

DOI: 10.12737/article_59a93b0b29fa13.40976330

*Таваева А.Ф., аспирант,
Петунин А.А., д-р техн. наук, проф.*

Уральский федеральный университет имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАШИН ФИГУРНОЙ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

tavaeva_a_f@bk.ru

Статья касается задачи оптимизации маршрута инструмента применительно к машинам лазерной резки с числовым программным управлением (ЧПУ). В качестве критерия оптимизации рассматривается параметр времени листовой резки T_{cut} . Для его вычисления необходимо знать значения параметров, одним из которых является скорость листовой резки V_{on} . Обычно принято, что эта величина постоянна, но проведенные исследования показывают, что она зависит от некоторых параметров, а именно: количества кадров управляющей программы (УП), геометрии деталей. В зависимости от количества кадров УП и конфигурации обрабатываемых контуров значение скорости листовой резки изменяется. В статье получены формулы для вычисления рабочей скорости инструмента в зависимости от количества кадров УП для различных толщин листового материала Amg3M для машины лазерной резки ByStar3015. Проводится их анализ. С помощью формул можно точно вычислить время листовой резки и построить оптимальный маршрут перемещения инструмента.

Ключевые слова: *машины термической резки с ЧПУ, машины лазерной резки с ЧПУ, оптимизация маршрута инструмента, время резки, рабочая скорость инструмента.*

Введение. В машиностроительном производстве и других отраслях промышленности большая часть продукции изготавливается из заготовок, полученных из листового материала на различном технологическом оборудовании. К такому оборудованию относят машины с ЧПУ термической, гидроабразивной резки, гильотинные ножницы и другие типы оборудования. К машинам термической резки относят машины лазерной, плазменной и газовой резки. Применение такого типа оборудования обусловлено возможностью обработки многих видов материалов различной толщины, высокой скоростью резки, возможностью обработки контуров различной сложности, адаптация к постоянным изменениям номенклатуры выпускаемой продукции. Разработка управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ осуществляется с помощью САМ систем. Разработка УП для технологического оборудования листовой резки предполагает предварительное геометрическое моделирование заготовок и получение раскройной карты листового материала, что порождает различные задачи оптимизации раскроя листового материала. К таким задачам относят задачу оптимизации расхода материала, задачу оптимизации маршрута режущего инструмента. Задача оптимизации расхода материала относится к классу задач раскроя-упаковки [1, 2].

Проектирование процессов термической резки, включающее в себя разработку УП и поиск оптимального маршрута перемещения инструмента, является актуальной проблемой на сего-

дняшний день [3, 4, 5, 10–14]. В качестве критерия оптимизации в задаче оптимизации маршрута инструмента можно рассмотреть параметр времени листовой резки T_{cut} [6, 7]:

$$T_{cut} = L_{on}/V_{on} + L_{off}/V_{off} + N_{pt} \cdot t_{pt} \quad (1)$$

Здесь L_{on} – длина реза с включенным режущим инструментом (рабочий ход), V_{on} – скорость рабочего хода инструмента машины с ЧПУ, L_{off} – длина переходов с выключенным режущим инструментом (холостой ход), V_{off} – скорость холостого хода, N_{pt} – количество точек врезки, t_{pt} – время, затрачиваемое на одну врезку. V_{on} , t_{pt} – параметры, зависящие от конкретного оборудования, технологии резки, толщины и типа материала. Функциональная зависимость этих величин должна определяться научно обоснованными табличными функциями, либо аналитически, однако на практике их значения определяются, чаще всего, приблизительно, что не обеспечивает точность вычисления целевой функции (1) при оптимизации маршрута резки. Алгоритмизация вычисления целевой функции (1) на основе научно-обоснованного определения параметров функций является необходимым условием для разработки алгоритмов оптимизации маршрута инструмента по времени резки. Маршрут инструмента будет оптимальным, если адекватно вычисляется целевая функция, а для этого необходимо знать точные значения параметров, входящих в целевую функцию.

