

Работа выполнена в Севастопольском приборостроительном институте.

Научные руководители: - доктор технических наук, профессор
Костоломов Эдгар Филиппович
- доктор технических наук, профессор
Туранинко Виктор Анатольевич

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Юпп Вадим Яковлевич
- кандидат технических наук, доцент
Новолевская Татьяна Викторовна

Ведущее предприятие: - завод "Сельхоздеталь", г.Симферополь

Защита диссертации состоится "23" июня 1994 года в
14.00 час. на заседании специализированного Совета
К 068.16.01 при Севастопольском приборостроительном институте
по адресу: 335053, Севастополь, Стрелечья бухта, студгородок

Автореферат разослан 17 мая 1994 года

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Севастопольского приборостроительного института

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук

А.Н.Шерешевский
А.Н.Шерешевский

ЛНБ им. В. Стефанюка

ЛНБ України ім. В. Стефанюка



00777493 (.)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современном машиностроении очень высок удельный вес технологических операций раскроя, вырезки, получения различных сложных контуров и пазов, которые осуществляются традиционными способами, включающими в себя такие операции обработки, как штамповка, фрезерование, шлифование. Данные технологические процессы отличаются высокой производительностью и высоким качеством обработки, но требуют при эксплуатации значительного расхода электроэнергии, больших производственных площадей, сопровождаются высоким процентом отхода металла. Поэтому становится понятным поиск новых способов перехода к ресурсо- и энергосберегающим технологиям, в которых все чаще используют нетрадиционные методы обработки.

Одним из таких методов является лазерный, который хорошо поддается автоматизации, обеспечивает высокое качество обрабатываемых поверхностей и позволяет поставить технологический процесс на качественно новый уровень.

При анализе литературных и патентных источников было установлено, что в лазерных технологиях, описанных довольно полно, не нашли отражения лазерные методы формирования режущих кромок деталей, широко применяемых в народном хозяйстве. Примером может служить сельхоздеталь типа "сегмент", которая изготавливается партиями 1,5-2 миллиона штук в год. Поэтому поиск путей формирования режущих кромок деталей лазерным излучением без промежуточных операций, исследование закономерностей этого процесса с целью обеспечения заданной точности является актуальной задачей в области автоматизации производственных процессов в машиностроении.

Цель диссертационной работы является повышение уровня автоматизации процесса формирования режущих кромок на базе разработки и обоснования нового способа резки материалов лазерным излучением, направленным под углом от нормали к обрабатываемой поверхности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий комплекс задач:

- разработать более эффективный способ формирования режущих кромок деталей сельхозмашин (РКДС), обеспечивающий автоматизацию процесса обработки;
- на его основе построить и исследовать аналитические

модели процесса резки материалов непрерывным и импульсным лазерным излучением; дающие количественную оценку явлений в зоне обработки и позволяющие описать целевую функцию и ее ограничения;

- получить ее регрессионные модели процессов лазерной резки материалов, расширяющие область аналитических исследований и обеспечивающие определение оптимальных режимов автоматической обработки на программно управляемом оборудовании;

- исследовать пути повышения точности и качества формирования РКДС, выполнить сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследований, получить алгоритмы и управляющие программы технологического процесса формирования РКДС.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применены теоретические и экспериментальные методы исследования.

В качестве теоретических использованы методы математического моделирования и нелинейного программирования, оптимизации процессов, математической обработки результатов исследований. При проведении экспериментов использовалось современное технологическое оборудование, контрольно-измерительная аппаратура и персональные ЭВМ.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработан новый способ формирования режущих кромок лазерным излучением, обеспечивающий автоматизацию процесса обработки.

2. Построены аналитические модели процесса резки материалов непрерывным и импульсным лазерным излучением под углом, учитывающие влияние основных технологических факторов на размерные и качественные параметры резов и позволяющие описать целевую функцию и ее ограничения.

3. Получены регрессионные модели процесса лазерной резки материалов под углом, обеспечивающие определение оптимальных режимов автоматической обработки на программно управляемом оборудовании.

4. Созданы алгоритмы автоматического управления процессом формирования РКДС.

