

**ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 2 (2021)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано
Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация научных исследований по широкому спектру проблем в области металлургии,
машиностроения, транспорта, строительства, химической и нефтегазовой инженерии,
производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/FUTF8491>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,344

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Богомоллов Алексей Витальевич - к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Кажыбаева Галия Тулеуевна - к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

Зарубежные члены редакционной коллегии:

Waigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Исаева КуралайСметкановна Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

***В. Б. Шулятьев, А. Г. Маликов**

Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук,
Российская Федерация, г. Новосибирск

ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА АВИАЦИОННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИСПАРЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Экспериментально исследованы характеристики реза алюминиевых сплавов излучением импульсно-периодического CO_2 -лазера с модуляцией добротности и высокой пиковой мощностью, когда происходит развитое испарение материала. Разрезались листы алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Li и Al-Si-Li толщиной 1,5 мм и 2 мм, в качестве технологического газа использовались аргон и воздух. Установлено, что морфология поверхности реза существенно различна при использовании аргона и воздуха. Впервые реализован режим лазерно-плазменной резки, когда в процессе резки поддерживается оптический разряд в потоке аргона. Получен рез с малой шероховатостью поверхности и без грата при давлении аргона 0,5 bar, что значительно ниже величин, при которых достигается высокое качество реза в случае резки непрерывным лазером. Удельные затраты лазерной энергии на создание качественного реза близки при лазерно-плазменной резке алюминиевого сплава и резке непрерывным CO_2 -лазером.

Ключевые слова: алюминий-литиевый сплав, импульсно-периодический CO_2 -лазер, модуляция добротности, лазерно-плазменная резка, качество поверхности.

Введение

Алюминий-литиевые сплавы представляют интерес для авиационной промышленности из-за пониженной плотности, что позволяет существенно облегчить вес авиационных конструкций. Ведутся работы по лазерной сварке Al-Li сплавов [1, 2], лазерная резка таких сплавов также актуальна. Лазерная резка выгодно сочетает высокую скорость и высокое качество поверхности реза. Лазерная резка алюминия и алюминиевых сплавов затруднена из-за высокого коэффициента отражения лазерного пучка и высокой теплопроводности материала. Большой поток тепла в материал из области реза создаёт широкую зону термического влияния, что приводит к большому количеству грата и затрудняет получение качественного реза.

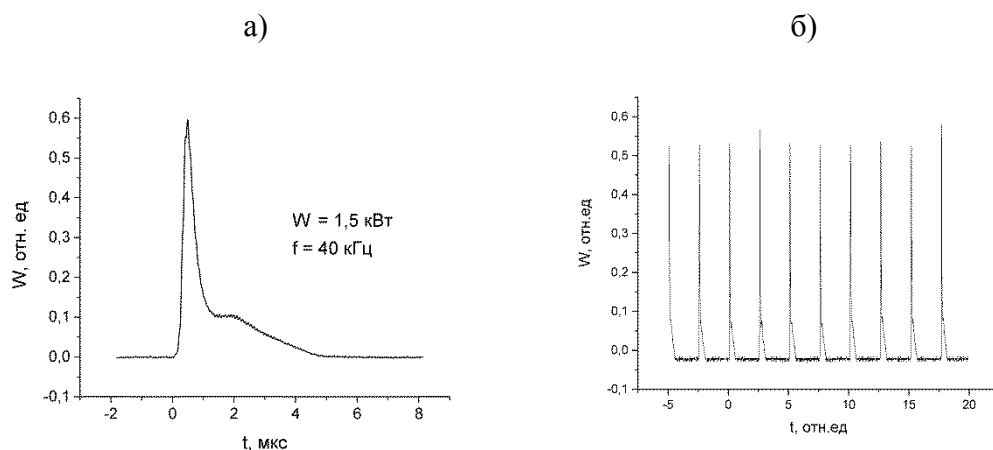
При резке алюминиевых сплавов непрерывным лазером для получения качественного реза проводят тщательную многопараметрическую оптимизацию процесса [3–5]. Для эффективного удаления расплава резка производится при высоком давлении технологического газа в камере режущей головки – 0,6 МПа