Обычно принято, что скорость резки $V_{on} = \text{const}$. Однако ранее проведенные исследования показали, что скорость рабочего хода инструмента зависит от определенных параметров (от количества кадров УП и от геометрии обрабатываемых заготовок) [8, 9, 15]. В этой статье приводятся исследования для определения зависимости рабочей скорости режущего инструмента лазерной машины с ЧПУ ByStar3015 для материала Амг3М различной толщины. На основании полученных результатов можно точно вычислить целевую функцию и построить оптимальный маршрут перемещения режущего инструмента.

Основная часть. Для того чтобы определить, как изменяется скорость рабочего хода инструмента для фигурных заготовок, были рассмотрены конкретные технологические примеры раскроя листового материала на лазерном комплексе ByStar3015 с ЧПУ для материала Амг3М толщиной 1, 2, 3 и 5 мм. Для того чтобы определить, как изменяется рабочая скорость режущего инструмента, были разработаны 150 УП с использованием разных фигурных заготовок. Исследования показали, что рабочая скорость резака не является постоянной величиной, а зависит от количества кадров n . Причем до порогового значения n скорость выше заданной, при достижении порогового значения n скорость становится равной заданной скорости, а после – скорость ниже относительно заданного значения V_{on} . Для каждой толщины рассматриваемого материала пороговое значение различно. С помощью аппроксимации полученных результатов были построены графики зависимости скорости рабочего хода режущего инструмента от количества кадров n в УП. Для материала Амг3М толщиной 1мм графики зависимости рабочей скорости инструмента от количества кадров УП приведены на рис. 1, 2. Из рис. 1, 2 видно, что скорость режущего инструмента на рабочем ходе в зависимости от количества кадров УП изменяется по-разному.

Рассмотрим, как изменяется скорость режущего инструмента на рабочем ходе для материала Амг3М толщиной 1мм.

На основе результатов исследования для материала Амг3М толщиной 1мм при количестве кадров $0 < n \leq 70$ скорость изменяется согласно формуле (рис.1):

$$V_{on} = -4 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0,105, \quad (2)$$

а при количестве кадров $n > 70$ скорость рабочего хода инструмента изменяется согласно (рис. 2):

$$V_{on} = 0,2572 \cdot n^{-0,222}. \quad (3)$$

Для того чтобы оценить точность аппроксимации конкретных технологических результатов рассмотрим разницу (в %) реальных результатов и результатов, полученных по формуле (2) и (3).

Для Амг3М толщиной 1 мм была задана скорость $V_{on} = 0,1$ м/с при разработке УП. Из рассмотренных технологических примеров скорость близкая к заданной достигается при количестве кадров $n=70$ и равна $V_{on} = 0,09947$ м/с. Можно сказать, что при $n=70$ скорость рабочего хода режущего инструмента достигает значения заданной скорости. По формуле (2) значение скорости $V_{on} = 0,0989$ м/с, отклонение от реальной скорости при $n=70$ составляет 0,6 %. По формуле (3) значение скорости $V_{on} = 0,1$ м/с, отклонение от реальной скорости при $n=70$ составляет 0,6 %.

Рассмотрим изменение скорости рабочего хода режущего инструмента по формуле (2) и сравним с реальными значениями скорости. Для количества кадров $n=19$ значение скорости, вычисленное по формуле (2) $V_{on} = 0,1033$ м/с, а реальное значение $V_{on} = 0,102$ м/с при $n=19$. Таким образом, отклонение вычисленной скорости рабочего хода инструмента по формуле (2) от реальной скорости составляет 1 %. При анализе и сравнении реальных значений скорости и значений скорости, вычисленных по формуле (2), выявлено, что максимальное отклонение вычисленных значений от реальных составляет 1,3 %.

