиняев Валерий Викторович — начальник сектора,
Балашов Сергей Михайлович — ведущий инженер
 НТЦ НПК ФГУП «ЦАГИ».
 E-mail: valeriy.zinyayev@tsagi.ru

ОДК: драйвер внедрения аддитивных технологий

В России один из главных драйверов внедрения аддитивных технологий — Ростех и входящая в его состав Объединенная двигателестроительная корпорация (ОДК). Ростех начал внедрение аддитивных технологий при производстве перспективных российских газотурбинных двигателей, которые будут сертифицированы в 2025 – 2030 гг. Детали, изготовленные этим методом, будут составлять до 20% общей массы двигателя. Внедрение 3D-печати позволит в три раза снизить время и в два раза сократить стоимость изготовления серийных деталей.

Для этого Госкорпорация создала единый Центр аддитивных технологий на базе рыбинского «ОДК-Сатурн». Здесь разработан и апробирован процесс изготовления деталей селективным сплавлением, начиная от разработки 3D-модели, заканчивая функциональной деталью. Сотни различных опытных деталей, изготовленных селективным плавлением из кобальтового, титанового сплавов, нержавеющей

стали, уже успешно прошли стендовые испытания в составе двигателей.

Создание высокотехнологичного Центра аддитивных технологий (ЦАТ) ведется и на другом предприятии ОДК — Московском машиностроительном предприятии им. В.В. Чернышева. Организаторами ЦАТ являются холдинги авиационного кластера Ростеха: помимо ОДК, это «Вертолеты России», КРЭТ и Технодинамика. В первую очередь в ЦАТ осваиваются две базовых технологии: селективное послойное сплавление лазером металлического порошка и прямое лазерное выращивание.

Первый российский электронный-лучевой 3D-принтер для печати металлическими порошками сейчас разрабатывает холдинг «Росэлектроника» Госкорпорации Ростех. Первый полнофункциональный образец будет произведен в конце 2020 г.

<https://nangs.org/news/technologies/additivnyye-tehnologii-v-deystvii>