Практическая ценность и реализация научного исследования состоит в следующем:

1. Разработан технологический процесс формирования режущих кромок лазерным излучением в автоматическом режиме.

2. Построена диалоговая программная система проектирования данного технологического процесса, которая остается открытой для включения новых модулей оценки точности и качества процессов лазерной обработки.

3. Разработан алгоритм управления процессом изготовления деталей режущих аппаратов сельхозмашин на автоматизированном лазерном модуле, а также схема автоматизированной лазерной установки для формирования РКДС.

Результаты работы апробированы на Симферопольском заводе "Сельхоздеталь", а также на СООПТНП "Бриз", г. Севастополь. Экономический эффект от внедрения составляет 28 тыс. руб. по ценам 1991 года.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных, Республиканских и вузовских конференциях, совещаниях и семинарах, в том числе: Всесоюзном научно-техническом семинаре "Автоматизация контроля качества в гибком производстве" (Москва, 1989); Всесоюз. и научно-техническом семинаре "Основные направления повышения эффективности в приборостроении" (Севастополь, 1990); научно-техническом семинаре департамента "Приборостроение" (Севастополь, 1991); конференциях профессорско-преподавательского состава Севастопольского приборостроительного института.

В диссертации учтены мнения ведущих специалистов в области лазерной технологии и автоматизации технологических процессов.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 16 научных работ, в том числе положительное решение по заявке на изобретение.

На защиту выносятся:

1. Способ обработки материалов лазерным излучением для формирования РКДС, обеспечивающий автоматизацию процесса обработки.

2. Аналитические модели процесса резки материалов непрерывным и импульсным лазерным излучением под углом, учитывающие влияние основных технологических факторов на размерные и качественные параметры резов и позволяющие описать целевую функцию и её ограничения.

3. Регрессионные модели процесса лазерной резки материалов под углом, обеспечивающие определение оптимальных режимов автоматической обработки на программно управляемом оборудовании.

4. Алгоритм автоматического управления процессом формирования РКДС и результаты практической реализации..

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературных источников из 127 наименований и приложения, содержащего технические характеристики оборудования, распечатки моделей и программ, акты практической реализации. Работа выполнена на 163 страницах машинописного текста, содежит 73 рисунка и 22 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко излагаются актуальность работы, ее цель и научная новизна, сформулированы основные положения, выносимые на зад. у. Отмечено, что наиболее существенные результаты в области лазерной обработки изложены в работах Бабенко В...., Вейс В.П., Воцоватова Ф.Ф., Григорьянца А.Г., Голубева В.С., Коваленко В.С., Котлурова В.П., Либенсона М.Н., Романенко В.В., Рыкалина М.И., Стельмаха М.Ф. Тычинского В.П., Углова А.А. и др.

В первой главе приводятся технические характеристики деталей режущих аппаратов (ДРА) сельхозмашин, изготавливаемых на традиционном механическом оборудовании. Технологический процесс изготовления ДРА включает в себя такие трудоемкие и энергоемкие операции, как отрезка, вырубка, пробивка, плоскошлифовальная, закалка, отпуск.

Проведен анализ методов и средств для резки материалов, среди которых по своим характеристикам и техническим возможностям выделен лазерный. При оценке методов автоматизации процесса лазерной резки с помощью таблиц анализа выявлено, что при всей глубине и обширности проработок в данной области, в ней не освещен процесс автоматизированного формирования РКДС.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Существующие технологические процессы изготовления деталей с режущими кромками (РК) энергоемки, трудоемки, отличаются низким уровнем автоматизации. Характеризуются большим

расходом электроэнергии, СОЖ, абразивного инструмента, отличаются низкой культурой производства.

2. Использование специальных технологий для формирования РКДС по сравнению с традиционными не дало положительных результатов как по энергозатратам, так и по точности и качеству.