при толщине листа 1,5 мм [3], 1 МПа и более при толщине листа 2 и 3 мм [6-8]. Экспериментально установлено ключевое влияние рода вспомогательного газа на качество реза [4]. В [4] производилась резка сплава 2024-T3 системы Al-Cu толщиной 3 мм непрерывным CO₂-лазер при использовании в качестве технологического газа аргона, азота и сжатого воздуха. Лучшие результаты по шероховатости поверхности реза и величине грата получены с аргоном. Авторы объясняют это большей плотностью и динамической вязкостью аргона, что повышает эффективность удаления расплава силой вязкого трения. Кроме того, аргон является инертным газом и не образует с разрезаемым материалом тугоплавких химических соединений. Резка в [4] проводилась при максимальном давлении аргона 1 МПа, при этом на образцах оставался грат. Рез без грата при разрезании сплава 2024-T3 с аргоном в качестве технологического газа получен в [7] при использовании неосевого сверхзвукового сопла. Сопло имеет прямоугольный профиль, и струя подаётся в область реза под углом к лазерному лучу со стороны уже сформированного канала. Такое решение усложняет конструкцию и плохо подходит для выполнения криволинейных резов.

В [8] сообщалось, что давление технологического газа, необходимое для получения высокого качества реза алюминиевых сплавов, можно существенно снизить, если для резки использовать импульсно-периодический CO₂-лазер с модуляцией добротности. Причина этого в том, что при высокой мощности лазерных импульсов происходит интенсивное испарение материала, и расплав выбрасывается с фронта реза давлением отдачи паров. Из-за появления этого дополнительного механизма удаления расплава зависимость результатов резки от рода вспомогательного газа может быть разной при резке импульсно-периодическим и непрерывным лазером. В настоящей работе экспериментально исследуется влияние рода вспомогательного газа на качество реза при резке современных алюминий-литиевых сплавов мультикилогерцовым импульсно-периодическим CO₂-лазером с непрерывной накачкой и модуляцией добротности.

Материалы и методы

Для резки алюминиевых сплавов использовался импульсно-периодический CO₂-лазер с непрерывной накачкой и механической модуляцией добротности резонатора [9, 10]. В лазере использован самофильтрующий резонатор, качество лазерного пучка близко к TEM₀₀ моде, ВРР = 4,7 мм*мрад. Модуляция добротности производится при помощи вращающегося медного диска с прорезями. Резка производилась в импульсно-периодическом режиме (ИП режим) при средней мощности излучения 1,5 кВт и частоте следования импульсов 40 кГц, что достигалось вращением диска с 600 щелями со скоростью 66,66 об/сек. Осциллограммы импульса и последовательности импульсов показаны на рисунке 1. Также производились резы при непрерывной лазерной мощности (НИ режим) без диска-модулятора.



а) осциллограмма; б) последовательность импульсов
 Рисунок 1 – Лазерный импульс при $W = 1,5$ кВт, $f = 40$ кГц

Разрезались листы алюминий-литевых сплавов 1420 системы Al-Mg-Li толщиной $t = 1,5$ мм и В-1461 системы Al-Cu-Li-Mg-Zn толщиной $t = 2$ мм. Для резки использовался 2D CNC стол, делались прямые резы. Лазерный пучок фокусировался линзами с фокусным расстоянием $F = 63,5$ мм и 95 мм, диаметр лазерного пучка на линзе равен 25 мм. В качестве технологических газов использовался аргон с объёмной долей аргона 99,998 % и атмосферный воздух. Струя газа формировалась коническим соплом с выходным диаметром 2,5 мм, зазор между газовым соплом и поверхностью листа устанавливался равным 2 мм. Положение перетяжки сфокусированного пучка по отношению к поверхности листа выбиралось так, чтобы величина грата была минимальной. Оптимальным было положение перетяжки вблизи верхней поверхности листа при резке с аргоном и вблизи нижней поверхности при резке с воздухом. В [8] экспериментально установлено, что при резке алюминиевых сплавов импульсно-периодическим CO₂-лазером с модуляцией добротности повышение давления технологического газа свыше 0,05 МПа не приводит к повышению качества реза. В настоящей работе резка производилась при давлении 0,05 МПа.

