

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 621.91

А. А. ПЕТУНИН

**О НЕКОТОРЫХ СТРАТЕГИЯХ  
ФОРМИРОВАНИЯ МАРШРУТА ИНСТРУМЕНТА  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ  
ДЛЯ МАШИН ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МАТЕРИАЛА**

В статье предлагается алгоритм формирования управляющей программы для машин термической резки материала с ЧПУ. В отличие от традиционных подходов алгоритм основывается на вводимых понятиях «жесткости заготовок» и «жесткости листа» и направлен на минимизацию тепловых деформаций материала при термической резке. Исследуется эффективность решения задачи формирования маршрута резки для реальных производственных условий с различными критериями оптимальности. *Машины с ЧПУ; термическая резка; САМ система; управляющая программа; оптимизация маршрута инструмента*

Более половины технологического оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), используемого для резки листовых материалов на предприятиях у нас в стране и за рубежом, составляют машины термической резки (МТР). К этому классу оборудования относятся машины для газовой (кислородной), плазменной, лазерной и электроэрозионной резки материала. Применение систем автоматизированного проектирования управляющих программ – Computer-Aided Manufacturing (CAM) систем для МТР позволяет значительно сократить время разработки программ и повысить эффективность технологии резки материала по качественным и стоимостным характеристикам. Проектирование УП для машин термической резки осуществляется на основе предварительно полученного варианта раскроя материала, поэтому такого рода САМ системы, как правило, поставляются на рынок совместно с программным обеспечением, предназначенным для решения задач рационального раскроя материала, и, по существующей классификации САПР, являются САД/САМ системами (САД – Computer-Aided-Design).

САМ модули современных универсальных САД/САМ систем, ориентированные на автоматизацию разработки УП для широкого спектра технологического оборудования с ЧПУ, обычно включают в себя два режима работы: интерактивный и автоматический. Основные исследования, проводимые в последнее время в нашей

стране в этой предметной области, направлены на создание эффективных алгоритмов автоматического проектирования УП для МТР и связаны, в первую очередь, с задачами оптимизации маршрута резака по времени и стоимости резки [1–6]. В то же время остается малоизученной проблема минимизации тепловых деформаций материала, которые возникают при термической резке и которые могут приводить к существенным искажениям геометрической формы вырезаемых заготовок. Разработка алгоритмов, обеспечивающих качественные (с точки зрения соблюдения всех технологических требований резки) управляющие программы, является, на наш взгляд, приоритетной задачей при создании современных высокоэффективных САМ систем для машин термической резки материала.

В данной статье формулируется ряд эвристических правил, на основе которых разработан алгоритм автоматической генерации управляющих программ для МТР, направленный на минимизацию тепловых деформаций материала. В статье также исследуются вопросы эффективности применения в реальных производственных условиях алгоритмов минимизации траектории холостого хода инструмента.

**1. СРАВНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ  
И ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЙ РЕЗКИ  
МАТЕРИАЛА**

Прежде чем сформулировать основные правила, обеспечивающие минимизацию тепловых деформаций материала при разработке в САМ системе УП для МТР, рассмотрим некоторые

особенности различных технологий резки листовых материалов. Как отмечалось выше, в настоящее время в МТР используется 4 основных метода термической резки: газовая (кислородная), плазменная, лазерная и электроэрозионная.

Каждый из этих методов, в свою очередь, может различаться рядом параметров, определяющих качественные и количественные характеристики конкретного технологического оборудования. К ним, в частности, относятся: ширина и скорость реза (зависящие также от марки и толщины материала), максимальная скорость движения резака на холостом и рабочем ходу, максимальная толщина разрезаемого материала, ограничения по маркам обрабатываемого материала, величина тепловых деформаций материала и др.

Газовая резка является наиболее универсальной (по диапазону толщин разрезаемого материала) и наиболее дешевым методом термической резки. Основными недостатками газовой резки являются низкое качество поверхности реза, большая толщина реза, невысокая скорость резки «тонкого» материала и большие тепловые деформации вырезаемых заготовок, которые сопровождаются изменением химических и физических свойств материала вблизи контура реза, появлением грата и пр.

Плазменная резка занимает промежуточное положение между газовой и лазерной резкой по точности реза, диапазону толщин материала, стоимости и величине тепловых деформаций. По скорости резки она конкурирует с лазерной технологией.

