

Упрощенная методика технологического обеспечения операций обработки материалов лазерным лучом

* В. П. Котляров, А. Н. Киященко, Н. И. Сергиенко

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,
г. Киев, 03056, Украина, *e-mail: kotlyarovv@ukr.net

Поступила 28.12.17

После доработки 08.08.2018

Принята к публикации 03.09.2018

При проектировании технологических операций лазерной обработки с многокритериальной оценкой их результатов одним из этапов процедуры является выбор технологического регламента ее реализации. Предлагается модифицированный алгоритм оптимизации, при котором упрощается содержание исследуемого факторного пространства за счет исключения критических для поиска оптимального режима обработки величин, влияние которых затем компенсируется изменением стратегии технологической операции, в частности, в результате использования метода «подгонки» критического показателя до требуемого уровня с управляемым уменьшающимся шагом приращения его значения. Для реализации разнообразных операций с адаптивной формой их организации (прецизионной обработки отверстий, формирования размерных щелей, поверхностного нагрева с нормированной глубиной зоны) разработано несколько технологических установок и устройств, схемы которых приводятся в работе вместе с результатами их исследований. Их применение улучшает показатели воспроизводимости результатов обработки при упрощенной методике выбора технологического регламента операций.

Ключевые слова: лазер, лазерный луч, технологическая операция, технологическое обеспечение моделирования процесса, оптимизация, адаптивная организация операции, режим обработки, методика выбора.

УДК 621.375.826:621

DOI: 10.5281/zenodo.1968401

ВВЕДЕНИЕ

Лазерным технологиям более 50 лет, однако проектирование технологических операций на этапе их режимного обеспечения, за редким исключением, продолжает оставаться исследовательской задачей, простой или сложной в зависимости от вида операции, комплексности технического задания, в частности, от количества ее нормированных показателей и уровня требований к ним. Учитывая, что практически любой вид операции характеризуется по крайней мере тремя показателями в виде размерных и качественных результатов обработки, а также технико-экономическим ее показателем (производительность, энергоемкость, себестоимость и др.), то задачу проектирования режимов можно считать многокритериальной, и для поиска оптимальных режимов ее реализации используются методы нелинейного программирования (например, множителей Лагранжа) или числовые методы нелинейной оптимизации (например, метод штрафных функций) [1]. Оба метода требуют определенных знаний и навыков. Также применяются методы, основанные на преобразовании каждого из нормиро-

ванных показателей в безразмерные функции откликов с последующим их объединением в единый показатель [2]. Координаты экстремального значения последнего являются уровнями управляемых факторов процесса обработки и составляют оптимальный технологический регламент операции. Таким образом, необходимым этапом поиска режима обработки является моделирование процесса в отношении нормированных показателей проектируемой операции. Сложность этого этапа определяется видом показателя и комплексностью процесса, ответственного за достижение технологического результата. Так, для *размерных показателей операции* моделирование может выполняться по данным аналитических и (или) экспериментальных исследований процесса обработки. *Технико-экономические показатели операций*, характеризующие временные, материальные и ресурсные затраты и зависящие от их технологических схем, описываются зависимостями для определения той составляющей операционного времени, в течение которой работает лазер (машинное время $T_{\text{маш}}$), как наиболее затратный элемент лазерной технологической установки (ЛТУ) [3]. *Показатели качества* (точность

размерных результатов, погрешности продольной и поперечной форм обрабатываемых элементов заготовки, их расположения относительно базовых поверхностей, а также шероховатость обработанных поверхностей) являются величинами, которые более тонко описывают выполненную операцию. Моделирование таких показателей, как и размерных результатов, возможно аналитическими и экспериментальными методами, однако практика таких исследований ограничена [4, 5].

Что касается зависимости методик моделирования от сложности процесса, ответственного за технологический эффект, то наиболее распространенные виды операций могут быть поделены на три основные группы:

- *операции поверхностной тепловой обработки* вследствие нагрева заготовки лазерным лучом, при выполнении которых практически отсутствует массоперенос материала из зоны нагрева (поверхностная термообработка, объемное формообразование, некоторые виды маркирования) [6];

- *операции газолазерной обработки*, которые характеризуются разделением обязанностей между двумя составляющими инструмента: *лазерный луч* обеспечивает плавление материала (абляцию) в пределах объема обрабатываемого элемента; *струя газа* удаляет из последнего расплав, формируя полость элемента (паз, сквозной рез, лунка, отверстие) [6];

- *операции прецизионной (размерной) обработки* с тепловым разрушением материала его сублимацией при самоудалении продуктов разрушения (эрозии) из полости обрабатываемого элемента (паз, рез, уступ, лунка, отверстие) [7].

Цель исследований – анализ применимости методик аналитического и экспериментального проектирования технологического регламента операции по классическому алгоритму и разработка упрощенной методики путем исключения из технического задания (ТЗ) критических для исследований показателей с последующей компенсацией потери качества проектирования разработкой и применением дополнительных приемов или технологической оснастки.

1. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Процедура **моделирования** процесса лазерной обработки, то есть установление количественных связей между факторами, управляющими состоянием объекта исследований, и его выходными показателями, выполняется в следующих целях:

- изучение воздействия каждого из управляемых факторов на состояние объекта;
- построение ранговых диаграмм влияния управляющих факторов объекта для каждого из показателей его состояния;
- формирование обобщенного показателя (функции) состояния объекта в процедуре его многокритериальной оптимизации;
- использование в системах, управляющих состоянием объекта по одному или нескольким показателям.

Для моделирования процесса поверхностной тепловой обработки используются аналитические (теоретические) или экспериментальные методики. Первые применяются для установления физических (а также химических и механических) явлений, ответственных за создание технологического эффекта, например при приближенном решении нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности. Эта задача является нелинейной задачей переноса теплоты в твердом теле, у которого от температуры зависят поглощательная способность поверхности заготовки (нелинейность II рода) и теплофизические свойства ее материала: теплопроводность, теплоемкость и его плотность (нелинейности I рода), что особо проявляется для умеренных энергетических потоков (нагрев и термическая обработка) [8], то есть при интенсивности излучения на поверхности заготовки $I_p \leq 10^5$ Вт/см² (для металлов). Аналитически нелинейные задачи с нелинейностями I и II рода решаются (приближенно) различными способами «линеаризации» исходного уравнения: преобразованием Кирхгофа, подстановками Варшавского, Больцмана, Гудмана. Модели, получаемые при решении таких задач, прогнозируют размерные характеристики зон упрочнения (ширину и глубину) для различных схем и характера облучения, отличающихся видом теплового источника, создаваемого при облучении поверхности с различной скоростью его перемещения. Авторы подтверждают высокую сходимость предсказанных и экспериментальных результатов (до 3–4%) [9]. Тем не менее для повышения точности предсказания результаты расчетов могут уточняться поправочным коэффициентом, определяемым экспериментально [10]. Дальнейшее повышение точности расчетных результатов достигнуто при решении уравнения теплопроводности числовыми методами, например методом конечных элементов, обязательно при учете нелинейностей I и II рода, то есть температурных изменений теплофизических свойств материала заготовки и поглощательных свойств поверхности заготовки. Причем достаточный уровень правдивости достигается

при представлении этих зависимостей в виде функций, например полиномами третьей степени. Любой вид линеаризации температурных зависимостей приводит к существенным ошибкам предсказаний: при их среднеинтегральных значениях результаты существенно завышены, а при их начальных значениях – занижены [11]. Основным недостатком числовых методов моделирования является отсутствие модели в явном виде, что усложняет ее использование при решении многокритериальных оптимизационных задач.

Процесс газозерной обработки, например, при разрезании листовой заготовки выполняется сложным (составным) инструментом. Для режимного обеспечения технологической операции необходимо не только решить *тепловую задачу нагревания и плавления материала*, но и *газовую*: определить параметры газовой струи на основе согласования ее размеров и формы с параметрами расплавленной зоны материала; выбрать динамику движения и энергетические характеристики путем подбора типа сопла, его размерных характеристик и положения относительно заготовки. Предпочтительным является решение этих задач с помощью численных методов и объединение в один программный продукт [12].

При решении прямой газовой задачи (моделирование процесса) уравнения, необходимые для определения параметров газовой струи, основаны на общих уравнениях газовой динамики [13], в частности уравнении Эйлера; на уравнении баланса энергии при адиабатическом движении идеального и совершенного газа; уравнении неразрывности (закон сохранения массы) при его постоянном течении; уравнениях увеличения кинетической, потенциальной и внутренней энергии и увеличения энергии единицы массы газа; на уравнении Бернулли (механической формы уравнения энергии). Исходными величинами при этом являются параметры сопла: его тип, размеры и расположение, а также состав газа, его давление и скорость на входном отверстии сопла. Для решения обратной задачи эти параметры становятся искомыми из условия совпадения размеров и формы струи на его начальном участке с профилем сквозной зоны расплава в листовой заготовке.

При исследовании явлений, ответственных за формообразование размерного элемента в теле заготовки (отверстие, лунка, паз, рез) при тепловом разрушении ее материала и самоудалении, с целью предсказания размерных результатов технологической операции впервые были осуществлены попытки моделирования процес-

сов лазерной обработки. Для этого были учтены следующие физические принципы для описания процесса разрушения материала: теория размерностей [14], закон сохранения энергии в разных изложениях [15], [16], [17], [18], а также с учетом кинетики образования отверстия лазерным лучом (феноменологические модели) [19]. Были также попытки применить приближенные методы аналитического решения уравнения теплопроводности для предсказания размерных результатов обработки отверстия (лунки) путем определения границ изотерм испарения материала в теле заготовки [20]. Некоторые исследователи использовали опыт построения эмпирических моделей в технологии механообработки путем объединения одномерных экспериментальных зависимостей в виде степенных функций [21]. За редким исключением ([18], [19]), все модели характеризуются низкой точностью предсказания результатов обработки (погрешность достигает 200%) вследствие существенно упрощенного представления о механизме формообразования обрабатываемого элемента. Например, не учитываются температурные зависимости уровня поглощения заготовкой энергии излучения и теплофизические характеристики ее материала, пиковый характер подачи энергии в структуре импульса, условия облучения (положение заготовки в каустике луча), присутствие в эрозионном факеле материала в твердой и жидкой фазах и т.д.

При моделировании рассматриваемых технологических операций в контексте *показателей точности* их размерных характеристик используется принцип суперпозиции для формирования суммарной погрешности обработки из ее составляющих, вносимых участниками технологической обрабатывающей системы (ТОС). Для реализации этого принципа ТОС представляется в виде преобразующей системы, на вход которой поступают нестабильности ее участников (инструмента, заготовки и технологического оборудования), а также ошибки используемых приемов, а на выходе создается результат их действия на формируемый элемент заготовки, представляемый в виде линейной (или линеаризованной) комбинации преобразованных в ТОС исходных нестабильностей. Зависящие от технологического регламента операции и от характеристик оборудования исходные нестабильности и коэффициенты их трансформации в преобразующей системе определяются в результате анализа работы оборудования и особенностей технологической схемы операции. Данные прогнозных расчетов суммарной погрешности операций контурного вырезания изделий из листа [5], а также прошивки отверстий [22, 23]

близки к экспериментальным результатам: погрешность ширины реза $\Delta b = 48$ мкм близка к действительной величине ее поля рассеяния $6S_b = 66$ мкм для вырезания при импульсной подаче энергии и $\Delta b = 187,2$ мкм к величине $6S_b = 183,0$ мкм – в операции с непрерывным облучением [4]; а погрешность диаметра отверстий $\Delta d = 45,5 \pm 15,7$ мкм сравнима с $6S_d = 51,6$ мкм [24]) соответственно. Операции поверхностного упрочнения наименее исследованы как в отношении точности элементарных зон упрочнения (их поперечных Δb (Δd) и продольных размеров Δz), так и размерных характеристик упрочненной поверхности заготовки (ΔB и ΔZ), вероятно, вследствие обычно низких требований к их воспроизводимости. Однако этим показателем вряд ли стоит пренебрегать из-за опасности возникновения на упрочненной поверхности заготовки зон низкой твердости из-за пропусков в схеме ее покрытия при вариациях диаметра и глубины единичных зон или явлений отпуска при многократном наложении друг на друга тепловых источников с меньшей температурой, чем 723°C (для сталей) [25]. Для операций поверхностного упрочнения, результаты которых наиболее предсказуемы вследствие относительной простоты набора явлений, ответственных за технологический эффект, была исследована возможность использования искусственной нейронной сети (ИНС), чтобы предсказывать суммарную погрешность операции упрочнения при импульсном (непрерывном) облучении, и ее обучения (управления синапсными коэффициентами) для уменьшения предикта до нормированного его уровня [26] (в таблице). Вид моделей для показателей качества (линейный полином Тейлора) позволяет их использовать в задачах косвенной оптимизации для создания функционалов невязки суммарной погрешности одной (нескольких) ее составляющей для включения в функцию цели, накладывая дополнительные условия на выбор технологического регламента операции.

Экспериментальные методы исследования процесса лазерной обработки выполняются по различным методикам в зависимости от цели процедуры: построение физических моделей процесса, то есть выявление частных зависимостей его показателей от каждого из управляемых факторов или поведения исследуемого объекта от комплексного влияния всей их совокупности, включая взаимодействия. Преследуя первую цель эксперимента, достигается удовлетворение познавательного интереса, поэтому предпочитается однофакторная стратегия возбуждения процесса поочередно каждым из

факторов при фиксированных уровнях остальных. Из таких моделей действительно можно установить независимое влияние каждого из факторов для сопутствующего набора уровней остальных, что может пригодиться для их использования в системах автоматизированного управления процессом, однако возникает некая неуверенность такого управления вследствие неопределенной реакции любого из остальных факторов на изменение уровня фактора, управляемого в данной обстановке. Попытки объединения одномерных зависимостей в обобщающую модель процесса приводят к созданию конгломератов [21], приблизительно описывающих процесс.

Прикладной характер моделирования, необходимый для обеспечения режимного управления процессом без акцентирования внимания на подробностях его физической (или химической) сути, имеет большую ценность для технологического обеспечения операций. Метод «черного ящика» (кибернетический) предполагает одновременно многофакторное возмущение объекта по определенной схеме с фиксированием его реакции на выбранных показателях. В результате соответствующей обработки экспериментальных данных на фоне принятого порядка (плана) эксперимента удастся связать уровни показателей, характеризующих процесс, с уровнями управляющих факторов, то есть смоделировать процесс. С начала применения многофакторного планирования эксперимента усилиями ряда математиков были разработаны научные принципы «Теории эксперимента», в которой проанализированы возможности и особенности множества типов экспериментальных планов, оптимальных по различным критериям. Личная практика использования планов позволяет рекомендовать некоторые из них для разных творческих ситуаций, таких как моделирование новых по содержанию процессов (планы 1 и 2); изменение границ факторного пространства или набора показателей исследованного ранее процесса (планы 2 и 3); уточнение моделей в связи с дрейфом режима работы лазера ЛТУ или на этапе предпланирования эксперимента (план 4) (см. таблицу). В последней приняты следующие обозначения: L_n – количество членов линейной модели ($L_{кв}$ – для квадратичной); n – количество факторов, изменяемых в эксперименте; B_k – план Бокса на кубе; H_c – план Хартли на сфере; H_c кв. D -квази D -оптимальный план на сфере; Рехтш. – насыщенный план Рехтшафнера ([27] в таблице).

Хотя такой вид моделирования процесса может применяться для всех рассматриваемых операций, он наиболее эффективен для их пока-

Перечень экспериментальных планов для разных задач (этапов) моделирования

№ пп	Модель. Количество эффектов. План. Количество опытов	Количество факторов n						
		2	3	4	5	6	7	8
1	Линейная, $L_n = 1+n+0,5n(n-1)$	4	7	11	16	22	29	37
	Тип плана [2]	2^2	2^3	2^4	2^{5-1}	2^{6-1}	2^{7-2}	2^{8-2}
	Количество опытов	4	8	16	16	32	32	64
2	Квадратичная $L_{кв} = 0,5(n+2)(n+2)$	6	10	15	21	28	36	45
	Тип плана (композиционный) [2]	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k, H_c	B_k	B_k
	Количество опытов	8	14	24	26	44	48	80
3	Квадратичная $L_{кв} = 0,5(n+2)(n+1)$	6	10	15	21	28	36	45
	Тип плана (насыщенный) [2]	Н _c квD	Н _c квD	Рехтш.	Рехтш.	Рехтш.	Рехтш.	Рехтш.
	Количество опытов	6	10	15	21	28	36	45
4	Линейная (квадратичная) $(n+1) \leq L \leq 0,5(n+2)(n+1)$	3–6	4–10	5–15	6–21	7–29	8–37	9–46
	Тип плана (компромиссный) № пл. [27]	41	45	46	56	52	31	32
	Количество опытов	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$

зателей более высокого порядка (например, качества), чем размерные и технико-экономические характеристики, а также для всех показателей операций прецизионной обработки.