Для исследования морфологии поверхности реза и измерения шероховатости использовался сканирующий лазерный микроскоп Olympus LEXT. Шероховатость измерялась в трёх сечениях – на расстоянии 0,2t, 0,5t и 0,8t от верхней поверхности листа, в качестве характеристики образца принималась средняя величина.

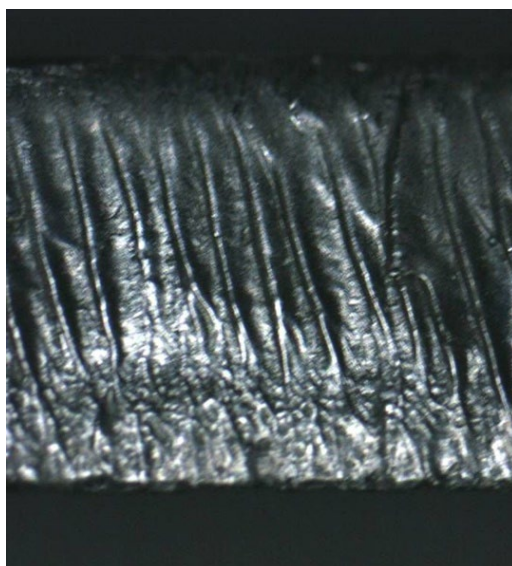
Экспериментальные результаты

Как показали результаты экспериментов, при резке в ИП режиме пространственная структура поверхности реза существенно различна при использовании аргона и воздуха. При резке с аргоном наблюдается характерная бороздчатая структура. При резке с воздухом поверхность имеет зернистый характер, бороздки выражены слабо или отсутствуют. Это относится к Al-Mg-Li сплаву 1420 и к Al-Cu-Li-Mg-Zn сплаву В-1461. На рис. 2 и 3 показаны 2D изображения поверхности реза сплавов 1420 и В-1461 в ИП режиме с аргоном и

воздухом. На рис. 4 показана 3D картина поверхности реза с аргоном и воздухом для сплава В-1461 в средней части реза, картина получена путём послойного сканирования с использованием лазерного конфокального сканирующего микроскопа. Различия в структуре поверхности в случае аргона и воздуха хорошо видны. Также существенным отличием является отсутствие грата в случае аргона при скорости резки, близкой к максимальной. При резке с воздухом грат на нижней кромке наблюдается во всём диапазоне скоростей резки, минимальная высота грата равна 0,1...0,2 мм.

Резка в НИ режиме производилась также при давлении технологического газа 0,05 МПа. Различия в картине поверхности реза с аргоном и воздухом в НИ режиме (рис. 5) выражены гораздо слабее – в обоих случаях имеется значительный грат и высокая шероховатость в нижней части реза. В верхней части реза шероховатость ниже и наблюдается бороздчатая структура, которая лучше выражена в случае аргона.

Лучшие результаты по качеству реза в ИР режиме с аргоном получены при использовании линзы с фокусным расстоянием $F = 63,5$ мм для сплава 1420 и $F = 95$ мм для сплава В-1461. При резке сплава 1420 с линзой 95 мм имеется грат величиной (0,2...0,3) мм на нижней кромке реза, при резке сплава В-1461 линзой 63 мм - грат (0,1...0,2) мм на верхней кромке. Зависимость шероховатости R_a (арифметическое среднее) поверхности реза от скорости V резки показана на рисунках 2-6, стрелками отмечены области, где наблюдается грат и где рез отсутствует.