К недостаткам лазерной резки можно отнести невозможность резки на серийно выпускаемых машинах «толстого» (свыше 25 мм) материала, а также некоторых видов материала (например: медь, стекло). По качеству реза лазерная резка превосходит газовую и плазменную резку.

Электроэрозионная резка (так же, как и лазерная) является наиболее точным методом резки металлов, но обладает очень низкой скоростью реза.

В настоящее время все более популярным становится еще один вид резки материала – гидроабразивная резка (ГАР), которая используется, как правило, при резке неметаллов, в частности, камня. Также она применяется при резке высоколегированных сталей толщиной свыше 45 мм, поскольку резка больших толщин на серийно выпускаемых плазменных машинах не предусмотрена, а газовая резка не предназначена для резки таких материалов. При резке других металлов толщиной более 10 мм в реальном

производстве применение машин гидроабразивной резки представляется нам нецелесообразным из-за высокой себестоимости и низкой скорости резки. Для сравнения: стоимость резки стали толщиной 20 мм составляет для гидроабразивной резки около 1000 руб., а для газовой и плазменной – не более 150 руб. за метр реза. Скорость гидроабразивной резки этого материала всего 50 мм/мин, в то время как плазменная резка быстрее более, чем в 30 раз! Вместе с тем следует отметить, что ГАР не порождает тепловые деформации материала, обладает низкой шириной реза и режет практически любые материалы. Большая часть современных универсальных САМ систем, ориентированных на машины термической резки, как правило, содержит и возможность разработки УП для гидроабразивных машин с ЧПУ.

Итак, при разработке управляющих программ для технологического оборудования резки листовых материалов (кроме машин ГАР) необходимо учитывать фактор тепловых деформаций материала. В некоторых публикациях рекламного характера, особенно в сети Интернет [7, 8], можно встретить утверждения о том, что при использовании лазерной (и даже плазменной) технологии резки тепловые деформации минимальны. Многолетний опыт автора по автоматизации разработки УП для кислородных, плазменных и лазерных машин с ЧПУ в одном из крупнейших в Европе раскройно-заготовительном цехе ОАО «Уралхиммаш» и на многих других предприятиях показывает, что эти утверждения очень далеки от действительности. Искажение реальных размеров заготовок даже при лазерной резке материала может достигать 10 мм (особенно, для узких и длинномерных деталей). Поэтому все предлагаемые в данной статье правила формирования маршрута резки, направленные на уменьшение тепловых деформаций материала, актуальны при разработке УП для любых МТР.

## **2. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ УП ДЛЯ МАШИН ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ**

Главная задача САМ системы – автоматизация программирования маршрута резака и процесса резки в соответствии полученной ранее раскройной картой, которая представляет собой графический файл, содержащий информацию о геометрии вырезаемых заготовок и об их расположении на раскраиваемом материале. Каждая заготовка описывается либо одним замкнутым контуром, либо несколькими контурами (при наличии отверстий в заготовке). Перед началом разработки УП пользователь системы должен

определить ряд важных числовых параметров, влияющих на процесс и результат проектирования. К ним, в частности, относится ширина реза. Эту величину необходимо определить еще на этапе раскроя на основании выбранного метода термической резки, толщины и марки материала, а также скорости резки.

Еще одна важная особенность термической резки – необходимость предварительной врезки (пробивки) материала перед процессом резки по контуру заготовки. Пробивка материала сопровождается дополнительными тепловыми деформациями материала в точке врезки, поэтому производится на расстоянии (дистанции) от контура реза, большем, чем величина припуска на рез. Исключения составляют случаи, когда врезка осуществляется с края материала. При работе в интерактивном режиме пользователь может сам определять точки врезки в нужном месте посредством курсора «мыши». Автоматический режим предполагает наличие в САМ системе соответствующего алгоритма выбора точек врезки. В некоторых САД/САМ системах точки врезки определяются еще до процесса раскладки заготовок на материале, в этом случае, в процессе раскроя может возникнуть необходимость корректировки точек врезки в интерактивном режиме.

Таким образом, программирование УП заключается в выборе последовательности контуров для резки и определении для каждого контура точки врезки. После завершения процесса резки одного контура переход к следующей точке врезки происходит с выключенным резаком на холостом ходе.