Математические модели процесса, полученные любым из перечисленных выше методов и имеющие вид линейной или нелинейной функции показателя состояния объекта от сочетания уровней его управляемых факторов, по своему виду и возможностям являются предикторами состояния объекта. Их использование для формирования комплекса условий определенного состояния объекта затруднено тем, что модель представляет собой функцию с многими неизвестными, имеющую множество решений, поэтому ее применение в процедуре режимного обеспечения технологической операции с однокритериальной оценкой результата последней неэффективно и нецелесообразно.

2. РЕЖИМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Задача проектирования технологического регламента операции заключается в том, что по предложенным ТЗ или чертежами критериям показателей состояния объекта необходимо выбрать соответствующие уровни управляющих факторов. Очевидно, что усложнение задания увеличением количества нормированных показателей приводит к уменьшению числа соответствующих состояний объекта, а значит, к затруднениям поиска их координат в факторном пространстве. Особенно это касается случаев ужесточения требований к показателям качества процесса, так как аналитическое моделирование последнего в отношении этих показателей является сложной процедурой, например [26], или длительной [28].

2.1. Операции поверхностной термообработки

Для проектирования операции поверхностного упрочнения в результате нагревания поверхностного слоя заготовки лазерным лучом можно использовать расчетный метод, основанный на нелинейном программировании с использованием в качестве уравнения связи обратного решения трехмерного уравнения теплопроводности, выполненного методом конечных элементов.

Для выполнения технологического задания – формирования в теле заготовки закаленной зоны заданной формы и размеров с нормируемым уровнем твердости – ТЗ на проектирование операции должно содержать следующие данные:

- чертеж заготовки с указанием размерных границ и профиля зоны закалки:

$$F_3(X, Y, Z);$$

- уровни температур структурных превращений: равновесной A_{C3} и величины температурного интервала ΔT , в пределах которого должен находиться материал зоны закалки во время обработки:

$$A_{C3} \leq T(X, Y, Z, t) \leq A_{C3} + \Delta T; \quad (1)$$

- критические значения скоростей охлаждения материала в зоне закалки V_{Omax} и V_{Omin} :

$$V_{Omin} \leq \partial T(X, Y, Z, t) / \partial t \leq V_{Omax}; \quad (2)$$

- граничные условия, которые описывают максимальный (минимальный) уровень температуры на характерных поверхностях заготовки, например температуры плавления $T_{пл}$:

$$T_{max}(X, Y, Z, t) \begin{cases} X=0 \\ Y=0 \leq T_{пл}; \\ Z=0 \end{cases} \quad (3)$$

или $T_{пл} \leq T_{max}(X, Y, Z, t) \begin{cases} X=0 \\ Y=0 \leq T_{пл}. \\ Z=0 \end{cases}$

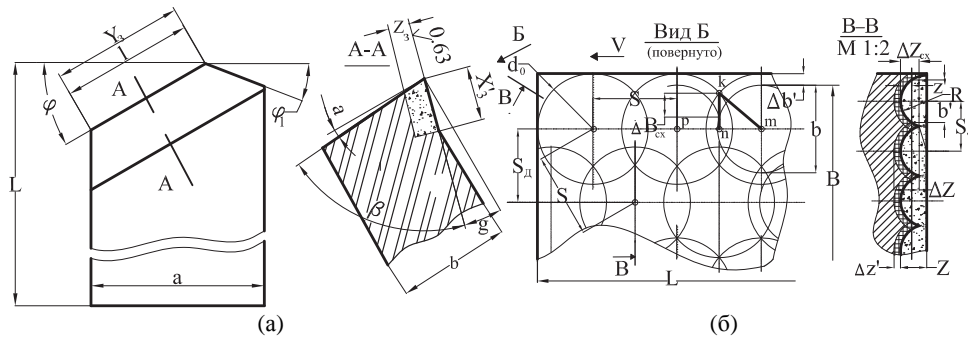


Рис. 1. Эскиз реза (а) и схема формирования закаленного слоя (б).

Для выполнения требований ТЗ к качественным и размерным результатам используется комплекс управляемых факторов процесса: временные, пространственные и энергетические характеристики теплового источника, созданного в результате облучения, его положение и закон относительного перемещения. Свойства теплового источника определяются комплексным параметром луча (интенсивностью излучения) на поверхности заготовки, уровень которого зависит от нескольких характеристик луча, поэтому режим обработки включает в себя:

- для непрерывного режима облучения: мощность излучения P , распределение интенсивности в поперечном сечении луча, его размер на поверхности заготовки d_0 и скорость относительного перемещения (подачи) V луча и заготовки;

- для ЛТУ с импульсным режимом работы: энергию импульса излучения E и его длительность τ , частоту следования импульсов f и размеры луча на поверхности заготовки d_0 , распределение интенсивности в сечении луча, скорость относительного перемещения V при многоимпульсном облучении или шаг относительного смещения S в случае одноимпульсной схемы обработки.

В качестве примера рассмотрим задачу проектирования режима закалки проходного реза по передней его поверхности (рис. 1а). Анализ эскиза изделия позволил сформулировать следующие условия проектирования:

- заготовка – усеченный под углами ϕ и ϕ_1 со стороны одного из торцов параллелепипед со сформированным режущим клином (углы γ , α и β), с площадью поперечного сечения $a \times b$ из инструментального материала;

- упрочняемая поверхность реза – передняя, окончательно обработанная до шероховатости R_a (без покрытия);

- пространственная форма закаленного слоя – усеченный параллелепипед толщиной Z_3 , шириной X_3 и длиной, равной длине режущей кромки $Y_3 = l$;

- твердость материала заготовки в пределах зоны закалки $H_{\mu} = 8750 \pm 50$ МПа.

В условиях заданной глубины зоны закалки Z_3 и исходной шероховатости передней поверхности реза R_a исключаются необходимость и возможность ее оплавления, а принимая во внимание специфику отвода тепла со стороны задней поверхности режущего клина с углом наклона α , обоснованно можно считать необходимым выполнение операции с нормированной подачей энергии в виде отдельных импульсов. Это позволяет уточнить вид модели и граничные условия ее работы:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = c(T) \rho(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} - V \frac{\partial T}{\partial X} \right), \quad (4)$$

$$a) E \leq E_{max}, \text{ б) } \tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max},$$

$$в) V_{Omin} \leq V \leq V_{Omax}, \text{ г) } I_{Pmin} \leq I_P \leq I_{Pmax}, \quad (5)$$

где λ , c , ρ – теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность материала соответственно; а) – энергетические; б) и в) временные ограничения; г) – ограничение на интенсивность пучка излучения I_P .

Для выполнения нормы ТЗ, касающейся поперечной формы зоны закалки с заданными размерами (X_3 и Z_3), функция цели должна содержать условия ее формирования:

$$RSQ = [T(X, Y, Z) - F(X, Y, Z)]^2 = \text{минимум}. \quad (6)$$

Для формирования зоны закалки с заданным профилем сечения необходимо дополнить систему граничных условий (5) параметром, который определяет распределение интенсивности в луче на поверхности заготовки. Если его описать зависимостью:

$$I_P(X, Z, t) = W_P(X, Z, t)/A = P(t) \dot{W}_P(X, Z)/A, \quad (7)$$

(где $\dot{W}_P(X, Z)$ – постоянное нормированное распределение плотности мощности теплового источника, например нормальное, равномерное или другое; A – коэффициент поглощения поверхностью заготовки лучистой энергии используемой длины волны), то в результате решения уравнения связи (4) с соответствующими граничными условиями (5) можно опреде-

лить размеры луча и положение граничных точек нормированного распределения $\hat{W}_P(X, Z)$ на облучаемой поверхности:

$$\frac{E}{W_{E\max}} \left(\frac{P}{AI_{P\max}} \right) \leq \frac{E}{W_E} \left(\frac{P}{AI_P} \right) \leq \frac{E}{W_{E\min}} \left(\frac{P}{AI_{P\min}} \right). \quad (8)$$

В случае использования распределения интенсивности в сечении луча в качестве одного из параметров оптимизации необходимо перейти от нормируемого (условного) распределения к реальному, описав его зависимостью:

$$P(t) = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} AI_p(X, Z, t) dx dz, \quad (9)$$

которая дает возможность сравнивать лучи одинаковых размеров и мощности, но с разным нормируемым распределением $\hat{W}_P(X, Z)$. Примеры профилей лучей, которые отвечают этим требованиям, приведены на рис. 2.

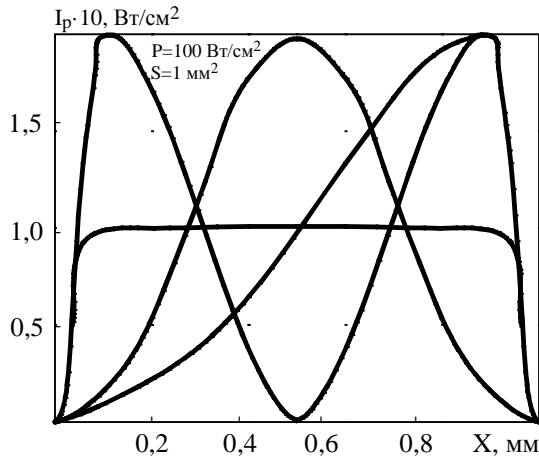


Рис. 2. Примеры профилей распределения интенсивности в луче.

Поиск режимов обработки (параметров лазерного луча и условий облучения) осуществляется путем восстановления энергетического потока излучения на облучаемой поверхности по заданному положению и форме изотермы закалки в теле заготовки, при использовании в качестве связи численного решения уравнения теплопроводности типа (4) с граничными условиями (5):

$$\begin{cases} \lambda(T) \frac{dT}{dz} \Big|_{Z=0} = -A(T) W_{Po} \exp[-k(X^2 + Y^2)] \\ T(\pm\infty; Y; Z; t) = T(X; \pm\infty; Z; t) = \\ = T(X; Y; \pm\infty; t) = T(X; Y; Z; 0) = T_0, \end{cases} \quad (10)$$

где $T(X; Y; Z; t)$ — температура; t — время; X, Y, Z — пространственные координаты; W_{Po} — плотность мощности теплового источника, созданного поглощенной частью энергии луча; k — коэффициент сосредоточенности теплового источника; $A(T)$ — температурная зависимость коэффициента поглощения излучения поверхностью заготовки.

Так как уравнение связи учитывает ограничения (1)–(3) и (5) в неявной форме и при этом решается задача не прямой оптимизации (поиск экстремума функции (6)), используется один из методов прямого поиска — метод Хука-Дживса (метод деформируемого многогранника).

Для количественной оценки результатов проектирования выполним режимное обеспечение операции закалки режущего клина автоматного проходного резца из стали У8 (рис. 1а) следующих размеров: $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 70^\circ$; $a \times b = 14 \times 10$ мм; глубина $Z_3 = 0,15$ мм, ширина $X_3 = 2,25$ мм (в сечении $A-A$ — рис. 1а); длина единичной зоны $Y_3^1 = X_3 = 2,5$ мм и общая длина $Y_3 = l = 12$ мм. Твердость материала в пределах зоны закалки $H_u = 8750 \pm 50$ МПа. На основании исходных данных формируется комплекс граничных условий согласно (1)–(3) и (5):

- условия реализации структурных превращений в пределах зоны закалки:

$$730^\circ\text{C} \leq T_V(X, Y, Z, t) \leq 811^\circ\text{C} (\Delta T = 81^\circ\text{C}),$$

- условия сохранения неизменного состояния облучаемой поверхности ($R_a = 0,63$ мкм) без ее оплавления:

$$T_{\max}(X, Y, Z, t) \begin{cases} X = 0 \\ Y = 0 \\ Z = 0 \end{cases} \leq 1500^\circ\text{C} \leq T_{\text{пл}},$$

- ограничения на параметры пучка излучения, которые определяются возможностью выбранного технологического оборудования:

$$\begin{aligned} E &\leq 8 \text{ Дж}; \quad 2 \cdot 10^{-3} \text{ с} \leq \tau \leq 8 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad 1 \text{ Гц} \leq f \leq 100 \text{ Гц}; \\ &0,4 \text{ Дж/мм}^2 \leq W_E \leq 3,0 \text{ Дж/мм}^2; \\ &1,3 \text{ мм} \leq d_0 \leq 3,6 \text{ мм}. \end{aligned}$$

В работе использовано технологическое оборудование TruPulse 21 [29] и Квант-15 со следующими техническими характеристиками (после модернизации):

- размеры активной среды YAG: Nd^{+3} : $d \times l = 6 \times 130$ мм;
- импульсная энергия излучения: $E \in 0,1 \div 10$ Дж;
- длительность импульса: $\tau \in 50 \div 8000$ мкс;
- угол расходимости лазерного луча: $\theta \in 0,003 \div 0,006$ рад.;
- частота подачи импульсов: $f \in 1 \div 100$ Гц;
- телескоп (афокальный) — увеличение: $\Gamma = 2$ и 4 раза;
- набор преобразующих линз с фокусным расстоянием: $F = 25, 50, 75$ и 100 мм.

При формировании функции цели на конфигурацию зоны закалки налагается штраф (6), преобразованный для зоны, полученный при воздействии одного импульса, то есть $Y_3 = X_3$:

$$RSQ_1 = [T(X, Y, Z) - F(X_3, Y_3)]^2 = \text{минимум}, \quad (11)$$

а также на скорость термических циклов (нагрев и охлаждение зоны):

$$RSQ_2 = [\partial T(X, Y, Z, t)/\partial t - V_{min}]^2 = \text{минимум}. \quad (12)$$

Для сокращения продолжительности расчетов, а также в связи с осевой симметрией задачи в направлении Y и X (в направлении от кромки режущего клина) процесс нагревания описывается двумерным уравнением теплопроводности (10). Зависимости $c_p(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ и $A(T)$ [30], а также $P(X, Y)$ интерполируются кубическими сплайнами.

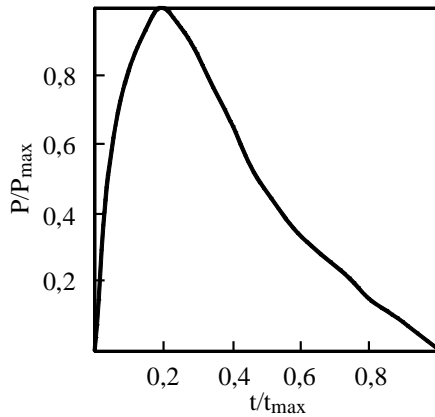


Рис. 3. Временная форма импульса излучения ($\tau = 6 \cdot 10^{-3}$ с, $E = 6,1$ Дж).

Для временной формы импульса выбранной ЛТУ (рис. 3), а также при допуске на прирост функции и аргумента 10^{-4} расчетные уровни факторов представляются в виде аргументов:

- x_1 , – длительность импульса $\tau = 6,10^{-3}$ с;
- x_2 – координата левой границы теплового источника $x_{min} = 0,01$ мм;
- x_3 – нормированная плотность энергии $\hat{W}_E = 2,4$ мм⁻²;
- $x_4 \dots x_{4+N}$ – ординаты оптимального распределения интенсивности в сечении луча вдоль координаты X (нормированное распределение приведено на рис. 4) (N – количество точек интерполяции);
- x_{10} – диаметр луча на поверхности заготовки – $d_0 = 1,8$ мм;
- x_{11} – шаг перемещения заготовки (луча) $S_{л} = 0,8$ мм (коэффициент перекрытия $k_{л} = S_{л}/d_0 = 0,44$);
- x_{12} – скорость перемещения $V = 8$ мм/с (при частоте подачи импульсов $f = 10$ Гц);
- x_{14} – импульсная энергия $E = 6,1$ Дж.

