

УДК 621.375.826:621

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК БОЛЬШИХ ТОЛЩИН ДЛЯ НУЖД ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

© В. В. Романенко, к.т.н., доцент, А. С. Козырев,
НТУУ «КПИ», Киев, Украина

У даній роботі на основі теоретичного аналізу процесу газолазерної різки металевих заготовок великої товщини для потреб поліграфічних виробництв запропоновані способи вдосконалення цього процесу за рахунок сканування лазерного випромінювання по лінії різання, що забезпечує реалізацію оптимальних умов різки та високу якість обробки.

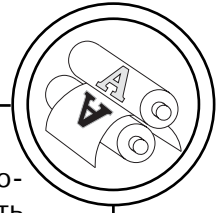
Based on the theoretical analysis of the process of laser gas-assisted cutting of metal slugs of large thickness for the necessities of polygraphist production, the given work offers methods of perfection of this process by utilization of scanning of laser radiation along the lines of cutting, which provides the achievement of optimum conditions of cutting and high quality of treatment.

Постановка проблемы

Газолазерная резка (ГЛР) металлических материалов больших толщин, широко применяемая в производстве полиграфических машин, сопровождается рядом осложнений. В первую очередь, это необходимость осуществлять процесс резки на низких скоростях, что ведет к возникновению неуправляемого, так называемого, автогенного режима резки, сопровождаемого значительной шириной получаемого реза, его высокой шероховатостью и, как следствие, низким качеством кромок разрезаемых заготовок. Поэтому газолазерную резку на низких скоростях производят при высокой плотности лазерной мощности, но это возможно при исполь-

зовании одномодового лазерного луча, а также более короткофокусной оптики. Такие оптические системы, в свою очередь, имеют ограниченную глубину фокальной зоны, что также отрицательно сказывается на параметрах резки материалов больших толщин. Вместе с тем, экспериментально определен скоростной диапазон газолазерной резки металлов непрерывным лазерным излучением (скорость резки равна $V = 1...2,5$ м/мин) [1], обеспечивающий оптимальное качество выполняемых резов. Однако, в силу значительной зависимости толщины разрезаемых материалов от скорости резки, при этом удается разрезать металлические материалы толщиной не более 5...7 мм.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



Следовательно, традиционная схема газолазерной резки позволяет либо разрезать металлы больших толщин с низким качеством реза, либо резать с необходимо высоким качеством лишь тонколистовые материалы.

Цель работы

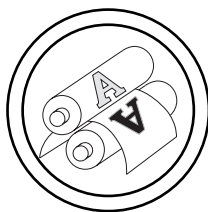
Теоретический анализ процесса ГЛР для разработки новых способов резки металлических заготовок больших толщин для потребностей полиграфической промышленности.

Результаты проведенных исследований

Для теоретического анализа процесса ГЛР необходимо сначала его формализовать. Сформулируем следующие предположения о процессе ГЛР. На фронте резания существует расплавленный слой конечной толщины, перегретый по сравнению с температурой плавления металла и его окислов. Толщина этого слоя и его перегрев определяются совместным воздействием лазерного излучения и газовой струи на зону обработки. Процессы поглощения энергии лазерного излучения, горения, испарения материала в зоне ГЛР, а также динамического удаления продуктов разрушения газовой струей происходят на поверхности жидкого слоя. Следовательно, при ГЛР существует стационарный режим, характеризующийся постоянным объемом жидкого слоя на фронте разрушения, который выполняет роль режущего инструмента. При этом фронт резки характеризуется наклоном по отношению к оси излучения.

Рассмотренные предположения позволяют определить характеристики процесса ГЛР через параметры жидкого слоя как режущего инструмента. Параметрами состояния расплавленного слоя в стационарном режиме являются максимальная температура T_0 , ширина b , толщина h_m и скорость стационарного разрушения V_0 .

