

## Автоматизированное проектирование управляющих программ для изготовления художественных металлических оград из листового материала

В последние десятилетия компьютерные технологии находят все более широкое применение для проектирования объектов декоративно-прикладного искусства, к которым относятся, в частности, художественные металлические ограждения (ограды, заборы и решетки). Художественная ценность оград и других подобных изделий определяется оригинальностью и эстетическими характеристиками их геометрии. Как известно, современные САД системы обладают эффективным инструментарием для описания сложных геометрических контуров, что позволяет реализовать практически любой замысел художника, дизайнера или архитектора в цифровом формате, который может быть использован в дальнейшем для изготовления изделий с помощью традиционных технологийковки, сварки или литья. Сравнительно новой технологией изготовления металлических оград является использование технологического оборудования с ЧПУ для резки листового материала, что предполагает применение средств автоматизации проектирования управляющих программ (САМ систем). Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с обработкой геометрической информации при проектировании художественных металлических ограждений, с выбором технологии и соблюдением технологических требований резки листового металла на машинах с ЧПУ.

### Геометрическое моделирование художественных оград

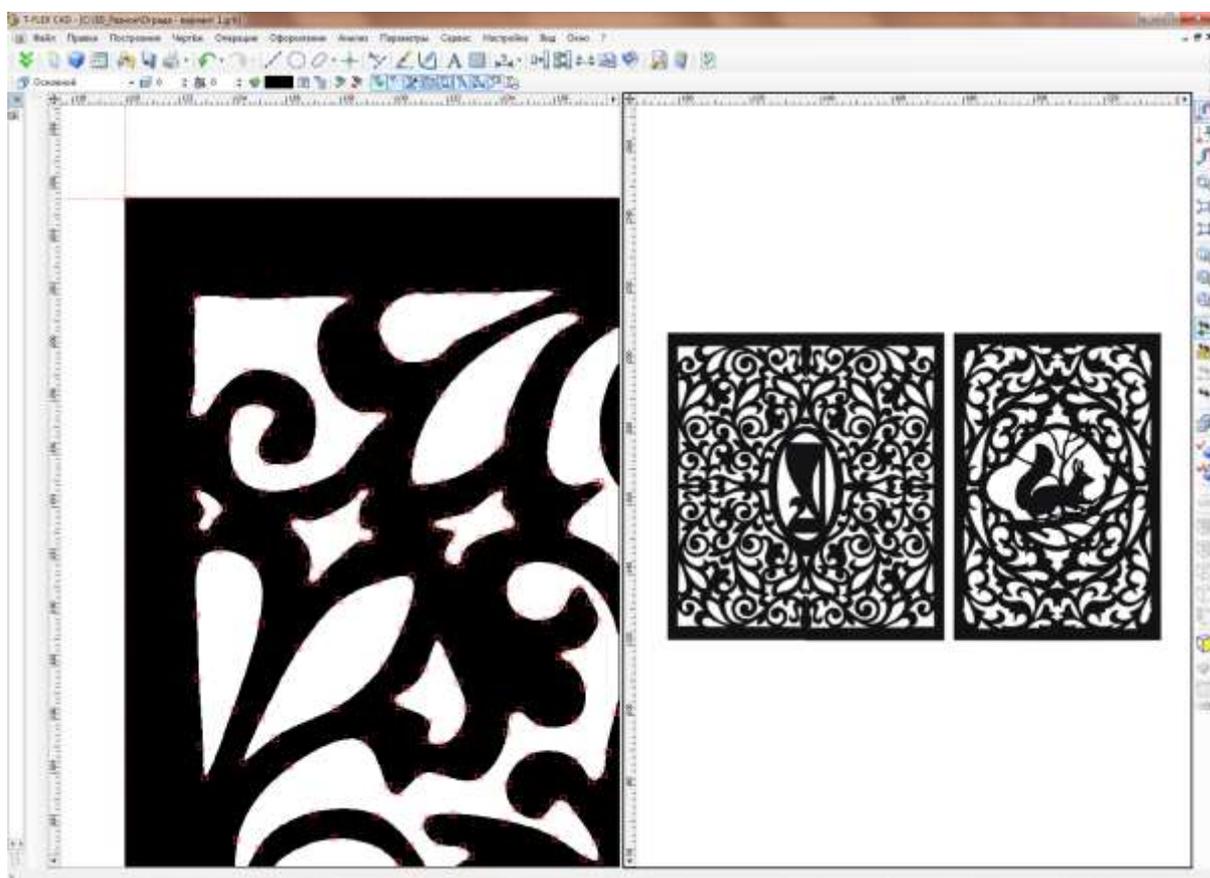
Поскольку рассматривается технология изготовления оград из листового материала, то геометрическую модель ограды достаточно иметь в виде 2D объекта, который представляет собой набор замкнутых полилиний. Обычно процессу получения векторной модели сложного художественного контура предшествует его описание в растровом формате. Чаще всего, эскиз ограды рисуется на бумаге и затем сканируется. Затем необходимо выполнить процедуру векторизации. Эту процедуру можно выполнять и без предварительного сканирования эскиза, используя специальные технические средства для «оцифровки» геометрических контуров (дигитайзеры) и специальное программное обеспечение. Оцифровка контура на дигитайзере производится в режиме интерполяции, т.е. векторная модель контура рассчитывается из условия, что полученная кривая должна проходить через указанный пользователем набор точек (узлов). В общем случае, задачу интерполяции применительно к проектированию художественных ограждений можно сформулировать следующим образом.