Значения остальных параметров обработки определены исходя из характеристик возможностей используемой технологической установки. Так, например, для технологической установки на базе лазера TruPulse 21 ($P_{cp} = 20$ Вт, $P_{um} = 1,5$ кВт, $E_{max} = 15$ Дж, $\tau \in 0,2 \div 50$ мс, ВРР = 4 мм×мрад [29]) с диаметром луча

$D = 6,0$ мм, углом его расходимости $\theta = 4$ мрад и увеличением телескопа $\Gamma = 2$ при работе с линзой с фокусным расстоянием $F = 50$ мм для формирования зоны облучения диаметром $d_0 = 1,8$ мм телескоп необходимо расстроить смещением его положительной компоненты на +2 мм и разместить облучаемую поверхность заготовки со смещением $\Delta F = -5,9$ мм от перетяжки каустики луча.

Прогнозные значения размеров зоны закалки при выбранных режимах:

- x_{13} – размеры зоны закалки $X_3' = 2,25$ мм, $Z_3' = 0,158$ мм, $Y_3 = 12,0$ мм;
- x_{15} – поверхностная производительность операции $V \times X_3' = 18,0$ мм²/с, ее продолжительность 1,5 с.

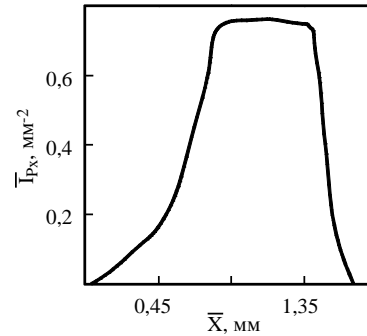


Рис. 4. Нормированное распределение интенсивности в сечении лазерного луча.

Экспериментальная проверка выбранных режимов обработки показала достаточно высокую степень сходимости размерных показателей зоны закалки с их расчетными значениями: $X_{3Э} = 2,30$ мм (расчетное значение 2,25), $Z_{3Э} = 0,145 \div 0,159$ мм (0,158), $Y_{3Э} = 12,5$ мм (12,0).

Задание проектирования выполнено в контексте набора данных, изображенных на эскизе изделия (рис. 1а), однако реализация выбранной схемы покрытия передней поверхности режущего клина суперпозицией одиночных закаленных зон (рис. 1б) приводит к появлению нестабильности ширины и глубины закаленного слоя ΔB_{cx} и ΔZ_{cx} при естественных погрешностях формирования одиночных зон Δb и Δz от нестабильностей, вносимых участниками ТОС. В случае высоких требований к равномерности закаленного слоя, например, при обработке тонкостенных заготовок на функцию цели будут налагаться дополнительные штрафы, касающиеся минимизации погрешности глубины и ширины зоны закалки.

2.2. Операции раскрытия листовых заготовок газолазерным разрезанием

Особенностью процесса газолазерной обработки является использование двух видов энергетического воздействия на материал заго-

товки. Лазерный луч обеспечивает тепловое воздействие с целью нарушения его сплошности, то есть создания условий для механического удаления расплава наиболее эффективным видом воздействия – газовой струей. Хотя такое разделение функций упрощает управление процессом удаления материала, этап проектирования режимов обработки усложняется, так как необходимо учитывать взаимное влияние составляющих инструмента, в частности, удаление материала из полости реза, что нарушает баланс тепловой энергии и не способствует учету расхода кинетической энергии струи газа.

Комплексность инструмента для газолазерного резания усложняет задачу проектирования технологической операции, которую необходимо выполнять в двух направлениях:

- выбор параметров пучка излучения, условий его преобразования оптической системой и скорости перемещения относительно заготовки исходя из данных задания формирования в теле заготовки зоны расплава, размеры и форма которой отвечают форме реза;

- проектирование системы подачи технологического газа (тип, давление, форма, размеры и расположение сопла относительно заготовки) в виде струи, энергетические размеры и форма которой определяются размерами зоны расплава в заготовке, причем необходимо учитывать некоторые гидродинамические свойства материала заготовки в жидком состоянии: жидкотекучесть, вязкость и пр.

Операции контурного газолазерного резания можно рассматривать как однокритериальные, то есть оцениваемые по одному из главных технологических показателей операции разрезания – ширине реза. Другие требования, предъявляемые к качеству реза, выполняются за счет дополнительных средств воздействия на процесс обработки, а основной технико-экономический показатель – производительность операции – обеспечивается максимизацией скорости резания при выборе режима обработки. В таких случаях наряду с использованием аналитических моделей, полученных в результате приближенных решений уравнения теплопроводности [30], и феноменологических моделей, разработанных для разрезания импульсно-периодическим и непрерывным излучением [12], применяются математические (эмпирические) модели, полученные экспериментальными методами [31].

Анализируя возможности проектирования с использованием этих моделей, можно сделать вывод о том, что они имеют ряд недостатков, которые существенно влияют на качественную (из-за низкой точности) и количественную

(вследствие трудоемкости получения моделей и существенных ограничений при использовании) стороны решения заданий проектирования операций газолазерного резания.

Для решения тепловой задачи необходимо описать процесс нагревания и плавления материала заготовки математической моделью в тепловой постановке – нелинейным дифференциальным уравнением теплопроводности (13) для каждой из двух фаз, с учетом фазовых переходов [32]:

$$[c(T)\rho(T) + H\delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + f; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} T_{x_i,0} &= T_n = Const > 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ x_1, x_2 \in \text{зона реза} \\ x_1, x_2 \in \text{зона возд. ЛЛ}}} &= A(T)I_p; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ x_1, x_2 \in \text{зона реза} \\ x_1, x_2 \in \text{зона возд. ЛЛ}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ x_1, x_2 \in \text{зона реза} \\ x_1, x_2 \in \text{зона возд. ЛЛ}}} &= 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=h \\ x_1, x_2 \in \text{зона реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=h \\ x_1, x_2 \in \text{зона реза}}} &= 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=0 \\ x_1, x_3 \in \text{зона реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=0 \\ x_1, x_3 \in \text{зона реза}}} &= 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=l_2 \\ x_1, x_3 \in \text{зона реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=l_2 \\ x_1, x_3 \in \text{зона реза}}} &= 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_1=0 \\ x_2, x_3 \in \text{зона реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_1=0 \\ x_2, x_3 \in \text{зона реза}}} &= 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_1=l_1 \\ x_2, x_3 \in \text{зона реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_1=l_1 \\ x_2, x_3 \in \text{зона реза}}} &= 0; \end{aligned} \quad (14)$$

где T_{oc} – температура окружающей среды; $c(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ и $\alpha(T)$ – температурные зависимости удельной теплоемкости, плотности, теплопроводности и теплоотдачи материала заготовки; f – внутренний тепловой источник (принимается равным 0); x_i ($i = 3$) – координаты трехмерного пространства; $\delta(\xi)$ – дельта-функция Дирака ($\xi = (T - T^*)/T^*$; T^* – температура фазового перехода); H – энтальпия фазового перехода.

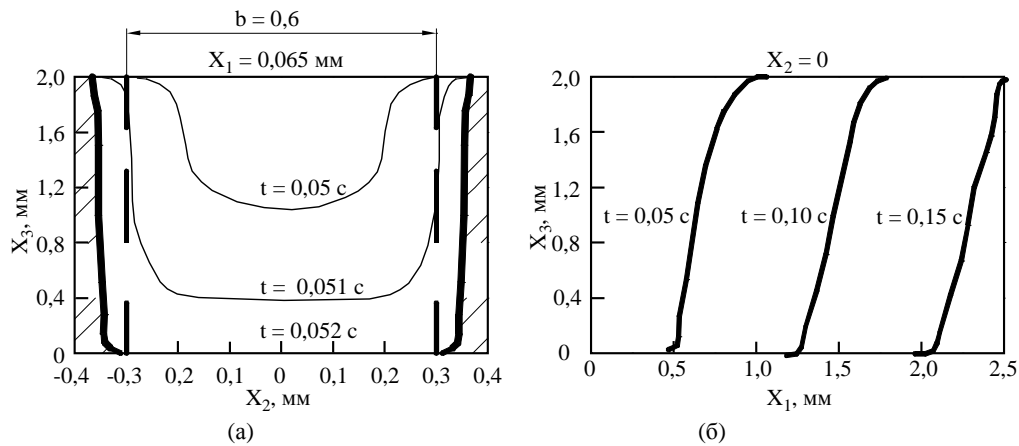


Рис. 5. Форма и границы зон плавления ((а) – поперек; (б) – вдоль направления резания) в результате облучения лучом CO_2 – лазера мощностью $P = 1500$ Вт с диаметром луча $d_0 = 0,5$ мм при скорости подачи $V = 1$ м/мин (– расчетное положение изотерм, - - заданное).

В связи с тем, что точного аналитического решения нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности (13) в произвольной постановке не существует, для прогнозирования результатов процесса лазерной обработки в режиме управляемого плавления материала листовой заготовки или для проектирования на этой основе технологической операции используется его численное решение. Наиболее интересна локально-одномерная схема решения, которая является экономичной. Но при использовании такой схемы возникают две проблемы.

1. В процессе газолазерной обработки происходит удаление материала из зоны облучения и определение температуры узловых точек расчетной сетки перестает быть объективным.

2. Температурные зависимости теплофизических характеристик материалов известны лишь для малого диапазона температур.

Первая проблема решается в результате заполнения ячейки расчетной сетки фиктивным материалом с определенными теплофизическими и оптическими свойствами взамен того, что удаляется. При решении таких задач предлагается принимать значения удельной теплоемкости $c = 1$ Дж/кг·град и теплопроводности $\lambda = 10^5$ Вт/м·град. Этот прием исключает необходимость перестройки сетки при использовании локально-одномерных схем расчета, а также позволяет учитывать переизлучение в зоне резания путем варьирования теплофизических характеристик фиктивного материала, а при импульсном облучении – влияние эрозионного факела на параметры реза [33].

Проблема, связанная с недостаточным количеством данных о температурных зависимостях теплофизических характеристик обрабатываемого материала, решается с помощью их аппроксимации кубическими сплайнами, причем необходимо учитывать то, что при фазовом переходе скачок испытывает теплоемкость, после чего она, а также теплопроводность в исследуемом диапазоне температур остаются

практически неизменными. Также можно считать постоянным уровень коэффициента поглощения материала после достижения температуры поверхности уровня $300\text{--}400^\circ\text{C}$.

Прямым решением тепловой задачи прогнозируются результаты облучения в виде размеров и формы реза при известных свойствах лазерного луча (длина волны излучения, мощность P и ее распределение в пределах диаметра луча D , угол расходимости θ), параметрах его преобразования (вид и характеристики оптической системы) и условиях облучения (рис. 5). Различия в положениях изотермы сквозного плавления заготовки ($t = 0,052$ с) и заданной ширины реза $b = 0,6$ мм объясняются сложностью предсказания возможности удаления расплава струей газа без ее характеристик.

Для определения комплекса параметров лазерного луча, условий его преобразования и облучения заготовки (то есть режима обработки технологической операции) необходимо осуществить восстановление энергетического распределения потока излучения на облучаемой поверхности по заданному положению и форме изотермы плавления в теле заготовки при использовании в качестве связи численного решения уравнения теплопроводности типа (13) с граничными условиями (14).

Учитывая вспомогательную функцию газовой струи – удаление материала из полости реза, сформированной границами его размерного плавления в результате лазерного облучения, для приближенных расчетов газового потока через сопло можно довольствоваться упрощенной одномерной стационарной моделью [33]. Принимая вектор скорости в сечении канала сопла направленным вдоль оси, а ее величину u , давление p , плотность ρ и температуру T постоянными в данном сечении канала, будем рассматривать их как величины, которые изменяются от сечения к сечению последнего при заданном законе изменения площади

сечения сопла F вдоль оси. Газовый поток можно считать адиабатическим, а газ совершенным и идеальным. При этих условиях движение газа можно считать изэнтропическим.

Дифференциальное соотношение между изменениями скорости газа и площади сечения сопла можно получить из уравнения Эйлера при условии неразрывности струи:

$$(M^2 - 1) \frac{du}{u} = \frac{dF}{F}, \quad (15)$$

где M – число Маха, которое характеризует степень превращения теплоемкости газового потока в кинетическую энергию и связано со скоростью потока u зависимостью:

$$u = u_3 \left\{ \left[(k+1)M^2/2 \right] / \left[1 + (k-1)M^2/2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}:$$

(u_3 – скорость звука). Если $M < 1$, знак du противоположен знаку dF , то есть с ростом площади сечения сопла скорость движения V падает и, наоборот, при уменьшении сечения – растет:

$$\frac{F}{F_{ex}} = \frac{M_{ex}}{M} \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \quad (16)$$

где p_{ex} , ρ_{ex} , u_{ex} , T_{ex} , M_{ex} – давление, плотность, температура газа и число Маха на входе газа в сопло. Из соотношений (15) и (16) получены зависимости (17), из которых можно получить параметрическое решение задачи об одномерном газовом потоке в сопле переменного сечения:

$$\frac{p}{p_{ex}} = \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad \frac{\rho}{\rho_{ex}} = \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (17)$$

$$\frac{u}{u_{ex}} = \frac{M}{M_{ex}} \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{T}{T_{ex}} = \frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2}.$$

За пределами сопла движение газа в окружающей среде является струйным. В зависимости от относительного направления движения струй к поверхностям тангенциального разрыва, струя газа и поток окружающей среды могут быть попутными или встречными. На границе двух струй формируется область конечной толщины с непрерывным распределением скорости и температуры. Эта область является струйным турбулентным пограничным слоем. Утолщение струйного пограничного слоя происходит за счет торможения частей струи, что приводит, с одной стороны, к увеличению ее поперечного сечения, а с другой – к постепенному «съедению» потенциального ядра струйной области, которая лежит между внутренними границами пограничного слоя.

Как показывает практика, одним из основных свойств такой струи является постоянство статического давления во всех областях течения, в результате чего скорость в потенциальном ядре струи остается постоянной. Часть струи, в которой есть потенциальное ядро течения, образует начальный участок. В связи с тем, что толщина материала, который разрезается, в большинстве случаев меньше, чем начальный участок газового потока, при расчетах параметров струи достаточно рассчитать длину начального участка и, убедившись в том, что она превышает толщину материала, принять профиль начального участка цилиндрическим и равным диаметру исходного отверстия сопла, а энергетические параметры по всей длине начального участка – постоянными. Для приведенной схемы формирования рабочего участка струи газа с использованием соответствующих зависимостей скорости газа струи от относительной площади поперечного сечения, при условии сохранения избыточной теплоемкости, разработана программа, которая включает в себя блок ввода начальных параметров газового потока, размерных характеристик сопла и блоки расчета параметров газовой струи после сопла (начальный участок) и при ее дальнейшем распространении. Определение необходимых энергетических характеристик струи выполняется с помощью соотношения (18). Результаты расчета изображены на рис. 6 ($p_1 = 600$ кПа, $T_1 = 298^\circ\text{K}$, $u_1 = 138$ м/с, $M_1 = 0,4$):

$$P_{\min} = \frac{2P^2V^2}{(d_2)^2 \rho (ca)^2 \left(T_{nl} + \frac{L_{nl}}{c} \right)^2}, \quad (18)$$

где d_2 – диаметр струи; P – мощность излучения; V – скорость подачи; a – температуропроводность материала; L_{nl} – скрытая теплота и T_{nl} – температура его плавления.

Для придания поперечному сечению реза заданной формы при формировании функции цели на конфигурацию профиля изотермы плавления налагается штраф, подобный (11), а параметры газовой струи выбираются по прежним расчетным соотношениям (13–18).

Если ТЗ содержит большее количество нормируемых показателей, касающихся чаще всего качественных показателей результатов обработки, моделирование которых требует использования экспериментальных методов проектирования, альтернативным подходом является задействование возможностей дополнительного совершенствования операции технологическим ее оснащением.