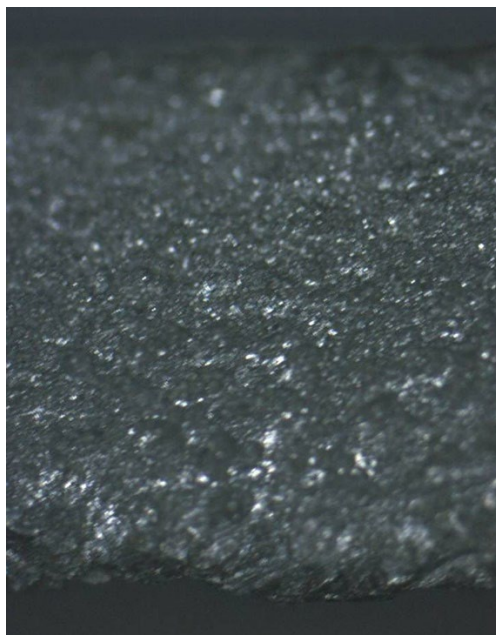
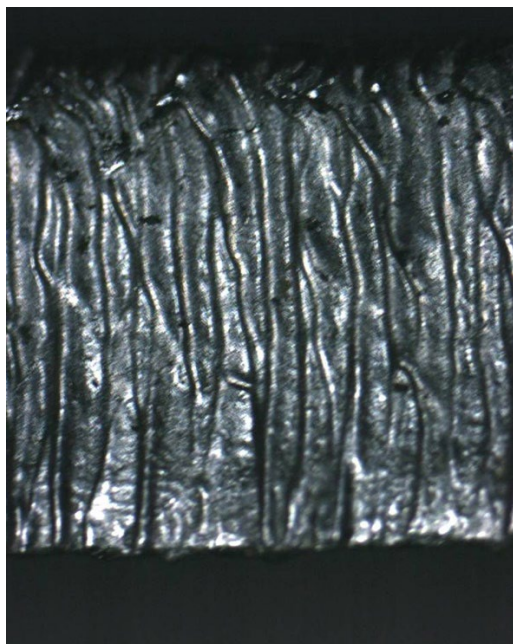


а)



а)

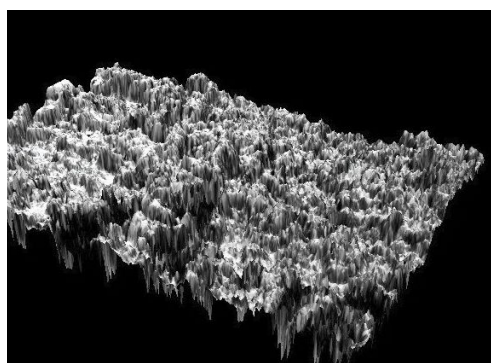
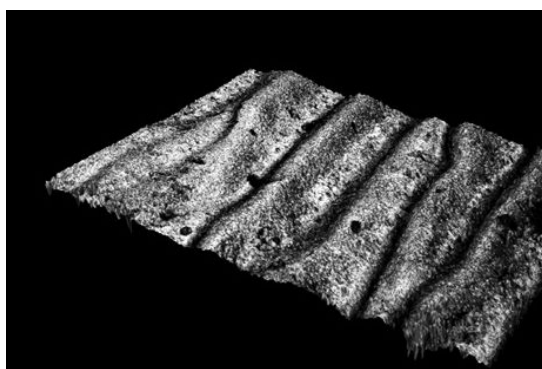
Рисунок 2 – Фото поверхности реза сплава 1420 в RP режиме, $t = 1,5$ мм, $V = 2,6$ м/мин, а) аргон, б) воздух



а)

б)

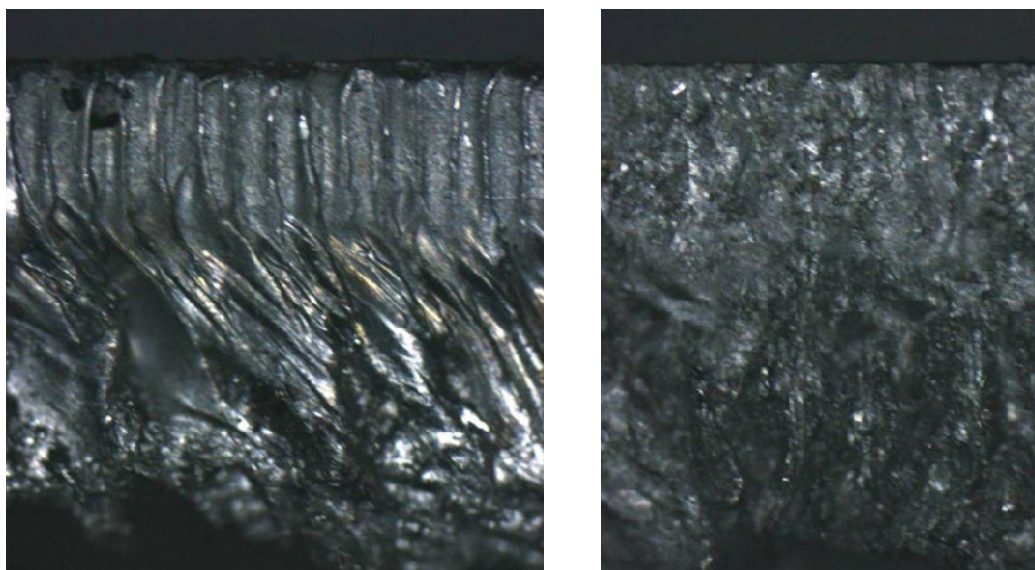
Рисунок 3 – Фото поверхности реза сплава В-1461 в РР режиме, $t = 2$ мм, $V = 1,8$ м/мин, а) аргон, б) воздух