Пусть задан конечный набор точек  $x_i^k, y_i^k$ ,  $k=1, 2, \dots, N$ ;  $i=1, 2, \dots, n_k$ , где  $N$  – кол-во замкнутых контуров, определяющих границы ограды,  $n_k$  – кол-во точек, принадлежащих контуру с индексом  $k$ . Необходимо построить  $N$  замкнутых интерполяционных полилиний, проходящих через заданные точки и состоящих из кусочно-гладких геометрических примитивов (напомним, что гладкая кривая может быть описана функцией с непрерывной производной). Полилинии не должны пересекаться. Одна из них должна быть внешней по отношению ко всем остальным.

Следует отметить, что кусочно-линейная интерполяция как самый простой способ интерполяции для задачи моделирования оград нецелесообразна, поскольку резка на машине с ЧПУ контуров, состоящих из большого числа коротких отрезков, приводит к резкому увеличению времени резки, снижению качества поверхности реза и износу технологического оборудования. Программное обеспечение для дигитайзеров, как правило, имеет режим построения контура, состоящего из кусочно-гладких кривых. В качестве гладких кривых могут использоваться наряду с отрезками прямых также дуги окружностей и некоторые виды сплайнов, т.е. кривых, описываемых кусочно-полиномиальными функциями. В том случае, если дигитайзер не используется, удобным

способом получения векторного формата контура художественной ограды является оцифровка на экране монитора по растровой «подложке», которая получается, как отмечено выше, в результате сканирования эскиза ограды. Использование растрового изображения в качестве «подложки» возможно, например, в системе T-FLEX CAD. Этот режим векторизации растрового формата контура наряду с процедурой интерполяции может содержать и процедуру аппроксимацию растра, которая не требует, чтобы полученная векторная кривая проходила через все заданные пользователем точки. Одним из наиболее точных методов аппроксимации сложных геометрических контуров сплайнами, обеспечивающих высокую степень «гладкости» кривой, является метод аппроксимации неоднородными рациональными B-сплайнами - NURBS (*Non-uniform rational B-spline*). Поскольку требование «гладкости» линий является важным фактором при проектировании художественных оград, геометрическое описание контура с применением NURBS моделей может быть более адекватно художественному замыслу проектировщика, нежели интерполяция растра кусочно-гладкими кривыми другого типа.

Российская система T-FLEX CAD обладает широким набором инструментов, необходимых для подготовки векторных эскизов: позволяет создавать и редактировать векторные эскизы как из прямых и окружностей, так и из NURBS-сплайнов любой сложности.



**Рис.1. Проектирование художественной ограды в системе T-FLEX CAD**

На рис.1 показан пример эскиза металлической ограды, описанной набором NURBS-сплайнов в системе T-FLEX CAD. Полученный в T-FLEX CAD сплайновый эскиз, благодаря возможностям экспорта во многие распространенные форматы, далее может быть передан в любой сторонний САМ модуль, осуществляющий следующий этап проектирования: преобразование геометрии контуров к виду, удобному для обработки системой ЧПУ.