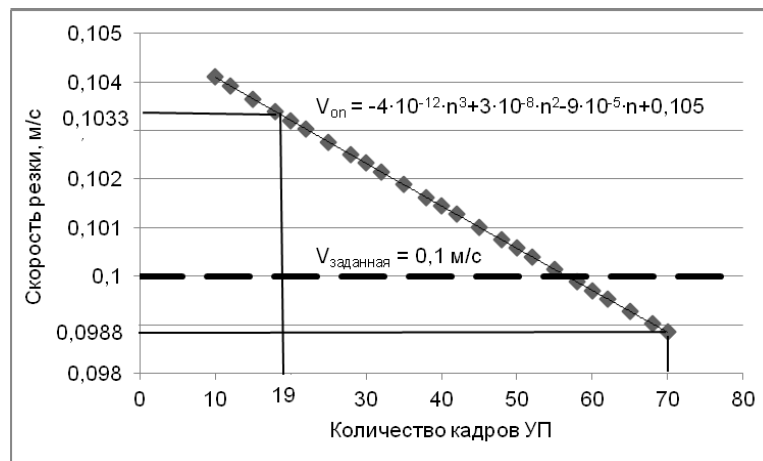


Рис. 1. Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходе для Амг3М, $\Delta=1$ мм при количестве кадров $0 < n < 70$

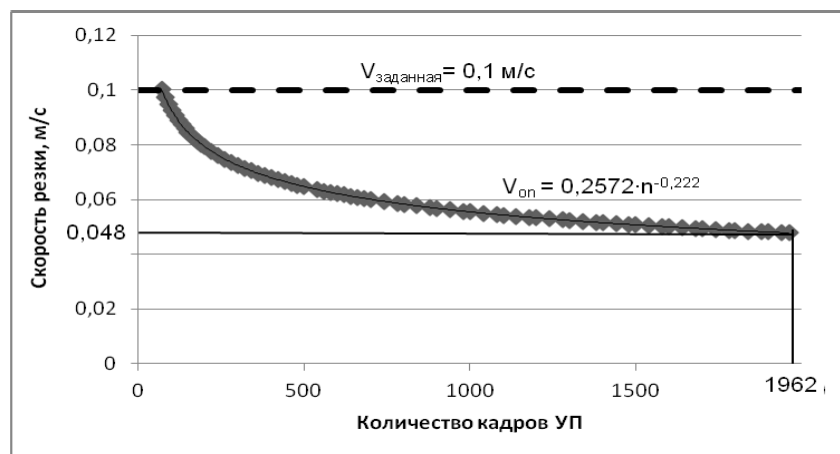


Рис. 2. Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходу для Амг3М, $\Delta=1$ мм при количестве кадров $n>70$

Теперь рассмотрим изменение скорости рабочего хода режущего инструмента по формуле (3) и сравним с реальными значениями скорости. При исследовании зависимости скорости режущего инструмента на рабочем ходу были рассмотрены УП с максимальным количеством кадров $n=1962$. Реальное значение скорости при этом количестве кадров равно $V_{on} = 0,04776$ м/с. Для $n=1962$ значение скорости, вычисленное по формуле (3) $V_{on} = 0,04779$ м/с. Таким образом, отклонение вычисленной скорости рабочего хода инструмента по формуле (3) от реальной скорости составляет 0,039 %.

Из рисунка 1-2 и формул (2)-(3) можно заметить, что скорость режущего инструмента на рабочем ходе при количестве кадров $0 < n < 70$ может увеличиться почти на 5% от заданной скорости при разработке УП, а при количестве кадров $n > 70$ скорость падает почти на 50% от заданной.

Аналогичные исследования были проведены для материала Амг3М толщиной $\Delta=2, 3$ и 5мм. Приведем основные результаты, которые были получены.