Взамен предложенного алгоритма решения тепловой и газодинамической задач процесса

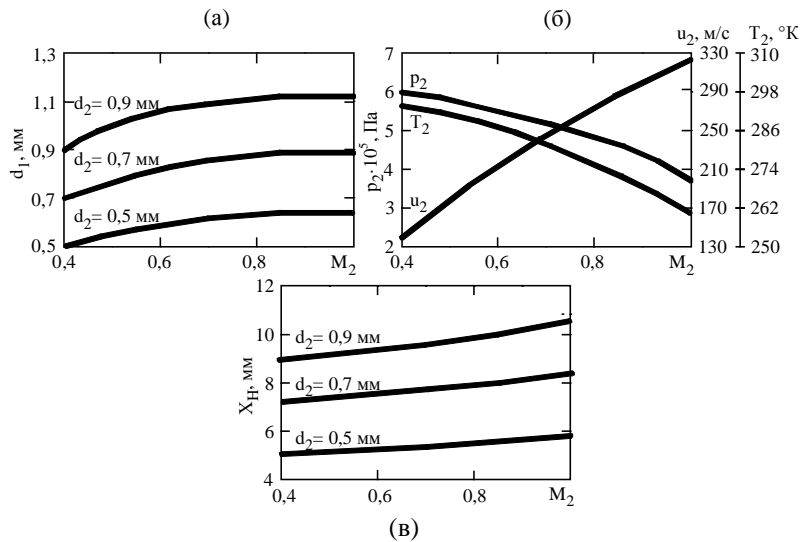


Рис. 6. Зависимости характеристик газовой струи в пределах ее начального участка от числа Маха ((а) – диаметр струи; (б) – давление, температура и скорость на ее оси; (в) – длина участка).

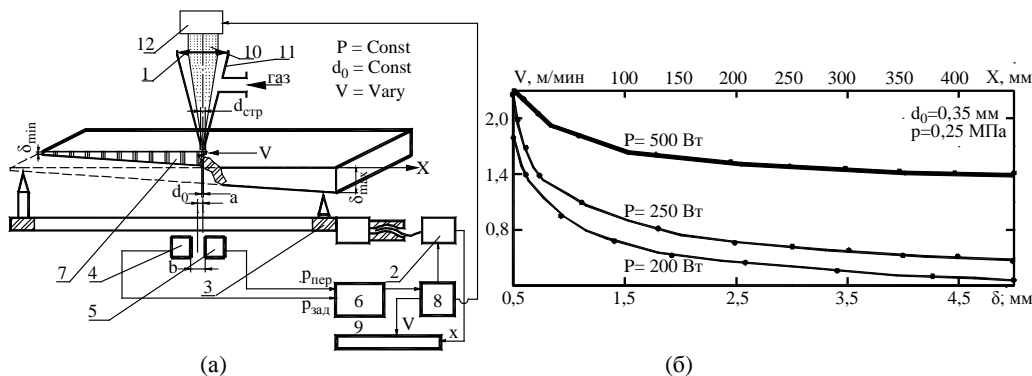


Рис. 7. Экспресс-метод определения режима газолазерного разрезания заготовок толщиной $\delta \in \delta_{\min} \div \delta_{\max}$: (а) – схема ЛТУ для реализации метода (1 – линза; 2 – привод подачи стола; 3, 4, 5 – датчики давления; 6 – измеритель давления в датчиках 4 и 5; 7 – заготовка; 8 – процессор; 9 – графопостроитель; 10 – луч лазера; 11 – резак с соплом; 12 – лазер; (б) – экспериментальные зависимости $V = f(P, \delta)$ разрезания дуба мореного толщиной 0,5 ÷ 5,0 мм.

газолазерного разрезания листовой заготовки для определения режима реализации технологической операции может быть использован экспресс-метод экспериментальной параметризации процесса газолазерного разрезания листового материала. Используя отмеченный в экспериментах эффект соответствия направления струи технологического газа, выходящего из реза, оптимальности условий его формирования, можно управлять результатами разрезания по данным контроля направления струи по давлению газа.

Для этого под заготовкой 7, установленной на столе 3 ЛТУ с приводом его перемещения 2 (рис. 7а), располагают на равном расстоянии от условной оси, смещенной относительно оси луча на расстояние $a = d_0/2$ (где d_0 – диаметр луча на поверхности заготовки), два датчика давления 4 и 5 с расстоянием между ними $b = d_{\text{стр}}$ (где $d_{\text{стр}}$ – диаметр газовой струи), которые подключены к устройству 6. Оптимальным для выбранной мощности излучения P принимается такое значение скорости резания V , которое задается приводом 2 при условии одинакового давления газа, создаваемого струей, выходящей

из нижней стороны реза, на датчиках 4 и 5. Если заготовке из обрабатываемого материала придать форму клина с клиновидностью $k = (\delta_{\max} - \delta_{\min}) / l$ (l – длина заготовки) и резку выполнять с мощностью луча P , достаточной для сквозного прорезания заготовки наибольшей толщины δ_{\max} в направлении клиновидности, то обработка будет выполняться с переменной скоростью V для поддержания оптимального направления струи газа, выходящей из реза при условии ее равного давления на датчики 4 и 5. Сопоставляя последовательность мгновенных значений скорости подачи V при перемещении луча вдоль оси x от начала прохода вдоль заготовки с известной клиновидностью k , можно установить зависимость $V = f(\delta_x)$.

На рис. 7б показаны такие зависимости, которые построены самописцем 9 при разрезании заготовки из дуба мореного длиной $l = 450$ мм с клиновидностью $k = (5,0 - 0,5) / 450 = 0,01$ для луча мощностью $P = 200, 250$ и 500 Вт.

Таким образом, весь диапазон толщин материалов, которые будут разрезаться (в примере $\delta \in 0,5 \div 5,0$ мм), нормируется за один

переход резания модельного образца. Если в ЛТУ не предусмотрено плавное управление уровнем скорости подачи стола V , предложенная методика может быть использована для построения зависимости при постоянной ее величине. В этом случае выбирается скорость подачи, необходимая для разрезания клиновидной заготовки наименьшей толщины излучением выбранной мощности. Процессор 8 управляет режимом работы блока питания лазера, плавно увеличивая уровень начальной мощности луча по мере роста толщины заготовки для обеспечения оптимального протекания операции резания, которое контролируется по давлению на датчиках 4 и 5.

Рассмотренная задача проектирования операции рассматривается как однокритериальная, а в действительности чаще оценивается большим количеством показателей, касающихся качества, производительности и себестоимости операции. Моделирование процесса в их отношении для наложения дополнительного штрафа на режим реализации операции требует особого рассмотрения или поиска средств компенсаций за счет дополнительного воздействия на процесс.

2.3. Операции размерной (прецизионной) обработки

Операции данного класса предназначены для формирования в изделиях элементов различных размеров и формы (сквозные отверстия и глухие лунки, пазы, щели и выемки) с нормированными показателями их качества (точность размеров, погрешности продольной и поперечной форм, шероховатости поверхности и состояние приповерхностного слоя). В зависимости от размеров и формы элемента для его формообразования применяется несколько технологических схем:

- копирование размеров и профиля инструмента ($d \leq 0,3$ мм, глубиной до 2 мм);
- при большей глубине используется постепенное заглубление инструмента в тело изделия;
- для элементов большего поперечного размера и сложной формы применяется схема трепанации с обходом их контура (глубиной до 2 мм);
- при большей глубине элементов или для более «толстых» изделий применяется комбинированная из двух первых схем трепанация с постепенным заглублением инструмента (спиральное сверление [35]).

При всех схемах обработки используется механизм самоудаления продуктов разрушения материала заготовки избыточным давлением паров, поэтому для их формирования энергия луча подается порциями (импульсами) при

уровне интенсивности более 10^8 Вт/см². Длительность импульсов для разных технологических задач варьируется от $0,1 \div 10^{-3}$ (для свободной генерации) до 10^{-12} с в нанотехнологиях. Сложность механизма формообразования размерных элементов не дает возможности использовать только аналитические модели процесса для прогнозирования результатов обработки и тем более для проектирования операций, а также численные методы решения тепловых задач в их любой постановке. Однако технологические задачи проектирования операций сверления отверстий и их трепанации, а также формирования пазов (щелей) суперпозицией отдельных отверстий (лунки) в их однокритериальной постановке были решены в работе [36] в целях перфорации металлических изделий импульсами с регулярной пиковой структурой при условии расположения поверхности изделия в перетяжке каустики лазерного луча, преобразованного оптическим элементом. Автором были приняты некоторые упрощения механизма формообразования лунки, в том числе одинаковая величина приращения ее глубины ΔZ от действия каждого пика импульса, несмотря на изменения условий облучения на дне лунки при ее углублении. Кроме того, в течение импульса τ предполагается неизменный уровень пиковой интенсивности I_{ps} , хотя его энергетическая макроструктура, как импульса свободной генерации, переменна и состоит из переднего фронта, основной части и заднего участка. Таким образом, чем больше реальная схема облучения будет приближена к расчетной, тем ближе к заданным размерам будут лунки (отверстия), обработанные на режимах, установленных по предлагаемому алгоритму. Для формирования лунки диаметром d и глубиной Z или сквозного отверстия длиной h необходимо выбрать уровни характеристик лазерного луча, условия его преобразования и облучения, используя следующую последовательность действий:

- выбрать значение плотности мощности W_{ps} теплового источника в теле заготовки, необходимое для реализации избранного механизма разрушения ее материала: для испарения материала со дна лунки ее уровень должен превышать 10^7 Вт/см²;
- рассчитать уровень длительности пика излучения τ_{sp} из условия ограничения бокового теплоотвода для уменьшения количества расплава в продуктах эрозии:

$$\tau_{sp} = 4 \cdot 10^{-3} d^2 / a$$

и уточнить из набора значений, реализуемых на выбранной ЛТУ: τ_{od} ;

- определить толщину слоя материала на дне лунки, удаляемого одним пичком:

$$\Delta_1 = W_{Ps} \times \tau_{S\delta} / (L_u \times \rho),$$

где L_u – удельная теплота испарения материала заготовки; ρ – его плотность;

- выбрать период следования импульсов t_s , который должен быть достаточно продолжительным для самоудаления продуктов эрозии из полости лунки глубиной Z_i , но достаточно коротким для охлаждения материала на дне отверстия не ниже температуры кристаллизации, то есть:

$$Z_i / V_p + \tau_{S\delta} < t_s < 0,05d^2/a + \tau_{S\delta},$$

где V_p – скорость разлета частиц эрозийного факела $\sim 10^4$ м/с; Z_i принимается равной полной глубине лунки ($Z_i = h$) или толщине заготовки ($Z_i = \delta$) для сквозного отверстия;

- установить частоту следования импульсов $f_p = 1/t_s$, значение которой уточняется из ряда значений, которые реализуются на выбранной установке, как $f_\delta \geq f_p$;

- определить количество импульсов, необходимое для формирования лунки заданной глубины h или отверстия в заготовке заданной толщины δ : $n = h/\Delta$;

- рассчитать энергию одиночного микроимпульса (пичка):

$$E_s = W_{Ps} \times \tau_{S\delta} \times \pi d^2 / (4A);$$

- определить энергию импульса (цуга пичков):

$$E = n \times E_s = n \times W_{Ps} \times \tau_{S\delta} \times \pi d^2 / (4A) = \pi d^2 \times h \times L_u \times \rho / (4A);$$

- выбрать диаметр луча на поверхности заготовки: $d_0 = d$;

- рассчитать необходимое значение угла расходимости луча перед оптическим элементом θ :

$$\theta_p = d_0 / F_{min};$$

где F_{min} – фокусное расстояние оптического элемента, который при использовании тактики следования выбранным сечением перетяжки каустики луча (d_0) за положением дна обрабатываемой лунки должен иметь глубину резкости большую, чем глубина лунки h или толщина заготовки δ (для сквозного отверстия), то есть:

$$F_{min} \geq D_n [\pi \times h / (11,12\lambda)],$$

где D_n – диаметр луча на уровне главной плоскости оптического элемента (линзы);

- согласовать угол расходимости луча на выходе из лазера θ_n с его расчетным значением θ_p перед оптическим элементом с фокусным

расстоянием F_{min} , необходимым для формирования каустики заданной формы и размеров; для чего используется телескоп Галилея [37] с увеличением Γ , который расстраивается на величину Δ :

$$\Delta_{1,2} = 0,5 \left(\frac{D_n}{2\theta_n} + x \right) \pm \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D_n}{2\theta_n} + x \right)^2 + \left(\frac{F_1 \Gamma \theta_p}{\theta_n} - F_1^2 \right) \right]^{1/2}. \quad (19)$$

Отверстия и лунки диаметром больше 0,3 мм, глухие пазы и сквозныерезы такой же ширины формируются в результате суперпозиции отдельных отверстий (лунок) вдоль контура обрабатываемого элемента (рис. 8а). Если перфорация отверстий может выполняться при импульсной работе лазера путем модуляции импульсов свободной генерации, то при контурном вырезании удобнее использовать лазер с непрерывной генерацией излучения, которое превращается в импульсное модуляцией добротности резонатора. В этом случае задача определения режимов лазерной контурной резки импульсным излучением сводится к поиску уровней следующих параметров:

- τ_s – длительность импульса излучения;
- f – частота следования импульсов;
- V – скорость относительного движения лазерного луча и заготовки;
- P_{cp} – средняя мощность излучения;
- E_s – импульсная энергия;
- d_0 – размер лазерного луча на поверхности заготовки.

Исходными данными для проектирования технологической операции являются материал заготовки; ее толщина (для сквозного элемента); размеры вырезаемого контура B или ширина b и глубина паза Z ; допуски на них $It(B)$ или $It(b)$ и $It(Z)$; норма шероховатости поверхности стенок обрабатываемых элементов R_z (R_a). Условиями проектирования являются конструктивные и технологические параметры ЛТУ: диаметр лазерного луча D_n , его расходимость θ , а также параметры оптической системы телескопа (увеличение Γ , фокусное расстояние его отрицательной компоненты F_1 , положение телескопа относительно излучателя x) и набор элементов преобразующей оптической системы F_i . Проектирование выполняется в следующем порядке:

- определяется длительность импульса τ_{sp} , необходимая для формирования паза заданной ширины $b < 0,3$ мм при заданных размерах вырезаемого элемента заготовки:

$$\tau_{sp} < 4,10^{-3} \times b^2/a.$$

Принимается значение длительности из значений, реализуемых на ЛТУ, наиболее близкое к расчетному $\tau_{S\delta}$;

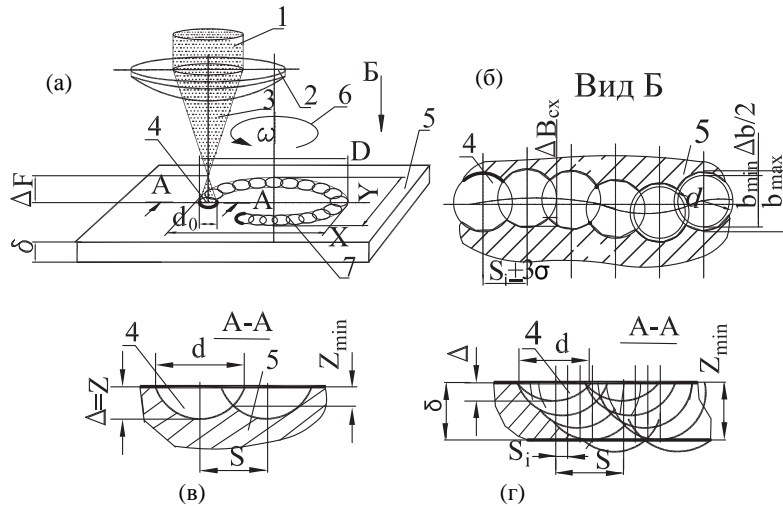


Рис. 8. Схемы формирования отверстия большого размера и сквозного реза: (а) – формирование контура полости; (б) – схема формирования реза; (в) – формирование дна канавки; (г) – формирование сквозного реза (1 – лазерный луч; 2 – линза; 3 – каустика луча; 4 – одиночный элемент реза; 5 – заготовка; 6 – траектория движения луча; 7 – рез).