а)

б)

Рисунок 4 – Рельеф поверхности в средней части реза сплава В-1461, $t = 2$ мм, $V = 1,8$ м/мин, размер области 640 x 480 мкм, а) аргон, б) воздух



а)

б)

Рисунок 5 – Фото поверхности реза сплава 1420, $t = 1,5$ мм в НИ режиме, $V = 2,6$ м/мин, а) – аргон, б) – воздух

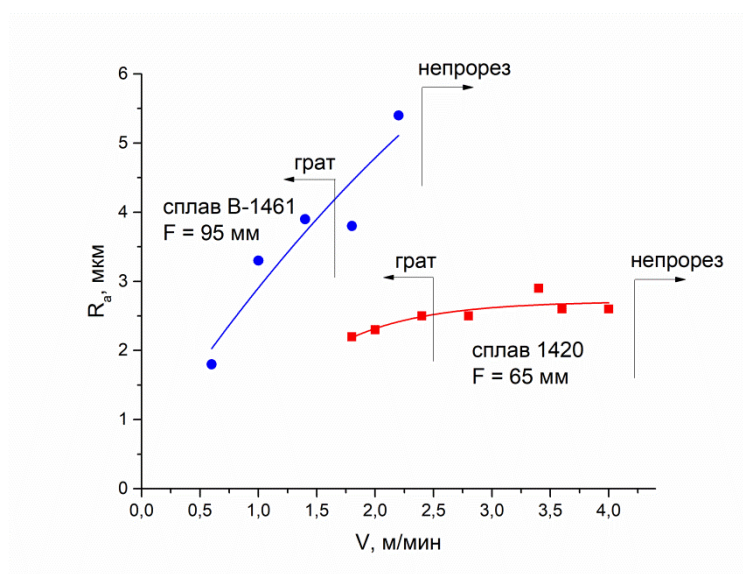


Рисунок 6 – Зависимость шероховатости поверхности реза от скорости резки в импульсно-периодическом режиме для сплавов 1420 и В-1461

Обсуждение результатов

Процесс нагрева металла мощными лазерными импульсами сложен, он включает прямое воздействие излучения на материал и формирование плазмы с последующей передачей части энергии от плазмы к поверхности материала. Импульсы излучения и плазма воздействуют на поверхность металла, вызывая

его плавление и испарение, в материале генерируя тепловые и звуковые волны. На расплав действуют силы давления и вязкого трения со стороны потока технологического газа, давление отдачи паров и давление нагретой плазмы. Как видно из рисунков 2–5, имеются существенные различия в структуре поверхности реза в случае непрерывного и импульсно-периодического лазерного воздействия, а также при резке импульсно-периодическим лазером с аргоном и воздухом. Эти различия связаны с тем, что названные выше процессы дают различный вклад в нагрев материала и удаление расплава.

Более высокое качество реза в ИП режиме по сравнению с НИ режимом можно объяснить тем, что в ИП режиме появляется дополнительный механизм удаления расплава с фронта реза: достигается температура развитого испарения, и расплав выбрасывается давлением отдачи паров. Оценим время, за которое на поверхности алюминиевой пластины достигается температура кипения 2400 °С.

При средней лазерной мощности 1,5 кВт и частоте следования импульсов 40 кГц пиковая мощность импульса равна $(4,2 \dots 4,6) \cdot 10^4$ Вт, результат получен численным интегрированием. Диаметр d фокального пятна при фокусировке линзой с $F = 63,5$ мм, рассчитанный как сумма дифракционного размера и уширения из-за сферической аберрации, равен 110 мкм. Этому соответствует плотность мощности в фокальном пятне $I_0 \approx 4,7 \cdot 10^8$ Вт/см².