Схематически постановка задачи в стационарном режиме представлена на рис. 1. Лазерный луч воздействует на поверхность пластины металла толщиной h , движущейся со скоростью V . Соосно лучу в зону обработки направляется газовая струя кислорода. В результате воздействия энергии лазерного луча и теплоты экзотермической реакции на поверхности разрушения формируется зона жидкого металла и его окислов, а также происходит дальнейшее нагревание этого слоя до температуры разрушения T_0 . При этом некоторая часть расплавленного металла горит в струе кислорода и частично испаряется. Основная же масса расплавленного материала уносится из зоны обработки благодаря динамическому действию струи газа. Вместе с тем, плавление новой порции твердого металла на границе фазовых переходов компенсирует потерю удаляемого расплавленного материала. Причем при стационарном режиме разрушения масса расплавленного слоя на поверхности разрушения становится постоянной. Перемещение жидкого слоя в направлении обработки со скоростью V_0 , которая определяется



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

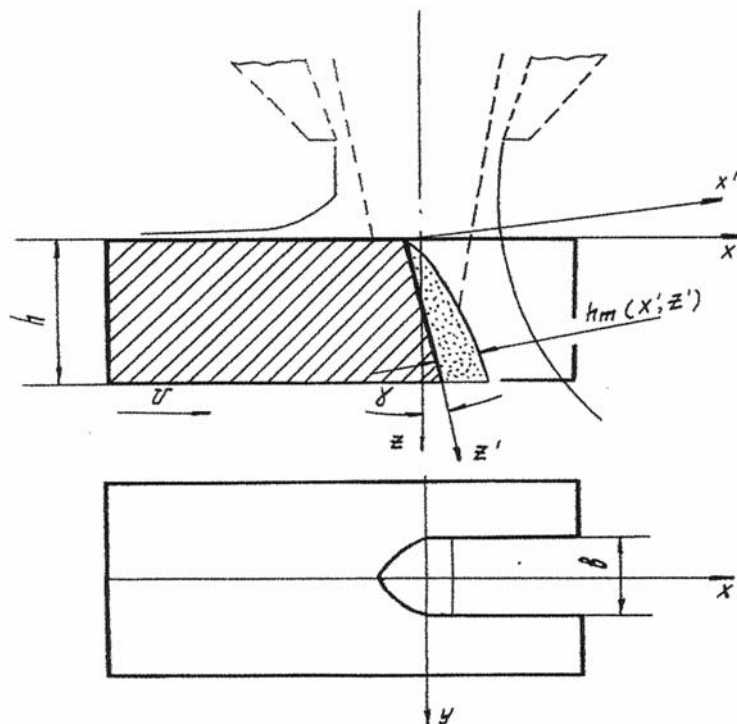


Рис. 1. Схема процесса ГЛР

температурой фронта разрушения T_0 , обеспечивает стационарное протекание процесса ГЛР. Следовательно, в ГЛР роль режущего инструмента выполняет высокотемпературный жидкий слой металла и его окислов, находящийся в постоянном динамическом равновесии.

Баланс энергии (мощности) и массы (скорости выноса) для расплавленного слоя может быть представлен системой уравнений:

$$A \cdot P + P_{\text{хим}} = Q, \quad (1)$$

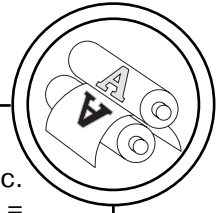
$$M_m = M_n, \quad (2)$$

где A — поглощательная способность расплава; P — мощность лазерного излучения;

$P_{\text{хим}}$ — мощность экзотермической реакции; M_m — масса расплава, образующегося на границе фазовых переходов; M_n — поток массы, удаляющейся из зоны резки.

Если считать, что мощность лазера P и толщина h — заданные параметры, то состояние жидкого слоя в стационарном режиме характеризуется четырьмя неизвестными: скоростью V , температурой T , шириной b и толщиной расплава hm . Для однозначного решения системы уравнений (1)-(2) дополним ее двумя зависимостями. Ширина реза b может быть определена как максимальное перемещение изотеры T_0 в направлении OY (см. рис. 1):

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



$$b = 2 \cdot y_{\max} = 2 \cdot \max\{y(x) :$$

$$: T(x, y(x)) = T_0\}, \quad (3)$$

где $T(x, y)$ — температурное поле на поверхности $Z = 0$.