На основе результатов исследования для материала Амг3М толщиной 2мм при количестве кадров $0 < n < 70$ скорость изменяется согласно формуле:

$$V_{on} = -7 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 6 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.0494, \quad (4)$$

а при количестве кадров $n > 70$ скорость рабочего хода инструмента изменяется согласно:

$$V_{on} = 0.0734 \cdot n^{-0.1}. \quad (5)$$

Была задана скорость $V_{on} = 0,048$ м/с при разработке УП. Как показывают результаты, реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента при количестве кадров $n < 70$ сначала превышает заданное значение скорости V_{on} . При количестве кадров $n=70$ реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента равно заданному значению $V_{on} = 0,048$ м/с. При количестве кадров $n > 70$ значение скорости V_{on} снижается до 33%.

На основе результатов исследования для материала Амг3М толщиной 3мм при количестве кадров $0 < n < 72$ скорость изменяется согласно формуле:

$$V_{on} = -2 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0.0254, \quad (6)$$

а при количестве кадров $n > 72$ скорость рабочего хода инструмента изменяется согласно:

$$V_{on} = 0.0346 \cdot n^{-0.075}. \quad (7)$$

Была задана скорость $V_{on} = 0,025$ м/с при разработке УП. Результаты показывают, что реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента при количестве кадров $n < 72$ сначала превышает заданное значение рабочей скорости. При количестве кадров $n=72$ реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента равно заданному значению $V_{on} = 0,025$ м/с. При количестве кадров $n > 72$ значение скорости V_{on} снижается до 27%.

На основе результатов исследования для материала Амг3М толщиной 5 мм при количестве кадров $0 < n < 105$ скорость изменяется согласно формуле:

$$V_{on} = -7 \cdot 10^{-14} \cdot n^3 + 7 \cdot 10^{-10} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0.0152, \quad (8)$$

а при количестве кадров $n > 105$ скорость рабочего хода инструмента изменяется согласно:

$$V_{on} = 0.0194 \cdot n^{-0.057}. \quad (9)$$

Была задана скорость $V_{on} = 0,015$ м/с при разработке УП. Как показывают результаты, реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента при количестве кадров $n < 105$ сначала превышает заданное значение рабочей скорости режущего инструмента. При количестве кадров $n=105$ реальное значение скорости рабочего хода режущего инструмента равно заданному значению $V_{on} = 0,015$ м/с. При количестве кадров $n > 105$ значение скорости V_{on} снижается до 22 %.

Полученные формулы (2)-(9) можно внести в обобщенную таблицу (таблица 1), которая содержит формулы для вычисления скорости рабочего хода инструмента для машины лазерной резки ByStar3015. Ранее в [8, 9] было проведено аналогичное исследование по определению изменения рабочей скорости инструмента от количества кадров УП для материала Ст10кп различной толщины. Эти данные также занесем в таблицу 1. Анализируя полученные формулы можно предположить, как будут изменяться значения рабочей скорости режущего инструмента применительно к материалам, для которых не были проведены исследования. Так зная значение скорости V_{on} , которое необходимо задать при разработке УП, и зная, как изменяются значения скорости режущего инструмента для определенных материалов, предположим, как изменяются значения рабочей скорости инструмента для Ст10кп толщиной $\Delta=3.5, 3.9, 8, 10$ мм и для Амг3М толщиной $\Delta=1.5$ мм. Результаты также занесем в таблицу 1.

Используя полученные формулы целевая функция (1) может быть уточнена и рассчитана по следующей формуле:

$$T_{cut} = L_{on}/V_{on}^* + L_{off}/V_{off} + N_{pt} \cdot t_{pt}. \quad (10)$$

Здесь V_{on}^* рассчитывается по формулам, приведенным в таблице 1 для материалов Ст10кп и Амг3М различной толщины.