• определяется частота следования заготовки V :
импульсов:

$$f_p > (0,05b^2/a + \tau_{sd})^{-1},$$

$$V_p \leq \frac{b \times W_{ps} \times \tau_{sd} \times f_d}{\delta \times \rho \times L_u}.$$

принимается частота f_d , ближайшая к расчетной f_p из возможных для выбранной ЛТУ;

• определяется уровень средней мощности излучения при значении интенсивности излучения в пучке $I_{ps} > 10^7$ Вт/см²:

$$P_{cp} = \pi \times b^2 \times A \times I_{ps} \times \tau_{sd} \times f_d / 4;$$

• рассчитывается уровень импульсной энергии излучения:

$$E_s = \pi \times b^2 \times A \times I_{ps} \times \tau_{sd} / 4;$$

• определяются условия облучения:

– диаметр луча на поверхности заготовки принимается равным ширине реза: $d_0 = b$;

– оптический элемент (линза) для преобразования лазерного луча должен иметь глубину фокуса, вдвое превышающую толщину заготовки δ для повышения качества профиля реза (уменьшения клиновидности):

$$F_p \geq D[\pi \times \delta / (11,12\lambda)]^{1/2},$$

где D – диаметр пучка излучения на уровне главной плоскости оптического элемента: $D = D_l \times \Gamma$; расчетное значение фокусного расстояния округляется до ближайшей большей величины F_d из ряда значений, используемых в ЛТУ;

– угол расходимости лазерного луча определяется по приближенной зависимости:

$$\theta_p = d_0 / F_d;$$

– для согласования расходимости луча после излучателя θ_l с расходимостью θ_p телескоп расстраивается на величину Δ , определяемую по зависимости (18);

– определяется величина скорости относительного перемещения лазерного луча и

Полученное значение скорости V_p проверяется по условию выполнения требований к качеству поверхности стенки реза (R_z или R_a) или нестабильности его ширины ΔB_{cx} (рис. 8б); так как при импульсной обработке непрерывный рез формируется последовательностью отверстий диаметром d_0 , расположенных с шагом S (рис. 8б), причем их соотношение $S/d = k_n < 1$. Нестабильность ширины реза ΔB_{cx} зависит от этого соотношения:

$$\Delta B_{cx} = b[1 - (1 - k_n^2)^{1/2}].$$

При $d_0 = b$ полученную зависимость можно преобразовать, учитывая, что $k_n = S/d_0 = V/(f_d \times d_0)$:

$$\Delta B_{cx} = b\{1 - [1 - (V_p/(f_d \times b))^2]^{1/2}\}.$$

Тогда на скорость реза V_p необходимо наложить ограничения из-за нормированных качественных характеристик реза, приравнивая погрешность ширины реза ΔB_{cx} величине допуска на его ширину (на размер вырезаемого контура $It(B)$) или его половину – уровню предельной шероховатости стенки реза $R_z(R_a)$. Предельное значение скорости ограничивается по этим условиям величиной:

$$V \leq f \times b[1 - (1 - \Delta B_{cx}/b)^2]^{1/2}.$$

В последней зависимости величина f принимается равной частоте следования импульсов f_d , если в заготовке толщиной δ сквозное единичное отверстие достигается заданной глубины $\Delta = Z$ или глухой паз формируется одним импульсом (рис. 8в), то есть:

$$\Delta = W_{ps} \times \tau_{sd} / (L_u \times \rho) = \delta \text{ (или } Z).$$

Если последнее равенство не выполняется (рис. 8г), то f_0 определяется по соотношению:

$$f_0 \leq f \times \Delta / \delta.$$

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ И СРЕДСТВА ПОДДЕРЖАНИЯ НОРМ КАЧЕСТВА ОПЕРАЦИЙ

Для компенсации неучтенных в предложенных методиках проектирования технологического регламента операций заданных уровней показателей качества их размерных результатов необходимо использовать методы и средства нережимного воздействия на ТОС. Например, с целью устранения или сокращения влияния возмущающих обстоятельств, дестабилизирующих процесс воздействия лазерного луча на заготовку и искажающих его результаты, которые заданы технологическим регламентом на ограниченное количество нормированных показателей. В связи с тем, что моделирование процесса обработки в контексте показателей точности размерных результатов, нормирующих степень их воспроизводимости, выполняется затратными (по времени и ресурсам) экспериментальными методами, а использование моделей, как результата их реализации, для формирования дополнительных штрафных функций в задачах оптимизации, подобных (11) и (12), является неэффективным из-за того, что они являются короткоживущими, требующими регулярного обновления, предлагается для выбора приемов и средств совершенствования технологических операций использовать данные исследований структуры их суммарной погрешности [4, 5, 22, 23, 25, 26].

3.1. Операции поверхностной термообработки

В прогнозной структуре суммарной погрешности размерных результатов поверхностной лазерной закалки, предсказанной перцептроном в виде трехслойной искусственной нейронной сети [26] (рис. 9) с прямым распространением сигнала, предвиденные данные влияния каждого участника ТОС на суммарную погрешность ширины и глубины зоны закалки при импульсном (а) и непрерывном (б) режимах нагрева заготовки достаточно близки к размерам закаленного слоя, полученным в натуральных испытаниях. Необходимо отметить, что для обоих режимов порядок и сила влияния основных управляемых факторов подобны для поперечных b и продольных z размеров зоны закалки.

Наибольшее влияние оказывает нестабильность поглощательной способности A : при *непрерывном* режиме на глубину единичной зоны она вызывает 53,9% погрешности, на

ширину зоны – 48,1%. Результаты закалки в *импульсном* режиме определяются на 48,3% по глубине зоны и на 41,7% по ее диаметру. Второе место при *непрерывном* облучении занимают ошибки настройки энергетического режима облучения $HP = 33,5\%$ для глубины зоны и 30,3% для ширины. В *импульсном* режиме на втором месте оказалась нестабильность скорости охлаждения зоны, что сказалось на случайном изменении уровня температуры закалки $T_{зак}$ и, как следствие, – на диаметре зоны 19,1%, тогда как ее глубина на 18,2% зависела от колебания уровня импульсной энергии E . Далее, *непрерывная* закалка на 6,8% нестабильна по глубине из-за нестабильности мощности луча P и на 5,8% по ширине зоны. При *импульсной* закалке на третьем месте ошибки при настройке режима $HP = 14,9\%$ по влиянию на глубину и нестабильность импульсной энергии E – на диаметр зоны 15,6%. Нестабильности остальных факторов влияют слабее и расположены в следующем порядке: для *непрерывного* режима: скорость подачи V (5,0%), $T_{зак}$ (4,1%), смещение положения заготовки $См$ (2,5%), угол расхождимости θ (2,1%), погрешность настройки положения заготовки в каустике луча ΔF (2,0%) – для ширины зоны: $T_{зак}$ (2,6%), $См$ (1,2%), ΔF (1,0%), θ (1,0%) и V (0,4%) – для глубины. Для *импульсного* режима ΔF (8,4%), $См$ (1,8%), длительность импульса τ (0,5%) и θ (0,3%) – для диаметра зоны и $T_{зак}$ (10,7%), ΔF (5,9%), $См$ (1,3%), τ (0,5%) и θ (0,2%). Обобщая эти данные, можно утверждать, что главными виновниками размерной нестабильности единичных зон закаленного слоя являются погрешности факторов, определяющих энергетический режим процесса нагрева A , HP , $E(P)$, поэтому одним из направлений стабилизации процесса облучения является повышение и стабилизация уровня поглощения энергии луча обрабатываемой поверхностью.

3.1.1. Методы стабилизации уровня поглощенной энергии

Для самых распространенных лазеров на CO_2 общепринятым является применение поглощающих диэлектрических покрытий: оксидирование или фосфатизация химическим путем. Однако потребность в дополнительных операциях покрытия, включая внутриваровскую логистику заготовок, и утилизации остатков покрытия после операции не отвечают нормам эффективности и экономичности. Предлагаем взамен более удобный и оперативный метод стабилизации – нанесение газовой сажи на поверхность зоны облучения. Она представляет собой губчатый углерод, для горения которого в

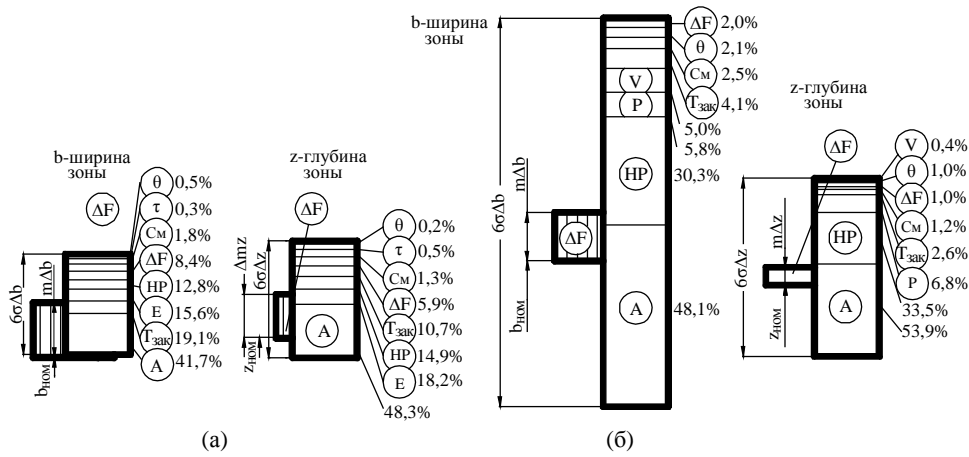


Рис. 9. Схема структуры суммарной погрешности размеров зон закалки в операциях с импульсным (а) и непрерывным (б) облучением (*A* – уровень поглощения поверхности заготовки; *T_{зак}* – температура закалки материала заготовки; *E(P)* – импульсная энергия (мощность луча); *HP* – настройка режима; *ΔF* – позиционирование заготовки; *См* – смещение положения заготовки; *τ* – длительность импульса; *θ* – угол расходимости луча).

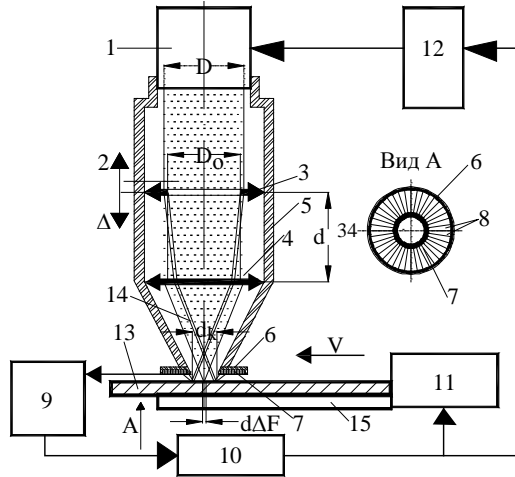


Рис. 10. Устройство для облучения поверхности заготовки со стабилизацией уровня поглощенной энергии. (1 – лазер; 2 – луч лазера; 3 – линза с центральным отверстием; 4 – линза преобразующая; 5 – корпус; 6 – корпус датчика мощности отраженных лучей; 7 – фотодатчик с секторами; 8, 9 – измеритель; 10 – процессор; 11 – привод стола; 12 – блок питания лазера; 13 – заготовка; 14 – каустика центральной части луча); 15 – стол устройства.

газовой среде не хватает кислорода, то есть при коэффициенте избытка окислителя $\alpha < 1$, при $\alpha > 1$ сажа не образуется. Коэффициент поглощения углерода в широком диапазоне длин волн излучения заметно превышает поглощающие способности основы конструкционных материалов – железа: $Fe_{1,06} = 0,35$; $Fe_{10,6} = 0,06$; $C_{1,06} = 0,77$; $C_{10,6} = 0,51$. Для нанесения покрытия на локальный участок поверхности на него нужно направить струю углеродсодержащего газа (метан, бутан, пропан) из сопла соответствующего диаметра, расположенного на расстоянии l от него, таким образом, чтобы желто-красная зона факела касалась холодной поверхности заготовки перед облучаемой ее зоной [38]. При изменении направления подачи необходимо менять положение сопла, чтобы опережать зону облучения. Остатки покрытия после лазерного облучения удаляются растворителем.

При облучении заготовок из материалов, имеющих достаточно высокую поглощательную

способность для излучений основных длин волн, проблема нестабильности поглощения остается и связана с изменчивостью характеристик обрабатываемой поверхности (высоты и направления шероховатости, наклона по отношению к лучу, наличия участков с органической и неорганической грязью и прочее). В основу устройства для облучения со стабильным уровнем поглощенной энергии положен принцип управления режимом обработки (мощностью излучения или скоростью подачи) в зависимости от уровня отраженного от облучаемой поверхности сигнала непосредственно перед зоной закалки [39].

Устройство, изображенное на рис. 10, работает следующим образом. Для выбранных режимов обработки, в том числе для диаметра зоны облучения d_0 и преобразующей линзы 4 с фокусным расстоянием F_4 , определяются условия облучения, то есть величина смещения поверхности заготовки с фокальной плоскости линзы ΔF_4 : $\Delta F_4 = d_{\Delta F_4} \times F_4 / (D_0 - F_4 \times \theta_{D_0})$, далее

выбираются параметры линзы 3 для отбора части мощности луча: диаметр центрального отверстия в ней (D_0) и ее фокусное расстояние F_3 : $F_3 = F_{34} (F_4 - d_{34}) / (F_4 - F_{34})$, где F_{34} – фокусное расстояние объектива из двух линз 3 и 4 с расстоянием между ними $d_{34} \pm \Delta$: $F_{34} = F_3 \times F_4 / [F_3 + F_4 - (d_{34} \pm \Delta)]$. Рабочий отрезок объектива из двух линз b_{34} будет равняться: $b_{34} = F_{34} [1 - (d_{34} \pm \Delta) / F_3]$. На расстоянии $F_4 + \Delta F_4$ от главной плоскости линзы 4 располагают поверхность заготовки 13 и смещают линзу 3 на величину $\pm \Delta$ из штатного ее положения a для концентрации периферийной части луча $D-D_0$ в кольцо вокруг зоны облучения диаметром $d_k = d_{\Delta F}$, размером $d_{\Delta F} + (0,1 \div 0,5)$ мм.

Процессор 10 должен иметь программу подключения к измерителю 9 тех секторов 8 (одного или двух) датчика 7, расположенных со стороны подачи заготовки 13. При изменении направления ее перемещения должны выбираться другие секторы 8 датчика 7 на тех же условиях. Измеритель 9 анализирует сигнал от подключенных секторов 8 и, в случае изменения мощности отраженного сигнала, что определяет процессор 10, последний вырабатывает управляющий сигнал либо на коррекцию скорости подачи V приводом 11 стола 15, либо на соответствующее изменение мощности луча P блоком питания лазера 12. Таким образом, учитывается действительный коэффициент поглощения участка поверхности заготовки перед ее облучением, то есть стабилизируется уровень поглощенной энергии, причем с меньшими материальными и временными затратами.

3.1.2. Устройства для улучшения характеристик обрабатываемого инструмента

При незначительной модернизации установки (рис. 10), а именно увеличении фокусного расстояния линзы 4 до $F_4 = 200 \div 250$ мм и использовании линзы 3 с отверстием $D_0 = 0,83D\sqrt{a}$ (a – коэффициент сосредоточенности излучения) для отбора периферийной части на уровне половинной максимальной интенсивности в луче: $I_{PD_0} = 0,5I_{P_0}$ ее можно применить для выравнивания интенсивности в зоне облучения. Тогда для наложения периферийного луча 8 у границы облучаемой зоны его мощность суммируется с мощностью центральной части луча 9, имеющей неравномерное распределение (чаще Гауссово), за счет чего оно выравнивается почти до равномерного (рис. 11а) [40]. Для достижения такого эффекта для значений F_4 , D , D_0 и d_{34} (изменяемое –

расстояние между линзами 3 и 4) выбирается линза F_3 : $F_3 = (d_{34} - F_4) / [1 + (D_0 \times \Delta F_4 / D \times \Delta F_{34})]$, где ΔF_4 – смещение поверхности заготовки в каустике линзы 3: $\Delta F_4 = -d_{\Delta F_4} \times F_4 / D_0$, а $\Delta F_{34} = d_{\Delta F_{34}} \times F_{34} / D$ ($F_{34} = F_3 \times F_4 / (F_3 + F_4 - d_{34})$). На рис. 11а показаны суперпозиция распределений интенсивности для условия $d_{\Delta F_4} = d_{\Delta F_{34}}$ и результат воздействия такого вида распределения на форму и глубину зоны заковки. Если при такой схеме облучения необходимо следить за уровнем поглощения поверхности заготовки излучения для стабилизации вводимой в заготовку энергии, как это выполняется на ЛТУ (рис. 10), то нужно выполнить условие $d_{\Delta F_{34}} = d_{\Delta F_4} + (0,5 \div 1)$ мм, чтобы создать поток излучения к фотодатчикам (ФД) (рис. 11б) от поверхности за пределами облучаемой зоны, и к торцу сопла прикрепить кольцевой секторированный фотодатчик 7 (см. рис. 10) с соответствующей аппаратурой. Это позволит управлять стабильностью размеров зоны, но меньших размеров и в форме сегмента круга (рис. 11б).