Отметим, что современные универсальные САД/САМ системы, предназначенные для автоматизации проектирования раскроя материала и подготовки УП для машин резки материала с ЧПУ, должны содержать специальные функции, которые могут использоваться для уменьшения расходов материала и сокращения стоимостных характеристик резки. К такого рода функциям, в частности, относятся: совмещенный рез, резка нескольких заготовок без выключения резака (цепная резка), резка несколькими суппортами, резка трехрезаковым блоком для получения фасок под сварку, резка «змейкой» (частный случай цепной резки), резка с перемычками, резка с использованием «мостов» и ряд других. Некоторые из этих функций используют более сложный алгоритм резки, чем резка по полному контуру заготовки и переход между контурами на холостом ходе. Автор исходит из того, что специальные функции наиболее эффективно могут применяться только в интерактивном режиме.

Их полная автоматизация – актуальная задача ближайших лет. Отдельные специальные приемы используются в настоящее время при программировании маршрута резки в автоматическом режиме [9], однако, при этом не учитываются приоритетные (для обеспечения качества резки) технологические правила термической резки.

Сформулируем наиболее важные из технологических требований резки, обусловленные наличием термических деформаций материала. Прежде всего, введем понятия правил «жесткости заготовки» и «жесткости материала».

### 2.1. Правило «жесткости заготовки»

Это правило заключается в том, что при резке контура точка врезки выбирается таким образом, чтобы сначала вырезались участки контура, расположенные в непосредственной близости к границе материала, либо к границе вырезанной области, а завершение резки происходило по участку контура, граничащего с «жесткой» (невырезанной) частью области. Поясним правило «жесткости заготовок» на примере. На рис. 1 показаны 3 заготовки и 9 возможных точек врезки.

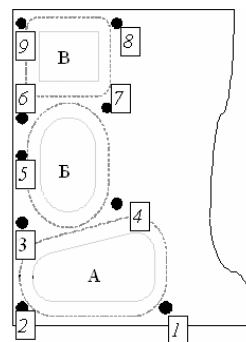


Рис. 1. Пример выбора точек врезки

Предположим, что мы начинаем резку с заготовки «А» и выбираем одну из первых 4 точек врезки (1–4). Точка 2 является недопустимой для врезки, поскольку при завершении резки не остается «жесткого» участка невырезанной области в материале, и заготовка (еще до завершения резки контура) начнет перемещаться относительно материала. Кроме этого, заготовка будет получать максимальное нагревание из-за малой площади остатка в области завершения резки. Все это, в конечном итоге, приведет к искажению геометрических размеров заготовки.

Точки 1, 3 и 4 являются допустимыми для врезки, однако при выборе точки врезки 1 резка контура должна производиться по часовой

стрелке, а при выборе точки 3 – против. Для точки 4 направление реза не является существенным. При резке следующей заготовки («Б») допустимы точки врезки 4, 6 или 7. Для точки 4 правило «жесткости заготовки» предполагает движение резака по часовой стрелке, а для точки 6 – против.

И, наконец, при резке заготовки «В» допустимы точки врезки 7 или 8. Выбор точки врезки 7 диктует необходимость движения резака по часовой стрелке, а в случае выбора точки 8 – против часовой стрелки.

Таким образом, правило «жесткости заготовок» существенно ограничивает свободу выбора точек врезки и направлений обхода контура. В частности, для данного примера, если все контуры вырезаются по часовой стрелке, то набор точек врезки 1, 4, 7 является наиболее предпочтительным, а если против часовой стрелки, то – 4, 7, 8 (или 4, 6, 8). Понятно, что строгая формализация процедуры выбора представляется затруднительной, и остальные допустимые варианты также не приведут к критическим изменениям в геометрии заготовок, но интуитивно ясно, что предлагаемые 3 варианта несколько уменьшают тепловые деформации по сравнению с другими допустимыми вариантами.

Важно отметить, что при изменении порядка вырезки заготовок (например, в последовательности «В», «Б», «А») изменится и набор допустимых точек врезки и направлений реза.

Функция определения допустимых точек врезки является важнейшей функцией САМ системы при автоматическом режиме формирования УП.