Как показывают результаты исследований, скорость рабочего хода инструмента машины лазерной резки ByStar 3015 зависит от количества кадров УП. До определенного порогового значения количества кадров n рабочая скорость режущего инструмента больше установленной скорости при разработке УП, а после преодоления этого порогового значения скорость падает (рис. 1 и 2). Таким образом, используя формулы из таблицы 1 для расчета скорости режущего инструмента на рабочем ходе в зависимости от количества кадров УП, можно точно вычислить целевую функцию (1).

Таблица 1

Обобщенная таблица формул для вычисления рабочей скорости инструмента

Материал и толщина материала (Δ)	Количество кадров УП		
	$0 < n < 172$	$n = 172$	$n > 172$
Ст10кп, $\Delta=1$ мм	$V_{on} = -2 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 7 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.1415$	$V_{on} = 0.13 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.6633 \cdot n^{-0.317}$
	$0 < n < 167$	$n = 167$	$n > 167$
Ст10кп, $\Delta=2$ мм	$V_{on} = -1 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.105$	$V_{on} = 0.0975 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.49 \cdot n^{-0.315}$
	$0 < n < 242$	$n = 242$	$n > 242$
Ст10кп, $\Delta=3$ мм	$V_{on} = -4 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 5 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.066$	$V_{on} = 0.06 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.2145 \cdot n^{-0.229}$
	$0 < n < 242$	$n = 242$	$n > 242$
Ст10кп, $\Delta=3.5, 3.9$ мм	$V_{on} = -3 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.0462$	$V_{on} = 0.042 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.1501 \cdot n^{-0.229}$
	$0 < n < 167$	$n = 167$	$n > 167$
Ст10кп, $\Delta=4$ мм	$V_{on} = -8 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 8 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.0439$	$V_{on} = 0.04 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.1945 \cdot n^{-0.306}$
	$0 < n < 288$	$n = 288$	$n > 288$
Ст10кп, $\Delta=8$ мм	$V_{on} = -7 \cdot 10^{-11} \cdot n^3 + 6 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.031$	$V_{on} = 0.027 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.0634 \cdot n^{-0.15}$
	$0 < n < 288$	$n = 288$	$n > 288$
Ст10кп, $\Delta=10$ мм	$V_{on} = -6 \cdot 10^{-11} \cdot n^3 + 5 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.027$	$V_{on} = 0.023 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.054 \cdot n^{-0.15}$
	$0 < n < 70$	$n = 70$	$n > 70$
Амг3М, $\Delta=1$ мм	$V_{on} = -4 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.105$	$V_{on} = 0.1 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.2572 \cdot n^{-0.222}$
	$0 < n < 70$	$n = 70$	$n > 70$
Амг3М, $\Delta=1.5$ мм	$V_{on} = -3 \cdot 10^{-12} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.07$	$V_{on} = 0.067 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.1723 \cdot n^{-0.222}$
	$0 < n < 70$	$n = 70$	$n > 70$
Амг3М, $\Delta=2$ мм	$V_{on} = -7 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 6 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0.0494$	$V_{on} = 0.048 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.0734 \cdot n^{-0.1}$
	$0 < n < 72$	$n = 72$	$n > 72$
Амг3М, $\Delta=3$ мм	$V_{on} = -2 \cdot 10^{-13} \cdot n^3 + 2 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0.0254$	$V_{on} = 0.025 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.0346 \cdot n^{-0.075}$
	$0 < n < 105$	$n = 105$	$n > 105$
Амг3М, $\Delta=5$ мм	$V_{on} = -7 \cdot 10^{-14} \cdot n^3 + 7 \cdot 10^{-10} \cdot n^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot n + 0.0152$	$V_{on} = 0.015 \text{ м/с}$	$V_{on} = 0.0194 \cdot n^{-0.057}$

Рассмотрим пример вычисления маршрута режущего инструмента двумя способами: с постоянной скоростью рабочего хода инструмента и с изменяющейся скоростью резака, вычисляемой по формулам (2)-(9).

