

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Непомнящих Е.В., Ильиных В.А.

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, Чита

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-принтер, 3D-модель профильного вала, 3D-модель втулки, многогранное профильное соединение.

Аннотация. В статье рассматриваются способы изготовления деталей многогранных профильных соединений с равноосным контуром. В дополнение к известным процессам формообразования предложены инновационные способы изготовления с применением аддитивных технологий. Приведены результаты моделирования деталей на 3D-принтере из АБС-пластика. Выдвинуты предположения, что на деталях, изготовленных на металлических 3D-принтерах, допустимо проведение достоверных исследований по определению напряжений и деформаций в соединениях с равноосным контуром.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF PROFILE JOINT FORMING METHODS THROUGH THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

Nepomnyashchikh E.V., Ilynykh V.A.

Zabaikalsky railway transport institute, Chita

Keywords: additive technologies, 3D-printer, 3D-model of profile shaft, 3D-model of bushing, multifaceted profile joint.

Abstract. The article deals with the methods of manufacturing parts of multifaceted profile joints with equiaxed contour. In addition to the known forming processes, innovative manufacturing methods using additive technologies are proposed. The results of modeling of parts on a 3D-printer made of ABS plastic are presented. Assumptions are made that it is acceptable to carry out reliable studies of stresses and deformations in joints with equiaxed contour on parts made on metal 3D-printers.

Несмотря на очевидные эксплуатационные преимущества профильных соединений с равноосным контуром [1], широкое внедрение их в машины и механизмы отечественного производства сдерживается отсутствием апробированных технологий изготовления, а также разработанных достоверных методов расчета и конструирования. В настоящее время отечественная промышленность не выпускает специальные металлообрабатывающие станки, режущие инструменты и контрольно-измерительную аппаратуру применение которых, позволит эффективно изготавливать детали соединений с профильными поверхностями в виде равноосных замкнутых кривых [2].

Анализ традиционных способов изготовления деталей с криволинейным и равноосным контуром показал, что основными из них являются:

- способ обработки при двух координатном перемещении режущего инструмента;
- способ обработки, основанный при однокоординатном перемещении режущего инструмента (бреющего резца);

- формообразование профиля способом копирования с наличием делительного движения заготовки;
- изготовление профиля способом огибания;
- способ формообразования профильной поверхности детали с подачей, обеспечиваемой формой самого инструмента при взаимосвязанном движении;
- способ высокоскоростного фрезерования на станках с ЧПУ при неподвижной заготовке и др.

Процесс промышленного изготовления РК-профильной кривой впервые был предложен в Германии инженерами Р. Мюселем и Ф. Данцером. Эта технология реализуется и сегодня в зарубежной и отечественной практике машиностроения. Её реализация возможна, как при помощи применения специальных станков, так и при оснащении универсальных станков специальной технологической оснасткой [1]. Специфика процесса заключается в том, что шлифовальному кругу или токарному резцу, в зависимости от конструкции применяемого станка, при помощи различных систем механизмов-построителей сообщают гармонические перемещения относительно координатных осей (X и Y) с частотой в N раз превышающей частоту вращения обрабатываемой заготовки. Данные гармонические перемещения можно описать следующими уравнениями [1]:

$$\begin{aligned} X &= R - e \cdot \cos(N \cdot f); \\ Y &= N \cdot e \cdot \cos(N \cdot f), \end{aligned} \quad (1)$$

где R – радиус средней окружности, e – эксцентриситет профиля, N – количество граней, f – угловой параметр.

«В результате суммирования двух принудительных перемещений: горизонтального – по закону косинуса и вертикального – по закону синуса, шлифовальный круг будет двигаться по траектории эллипса. Малый диаметр этого эллипса направлен вдоль одной из осей и равен $2e$, а больший в N раз превосходит малый и направлен параллельно вертикальной оси» [1].

Гармонические колебания, вызывают отклонения формы профиля обрабатываемой детали и уменьшают производительность. Это является серьезным сдерживающим фактором для широкого применения указанного способа обработки в крупносерийном производстве изделий.

Фрезерование профильных валов и протяжек с равноосным контуром специальными торцевыми фрезами считается более производительным, чем их токарная обработка [3]. К сожалению, в настоящее время отечественная промышленность не имеет специальных станков для фрезерования РК-профильных валов и отверстий ступиц. Процесс фрезерования реализуется на обычных горизонтально-фрезерных, расточных и многоцелевых станках с ЧПУ горизонтальной компоновки путём оснащения их специальным станочным агрегатом. Чистовое и тонкое фрезерование выполняются особыми торцевыми фрезами, режущие части которых не имеют вершин для уменьшения волнистости профильной поверхности.

Одним из перспективных способов изготовления РК-профильных изделий является шлифование [3]. В наиболее распространённых моделях станков данного типа шлифовальный шпиндель со шлифовальным кругом может перемещаться вдоль горизонтальной и вертикальной координат поперечного

сечения обрабатываемого вала (или втулки). В результате суммирования гармонических перемещений вдоль этих координат ось шлифовального круга перемещается по траектории эллипса при горизонтальном ходе толкателя и вертикальном ходе шпиндельной головки.