Другим дополнительным условием является выражение для толщины жидкого слоя h_m . Это выражение имеет вид:

$$h_m = \{x : L(x) = 0\}, \quad (4)$$

где $L(x)$ — математическая зависимость, которая получается путем решения системы гидродинамических уравнений, описывающих состояние жидкого слоя в стационарном режиме.

Итак, (1)-(4) составляют математическую модель ГЛР в стационарном режиме. Система (1)-(4) с четырьмя перечисленными выше неизвестными решалась численным методом [2].

Для объяснения результатов расчета на рис. 2 представлены теоретические зависимости па-

раметров ГЛР. Кривая 1 на рис. 2 соответствует условию $P_{\Sigma} = AP + P_{\text{хим}} - P_n - P_m - P_v = 0$, кривая 2 — $M_{\Sigma} = M_m - M_n = 0$. Здесь P_n , P_m и P_v — потери мощности на нагревание металла до температуры T_0 , на его плавление и испарение, соответственно. Точка C пересечения кривых 1 и 2 определяет стационарный режим ГЛР, который, как следует из дальнейшего анализа, является оптимальным.

Действительно, осуществление процесса резки на скоростях, меньших V_0 , сопровождается выделением в зоне обработки количества тепла большего, чем требуется для разрушения и удаления массы металла при образовании полости реза. Это сопровождается дополнительными тепловыми потерями на теплопроводность, расширение полости реза и в итоге ведет к снижению качества обработ-

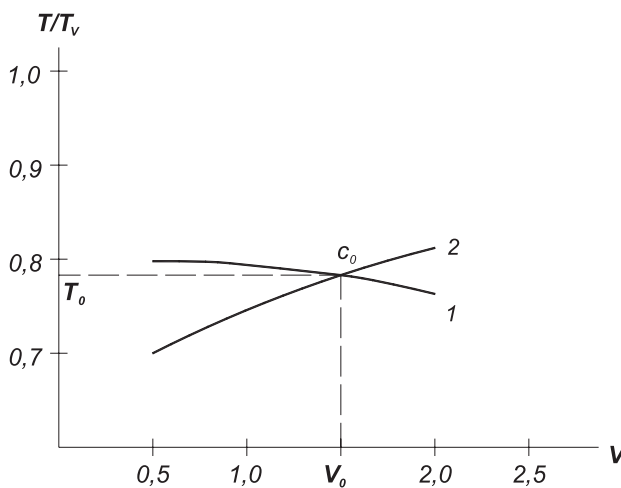
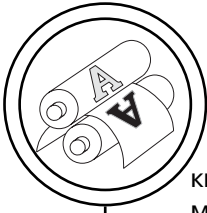


Рис. 2. Зависимости баланса энергии и массы в зоне резки от скорости обработки



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

ки. Кроме того, для скоростей, меньших V_0 , наблюдается повышение роли экзотермической реакции в общем энергетическом балансе. В результате при слишком малых скоростях резки, когда тепловой вклад экзотермической реакции становится соизмеримым с теплом, подводимым лазерным излучением, может наступить режим самопроизвольного горения, при котором энергии экзотермической реакции вполне достаточно для поддержания процесса разрушения, что и наблюдается экспериментально.

Резка на скоростях, превышающих V_0 , происходит при условии, когда выделяемого в полости реза тепла недостаточно для разрушения всей требуемой массы материала. При этом наблюдается колебание температуры границы разрушения, вызывающее нестабильность процесса разрушения. При слишком же высоких скоростях полного прорезания пластины металла заданной толщины не будет.

Кроме того, ранее установлено [1], что скорость распространения тепловой волны в металле примерно соответствует скорости резки V_0 , при которой осуществляется оптимальное удаление продуктов обработки из зоны разрушения. Следовательно, стабильные условия резки могут быть обеспечены, если скорость резки соответствует скорости распространения тепловой волны в разрезаемом материале.