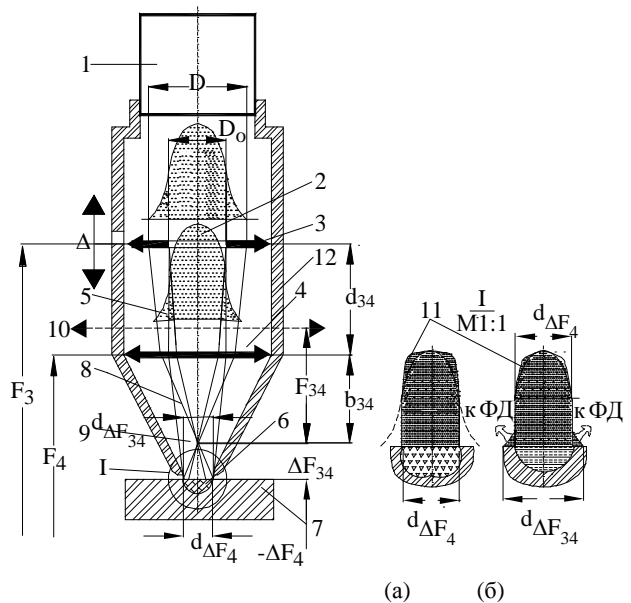


Рис. 11. Схема ЛТУ для поверхностной заковки лучом с равномерным распределением мощности в зоне облучения (1 – лазер; 2 – распределение мощности в центральной части луча; 3 – линза; 4 – преобразующая линза; 5 – распределение мощности на периферии луча; 6 – сопло резака; 7 – заготовка; 8 – каустика периферийного луча; 9 – каустика центрального луча; 10 – условная линза; 11 – распределение мощности в зоне облучения ((а) – при полном наложении периферийного луча на центральный; (б) – наложение с формированием сигнала к ФД); 12 – корпус преобразующей системы из линз 3 и 4).

Для управления законом распределения мощности в зоне облучения, например для решения задачи заковки режущей части резца (рис. 1), необходимо обеспечить несимметричный профиль распределения интенсивности, построенный расчетным путем (рис. 4).

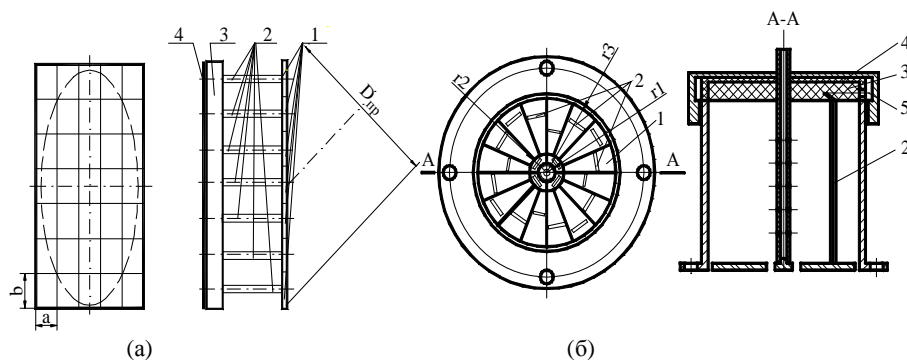


Рис. 12. Схема поворотного мозаичного зеркала с медными отражающими элементами, снабженными трубчатыми (а) и плоскими (б) пьезоприводами их наклона (1 – элементарное зеркало; 2 – пьезоэлементы; 3 – основание, 4 – плата печатного монтажа; 5 – провод.

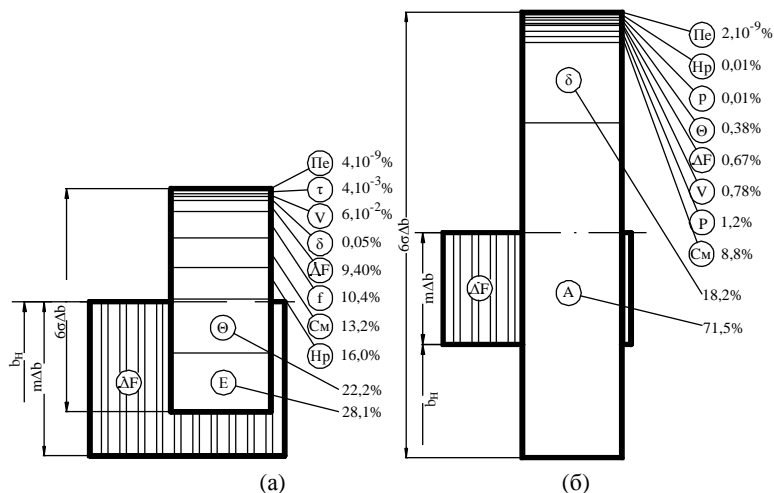


Рис. 13. Структура суммарной погрешности ширины реза при импульсном (а) и непрерывном (б) режимах газолазерной резки.

Для этого можно применить интегральный зеркальный элемент – поворотное зеркало, изготовленное из листовой меди с соответствующим покрытием и разделенное после закрепления на нем 35 трубок 2 из пьезокерамики на матрицу 1 из 5×7 штук алмазным шлифованием или лазерной резкой (рис. 12а). Противоположный торец трубок установлен на печатной плате для подвода управляющего питания к каждой из них. От уровня высокочастотного напряжения зависит угол изгиба трубки и соответственно угол наклона свободного торца с закрепленным элементарным зеркалом 1. Наклоняя зеркало 1, можно обеспечить выбранный закон распределения мощности в зоне облучения [41]. Для осесимметричных лучей рекомендуется использовать конструкцию подобного вида, но с радиально расположенными зеркалами 1, закрепленными на торцах пьезоэлементов, изгибающихся в радиальном направлении (рис. 12б) [42].

3.2. Операции газолазерного раскроя листового материала

Для улучшения результатов операции газолазерного разрезания листовых заготовок, режимы выполнения которой выбраны в результате численного решения уравнения теплопровод-

ности или экспресс-методом по внешним проявлениям качественного разрезания (рис. 7), направления дополнительного воздействия можно определить из анализа структуры суммарной погрешности ширины реза, появление которой вызывается действием неуправляемых и неконтролируемых факторов процесса обработки (рис. 13).

Превалирующее влияние нестабильности энергетических характеристик лазерного луча, включая изменчивость его размеров на поверхности заготовки, заметно для *импульсного* и *непрерывного* режимов подачи энергии. В *первом случае* энергия непосредственно влияет на ширину: E на 28,1% контролирует ее величину, а угол расходимости θ , воздействуя на размер зоны облучения, еще на 22,2% делает ширину реза зависящей от интенсивности луча на поверхности заготовки. В этом же направлении действуют нестабильности настройки режима работы лазера H_p (16,0%), реального положения поверхности заготовки C_m (13,2%) и его проектного значения ΔF (9,4%). Нестабильность частоты подачи импульсов f заметно влияет на ширину реза (10,4%), однако легко устраняется стабилизацией работы генератора тактовых импульсов или использованием внутрирезона-

торного модулятора добротности с функцией предустановки заданного количества импульсов. Хотя при импульсном облучении рез также продувается струей газа, его эффективность как эвакуатора продуктов эрозии невысока, так как большая их часть самоудается при сублимации вещества, выносящего при этом жидкие и твердые его частицы. Струя газа скорее охлаждает разрушенный материал, снижает его склонность к прилипанию и целенаправленно выносит из полости реза, поэтому состав и давление газа не оказывают заметного влияния на количественные результаты вырезания. Так как прогнозный расчет выполнялся для твердотельного дискового лазера на YAG: Nd^{3+} , излучение которого ($\lambda = 1,06$ мкм) достаточно хорошо поглощается поверхностью металлических листов, особенно при их нагреве выше 300°C , влияние нестабильности их поглощательных свойств не сказалось. А в качестве источника излучения с *непрерывной подачей лучистой энергии* использовался лазер на CO_2 , и режим его работы обеспечивал плавление материала, поэтому на первое место вышли нестабильность поглощательных свойств материала: A (71,5%) и колебания толщины листа δ (18,2%). Неуправляемое изменение начальных условий облучения S_m (8,8%) вызывает необходимость поддерживать неизменным уровень расчетного начального положения заготовки в каустике (ΔF). Нестабильность остальных факторов процесса резки или чувствительность процесса к ним несущественно влияют на точность ширины реза, в том числе давление технологического газа (p).

Для стабилизации характеристик лазерного луча твердотельного лазера (E и θ) рекомендуется использовать холодильник в системе охлаждения излучателя для исключения вариации температуры кристаллического активного элемента, от уровня которой зависят коэффициент его усиления, а также степень искажения торцов, то есть переменное «линзование» резонатора, приводящее к вариациям θ . Более 20% случайной составляющей суммарной погрешности $6\sigma\Delta b$ (ΔF) и систематическую ее часть $m\Delta b$ можно устранить, используя высокоточную методику двойного изображения [43] и реализующее его устройство [44] для начального относительного позиционирования преобразующей линзы и поверхности заготовки.

Для поддержания настроенного уровня ΔF при контурном разрезании нежестких или деформированных листов как при импульсном, так и непрерывном режиме подачи энергии можно рекомендовать схему оптической

системы ЛТУ [45], которая отличается от привычного для газолазерной резки резака тем, что он (рис. 14) снабжен приводом 6–7 перемещения в направлении, перпендикулярном к поверхности заготовки 12, а к его полости через штуцер 8 для подачи технологического газа подключен датчик давления 9, причем на входе в газовую магистраль установлена сменная диафрагма 10 диаметром d_{ex} для управления расходом газа. Измеренное давление p_u направляется в блок 11 для сравнения с заданным его значением p_z , и по его результату последний управляет работой приводов 6–7 для достижения их равенства: увеличивает зазор δ между торцом сопла 4 и поверхностью заготовки 12 – для уменьшения p_u , и наоборот. Учитывая, что расстояние l между торцом сопла 4 и главной плоскостью линзы 2 фиксировано, а зазор δ поддерживается на постоянном уровне, расчетное положение линзы относительно поверхности $H = F \pm \Delta F$ остается неизменным.

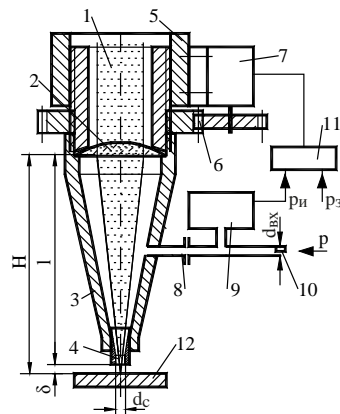


Рис. 14. Схема устройства для автоматического поддержания на неизменном уровне относительного положения оптического элемента (линзы) и заготовки (1 – луч лазера; 2 – корпус; 3 – резак; 4 – сопло; 5 – линза; 6, 7 – приводы перемещения оптической системы; 8 – штуцер; 9 – датчик давления; 10 – входная диафрагма; 11 – блок сравнения; 12 – заготовка).

Влияние нестабильностей большинства факторов, влияющих на точность ширины реза при непрерывной подаче лучистой энергии (рис. 15), может быть ослаблено или устранено при выполнении операции при адаптивной форме ее организации [46]. Управляющий сигнал оценивает качество процесса резания по времени прорезания заготовки насквозь. Было установлено экспериментально, что при оптимальной скорости подачи V полное прорезание листа происходит за время прохождения лазерным лучом расстояния, равного его размеру на поверхности заготовки d_0 . В этом случае нижняя кромка реза будет находиться на расстоянии $a = r_0 = d_0/2$ от оси луча в направлении, противоположном резанию. Если под заготовкой 11

установить два датчика давления 7 и 8: 8 – на уровне кромки реза 13, а 7 – на расстоянии $b = d_c$ вдоль реза, то струя технологического газа, выходящая из реза, пройдет между ними и при расстоянии между датчиками $b = d_c$ не окажет давления ни на один из них. Для скорости подачи V , меньшей оптимального значения, полное прорезание листа произойдет на расстоянии меньшем, чем радиус луча r_0 . В этом случае струя технологического газа из реза отклонится от оптимального своего положения и попадет на датчик давления 8, который срабатывает. При превышении скорости подачи оптимального значения полное прорезание листа не произойдет за время прохождения лазерным лучом расстояния, равного его диаметру d_0 . При этом прорезание нижних слоев материала листа происходит без подогрева лучом, а лишь за счет кинетической энергии струи газа и продуктов эрозии материала при их эвакуации из полости реза. Это снижает качество его стенок, а нижняя кромка сместится на расстояние a , большее, чем радиус r_0 луча, от его оси. В этом случае струя рабочего газа вызывает срабатывание датчика давления 7 и его сигнал поступает на вход интерфейса 10, который в зависимости от того, который из датчиков (7 или 8) сработал, выдает соответствующий управляющий сигнал на привод 9 рабочего стола 12 с заготовкой 11 на нем. Срабатывание датчика 7 ведет к уменьшению скорости подачи стола V , а 8 – к ее увеличению. При оптимальном значении скорости подачи датчики не поддаются воздействию струи газа, истекающей из сопла 6. В результате постоянного контроля за ходом операции разрезания листа и управления скоростью подачи исключается влияние случайных колебаний толщины заготовки и свойств ее материала (теплофизических и оптических), а также параметров лазерного луча (мощности и угла расходимости) на качество разрезания. Подобный результат может быть достигнут при неизменной скорости V при управлении по тем же признакам уровнем мощности луча через канал 10 – 2 (блок питания лазера).

Дальнейшего повышения качества, производительности и эффективности операции разрезания листов из горючих материалов (дерево, пластик, ткани и пр.) можно достичь за счет привлечения энергии управляемого горения материала при своевременном прекращении экзотермической реакции. Это достигается составом и последовательностью подачи технологических газов: повышение эффективности нагрева обрабатываемого материала происходит при использовании активного (кислородсодер-

жащего) газа, а высокое качество реза (низкую шероховатость его поверхности и минимальную ширину) придает гашение автогенных явлений порциями инертного (неактивного) газа. Экспериментально установлено, что чередование газов связано с режимами резки и свойствами материала, и частота смены газов выбирается из соотношения $f = V^2/a$ (V – скорость резания (подачи), a – температуропроводность разрезаемого материала) [47].

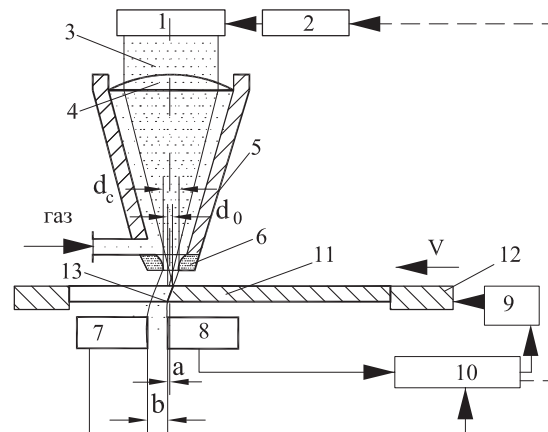


Рис. 15. Схема ЛТУ для газолазерного разрезания листов при адаптивной форме организации операции (1, 2 – лазер с блоком питания; 3 – лазерный луч; 4 – линза; 5 – резак; 6 – сопло; 7, 8 – датчики давления; 9 – привод подачи стола; 10, 12 – интерфейс; 11 – заготовка; 13 – кромка реза).