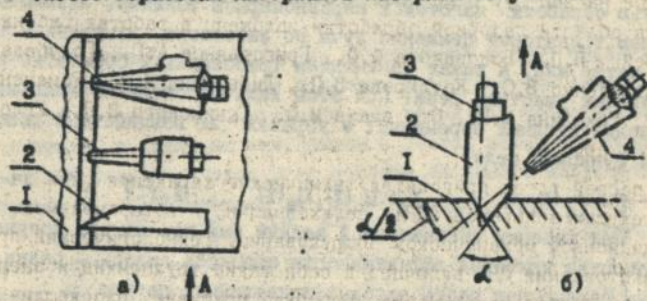
3. Результаты анализа и критическая оценка существующих технологий позволили предположить возможность использования лазерного излучения для автоматизированного формирования РКДС.

На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследования диссертационной работы.

Во второй главе изложен новый подход к процессу формирования РК лазерным излучением, направленным под углом от нормали к обрабатываемой поверхности, целесообразность которого подтверждена положительным решением по заявке на изобретение.

На рис. I, а, б представлены схемы, поясняющие суть данного изобретения.

Способ обработки материалов лазерным излучением



1 - обрабатываемый материал; 2 - резец; 3 - сопло;
4 - лазерный резак

Рис. I

На поверхность I обрабатываемого материала предварительно наносят резцом 2 риску с углом при вершине α . Одновременно автоматически наносят на поверхность риски через сопло 3 тонкую оксидную пленку при помощи паров жидкости, активно взаимодействующей с обрабатываемым материалом. Вслед за движущимся резцом 2 и соплом 3 помещается резак 4, через который подается лазерный луч, направленный перпендикулярно к поверхности риски / 8 /. В результате этого формируется рез материала под различными углами с высокой точностью размеров и шероховатостью

поверхности реза по параметру R_a порядка 5 мкм.

Выполнен анализ технологического процесса лазерной резки как объекта управления. В соответствии с основными положениями теории оптимального управления законы преобразования выходных параметров такого процесса могут быть представлены в следующем виде:

$$y_i^k = F_i^k(y_i^k; U_i(t); \omega_i(t)), \quad (1)$$

где k - k -й параметр состояния системы; $k \in \{1 \dots n\}$; F_i^k - функция преобразования параметра; $U_i(t)$ - вектор входных переменных (управляющее воздействие); $\omega_i(t)$ - вектор случайных отклонений переменных (возмущающее воздействие).

Для каждой точки фазового состояния в пространстве переменных существует некоторое непустое множество $U_i(y(t - \Delta t))$, которое определяет допустимую область управления:

$$U(t) \in U(y(t - \Delta t)). \quad (2)$$

Управление операцией лазерной резки обусловлено необходимостью обработки заготовок неравномерной толщины, резким изменением траектории движения луча по заготовке, изменением свойств материала, а также изменением требований к обработке на различных участках реза. При этом задача поиска оптимальных значений входных переменных и управляющих воздействий дополняется функцией цели:

$$C = f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t)). \quad (3)$$

При решении поставленной задачи был принят ряд допущений. В качестве критерия эффективности процесса лазерной резки выбрана переменная часть часовых приведенных затрат:

$$Z_n = (C_p \cdot P \cdot \Delta + C_g \cdot G_g + C_n), \quad (4)$$

где C_p - цена 1 кВт ч электроэнергии, руб; C_g - цена 1 м³/ч расхода газа, руб; G_g - расход поддуваемого газа; C_n - постоянная часть часовых приведенных затрат.

При лазерной обработке основной процент переменной доли себестоимости пропорционален штучному (основному) времени обработки единицы длины поверхности $t_0 = l/V$, где V - скорость резки, м/мин; Тогда технологическая себестоимость обработки - функция цели:

$$C_{т0} = \frac{l}{C_v \cdot V} \cdot (C_p \cdot P \cdot \Delta + C_g \cdot G_g + C_n). \quad (5)$$

Технические ограничения, связанные с возможностями лазерного модуля, а также с точностью и качеством обработки, можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} 0 < V < V_{\max} & ; \\ 0 < P < P_{\max} & ; \\ 0 < Q < Q_{\max} & ; \\ h_k & = h_{\text{TT}} & ; \\ h & > h_m & ; \\ v_{\min} < v < v_{\max} & ; \\ ZTB_{\min} < ZTB < ZTB_{\max} & ; \\ R_z < R_{z\text{TT}} & . \end{aligned} \right\} (6)$$

На основании рассмотренных связей сформулирована задача оптимизации управления процессом формирования РКД: зная начальное U_0 и конечное U_n состояние объекта (1), выбрать для него такое допустимое управление (2), которое прилет выражению (5) в соответствии с ограничениями (6) минимальное значение.