Преобразованная модель должна удовлетворять трем следующим условиям:

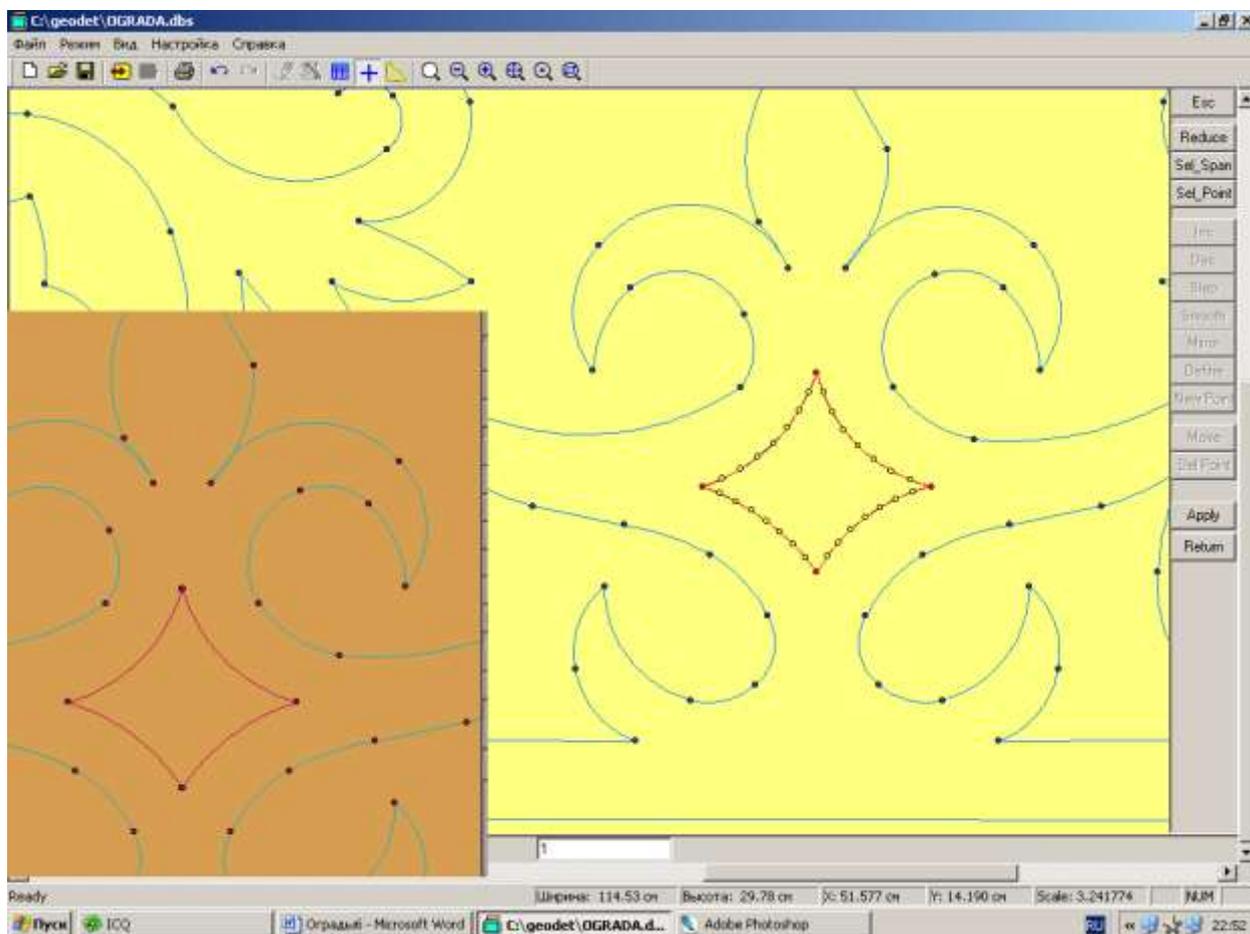
- 1) не содержать кусочно-линейных сегментов контуров, состоящих из большого числа коротких отрезков;
- 2) содержать контуры, состоящие только из отрезков прямых и дуг окружностей;
- 3) содержать только замкнутые контуры.