3.3. Операции размерной (прецизионной) обработки

Проектирование режимов операций прецизионной лазерной обработки отверстий, лунок, пазов, резов можно считать самой сложной процедурой технологического обеспечения в связи с тем, что такая задача является многокритериальной. Технологический регламент должен учитывать не только требования к размерам обрабатываемых элементов, но и нормированные показатели их точности, продольной и поперечной формы, шероховатости обработанных стенок, а также состояния материала в приповерхностном слое. Необходимо также принимать во внимание технико-экономические показатели и производительность операции. За исключением последних, моделирование остальных показателей может выполняться только экспериментальными методами, что предполагает наличие определенных знаний и умений. Свидетельством вышесказанного является содержание монографии [35], в которой, наряду с обилием примеров прекрасно выполненных операций макро-, микро- и нанопрецизионной обработки, при попытках пояснить физическое содержание соответствующих процессов отсутствует понятие режима выполнения операций, не говоря о примерах их

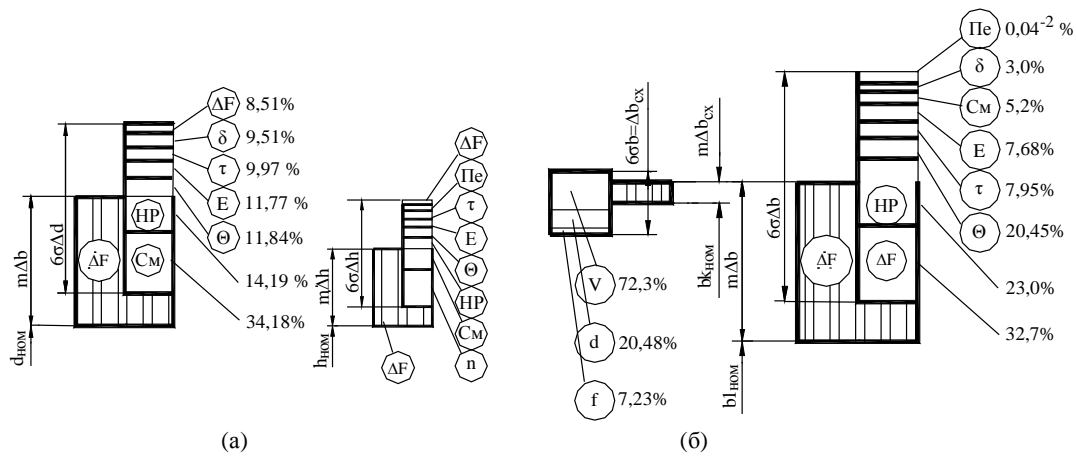


Рис. 16. Структура суммарной погрешности размеров лунки (а) и ширины реза контурной вырезки отверстия (б).

выбора. Можно предположить, что это либо проявление подхода *ноу-хау*, либо создание операций с подобными результатами является итогом специальных научных исследований.

Для упрощенной (инженерной) методики проектирования предлагается использовать некоторые технологические ухищрения и устройства, которые позволяют достичь требуемых результатов операции, спроектированной с учетом требований к размерным ее показателям (см. раздел 2.3). Основанием для поиска направлений совершенствования операций могут служить результаты анализа структуры суммарной погрешности элементарных лунок (рис. 16а) или отверстий (рис. 16б), составляющих основу операций при непосредственном формообразовании элемента изделия или в результате их суперпозиций на его поверхности или в теле. Значимость влияния нестабильностей практически всех факторов (характеристик луча E , τ , θ и n), технологических приемов (наладка режима обработки HP , позиционирование заготовки в каустике луча ΔF , ее смещение при установке $См$ и перекося Pe) от 4,36 до 48,31% затрудняет избирательное и дозированное воздействия на процесс, поэтому решение нужно искать в изменении тактики достижения качественного результата. Взамен принятого принципа работы на «настроенной» ЛТУ с соответствующим начальным расположением поля рассеяния размера обрабатываемого элемента в его поле допуска, которое учитывает естественный дрейф размера во времени и предусматривает переналадку ЛТУ при его достижении размером границы допустимого значения, предлагается схема «подгонки» размера в поле допуска путем пошагового его увеличения (от импульса к импульсу) с управляемой дискретностью приращения. Если работа на настроенных станках возможна лишь при условии существенной малости поля рассеяния

величины поля допуска, то есть $6\sigma_d \ll It(d)$, то метод «подгонки» при использовании эффективных средств увеличения обрабатываемого размера d_i дает возможность управлять конечным его значением.

3.2.1. Повышение эффективности использования теплового источника в зоне облучения

Прежде чем перейти непосредственно к средствам реализации предлагаемой методики «подгонки» размера, можно использовать более простые организационные средства, способствующие повышению качества обработки путем концентрации энергии теплового источника в заготовке, созданного при лазерном облучении. Обычно это достигается при оптимизации режима облучения, хотя в создании источника участвуют обе стороны процесса: лазерный луч – поставщик энергии и тело заготовки – ее потребитель. Очевидным представляется решение о перемещении операции лазерной обработки за операцию термической обработки (закалки), в результате которой измельчается структура материала и уменьшается его теплопроводность [48] и более эффективно используется накопленное тепло. В случае отсутствия операции термообработки в процессе изготовления изделия ее можно применить в локальном виде – путем лазерного облучения металла в зоне будущего расположения обрабатываемого размерного элемента на соответствующих режимах. Если для формирования глубоких полостей используется многоимпульсный режим обработки, то необходимо чередовать обрабатывающие импульсы с облучением в упрочняющем режиме. Такую последовательность переходов рекомендуется выполнять на одной ЛТУ без переустановки заготовки, используя один и тот же режим накачки активной среды и поочередно импульсы излучения в режиме свободной генерации – для закалки, и с модуляцией доброт-

ности резонатора – для размерного формирования обрабатываемого элемента [49]. Подобного результата можно достичь при обработке заготовки из материала, не изменяющего структуру после термического воздействия (например, из чистых металлов), применяя механическое ее измельчение в зоне расположения отверстия (лунки) за счет поверхностно-пластического воздействия на ее поверхность перед лазерным облучением. Для возврата структуры материала, окружающего обработанный элемент, к исходной используется объемная термообработка в режиме отжига (нормализации) материала заготовки.

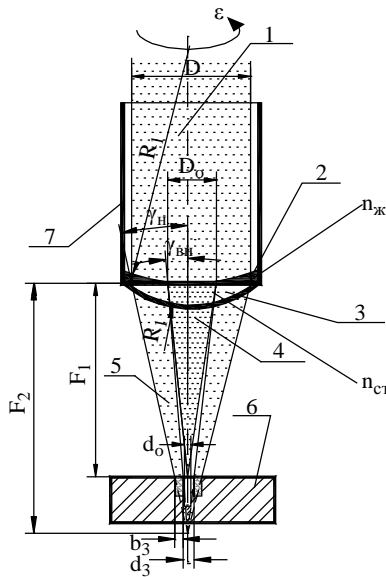


Рис. 17. Оптическая система для обработки отверстия с тепловой завесой вокруг него (1 – лазерный луч; 2 – линза из жидкости; 3 – рабочая линза; 4 – каустика центральной части луча от линзы 3 (F_1); 5 – каустика периферийного луча от системы линз 2 и 3 (F_2); 6 – заготовка; 7 – корпус устройства).

Для ограничения растекания тепла из теплового источника, созданного при лазерном облучении материала заготовки в пределах апертуры обрабатываемого элемента, можно использовать тепловую завесу вокруг последнего, чтобы уменьшить градиент температуры с окружающим материалом. Такой дополнительный тепловой источник должен создаваться одновременно с основным, для чего используется периферийная часть энергии луча, отводимая в сторону от центра дополнительным оптическим элементом в виде отрицательной линзы с центральным отверстием, расположенной над основной, преобразующей луч в инструмент. Учитывая, что параметры такой линзы зависят от параметров луча, характеристик обрабатываемого элемента (отверстия или лунки) и свойств материала заготовки, можно предположить, что разнообразие технологических задач вызовет необходимость изготовления для каждой

из них специальной линзы. Предлагаемое устройство (рис. 17), состоящее из двух линз, обладает гибкостью за счет возможности оперативного изменения параметров отрицательной компоненты в отношении фокусного расстояния, показателя преломления и диаметра отверстия в нем D_0 [50], что позволяет приспособить устройство для работы с линзами различных фокусных расстояний, которые определяются при решении основной задачи – выбора режима обработки отверстия. Подробности проектирования объекта приведены в [45].

3.2.2. Оптимальная организация технологической операции

К принципиальным недостаткам лазерной прошивки отверстий относится свойственная им конусообразность, возникающая вследствие двух причин. Первая – более продолжительное время воздействия энергии луча и его теплового следствия на участок отверстия, с которого начинается формирование продольного канала последнего. Вторая причина касается общепринятой схемы формообразования отверстий, глубина которых превышает $2d$, с неизменным положением заготовки в каустике луча во время обработки и заключается в уменьшении уровня интенсивности излучения на дне отверстия по мере его углубления.

Устранение или ослабление влияния первой причины достигается оптимизацией уровня импульсной энергии, необходимой для формирования отверстия [36], путем уменьшения длительности импульса. Эту же цель преследуют предложения п. 3.2.1.

Для поддержания неизменного уровня интенсивности на дне обрабатываемого отверстия, смещающегося при его углублении с расчетного сечения каустики луча, используют несколько приемов:

- компенсация уменьшения интенсивности из-за увеличения диаметра каустики на дне отверстия повышением уровня импульсной энергии;
- периодическое изменение относительного положения оптического элемента и заготовки на величину приращения глубины отверстия в течение операции прошивки отверстия;
- увеличение фокусного расстояния оптического элемента путем его замены на длиннофокусный или использования конструкции с изменяемыми свойствами (трансфокаторы).

Применение предложенных методов влечет за собой решение следующих задач:

- любое из вышеперечисленных действий выполняется при смещении дна отверстия за

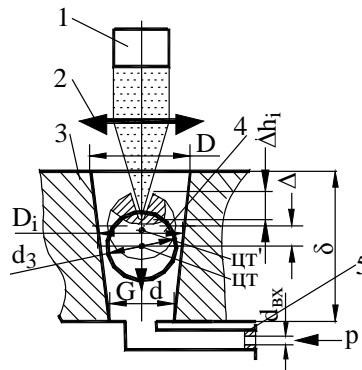


Рис. 18. Схема обработки глубоких отверстий в заготовке простой формы (шар, цилиндр, диск). (1 – лазер; 2 – линза; 3 – стол; 4 – заготовка (шар); 5 – входная диафрагма).

пределы глубины резкости оптического элемента;

– при заглаблении каустики луча в полость отверстия необходимо исключить ее «обрезание» апертурой входного участка обрабатываемого отверстия, например, «заостряя» ее диафрагмированием луча на уровне главной плоскости оптического элемента;

– предыдущая процедура требует увеличения импульсной энергии для компенсации потерь при «обрезании» луча диафрагмой;

– при периодической замене оптических элементов на длиннофокусные необходимо обеспечивать их соосность с обработанной частью отверстия;

– оптические элементы трансфокаторов не должны находиться вдоль оси луча в местах локальных концентраций его энергии и не могут быть склеенными: некоторые схемы и конструкции трансфокаторов приведены в [45].

В некоторых случаях (рис. 18) при обработке отверстия в заготовке простой формы небольших размеров можно уменьшить конусообразность отверстия, периодически в перерывах между импульсами смещая ее навстречу лучу на величину приращения глубины отверстия одним импульсом $\Delta = \Delta h_i$ [51]. Операцию прошивки отверстия можно автоматизировать, если заготовку 4 в виде шара расположить в канале отверстия в столе 3, соосного с осью луча лазера 1 и имеющего конусность $k = D - d$, причем его размеры связаны с диаметром заготовки d_3 : $D > d_3 > d$. При подаче воздуха в отверстие меньшего размера d стола 3 под давлением p через входную диафрагму размером $d_{вх}$ заготовка 4 займет положение, которое зависит от ее размера d_3 , веса G и конусности k . Перед началом обработки линзу 2 располагают вдоль оси луча таким образом, чтобы выбранное сечение его каустики находилось на поверхности заготовки 4. Если для обработки используются шары с рассеянием их размеров, то в соответствии с балансом сил (от веса изделия и давления воздуха на его площадь) их расположение будет

отличаться положением центра тяжести (ЦТ), а не поверхности, с которой начинается обработка, то есть обеспечивается постоянство начальных условий облучения $F \pm \Delta F$. При подаче импульса излучения в заготовке 4 образуется лунка размерами $d_i \times \Delta h_i$, что уменьшит ее вес до величины: $G'_3 = \pi \times \gamma (d_3^3/3 - d_i^2 \times \Delta h_i/2) / 2$ (γ – удельный вес материала заготовки). Баланс сил, удерживающих заготовку в отверстии $p_1 \times \pi \times d_3^2 / 4 = G_3 = \pi \times d_3^2 \times \gamma / 6$ (где p_1 – давление под заготовкой), определяется расходом воздуха через кольцевой зазор площадью $(D_i^2 - d_3^2) \times \pi / 4$ (D_i – диаметр сечения конусного отверстия на уровне расположения заготовки), и она сместится вверх навстречу лучу на величину $\Delta = \Delta h_i$, пока зазор вокруг нее не достигнет значения, при котором давление уравнивает новый вес шара. Величина перемещения заготовки Δ зависит от пневматической характеристики системы наддува воздуха (давления p , диаметра входного сопла $d_{вх}$) и конусности отверстия k . Дальнейшие импульсы вызывают подъемы заготовки до формообразования сквозного канала отверстия, после чего ЛТУ выключается. Смещение ЦТ отверстия вдоль оси заготовки (ЦТ) гарантирует стабильность его углового положения в отверстии стола. Таким образом, при условии выбора оптимальной продольной формы последнего обеспечивается неизменность взаимного положения каустики луча и дна обрабатываемого отверстия, то есть уровня интенсивности на нем в течение процесса обработки, что является гарантией формирования цилиндрического отверстия.

3.2.3. Автоматизация и адаптивная форма организации операции

Формирование отверстия в режиме подгонки его размера в пределы поля допуска возможно лишь при наличии оперативной информации о текущем его уровне. Вторым условием успешной реализации такой технологической операции

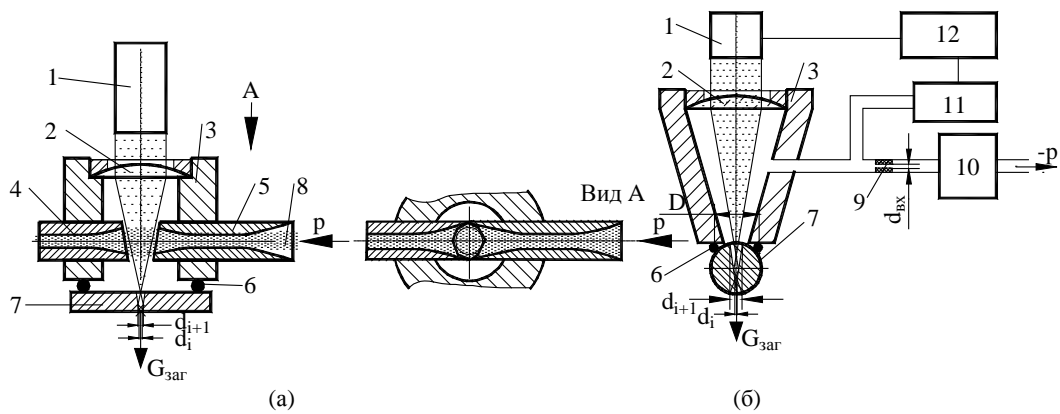


Рис. 19. Схемы ЛТУ с устройствами для контроля текущего размера отверстия по расходу воздуха через его сечение. (1 – лазер; 2 – линза; 3 – корпус (камера); 4 – сопло приемное; 5 – сопло напорное; 6 – уплотнение; 7 – заготовка; 8 – воздух; 9 – дроссель; 10 – вакуум-насос; 11 – датчик давления; 12 – блок питания лазера).

является предусмотренная возможность управления шагом приращения размера обрабатываемого отверстия в заготовке. При проектировании и реализации операции необходимо учитывать размеры, форму и материал заготовки, количество отверстий в ней, а выбранная ЛТУ должна соответствовать методам управления процессом обработки или допускать модернизацию соответствующего содержания. Принцип управления текущим размером обрабатываемого отверстия основан на известных его зависимостях от режима облучения. Так, для обработки отверстия в сплошном материале необходимо такое сочетание параметров лазерного луча и условий облучения, при котором в пределах границ обрабатываемого элемента достигается интенсивность, достаточная для выбранного механизма его формирования. Для увеличения текущего размера отверстия d (в ограниченных пределах) можно использовать дополнительные импульсы излучения с прежними или измененными параметрами (чаще энергетическими) при неизменных условиях облучения (для заготовок толщиной $\delta \geq 2d$) или с увеличенным поперечным размером луча в зоне облучения $d_{i+1} > d_i$.

Для формообразования отверстия в заготовке простой формы ее толщина должна быть достаточно большей диаметра отверстия, чтобы использовать устройства, изображенные на рис. 19 [52, 53].