Для записи перечисленных ограничений в виде функций от режимных параметров, были получены аналитические зависимости процессов разрушения материала под углом как непрерывным, так и импульсным лазерным излучением с учетом известных моделей лазерной резки и учетом угла наклона лазерного излучения от нормали к обрабатываемой поверхности, представленные в табл. I.

Здесь V_0^u и T_0^u , V_0^u и T_0^u - величины характеризующие, соответственно, скорости и температуры периодически и непрерывно протекающего разрушения; t_0 - время установления квазистационарного разрушения для малых скоростей обработки; λ_2 - расстояние, на которое переместится лазерный луч по верхней кромке металла за время t_0 ; λ_1 - ширина зоны жидкого металла; V_0 - скорость, для которой характерно образование борозчатой структуры поверхности реза; q - тепловой поток от сфокусированного лазерного излучения; ρ - плотность металла; $L_{\text{пл}}$ - удельная теплота плавления; G - удельная теплота горения; T_c - выделенная в градусах теплота реакции;

C - удельная теплоемкость металла; $T_{\text{он}} = (T_c - T_n)$, где T_c - температура границы разрушения; T_n - начальная температура металла; $\delta_n = S_0 \sqrt{V_0^u}$; $\delta_n = S_0 \sqrt{V^u}$, где S_0 - константа, близкая

Аналитические зависимости процесса формирования РЧС ЛМ

		РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ		
ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ		$v_s^* = \frac{q}{\operatorname{tg}(\alpha + \psi)} [2.9 \rho c T_{on} + \sum L_{na} - G]^{-1};$	(7)	
		$T_0^* = T_c \operatorname{tg}(\alpha + \psi) \ln^{-1} \delta_n;$	(8)	
		$v_s^* = \frac{q}{\operatorname{tg}(\alpha + \psi)} \left[\rho c T_{on} \left(1.9 + \frac{2}{k_1(\alpha + \beta)} \right) + \sum L_{na} - G \right]^{-1};$	(9)	
		$T_0^* = T_c \operatorname{tg}(\alpha + \psi) \ln^{-1} \delta_n;$	(10)	
		$t_0 = \frac{2 \operatorname{tg}(\alpha + \psi)}{k_1 v} \left[1 - (1 - k_1 k_2 T_{on})^{1/2} \right];$	(11)	
		$x_0 = \frac{2 \operatorname{tg}(\alpha + \psi)}{k_1} \left[1 - (1 - k_1 k_2 T_{on})^{1/2} \right];$	(12)	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ, СВОЕ ИЗМЕНЕНИЕ		$x_i = \operatorname{tg}(\alpha + \psi) [\lambda - (t_0 - t_m)]^{1/2};$	(13)	
		$v_s < \frac{\lambda}{k \operatorname{tg}(\alpha + \psi)} \cdot \frac{T_{om}}{T_{on}};$	(14)	
	НЕПРЕРЫВНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ		$h_n = \frac{\varepsilon_1 x_i + \varepsilon_2 [(a+b) - x_0]}{\operatorname{tg}(\alpha + \psi)};$	Для низких скоростей резки (15)
			$b_n = \operatorname{tg}(\alpha + \psi) [(a+b) \sqrt{1 - [x_0/(a+b)]^2} + 2 x_i];$	
			$h_s = \frac{[(a+b) - x_0] \varepsilon_2}{\operatorname{tg}(\alpha + \psi)};$	Для высоких скоростей резки (17)
			$b_{s0} = (a+b) \operatorname{tg}(\alpha + \psi) \left[1 - [x_0/(a+b)]^{1/2} \right]^{1/2};$	
	$b_{s1} = [(a+b) + \frac{2 \operatorname{tg} T_c}{k_n}] \operatorname{tg}(\alpha + \psi);$	(19)		
	$h = [(0.5(a+b)/\operatorname{tg}(\alpha + \psi) + 3E/\pi k_n L_n \operatorname{tg}^2(\alpha + \psi))^{1/2} - 0.5(a+b)/\operatorname{tg}(\alpha + \psi)];$	(20)		
	$b = 2 [(0.5(a+b))^{1/2} + 3E \operatorname{tg}(\alpha + \psi)/\pi L_n]^{1/2};$	(21)		