Первое условие, как отмечено выше, связано с особенностями систем ЧПУ и обусловлено механизмами разгона и торможения инструмента для резки при выполнении G-команд управляющей программы.

Второе условие также связано со свойствами систем числового управления, предусматривающими перемещение инструмента только по прямым линиям и дугам окружностей. В последние годы появились системы ЧПУ, поддерживающие перемещение инструмента по некоторым видам сплайнов, но они пока не получили широкого распространения.

Выполнение третьего условия является необходимым по технологическим требованиям резки листового материала, поскольку все граничные контуры ограды являются внутренними отверстиями одной детали.

Необходимый функционал для выполнения перечисленных условий при обработке векторной геометрической информации, как правило, имеется в современных векторизаторах и универсальных CAD и CAM системах. Выполнение первого условия обеспечивает функция удаления «лишних» опорных точек. Она может быть реализована в автоматическом режиме, но предпочтительным является более гибкий интерактивный режим, позволяющий пользователю выполнять аппроксимацию групп «коротких» отрезков (в зависимости от решения пользователя) линейными или круговыми примитивами. На рис.2 показан пример аппроксимации контура художественной ограды (контур выделен красным цветом) полилинией, состоящей из 4 дуг окружностей. При этом удаляется группа из 28 опорных точек контура. Для этих целей использован специальный модуль САПР «Сириус» [1].



Выполнение второго условия реализует функция аппроксимации сплайнов дугами окружностей и отрезками прямых. Важно отметить, что в силу необходимости выполнения первого условия, эта функция не должна выполнять «чисто» кусочно-линейную аппроксимацию. Потребность в функции «замыкания» контуров связана с «неаккуратностью» пользователей при моделировании и модификации геометрии художественных оград. Следует особо подчеркнуть, что перечисленные функции особо необходимы в том случае, когда геометрическая модель художественных ограждений была предварительно получена без учета указанных условий и передана для изготовления на машине с ЧПУ в виде одного из стандартных форматов обмена геометрическими данными, который может содержать, например, кривые Безье.

### **Выбор технологии и технологического оборудования**

Металлические ограды и решетки могут иметь различную высоту, но наиболее часто встречаются ограждения от 1 до 2 м. Для такого размера целесообразно использовать металл толщиной от 14 до 20 мм. В настоящее время для резки листового металла применяются газовые(газокислородные), плазменные, лазерные и гидроабразивные машины с ЧПУ. Для указанных толщин машины газовой и плазменной резки позволяют изготавливать ограды со скоростью реза свыше 1м в минуту. Применение гидроабразивной резки представляется нам нецелесообразным по причине низкой скорости реза, которую могут обеспечить серийно выпускаемые машины с ЧПУ, и высокой стоимостью 1 м реза. С другой стороны, гидроабразивная резка может быть эффективна при резке материалов, для которых термический способ резки является неприменимым из-за свойств разрезаемого материала. Лазерная резка также уступает плазменной и газовой резке по стоимости. Кроме того, большинство лазерных машин, функционирующих на российских предприятиях, не предназначены для резки металла свыше 12-15 мм. Самую низкую стоимость резки обеспечивает газовая резка, применение плазменной резки целесообразнее в тех случаях, когда необходимо обеспечить более высокое качество поверхности реза. Вместе с тем, газовая резка ограждений из листового металла на машинах с ЧПУ не является самой дешевой, поскольку свыше 80% металла может уходить в отход. Наиболее дешевой технологией изготовления ограждений, как показывает опыт, является сварочная технология, однако, применение в качестве основного материала металлических труб или прутков существенно ограничивает художественную ценность продукта, поскольку создание сложного художественного узора посредством сварки весьма проблематично. Это в меньшей мере относится к ковке, но и здесь трудоемкость реализации нетривиальных декоративных узоров приводит к тому, что стоимость такого рода изделий становится неадекватной их потребительским и художественным свойствам. Альтернативным вариантом термической резки при изготовлении художественных ограждений является чугунное литье. Художественные возможности литья очень велики, вместе с тем трудоемкость и стоимость изготовления оснастки делают эту технологию неприменимой для единичного производства.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение машин с ЧПУ для резки листовых материалов при изготовлении оград наиболее оправдано для несерийного производства изделий. Выбор конкретного типа технологического оборудования с ЧПУ для термической резки материала определяется приоритетом критериев стоимости (газовая резка) и качества поверхности реза (плазменная резка).