Современное машиностроение в последнее время все в большей степени начинает представлять из себя симбиоз смежных технологий и средств производства. Одним из ключевых прорывов по оптимизации производства и уменьшению затрат на изготовление продукции, является внедрение аддитивных технологий [4]. Аддитивное производство является наиболее динамично развивающимся направлением «цифрового производства» и включает в себя набор технологий, с помощью которых создаются физические трехмерные объекты за счет послойного выращивания, при этом используемое сырье может меняться в зависимости от применяемой технологии.

С начала развития объемной печати с середины XX века это направление бурно развивается, делаются открытия, основываются компании. Появились лазерные и струйные принтеры для объемной печати, использующие в качестве сырья пластики, полимеры, биоматериалы, продукты питания, и, конечно, металлы. Технологии 3D-печати металлами представляют наибольший интерес в качестве перспективной альтернативы для изготовления сложных по форме РК-профильных изделий.

Методы 3D-печати, предлагаемые компаниями производителями, отличаются между собой техническим исполнением. При этом способ изготовления изделия включает те же операции: лазер принтера разогревает специальный порошок до необходимой температуры, при которой происходит спекание гранул вместе, в результате чего получается твердая структура (рис. 1). По технологии выборочного (селективного) лазерного спекания **SLS (Selective Laser sintering)** применяется углекислотный лазер. В некоторых принтерах для увеличения скорости изготовления, может быть, использоваться два лазера. В качестве исходного материала задействуются порошки из стекла, керамики, полимеров, металлов. Гранула может быть в виде ядра из металлического порошка, который покрыт оболочкой из легкоплавкого материала. В таком случае менее мощный лазерный излучатель может применяться для материалов с низкой температурой спекания.

Технология прямого лазерного спекания металла **DMLS (Direct Metal Laser Sintering)** разработана немецкой компанией EOS и специализируется на спекании преимущественно металлических порошков:

- кобальт хрома,
- титановых и никелевых сплавов,
- инструментальных и нержавеющей сталей,
- легких металлов.

В методе лазерной и электронно-лучевой плавки металлы подвергаются не спеканию, а полной плавке до образования гомогенной массы по технологии **SLM (Selective Laser Melting)**, или селективное лазерное плавление. 3D-принтер наносит тонкий слой металлического порошка на поверхность, затем лазер расплавляет металл, создавая форму 3D-модели. Следующий слой порошка

помещается сверху, и процесс повторяется. Металл плавится при высокой температуре, а детали, напечатанные на 3D-принтере, требуют времени для охлаждения. Детали получаются прочные, но в то же время могут иметь тонкие стенки [6].

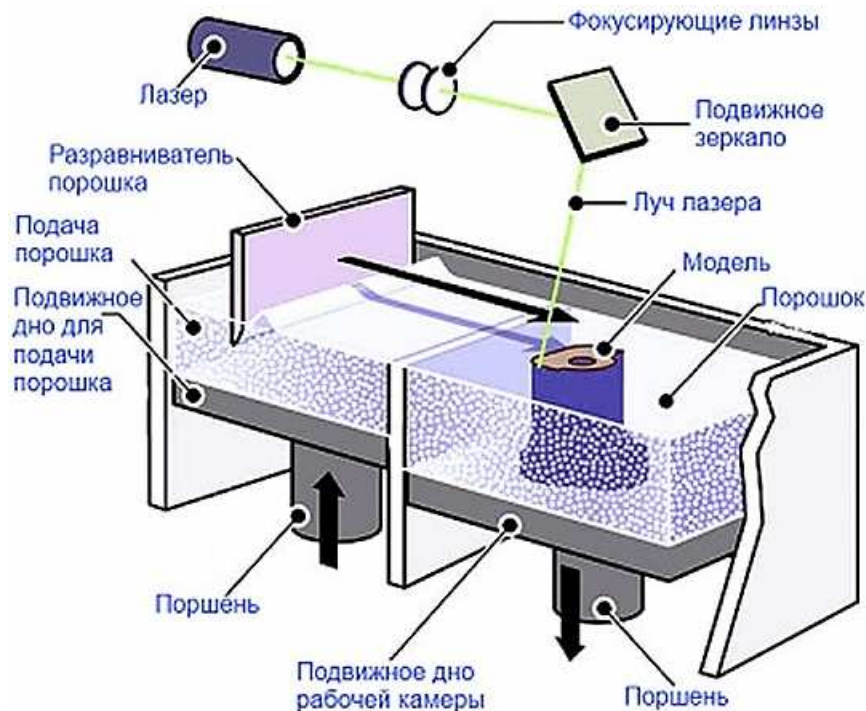


Рис. 1. Схема работы 3D принтера по технологии SLS [5]

В работе авторов [7], доказано, что детали из стали, изготовленные методом селективного лазерного плавления, имеют высокие физико-механические свойства. Предел текучести, предел прочности и относительное удлинение при проверках на растяжение со скоростью деформации 10^{-2}с^{-1} составили 320 МПа, 765 МПа и 50% соответственно. При динамическом испытании образцов по методу Гопкинсона-Кольского на сжатие, со скоростью деформации 10^3с^{-1} предел текучести и предел прочности составили в среднем 550 МПа и 945 МПа, соответственно. Предел прочности и относительная деформация исследуемых образцов до разрушения возрастал при увеличении средней скорости деформации в интервале $(0,75-2,80)\times 10^3\text{с}^{-1}$.