к скорости звука в металле: $k_1 = v/\lambda$; $k_2 = k/q$, где v - скорость резки; λ - коэффициент температуропроводности; k - коэффициент теплопроводности; a, b - большая и малая полуоси эллипса, в который фокусируется лазерный луч радиусом r_0 при наклонном падении; $T_{\text{эм}} = (T_0 - T_m)$, где T_m - температура плавления металла; h - глубина реза; b - ширина реза; $\epsilon_1 = v_0^n/v$; $\epsilon_2 = v_0^n/v$; $k_n = v_0^n/\lambda$; $T_c = T_0/T_m$; E - энергия излучения в импульсе; k_n - коэффициент перекрытия; L_0 - теплота испарения вещества; γ - половинный угол раствора светового конуса.

Полученные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Расхождения составляют 30 % для непрерывного излучения и 40 % для импульсного.

В третьей главе выполнено моделирование технологического процесса формирования РК, изложена методика проведения исследований.

Основными задачами экспериментальных исследований являлись: получение эмпирических зависимостей количественных и качественных параметров резов от технологических факторов при непрерывном и импульсном лазерном излучением, позволяющих с достаточной точностью описать ограничения целевой функции, рассмотренной в главе 2; исследование точностных и качественных параметров резов от технологических факторов; проверка адекватности математических моделей реальному процессу; сопоставление точностных параметров формирования РК непрерывным и импульсным лазерным излучением. Исследования проводились на отечественных лазерных модулях на сталях У9А и 65Г.

Для получения уточненных математических моделей процесса лазерной резки материалов под углом, устанавливающих влияние наиболее существенных технологических факторов на размерные параметры резов были выполнены исследования на основании постановки многофакторного эксперимента по квази-Д-оптимальному плану типа D_3 . В результате реализации многофакторного эксперимента получены регрессионные зависимости основных характеристик резов, выполненных непрерывным и импульсным лазерным излучением, позволяющие выработать рекомендации по назначению рациональных режимов, обеспечивающих заданную точность параметров резов.

Сопоставление технологических методов лазерной обработки

ДРА непрерывным и импульсным лазерным излучением показывает, что для последней характерна более высокая точность выполнения резов, однако производительность такой резки намного ниже, чем лазерами непрерывного действия.

Адекватность полученных моделей реальному процессу позволяет использовать их для описания ограничений функции цели при автоматическом управлении качеством и точностью параметров резов при лазерной обработке.

В четвертой главе описано автоматическое управление процессом формирования РК, обеспечивающее получение заданного качества поверхностей изделий при оптимальных значениях технологических параметров системы. На основе полученных во второй и третьей главах зависимостей функции цели (5), и технологических ограничений (22)-(26) построена математическая модель процесса формирования РКДС (табл.2). Функция цели и ограничения, входящие в состав математической модели, имеют нелинейный вид, что требует для их решения применения методов нелинейного программирования.

В связи с прерывностью целевой функции и сложностью ограничений в данном случае был использован численный метод исследования математической модели - метод прямого перебора.

Кроме того, данная задача была параллельно решена с помощью пакета прикладных программ EUREKA. Результаты расчета минимальной себестоимости двумя способами совпадают, что подтверждает целесообразность использования в этой ситуации метода прямого перебора, как наиболее простого.

Алгоритм управления процессом формирования РКДС лазерным излучением позволяет определять оптимальные значения мощности излучения P , скорости резки V и давления поддуваемого газа Q при заданном угле наклона лазерного излучения α , требуемом качестве поверхностей изделий и минимальной себестоимости обработки.

Разработана система автоматического управления (САУ) процессом формирования РКДС, реализующая вышеуказанный алгоритм и обеспечивающая выполнение параметров резов на оптимальных режимах, соответствующих первому классу по ГОСТ 14792-80.