В САПР «СИРИУС» (Система Интерактивного Раскроя И Управления Станками) были сформированы раскройные карты для заданного набора геометрических объектов на одном листе. И на основе раскроя с помощью САМ модуля был сформирован маршрут резки с учетом постоянства скорости рабочего хода инструмента и с учетом зависимости скорости от количества кадров (скорость рабочего хода режущего инструмента рассчитывается по формулам (2)-(9)).

Рассмотрим пример для материала Амг3М толщиной 1мм. Раскройные карты были сформированы для заготовок двух типов, общим количеством 15 шт, при этом количество контуров равно 19. С помощью САМ модуля был сформирован маршрут при условии постоянства рабочей скорости режущего инструмента (рис.3) и при условии вычисления скорости по формуле (2) или (3) в зависимости от количества кадров УП (рис.4). На рис.3 приведен маршрут перемещения режущего инструмента при условии, что $V_{on}=0,1$ м/с. На рис. 4 приведен маршрут перемещения резака с учетом расчета скорости по формуле (3), т.к. количество кадров $n=120$.

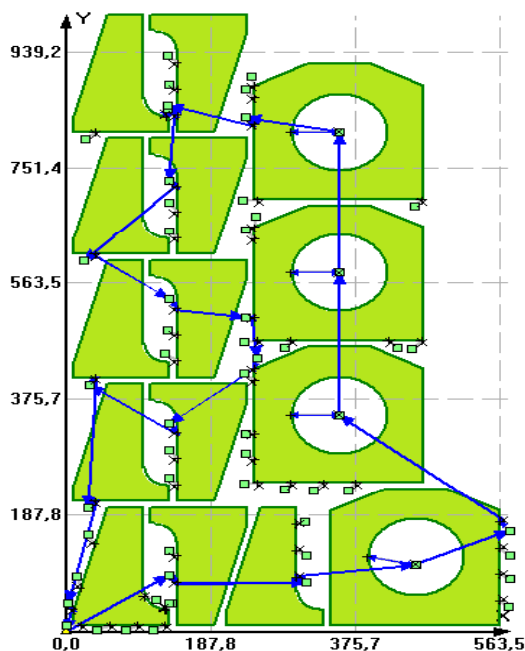


Рис.3. Маршрут перемещения режущего инструмента для Амг3М толщиной 1 мм при условии, что $V_{on} = \text{const} = 0,1$ м/с

При сравнении полученных маршрутов резки (рис. 3 и 4) видно, что маршрут резки изменяется с применением коррекции скорости по

формуле (3). Время резки $T_{cut} = 126,27$ сек в случае маршрута, представленного на рис. 3. А для маршрута, представленного на рис. 4, время резки $T_{cut} = 141,38$ сек. Как можно легко заметить, в рассматриваемом примере количество кадров $n=120$, а пороговое значение количества кадров для Амг3М толщиной 1 мм $n=70$. Следовательно, рабочая скорость инструмента будет ниже установленной скорости инструмента $V_{on} = 0,1$ м/с, что приводит к увеличению времени резки раскройной карты.

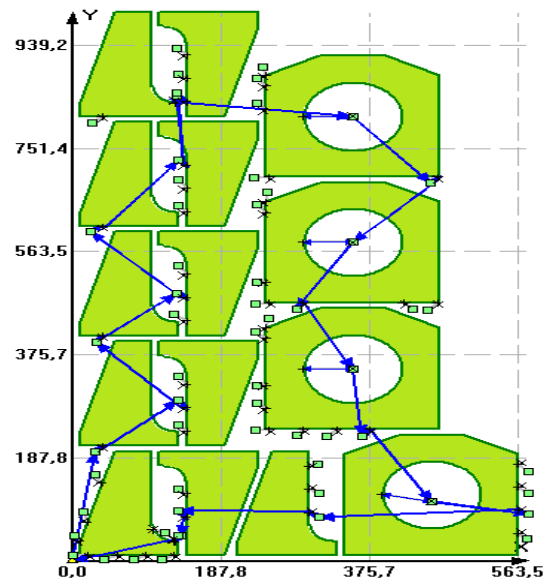


Рис. 4. Маршрут перемещения режущего инструмента для Амг3М толщиной 1 мм при условии, что V_{on} зависит от количества кадров