### **Разработка управляющей программы**

При назначении маршрута резки в САМ модуле пользователю необходимо обеспечить технологические требования резки металла, несоблюдение которых может привести к изменению геометрических размеров решетки, искажению узора, ухудшению качества поверхности реза или даже к выводу из строя машины с ЧПУ. Полностью автоматические алгоритмы назначения маршрута, реализованные в виде так называемых

программ «автоматической резки», в общем случае, не гарантируют полное соблюдение этих требований, и, в первую очередь, не обеспечивают минимизацию тепловых деформаций при термической резке металла. В силу этого, САМ системы, как правило, предусматривают и интерактивный режим проектирования управляющей программы, который обеспечивает пользователю максимальную свободу принятия решений. В частности, при резке металла важно обеспечить пользователю возможность выбора точки врезки, направления резки, скорости резки, припуска на рез и др. При этом интерактивные команды назначения маршрута резки обычно стараются сделать предельно малооперационными, что позволяет минимизировать время подготовки программы. По существу, задача разработки управляющей программы для резки ограды сводится к решению двух задач:

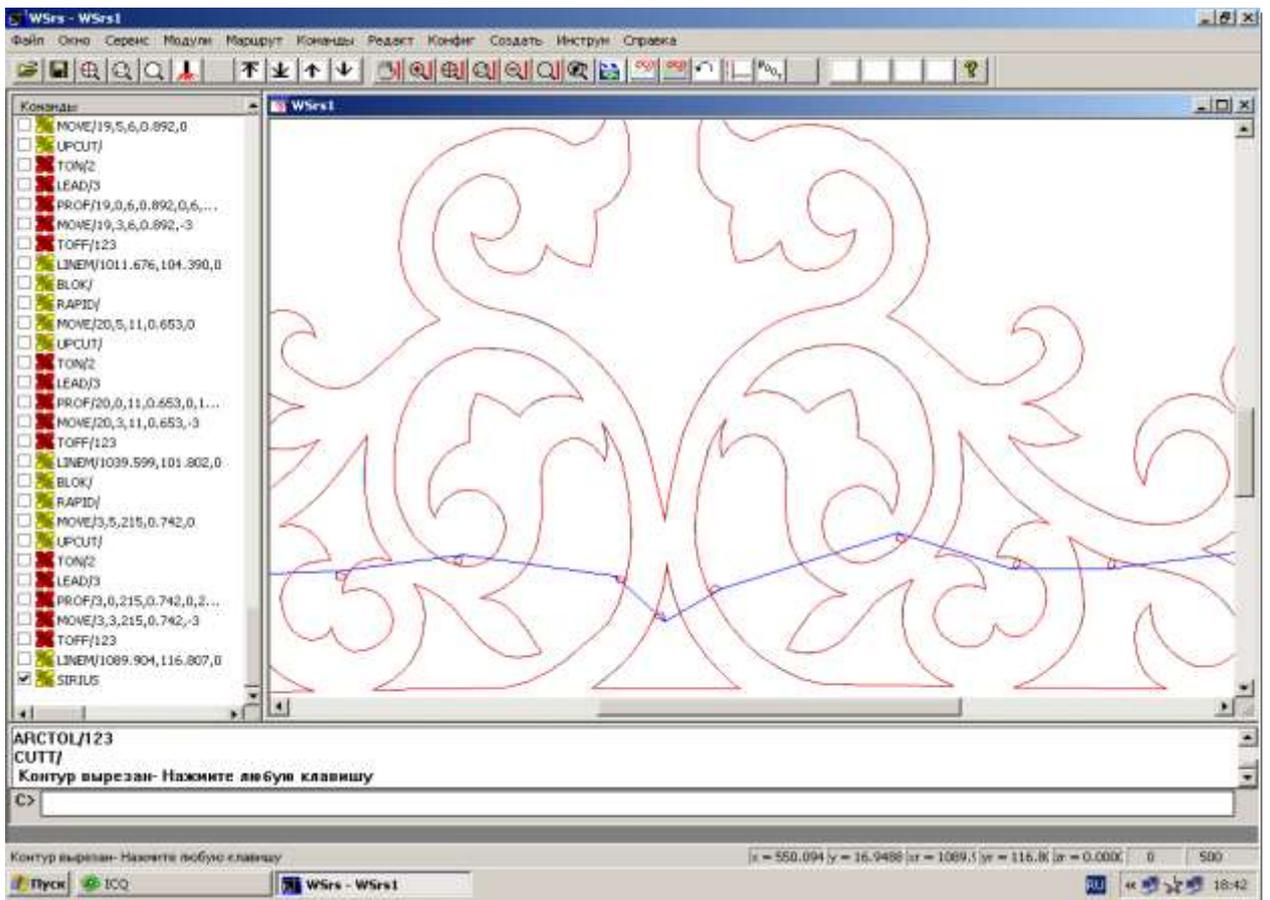
- 1) нахождение точек врезки  $P_i$  для каждого контура ограды ( $i=1,2,\dots,N$ );
- 2) определение порядка вырезки контуров  $I=(i_1, i_2, \dots, i_N)$ .