Экспериментальное исследование САУ в условиях СОМПИП "Бриз", г.Сестрорецк показали, что технологическая себестоимость лазерной обработки на оптимальных режимах уменьшилась \sim в 4,0

Математическая модель процесса формирования РКДС ЛМ

Наименование	Вид зависимости математической модели
Технологическая себестоимость обработки	<p style="text-align: center;"><u>Функция цели</u></p> $C_{T0} = (C_p \cdot P \cdot L + C_a \cdot G_a + C_n) / C_v \cdot V - \min \quad (5)$ $G_a = C_2 \cdot Q, \text{ если } \frac{P_a}{Q} \geq 0,5;$ $G_a = C_2 \cdot Q \sqrt{\frac{P_a}{Q} \left(1 - \frac{P_a}{Q}\right)}, \text{ если } \frac{P_a}{Q} < 0,5.$
Глубина качественно выполненного реза	<p style="text-align: center;"><u>Ограничения</u></p> $4,234 + 0,749 P \cdot Q - 0,6 V \cdot L - 0,225 V^2 < h_{1T}; \quad (22)$
Максимально достижимая глубина реза, но с низким качеством	$5,3 - 2,792 V + 0,237 Q + 0,985 P \cdot V - 0,255 P \cdot L + 0,328 V^2 > h_M; \quad (23)$
Ширина реза	$B_{\min} < 0,665 + 0,041 P \cdot V - 0,034 V^2 - 0,038 V \cdot Q + 0,059 Q \cdot L < B_{\max}; \quad (24)$
Зона термического влияния	$3TB_{\min} < 0,477 + 0,0306 P^2 - 0,0045 P \cdot Q - 0,0161 V^2 - 0,0456 V \cdot Q + 0,0854 Q \cdot L < 3TB_{\max}; \quad (25)$
Шероховатость поверхности	$30,511 - 2,071 P - 7,023 V + 3,355 P \cdot Q + 2,221 P \cdot L + 2,195 V \cdot Q + 3,147 Q \cdot L < R_{zTT}; \quad (26)$
	$\left. \begin{aligned} 0 < V < V_{\max} & ; \\ 0 < P < P_{\max} & ; \\ 0 < Q < Q_{\max} & ; \\ h_K < h_{TT} & ; \\ h > h_M & ; \\ B_{\min} < B < B_{\max} & ; \\ 3TB_{\min} < 3TB < 3TB_{\max} & ; \\ R_z < R_{zTT} & . \end{aligned} \right\} \quad (6)$

раза по сравнению с себестоимостью традиционной обработки.

В пятой главе представлены результаты практической реализации научных исследований.

Разработан технологический процесс формирования ДРА лазерным излучением в автоматическом режиме без промежуточных операций.

Создана диалоговая программная система проектирования технологического процесса изготовления ДРА лазерным излучением, особенностью которой является то, что ее структура остается открытой для включения новых модулей оценки точности и качества технологических процессов лазерной обработки.

Разработаны схемы адаптивного управления точностью процесса формирования режущих кромок деталей сельхозмашин.

Общие выводы

1. В результате выполненных в данной работе исследований решена задача, заключающаяся в обосновании возможностей формирования режущих кромок деталей сельхозмашин лазерным излучением, направленным под углом от нормали к обрабатываемой поверхности, которая базируется на раскрытых закономерностях процесса лазерной резки материалов под углом и построении математических моделей этого процесса, обеспечивающих возможность определения оптимальных режимов автоматической обработки на программно управляемом оборудовании.

2. Возможность формирования режущих кромок лазерным излучением, направленным под углом от нормали к обрабатываемой поверхности, подтверждена положительным решением по заявке на способ лазерной обработки.

3. При анализе технологического процесса лазерной резки как системы управления были разработаны:

- аналитические модели процесса лазерной резки непрерывным и импульсным лазерным излучением, позволяющие описать и дать количественную оценку явлений в зоне резки, а также связать размерные характеристики выполненных резов с режимами обработки;

- регрессионные модели, дополняющие и расширяющие аналитические в областях, не поддающихся аналитическому описанию, и устанавливающих влияние наиболее существенных технологических факторов на размерные и качественные параметры резов.

4. На базе данных моделей получена математическая модель