### 2.2. Правило «жесткости материала»

Это правило определяет порядок (последовательность) резки заготовок на материале. Фактически оно включает в себя несколько эвристических правил. Рис. 2 иллюстрирует 4 правила выбора стороны материала, с которой следует начинать процесс термической резки. Правило а рекомендует начинать процесс резки с узкой стороны листа (материала). Правила б, в и г уточняют, какую из узких сторон выбрать. Алгоритм выбора заключается в следующем.

Сначала определяем, есть ли среди заготовок длинномерные детали (длинномерной деталью будем называть заготовки, у которых один из габаритов больше другого не менее, чем в 4 раза). Если эти заготовки расположены вблизи узкой границы материала, то процесс резки следует начинать с них (правило б, так как именно такого рода заготовки подвержены максимальным тепловым деформациям. Затем определяем,

есть ли на материале крупный отход. При наличии такого отхода с одной из сторон, процесс резки следует начать с противоположной стороны, поскольку аккумулирующееся в материале в процессе резки тепло в конечной стадии резки должно быть несколько скомпенсировано «жестким» остатком (правило в). И, наконец, если на материале нет крупного отхода, резку следует начинать с той стороны, где суммарные тепловыделения от резки больше (больше мелких деталей, либо больше суммарный периметр реза) (правило г).

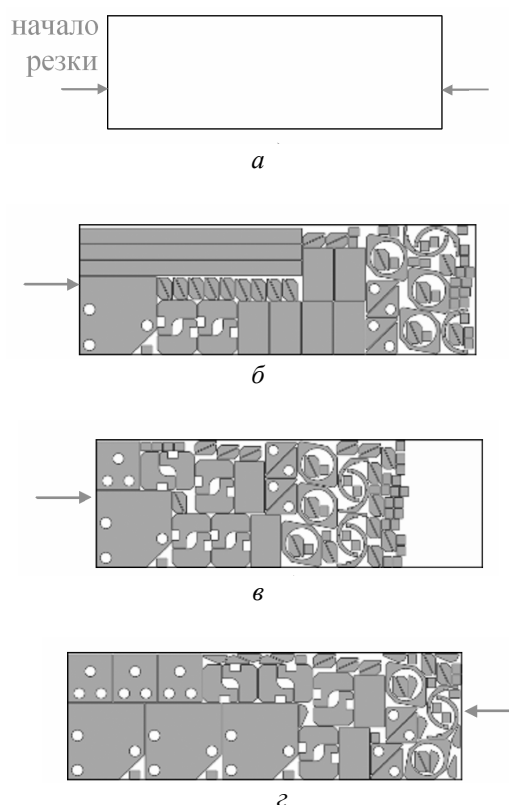


Рис. 2. Правила выбора начальной стороны материала

Еще два правила «жесткости» заключаются в том, что при выборе последовательности вырезаемых заготовок на материале не должно оставаться узких полос и «островов», содержащих невырезанные заготовки (см. рис. 3).

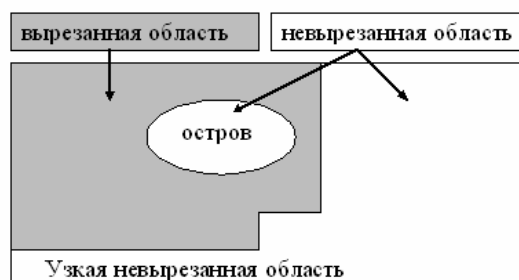


Рис. 3. Пример материала с недопустимыми невырезанными областями

Для того чтобы обеспечить все правила «жесткости материала», следует предварительно разбить всю область резки на некоторые зоны и затем процесс резки заготовок осуществлять в этих зонах последовательно по возрастанию номеров зон. При этом формирование и нумерация зон должна проводиться в соответствии со всеми правилами «жесткости материала» и таким образом, чтобы оставшаяся невырезанная область по своей геометрической форме приближалась к квадратной области.

Пример разбиения области термической резки на зоны представлен на рис. 4. Зона 1 и зона 8, выделенные на рисунке темно-серым цветом, сформированы с учетом правила «жесткости материала».

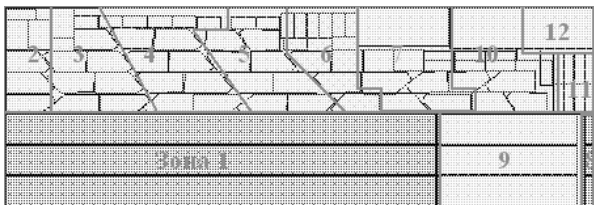


Рис. 4. Пример формирования зон резки с учетом «жесткости» материала

Таким образом, функция автоматического формирования маршрута термической резки в САМ системах должна учитывать сформулированные правила «жесткости материала». Эти же правила следует учитывать и при разработке УП в интерактивном режиме.