Оптимизационную задачу определения порядка вырезки можно сформулировать следующим образом:

Пусть  $P_i$  – точки врезки контуров ( $i=1,2,\dots,N$ ),  $P_0$  – начальная точка положения инструмента, а  $L_{ij}$  – расстояние между точками  $P_i$  и  $P_j$  ( $i,j=0,1,2,\dots,N$ ). Необходимо найти такой порядок вырезки контуров  $I=(i_1, i_2, \dots, i_N)$ , который минимизирует функцию

$$F_I(I) = L_{0i_1} + \sum_{j=1}^N L_{i_j i_{j+1}} + L_{i_N 0}$$

При этом действует следующее ограничение: в перестановке  $I$  контур  $i_N$  должен быть внешним и вырезаться в последнюю очередь. Дополнительным ограничением является также недопустимость некоторых последовательностей резки  $I=(i_1, i_2, \dots, i_N)$ , которые приводят к термическим деформациям контуров и искажению геометрических размеров ограды. Был разработан эвристический вычислительный алгоритм, определяющий множество допустимых с точки зрения тепловых деформаций металла последовательностей резки контуров[2]. Поиск оптимальной последовательности резки среди множества допустимых можно осуществлять с применением современных алгоритмом дискретной оптимизации (см., например, [3]). На рис.3 приведен пример фрагмента управляющей программы для резки художественной ограды, разработанной в САПР «Сириус».



**Рис.3. Фрагмент управляющей программы для резки ограды на машине с ЧПУ**

### **Заключение**

Описанная методика геометрического моделирования и автоматизированного проектирования управляющих программ для изготовления художественных ограждений обладает тремя основными преимуществами, которые обеспечивает применение САПР и машин с ЧПУ для термической резки материала:

- сокращение сроков проектирования и изготовления художественных металлических ограждений;
- реализация любого художественного замысла дизайнера (художника, архитектора);
- высокое качество изделия.

### **Литература**

1. Петунин А.А. Интегрированная САПР “Сириус” для автоматизации раскройно-заготовительного производства. Концепция. Опыт разработки и внедрения // Ресурсосберегающие технологии: математическое обеспечение оптимизационных задач в системах автоматизированного проектирования: Сборник докладов первой всероссийской научно-практической конференции по вопросам решения оптимизационных задач в промышленности. Санкт-Петербург:ЦНИИТС, 2001. С.126–129.

2. Петунин А.А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ для машин термической резки материала // Вестник УГАТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 280–286.

3. Ганелина Н.Д., Фроловский В.Д. Исследование методов построения кратчайшего пути обхода отрезков на плоскости // Сибирский журнал вычислительной математики. - №3, т. 9, 2006, с. 201 – 212.