Выводы. В этой статье было проведено исследование для того, чтобы определить, как изменяется скорость рабочего хода режущего инструмента для машины лазерной резки Ву-Star3015 для фигурного раскроя. Эксперимент был проведен для материала Амг3М толщиной Δ 1,2,3 и 5 мм. Как показывают результаты (рисунок 1 и 2, формулы (2)-(9)), скорость рабочих переходов режущего инструмента зависит от количества кадров УП. Причем до достижения определенного порогового значения количества кадров n в УП скорость сначала превышает (в некоторых случаях на 5%) значение скорости, которое установлено при разработке УП. При достижении порогового значения n скорость равна (или близка) к заданному значению скорости. После достижения порогового значения n скорость падает (в некоторых случаях до 50%). В этой статье были получены формулы (2)-(9) для вычисления скорости рабочего хода режущего инструмента для материала Амг3М. Была проведена оценка полученных формул с помощью сравнения реальных значений скорости и значений, вычисленных по формулам (2)-(9). Как показывает

анализ, отклонения значений скорости, вычисленных по формулам (2)-(9) от реальных значений рабочей скорости перемещения инструмента незначительны.

Также используя (2)-(9) и формулы, полученные в ранних исследованиях для материала Ст10кп, было предположено, как будет изменяться рабочая скорость режущего инструмента применительно к материалам, для которых исследования проведены не были. Все полученные формулы занесены в сводную таблицу, которую легко можно использовать при расчете целевой функции (1) и построить оптимальный маршрут перемещения режущего инструмента.

Во второй части статьи рассматривается пример раскроя листового материала. Пример рассматривается для материала Амг3М толщиной 1 мм. В САПР «СИРИУС» были разработаны раскройные карты. С помощью САМ модуля для сформированных карт раскроя был построен оптимальный маршрут перемещения режущего инструмента. Маршрут инструмента рассчитывается при двух условиях:

1. скорость рабочего хода инструмента машины термической резки с ЧПУ постоянна;
2. скорость рабочего хода инструмента зависит от количества кадров УП.

Полученные результаты показывают, что с учетом корректировки скорости по формуле (3) маршрут перемещения режущего инструмента уточняется и изменяется по сравнению с маршрутом, полученным при условии постоянства рабочей скорости резака. Результаты показывают, что время, полученное в случае корректировки скорости, увеличивается по сравнению со значением, полученным при условии, что скорость постоянна. Это можно объяснить тем, что в рассматриваемом примере количество кадров $n=120$, что превышает предел $n=70$. А при $n>70$ значение рабочей скорости режущего инструмента снижается.

Полученные результаты можно использовать для разработки алгоритма автоматического назначения маршрута резки. В настоящее время проводится реализация данной методики в рамках разработки программного обеспечения для расчета времени лазерной резки с учетом полученных формул (таблица 1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валихметова Ю.И., Филиппова А.С. Теория оптимального использования ресурсов Л.В. Канторовича в задачах раскроя-упаковки: обзор и история развития методов решения // Вестник УГАТУ. 2014. Т.18. №1 (62). С. 186–197.
2. Wäscher G., Haußner H., Schumann H. An improved typology of cutting and packing problems

// European Journal of Operational Research. 2007. №183. Pp. 1109–1130.

3. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D., Laguna M., Vossen T. An improvement heuristic framework for the laser cutting tool path problem // International Journal of Production Research. 2015. Vol. 53. Issue 6. Pp. 1761–1776.

4. Castelino D., D'Souza R., Wright P. Toolpath optimization for minimizing airtime during machining // Journal of Manufacturing Systems. 2003. Vol. 22. Issue 3. Pp. 173–180.

5. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. A review of cutting path algorithms for laser cutters // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol.87. Issue 5-8. Pp. 1865–1884.

6. Петунин А.А. Две задачи маршрутизации режущего инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ / Intelligent Technologies for Information Processing and Management: proceedings of the 2nd International Conference // Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет. (Уфа 10-12 ноября 2014 г.), Уфа: Изд-во УГАТУ, 2014. Т.1. С. 215–220.

7. Верхотуров М.А., Тарасенко П.Ю. Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки // Вестник УГАТУ. Управление, ВТиИ. 2008. Т.10. №2 (27). С. 123–130.

8. Tavaeva A., Kurennov . Cost minimizing of cutting process for CNC thermal and water-jet cutting machines / Application of Mathematics in Engineering and Economics: proceedings of 41st international conference // AIP Publishing. (June 8-13, 2015, Sozopol, Bulgaria), 2015. Pp. 020003-1 – 020003-7.

9. Таваева А.Ф., Петунин А.А. Определение зависимости изменения рабочей скорости инструмента от числа кадров управляющей программы для машины лазерной резки с ЧПУ / Информационные технологии и системы: Труды VI международной конф. // Челябинский Государственный Университет. (1-5 марта 2017 г., Банное, Россия), Челябинск: Издательство ЧелГУ, 2017. С. 298–305.

10. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. Construction heuristics for generating tool paths for laser cutters // International Journal of Production Research. 2014. Vol.52. Issue 20. Pp. 5965–5984.

11. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. Sheet metal laser cutting tool path generation: Dealing with overlooked problem aspects / Sheet Metal: proceedings of 16th international conference // (March 16-18, 2015, Germany), Key Engineering Materials, 2015. Vol.639. Pp. 517–524.

12. Hoefl J., Palekar U.S. Heuristics for the

plate –cutting salesman problem // IIE Transactions. 1997. Vol.29. Issue 9. Pp. 719–731.

13. Lee M.-K., Kwon K.-B. Cutting Path Optimization in CNC cutting processes using two step genetic algorithm // International Journal of Production Research. 2006. Vol.44. Issue 24. Pp. 5307-5326.

14. Han G.-S., Na S.-J. A study on torch path planning in laser cutting process part 2: Cutting path optimization using simulated annealing // Journal of

Manufacturing Processes. 1999. Vol. 1. Issue 1. PP. 62–70.

15. Tavaeva A., Petunin A. The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for precise calculation of objective function of tool path problem // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: proceedings of 2nd international conference // South Ural State University. (May 19-20, 2016, Chelyabinsk), 2016. PP. 1-4.

Tavaeva A.F., Petunin A.A.

SOME PROBLEMS OF CUTTING TOOL OPTIMIZATION APPLIED TO CNC THERMAL CUTTING MACHINES

The paper deals with problem of tool path optimization applied to CNC laser cutting machines. The parameter of cutting time T_{cut} is optimization criterion. In order to calculate T_{cut} the values of objective function parameters must be known. One of parameters is cutting speed V_{on} . One is usually constant, but conducted researches show that cutting speed depend on some parameters (frame numbers of NC programs, part geometry). Depending on frame numbers of NC programs and parts geometry the value of cutting speed is varied. The formulas of cutting speed calculating are obtained depending on frame numbers of NC programs for sheet material (alloy A95154) with various thickness. The analysis of these formulas is conducted. Based on received results the cutting time can be accurately calculated and optimal tool path can be built.

Keywords: CNC thermal cutting machines, CNC laser cutting machines, cutting tool optimization, cutting time, cutting speed.

Таваева Анастасия Фидагилевна, аспирант кафедры информационных технологий и автоматизации проектирования.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Адрес: Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: tavaeva_a_f@bk.ru

Петунин Александр Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и автоматизации проектирования.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Адрес: Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

E-mail: aapetunin@gmail.com