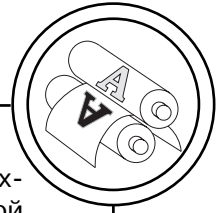
В результате проведенного анализа разработана принципиально новая схема газолазерной резки металлических мате-

риалов больших толщин, в основе которой заложен метод сканирования лазерного излучения по линии резки с расчетной амплитудой и в пределах соосно подаваемой газовой струи [3]. При создании нового способа резки мы исходили из следующих соображений.

Разрезаемая заготовка должна выполнять технологическое перемещение относительно лазерного излучения с достаточно малой скоростью, обеспечивающей полное прорезание всей толщины металла. Для металлических листов толщиной 10...15 мм такие скорости лежат в диапазоне 0,25...0,5 м/мин. Вместе с тем, как установлено выше, необходимо постоянно поддерживать в зоне резки скорость относительного движения лазерного луча и разрезаемой заготовки в оптимальном диапазоне ($V_0 = 1,5$ м/мин), что обеспечит требуемое высокое качество резки. Требуемое значение относительного движения луча и заготовки можно обеспечить за счет дополнительного сканирующего движения лазерного луча вдоль линии разрушения. При этом амплитуда сканирующего движения должна быть большей диаметра сфокусированного в зоне резки лазерного излучения и рассчитываться из условия соотношения скоростей технологического перемещения разрезаемой заготовки и сканирующего движения лазерного луча.

При возвратно-поступательном сканировании луча будет осуществляться способ пилообразного удаления материала по линии реза, когда при мед-

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



ленном технологическом движении заготовки лазерный луч периодически и с более высокой скоростью перемещается вперед-назад, одновременно углубляясь внутрь заготовки и возвращаясь на ее поверхность.

При сканирующем движении попутно технологическому движению заготовки разрушение в зоне обработки полностью соответствует условиям резки с образованием борозд на поверхности разрушения [1]. Очевидно, что будет наблюдаться больший наклон поверхности разрушения, чем при обычном способе разрезания из-за сканирования излучения вдоль фронта разрушения и, как результат, больший наклон борозд на поверхности выполненного реза. Следует также отметить, что для уменьшения наклона поверхности разрушения, что, в свою очередь, облегчает протекание процесса (в частности, удаление продуктов разрушения из зоны обработки газовой струей) не следует слишком завышать скорость относительно движения лазерного луча и заготовки и устанавливать ее в пределах 1,5...2 м/мин.

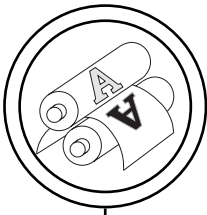
Для встречной фазы сканирующего и технологического движения характерно то, что разрушение выполняется снизу вверх. Происходит подрезание верхних слоев материала с удалением продуктов разрушения газовой струей вниз. Поверхность разрушения не может иметь бороздчатую структуру, так как формируется не в результате распространения теплового поля, а за счет течения продуктов разрушения в канале

реза. Как результат, поверхность реза будет иметь литой характер с незначительной величиной шероховатости.

Очевидно, что при реализации схемы пилообразного разрушения имеет место суммирующий эффект двух рассмотренных выше фаз обработки. При этом вблизи верхней и нижней кромки разрезаемого материала будет наблюдаться дополнительный перегрев материала заготовки в результате двойного движения сканируемого луча (вперед-назад), что может привести к возникновению неуправляемого (автогенного) режима резки на этих участках. Поэтому для данной схемы резки скорость относительного движения лазерного луча и заготовки должна быть максимально возможной — 2...2,5 м/мин. При выборе же скорости сканирования лазерного луча необходимо учитывать, что в фазе попутного движения луча и заготовки технологическое движение заготовки частично компенсирует сканирующее движение лазерного луча, тогда как в фазе встречного движения луча и заготовки наблюдается сложение двух этих скоростей. Суммирую приведенные рассуждения приходим к выводу, что скорость сканирования должна соответствовать примерно 2,0 м/мин.