Процесс изготовления физической модели при применении аддитивных технологий включает в себя ряд последовательных операций. Изначально создается эскиз изделия при использовании специального программного обеспечения, например: системы автоматизированного проектирования NanoCad. Далее необходимо преобразовать подготовленный трехмерный объект в управляющую команду, для техники, которая используется при изготовлении физической модели (детали) путем применения 3D-печати.

Авторами в работе [8] проведены исследования по разработке и апробации способа изготовления фасонных изделий с применением аддитивных технологий, на примере многопрофильного соединения с равноосным контуром. В результате были изготовлены модели профильных деталей с равноосным и криволинейным контуром при использовании полимера акрилонитрилбутадиенстирола (АБС-пластик) (рис.2, 3).

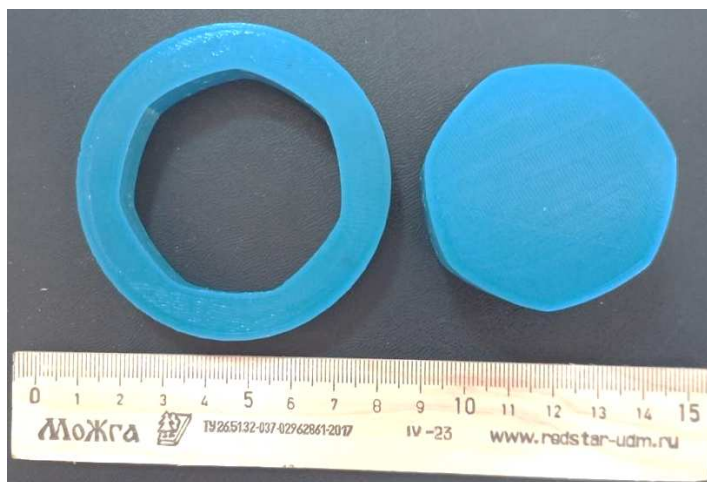


Рис. 2. Модели профильного соединения вал-ступица с равноосным контуром с числом граней семь



Рис. 3. Модели профильного соединения вал-ступица с контуром в виде синусоидальной кривой с числом лучей пять

Изготовление моделей деталей профильных соединений на 3D принтере, позволило апробировать методику расчетов параметров кривых описывающих их контуры, подобрать программное обеспечение сопровождающее процесс от расчета до изготовления моделей (прототипов), а также определить точность изготовления полученных моделей.

В дальнейшем предлагается разработать способ формообразования путем применения 3D печати деталей многопрофильных соединений из металлов, что позволит провести натурные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния данных моментопередающих соединений.

Список литературы

1. Тимченко А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Москва, 1993. – 41 с.
2. Пономарев В.В. Разработка методики проектирования фрез-протяжек для обработки РК-профильных валов: Дисс. ... канд. техн. наук. – Курск, 2023. – 115 с.
3. Шитиков А.Н. Обеспечение качества изготовления РК- профильных валов методом фасонного фрезерования: монография. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга», 2015. – 126 с.

4. Катаев Ю.В., Загоруйко М.Г., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Обоснование внедрения аддитивного производства на машиностроительное предприятие // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 9. – С. 104-107. – DOI: 10.28983/asj.y2022i9pp104-107.
5. Принтеры 3D и моделирование [Электронный ресурс]. – URL: <https://printerprofi.ru/3d/printer-po-metallu.html>.
6. Полиенко А.А., Тихомирова О.Г. Металлическое литье или металлическая 3D-печать // Тенденции развития науки и образования. – 2019. – №50-2. – С. 52-56. – DOI: 10.18411/lj-05-2019-40.
7. Зельдович В.И., Хомская И.В., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Абдуллина Д.Н., Петухов Е.А., Смирнов Е.Б., Шорохов Е.В., Клёнов А.И., Пильщиков А.А. Структура и механические свойства аустенитной нержавеющей стали, полученной методом селективного лазерного плавления // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 5. – С. 527-534. – DOI: 10.31857/S0015323021050132.
8. Ильиных В.А., Линейцев В.Ю., Непомнящих Е.В. Разработка моделей многогранных профильных соединений путем применения аддитивных технологий // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – №4. – С. 194-198.

Сведения об авторах:

Непомнящих Евгений Владимирович – старший преподаватель;

Ильиных Виктор Анатольевич – д.т.н., доцент.