На рис. 5 представлен пример маршрута инструмента для МТР, спроектированного в автоматическом режиме в САПР «Сириус» [10] с учетом правил «жесткости заготовок» и «жесткости материала».

### 3. О ЗАДАЧЕ МИНИМИЗАЦИИ ХОЛОСТОГО ХОДА ИНСТРУМЕНТА

В заключении рассмотрим вопрос целесообразности и эффективности решения известной задачи о минимизации холостого хода инструмента [1–5] при резке материала в реальных производственных условиях и с учетом особенностей применяемого технологического оборудования с ЧПУ.

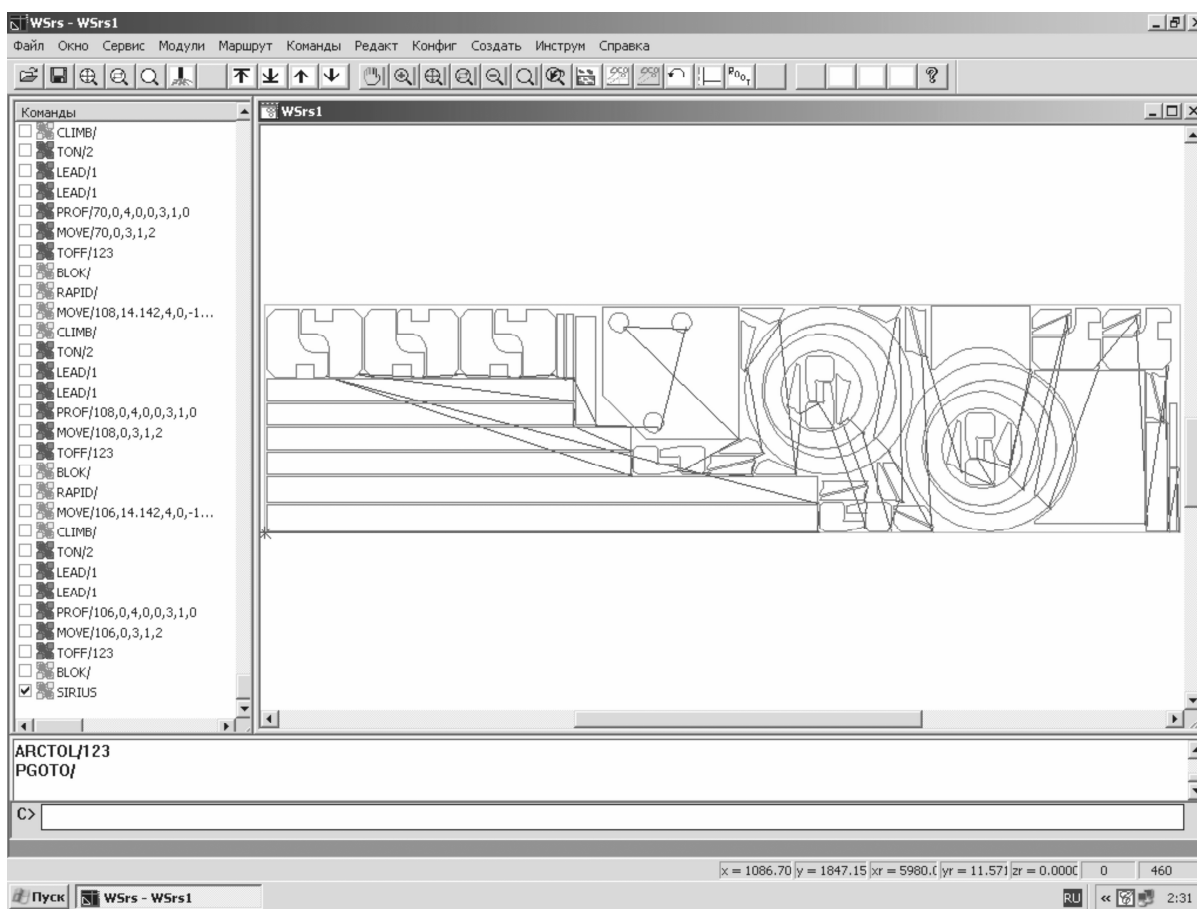


Рис. 5. Проектирование УП с учетом выполнения технологических правил термической резки

Многие разработчики САМ систем для МТР в рекламных материалах и научных публикациях упоминают об имеющихся в их системах функции автоматического определения маршрута термической резки с учетом минимума длины холостого хода [11, 12]. Попытаемся оценить каков реальный выигрыш от оптимизации холостого хода в реально существующем раскройно-заготовительном производстве.