Следует отметить, что предложенный способ обработки может быть успешно реализован при разрезании на прямолинейных участках, а также при резке заготовок с круговым профилем и с плавными изгибами контура.

На основании выполненного теоретического анализа воз-



ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ

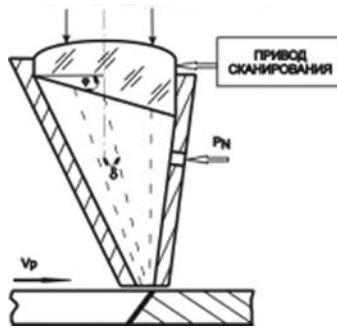


Рис. 3. Устройство пилообразного сканирования сфокусированного лазерного излучения вдоль направления резки

можных схем ГЛР листовых материалов больших толщин разработано устройство ГЛР с реализацией режима пилообразного сканирования лазерного излучения вдоль линии резки (рис. 3).

Суть работы предложенного устройства заключается в том, что происходит периодическое возвратно-поступательное колебание сфокусированного лазерного излучения вдоль направления резки V_p с синхронным углублением точки фокуса лазерного луча с поверхности внутрь заготовки и обратно.

Устройство содержит фокусирующую линзу с механизмом ее колебания вдоль оси линзы. Сама линза выполнена с клиновидным основанием, толстая часть которой должна быть строго ориентирована по направлению резки. Фактически такая линза представляет собой оптику, состоящую из набора двух оптических элементов: собственно линзы и оптического клина. При этом ось линзы наклонена по отношению к оси сопла для подачи рабочего газа P_N в зону резки на угол, равный

$$\delta = (n - 1)\varphi, \quad (5)$$

где φ — угол при вершине клиновидного основания линзы; n — коэффициент преломления лазерного излучения материалом линзы.

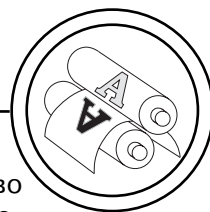
Линза с клиновидным основанием не только фокусирует излучение в зоне резки, но и отклоняет его на угол δ в сторону более толстой ее части. Следовательно, при колебательных движениях линзы («вверх-вниз») сфокусированное лазерное излучение будет перемещаться «вперед-назад» вдоль линии резки, а точка фокуса — синхронно «вверх-вниз». Это и обеспечивает сканирование излучения вдоль линии резки в «пилообразном» режиме, что, в свою очередь, обеспечивает стабильное и качественное протекание процесса при ГЛР толстолистовых металлических материалов.

Выводы

1. Анализ современного состояния технологии ГЛР металлических материалов больших толщин позволяет утверждать, что традиционные схемы резки не позволяют обеспечить необходимое качество процесса обработки и необходимо усовершенствование схем реализации ГЛР таких заготовок.

2. На основании теоретического анализа процесса ГЛР выдвинута гипотеза, что роль режущего инструмента при ГЛР выполняет слой жидкого металла на поверхности разрушения. Сформулированы условия стационарного протекания процесса разрушения для обеспечения качественной резки заготовок.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ



3. Разработана принципиально новая схема газолазерной резки металлических материалов больших толщин, в основе которой заложено сканирование лазерного излучения по линии резки. Проанализированы возможные методы резки по данной схеме и определен оптимальный способ ГЛР металлических материалов большой толщины при пилообразном движении лазерного луча вдоль линии резки.

4. Предложено устройство для реализации технологического метода пилообразного сканирования лазерного излучения при ГЛР материалов больших толщин с использованием колеблющейся клиновидной линзы, что позволяет выдерживать оптимальные условия протекания процесса по всей толщине заготовки и способствует получению резов с заданным качеством.

1. Коваленко В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. — Киев : Техника, 1987. — 112 с. 2. Коваленко В. С. Математическая модель процесса газолазерной резки металлов / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Ван Чук Нгуен // Электронная обработка материалов. — 1992. — № 3. — С. 31—36. 3. А. с. СССР № 1683254 В23к 26/00, 1991 г.

Рецензент — В. П. Котляров,
д.т.н., профессор, НТУУ «КП»

Надійшла до редакції 16.03.10