Оба устройства используют один принцип контроля текущего размера канала обрабатываемого отверстия – по скорости натекания воздуха из атмосферы в корпус (камеру) 3, который герметизируется линзой 2 со стороны лазера 1 и заготовкой 7 с уплотнениями 6 с противоположной его стороны. Отличия заключаются в том, что в устройстве на рис. 19а поперек корпуса 3 продувают воздух 8 под давлением p из напорного сопла 5 в приемное сопло 4, ширина которых превышает диаметр каустики луча линзы 2. В зависимости от параметров

продува воздуха 8 (давления p и его расхода) в корпусе создается разрежение, вследствие чего заготовка 7, прижатая к уплотнению 6, остается в этом положении до достижения сквозного канала обрабатываемого отверстия нижнего допустимого значения, после чего она отпадает. Во втором устройстве (рис. 19б) вакуум в корпусе 3 создается прямой откачкой воздуха из нее через дроссель 9 вакуум-насосом 10. Первая схема отличается тем, что обработка отверстия продолжается в одном и том же режиме до тех пор, пока его размер не достигает поля допуска и заготовка отпадает, при этом струя воздуха в корпусе 3 служит механической преградой для продуктов эрозии. Во второй схеме предусмотрена обработка в два режимных этапа (рабочий и калибровочный) с переходом от одного к другому по сигналу датчика давления 11, при этом блоком питания 12 меняется режим облучения, в том числе для уменьшения шага приращения размера при его приближении к полю допуска.

Для заготовок подобной формы и размеров с одним отверстием, но в тонкой стенке ($\delta < 2d$) подгонка его размера до заданного полем допуска значения увеличением энергии дорабатывающих импульсов или их количества не дает положительных результатов. В ЛТУ [54] применяется принцип управляемого увеличения размера инструмента, причем в режиме плавного уменьшения шага приращения по мере приближения к заданному размеру отверстия. Тот же принцип применен для обработки системы одинаковых по размеру отверстий в листовых заготовках (сито, водоохлаждаемые стенки) на установке, изображенной на рис. 20а.

Линза 2 в оправке 3 в виде поршня пневматического цилиндра с двумя уплотнениями 10 установлена с возможностью перемещения вдоль оси луча лазера 1 в корпусе 4, причем ее положение определяется усилием действия пружины 5 и давлением под ней воздуха, который

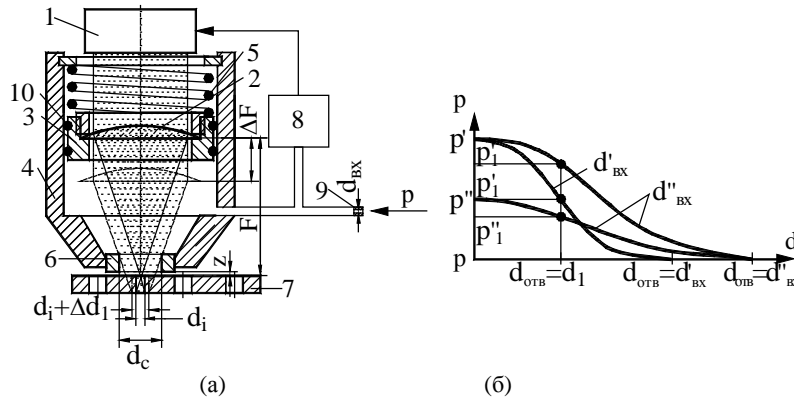


Рис. 20. Схема ЛТУ с устройством для адаптивной организации операции для обработки отверстий (а), пневматическая характеристика системы (б). (1 – лазер; 2 – линза; 3 – оправка-поршень; 4 – корпус-пневмоцилиндр; 5 – пружина; 6 – сопло; 7 – заготовка; 8 – датчик давления; 9 – входная диафрагма; 10 – уплотнение).

подается через входную диафрагму 9 размером $d_{вх}$. В начале операции, когда заготовка 7 расположена напротив оси луча на расстоянии Z от торца сопла 6, а сжатый воздух из корпуса 4 выходит через отверстие диаметром d_c , его расход определяется боковым зазором площадью $S = \pi \times d_c \times Z$. После формирования сквозного канала отверстия диаметром d_i давление в корпусе 4 уменьшается в результате дополнительного истечения воздуха через канал отверстия площадью $\Delta S = \pi \times d_i^2 / 4$, что нарушает равновесие сил, и пружина 5 смещает линзу 2 на величину ΔF , то есть изменяет условия облучения и размер каустики в отверстии. Выбирая соответствующие значения давления воздуха p и размера входной диафрагмы $d_{вх}$, можно использовать подходящий участок пневматической системы (рис. 20б), в пределах которого изменяется таким образом передаточное число между ΔF и d_i , чтобы обеспечить плавное увеличение размера отверстия до границы его поля допуска [55].

ВЫВОДЫ

1. Анализ немногочисленных публикаций по технологии обработки материалов лазерным лучом за последние 50 лет показал, что в первых попытках использования лазерного луча в качестве инструмента уделялось внимание прогнозированию результатов операций [14–18], а для проектирования режимов обработки использовались численные методы решения тепловых задач [20, 23, 25] и методы экспериментального проектирования операций [19, 21, 22, 24 и 25]. Первые ограничены в своих возможностях, вторые – трудоемки и продолжительны, однако до настоящего времени эти малочисленные методы технологического обеспечения операций являются единственными доступными для специалистов и могут считаться действующими из-за отсутствия иных.

2. Учитывая, что многокритериальность задач проектирования требует использования оптимизационных методов их решения, основанных на моделировании процесса обработки относительно нормированных показателей операции, эта процедура может применяться лишь при учете ограниченного перечня показателей (чаще размерных), в отношении которых возможно моделирование при приближенном аналитическом или численном решении уравнения теплопроводности в теле заготовки в результате ее облучения лазерным лучом. Однако наиболее критические по значению качественные показатели операции, характеризующие точность (воспроизводимость) размерных результатов, подобия продольной и поперечной формы обрабатываемого элемента заданной заготовки, а также шероховатость его поверхностей, могут быть промоделированы исключительно экспериментально по соответствующим методикам. Это превращает решение прикладной задачи определения режима обработки в научную разработку, поэтому применение таких методик рекомендуется в особых случаях.

3. Так как все операции лазерной обработки можно свести к трем наиболее применяемым видам воздействия лазерного луча на заготовку, таким как нагревание ее поверхности при лазерном облучении (операции лазерной поверхностной термообработки без фазовых переходов и заметного массопереноса); обработка с расплавлением материала заготовки (операции сварки, газолазерного разрезания листов, наплавки, легирования и аморфизации поверхности), а также с формированием размерных элементов за счет самоудаления материала при его нагреве выше температуры испарения (операции прецизионной обработки отверстий, лунок, пазов и резов, гравирования, создания регулярного микрорельефа поверхности и изготовления печатных форм), для них разработан

унифицированный алгоритм режимного обеспечения технологических операций, разбитый на два этапа.

4. Первый этап предназначен для определения оптимальных режимов облучения с целью достижения размерных (номинальных) характеристик обрабатываемого элемента заготовки и выполняется с использованием моделей процесса относительно его размерных показателей, а также показателей производительности и себестоимости операции, получаемых в результате использования упрощенных аналитических или (и) численных решений обратных задач теплопроводности, то есть восстановлением режима облучения по заданному температурному полю в теле заготовки с учетом относительного перемещения луча и заготовки.

5. Второй этап, являясь составной частью предлагаемой методики проектирования, заключается в разработке методов и средств дополнительного совершенствования технологической операции, которые, используя режимы из первого этапа проектирования, предлагают иные, часто нерезимные пути достижения достаточных уровней тех показателей, которые не участвовали в первом этапе проектирования. К ним относятся методы оптимизации процесса выполнения операции, заключающиеся в сокращении или устранении исходных нестабильностей параметров участников процесса обработки и стабилизации на этой основе качественных результатов обработки.

6. Для целенаправленного и эффективного дополнительного воздействия на процесс обработки выбор объекта рекомендуется выполнять по результатам анализа структуры соответствующих погрешностей, характерных для вида проектируемой операции.

7. Полезным оказалось применение автоматизированных средств получения конечных результатов, особенно при адаптивной форме организации операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайченко Ю.П. *Дослідження операцій*. Київ: Слово, 2006. 816 с.
2. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов*. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.
3. Котляров В.П. *Технологія лазерної обробки*. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2010. С. 26–28.
4. Kotlyarov V.P., Konovalenko Yu.V., Dubnyuk V.L., Kozyrev A.S. *Surf Eng Appl Electrochem*. 1996, (1), 1–6.
5. Kotlyarov V.P., Konovalenko Yu.V., Dubnyuk V.L., Kozyrev A.S. *Surf Eng Appl Electrochem*. 1996, (2), 1–6.
6. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюра Н.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. М.: МГТУ им. Баумана, 2008. С. 233–323, 523–548.
7. Вейко В.П. *Лазерная микрообработка*. СПб.: ГУ ИТМО, 2007. 111 с.
8. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов*. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
9. Коваленко В.С., Головкин Л.Ф., Черненко В.С. *Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера*. Киев: Техніка, 1990. 192 с.
10. Андрияхин В.М., Майоров В.С., Якунин В.П. *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1983, (6), 140–147.
11. Веденов А.А., Гладуш Г.Т. *Физические процессы при лазерной обработке материалов*. Ленинград: Машиностроение, 1986. 216 с.
12. Коваленко В.С., Романенко В.В., Олещук Л.М. *Малоотходные процессы резки*. Киев: Техніка, 1987. 112 с.
13. Самойлович Г.С. *Гидрогазодинамика*. М.: Машиностроение, 1990. 180 с.
14. Уляков П.И. *ЖЭТФ*. 1967, **52**(3), 821–831.
15. Коваленко В.С. *Технология и организация производства*. 1968, (3), 86–89.
16. Вакс Е.Д. *Технология обработки деталей машин световым лучом*. М.: Машиностроение, 1974. 32 с.
17. Тархов Г.Н. *Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов*. Тула: ТПИ, 1967. С. 31–43.
18. Satoshi N., Yasunao S., Kiichi T. *Bull Jpn Soc Precis Eng*. 1971, **5**(2), 39–42.
19. Вейко В.П., Либенсон М.Н. *Лазерная обработка*. Ленинград: Лениздат, 1973. 192 с.
20. Лобов Б.Я., Соболев Э.Н. *Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы*. М.: Наука. 1985. С. 114–121.
21. Суминов В.М., Промыслов Е.В., Скворчевский А.К., Кузин Б.Р. *Обработка деталей лучом лазера*. М.: Машиностроение, 1969. 196 с.
22. Котляров В.П., Коваленко В.С., Дятел В.П. *Справочник по технологии лазерной обработки*. Киев: Техніка, 1985. 168 с.
23. Kotlyarov V.P., Leleka S.V., Nidal Z. *Surf Eng Appl Electrochem*. 1999, (2), 1–6.
24. Котляров В.П., Коваленко В.С., Снегс В.Л. *Труды ЦНИДИ*. 1979, (75), 144–155.
25. Котляров В.П., Сергієнко М.І., Нідаль Зухаїр, Богданова О.В. *Вісник КПІ. Серія «Гірництво»*. 2000, (2), 81–86.
26. Котляров В.П., Ворончак Т.П., Дубнюк В.Л. *Вісник НТУУ КПІ. Серія «Машинобудування»*. 2015, (3), 104–114.
27. Бродский В.С. *Введение в факторное планирование эксперимента*. М.: Наука, 1976. 224 с.

28. Семенцов А.М. Упрочняющие технологии и покрытия. 2006, (9), 75–82.
29. Постригань Ю.В., Дубнюк В.Л. Оборудование и инструмент для профессионалов. 2008, (2), 30–33.
30. Котляров В.П., Дубнюк В.Л., Худякова О.П. *Технологія і техніка друкарства (ВП)*. 2014, (4), 52–70.
31. Kotlyarov V.P., Nidal Z., Hamid-Alah. *Surf Eng Appl Electrochem*. 1998, (2), 11–16.
32. Самарский А.А., Николаев Е.С. *Методы решения сеточных уравнений*. М.: Наука, 1978. 306 с.
33. Краснов Н.Ф. *Основы прикладной аэрогазодинамики*. М.: «Высшая школа», 1990, Т. 1, 323 с.
34. Котляров В.П., Лавріненков Е.О. *Спосіб визначення режиму лазерного різання заготовок різної товщини*. UA пат. 58166, 2011. Бюл. № 7.
35. Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г. *Практика прецизионной лазерной обработки*. М.: Техносфера, 2013. С. 415.
36. Steffen J. *Teinverktechn. un messtechn.* 1979, **87**(7), 309–320.
37. Куликовская Н.И. Оптико-механическая промышленность. 1975, (12), 19–21.
38. Котляров В.П., Гайдук І.В., Дубнюк В.Л. *Спосіб обробки матеріалів лазерним випромінюванням*. UA пат. 103184, 2015, Бюл. № 23. 3 с.
39. Котляров В.П., Дубнюк В.Л. *Лазерна установка для опромінення поверхні заготовки*. UA пат. 106618, 2015. Бюл. № 8. 3 с.
40. Котляров В.П., Лашта А.В. *Пристрій для лазерної обробки отворів без вхідного конусу і ґрата*. UA пат. 76424, 2013. Бюл. № 1. 3 с.
41. Котляров В.П., Шепелев О.О. *Установка для лазерної обробки*. UA пат. 98649, 2006. Бюл. № 9. 3 с.
42. Котляров В.П., Дубнюк В.Л., Ткачук М.В. *Пристрій для перетворення пучка лазерного випромінювання*. UA пат. 86594, 2014. Бюл. № 1. 3 с.
43. Котляров В.П., Процак О.М. *Спосіб візуального фокусування оптичних систем на об'єкт*. UA пат. 75096, 2012, Бюл. № 22. 3 с.
44. Котляров В.П., Аливерди А. *Пристрій для лазерної обробки*. UA пат. 41613, 2009. Бюл. № 10. 3 с.
45. Котляров В.П. *Технологічне оснащення лазерних комплексів*. Київ: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2013. С. 316.
46. Котляров В.П., Савіна Л.П., Дубнюк В.Л. *Установка для газолазерного різання листових заготовок*. UA пат. 103137, 2014. Бюл. № 23. 3 с.
47. Котляров В.П., Дубнюк В.Л., Данилейко О.О. *Спосіб газолазерної обробки заготовок із горючих матеріалів*. UA пат. 100324, 2015. Бюл. № 14. 3 с.
48. Котляров В.П., Хамеді Фархунд. *Спосіб лазерної обробки отворів в металевих заготовках*. UA пат. 42516, 2009. Бюл. № 13. 3 с.
49. Котляров В.П., Аливерді М.А., Вахдатінія І. *Пристрій для лазерної обробки отворів в металевих заготовках*. UA пат. 42519. 2009. Бюл. № 13. 3 с.
50. Котляров В.П., Короткий Д.В. *Об'єктив для лазерної обробки*. UA пат. 74855, 2012. Бюл. № 21. 3 с.
51. Котляров В.П., Петренко М.Д. *Установка для лазерної обробки отворів*. UA пат. 113544, 2017. Бюл. № 3. 3 с.
52. Котляров В.П., Гладченко О.В. *Пристрій для лазерної обробки*. UA пат. 99407, 2015. Бюл. № 11. 3 с.
53. Котляров В.П., Спаська О.О. *Спосіб лазерної обробки отворів*. UA пат. 103189, 2015. Бюл. № 23. 3 с.
54. Котляров В.П., Анякин Н.И. *ЭОМ*. 1984, (3), 78–81.
55. Котляров В.П., Тарасюк А.С. *Установка для обробки отворів лазерним променем в листових заготовках*. UA пат. 121892, 2014. Бюл. № 24. 3 с.

Summary

While designing a technological operation with a lot of criteria estimation of its results, one of the stages of the procedure – choosing a technological schedule for its implementation, is complicated by the necessity of using one of the indirect optimization techniques, which is performed by experimental modeling of processing with combining the response functions by one or another way. This method of searching for the processing mode is not only complex and long-lasting but most often is ineffective when using a value of a higher level of complexity as an index (indexes), for example, the accuracy index of the dimensional results of an operation. A modified optimization algorithm is proposed that simplifies the content of the factorial space by eliminating the critical values in searching for the optimum processing mode. The influence of those values is compensated by changing the strategy of the technological operation, in particular, by using the method of "fitting" the critical index to the required level with a controllably decreasing increment of its value. To implement various operations with an adaptive form of their organization (precision hole machining, formation of dimensional slits, surface heating with the normalized depth of the zone), a number of technological installations and devices have been developed, the schemes of which are given in the article together with the results of their studies. Their application improves the indexes of the reproducibility of results of processing with a simplified procedure for selecting the technological procedure for operations.

Keywords: laser, laser beam, technological operation, technological support process modeling, optimization, adaptive operation organization, processing mode, selection method.