Для примерной оценки были исследованы 80 управляющих программ для МТР (кислородных и лазерных), разработанных в ЗАО «Промашсервис» (г. Екатеринбург) для резки листового металла по заявкам различных заказчиков. Толщина металла варьировалась от 10 до 30 мм. Количество вырезаемых контуров в рассмотренных примерах – от 30 до 350. Соотношение времени холостого хода и общего времени резки составило от 0,9% до 4,8%. Учитывая, что величина выигрыша от применения алгоритмов оптимизации пути холостого хода обычно не превышает 10–20%, сокращение общего времени резки будет измеряться для этих десятками долями процента. Для металлов толщиной 45–200 мм (для их резки из термических методов применяется только газовая резка) временной эффект не превысит уже несколько сотых долей процента. За этот «эффект», возможно, придется «заплатить», как отмечалось выше, существенным ухудшением качества резки, а стоимость брака будет измеряться многими тысячами рублей. Таким образом, при выборе критериев оптимизации маршрута инструмента для машин термической резки приоритет следует отдавать критерию технологичности резки, а задача минимизации длины холостого пути должна рассматриваться с учетом ее реальной экономической эффективности. Вместе с тем, следует отметить, что решение данной задачи может дать реальный эффект при резке некоторых видов материалов малой толщины.

В качестве иллюстрации рассмотрим достаточно типичный (с точки зрения номенклатуры заготовок) для машиностроительной отрасли промышленности реальный пример раскроя стандартного прямоугольного листа (углеродистая сталь марки 09Г2С) размером 6000 мм на 1500 мм и толщиной 20 мм, приведенный выше на рис. 5. На листе размещены 98 заготовок, суммарное количество контуров для врезки – 114. Как видно из рисунка, на листе присутствуют длинномерные прямоугольные полосы, подверженные сильным тепловым деформациям. В разработанной для этого примера УП суммарная длина рабочего хода инструмента

составила около 150 м, суммарная длина холостого хода – 50 м.

В табл. 1 приведены данные о соотношении времени холостого хода инструмента и общего времени резки для газовой (кислородной), плазменной, лазерной и гидроабразивной резки. Данные получены постпроцессорами, разработанными для следующего технологического оборудования с ЧПУ: «Комета» (ЧПУ 2P32M); ESAB SUPRAREX (ЧПУ NCE 510); ЛТК «Хебр-1А» (ЧПУ ZIT500); ГАР (ЧПУ H22-1M).

Таблица 1  
Соотношение времени холостого хода и общего времени резки для различных МТР

метод резки	холостой ход (мин)	суммарное время резки (мин)	(%)
кислородная	9	450	1,7%
плазменная	6	190	3,2%
лазерная	6	495	1,2%
гидроабразивная	5	4200	0,12%

Из таблицы ясно, что наибольший относительный временной эффект от минимизации холостого хода для этого примера может быть достигнут для плазменных машин с ЧПУ. Однако даже для плазменной резки экономическая эффективность применения алгоритмов оптимизации холостого хода (несколько секунд сокращения общего времени резки) не будет иметь практического смысла, особенно при увеличении толщины материала. Для гидроабразивной машины с ЧПУ общее время резки при условии резки металла толщиной 50 мм составит уже более 5 суток (!) непрерывной работы. В этом случае, очевидно, вызывает сомнение уже целесообразность выбора гидроабразивного метода резки.

Для других типов конкретных машин с ЧПУ величины холостого и общего времени резки могут быть другими, но процентное соотношение изменится несущественно. В частности, многие зарубежные производители МТР с ЧПУ в последнее время анонсируют увеличение скорости резки в 2–3 раза по сравнению с приведенными в таблице данными с одновременным увеличением (в 3–4 раза) максимальной скорости холостого хода.

Однако при резке тонколистовой стали (1 мм) это соотношение существенно увеличивается и может достигнуть 20% при использовании плазменных и лазерных машин с ЧПУ. Лазерная технология также обеспечивает высокую скорость резки некоторых видов тонколистовых материалов (ДВП, эфирное стекло, алю-

миний, медь и др.). Относительно высокая скорость резки тонкого мрамора и керамического гранита – на машинах ГАР.

Таким образом, при условии соблюдения технологических требований резки алгоритмы минимизации холостого хода инструмента могут использоваться при разработке управляющих программ для МТР. Кроме того, оптимизация холостого пути может несколько повысить эффективность применения машин гидроабразивной резки и другого оборудования, которое не использует термическую технологию резки, например, прессов с ЧПУ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты, полученные в данной работе.

1. Предложен ряд правил, на основе которых разработан алгоритм автоматической генерации управляющих программ для МТР, направленный на минимизацию тепловых деформаций материала (правила могут быть использованы и в существующих САМ – системах при проектировании УП в интерактивном режиме).

2. На основе реальных производственных примеров и с учетом технических характеристик конкретного технологического оборудования определено примерное соотношение времени холостого хода и общего времени резки листового металла толщиной 10–30 мм на МТР. Показано, что задача соблюдения технологических требований термической резки при разработке управляющих программ для машин с ЧПУ имеет приоритетный характер перед задачей минимизации холостого хода инструмента.

3. Алгоритмы минимизации холостого пути могут эффективно использоваться в САМ системах при резке тонколистового материала при условии соблюдения технологических требований резки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ganelina N. D., Frolovsky V. D.** Constructing the shortest closed tour on a set of line segments using ant colony approach // Proc. of the 9th Intern. Conf. in Computer Graphics and Artificial Intelligence. Lirmoges, France, 2006. P. 197–202.
2. **Ганелина Н. Д., Фроловский В. Д.** Декомпозиционный метод оптимизации проектирования управляющих программ тепловой резки металла на оборудовании с ЧПУ // Научный Вестник НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2006. № 2 (23). С. 9–19.
3. **Пушкарева Г. В.** Применение гибридного генетического алгоритма для оптимизации маршрутов // Автометрия. 2006. Т. 42, № 2. С. 68–79.

4. **Левский М. В.** Оптимизация траектории движения рабочего инструмента при лазерной резке листовых материалов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 7. С. 26–31.

5. **Мухачева Э. А., Панокова Т. А.** Проблема рационального использования промышленных материалов: оптимизация обратного хода раскроя // Обратные задачи в приложениях: Сб. ст. Бирск: Изд-во БирГСПА, 2008. С. 270–277.

6. **Верхотуров М. А., Тарасенко П. Ю., Тарасенко Р. А.** Раскрой листовых материалов на фигурные заготовки: оптимизация пути режущего инструмента на основе применения группировки // Альманах современной науки и образования. 2008. № 1(8).

7. Компания «New-Laser» – лазерная резка металла [Электронный ресурс] (<http://www.new-laser.ru/>)

8. Компания «Rosinox-Laser» – плазменная резка, лазерная резка металла [Электронный ресурс] (<http://www.rosinox-laser.ru/>).

9. **Верхотуров М. А., Тарасенко П. Ю.** Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки // Вестник УГАТУ (сер. «Управление, ВТ и И»). 2008. Т. 10, № 2(27). С. 123–130.

10. **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. СПб.: ЦНИИТС, 2001. С. 126–129.

11. **Саенко А.** ТЕХТРАН: современное средство оптимизации раскроя листового материала // Оборудование и инструмент для профессионалов (сер. «Металлообработка»). 2008. № 6. С. 66–67.

12. Компания «SigmaTEK Systems» – CAD/CAM nesting software solution for all major profile cutting and punching machines [Электронный ресурс] (<http://www.sigmanest.com/>).

### ОБ АВТОРЕ

**Петунин Александр Александрович**, проф. каф. инф. техн. и автоматиз. проектир. Уральск. гос. техн. ун-та–УПИ. Дипл. математик (Уральск. гос. ун-т, 1977). Канд. техн. наук по системам автоматизир. проектир. (Уральск. политехн. ин-т, 1983). Иссл. в обл. задач раскроя и упаковки, разработки систем автоматизир. проектир.