При длительности τ действия теплового источника тепло распространяется в материале на расстояние $\delta = \sqrt{a\tau}$. Время нарастания мощности от нуля до пика равно приблизительно 0,5 мкс (рисунок 1, а), если принять его за τ , то материал прогревается на глубину $\delta = 6$ мкм. Таким, образом, выполняется условие $\delta \ll d$, и тепловой поток в пределах длительности фронта можно считать одномерным. Как видно из рис. 1, зависимость лазерной мощности от времени на фронте реза близка к линейной. При линейном росте плотности мощности в приближении плоской тепловой задачи зависимость температуры T поверхности от времени t описывается следующим соотношением [11]:

$$T = \frac{4}{3} \frac{AI_0}{\tau \sqrt{\pi c \rho \lambda}} t^{3/2}, \quad 1)$$

где A – коэффициент поглощения лазерного излучения, I_0 – интенсивность лазерного в пятне через время τ .

Коэффициент поглощения A алюминия может изменяться в широких пределах, в зависимости от состояния поверхности материала. По данным [12], при длине волны излучения СО₂-лазера 10,6 мкм $A = 0,03 \dots 0,06$ для гладкой поверхности и $A = 0,1 \dots 0,4$ для шероховатой поверхности. Теплофизические характеристики алюминия приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Теплофизические характеристики алюминия при температуре 600 К.

Плотность, ρ	Удельная теплоемкость, c	Теплопроводность, λ	Температуропроводность, a
г/см ³	Дж/г*К	Вт/см*К	см ² /с
2,7	1,04	2,3	0,82

Результаты расчёта по (1) показаны на рисунке 7. Видно, что даже при гладкой поверхности в пределах длительности фронта импульса на поверхности достигается температура кипения. Следует учитывать, что один и тот же участок поверхности облучается большим количеством импульсов, при $V = 3$ м/мин и $f = 40$ кГц за время смещения лазерного луча на величину $d/2$ на металл воздействует 73 импульса. С каждым последующим импульсом возрастает шероховатость поверхности, возрастает коэффициент поглощения, и время достижения температуры кипения уменьшается.

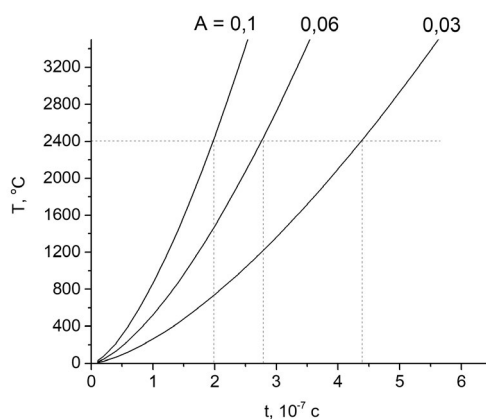


Рисунок 7 – Температура поверхности алюминиевой мишени в центре пятна облучения в зависимости от времени при линейном росте лазерной мощности

Поскольку при достижении температуры кипения «включается» механизм удаления расплава давлением отдачи паров, высокое качество реза может быть получено при меньшем давлении технологического газа, чем в случае резки непрерывным лазером. Ещё одной причиной лучшего качества реза в ИП режиме может быть повышенный перегрев расплава. В течение лазерного импульса температура расплава имеет температуру выше, чем при резке в НИ режиме, вблизи поверхности фронта реза температура расплава близка к температуре кипения. Вязкость расплава уменьшается с температурой, например динамическая вязкость жидкого алюминия равна $2 \cdot 10^{-3}$ Н*с/м² при температуре 800 °С и $1,3 \cdot 10^{-3}$ Н*с/м² при температуре 1278 °С. С уменьшением вязкости расплава и вязкого трения повышается эффективность удаления расплава. Кроме того, с ростом температуры уменьшается коэффициент поверхностного натяжения расплава, что облегчает срыв капель расплава с нижней кромки реза и уменьшает количество грата.

Главное различие в процессе резки с аргоном и воздухом в ИП режиме состоит в том, что в случае аргона резка происходит в режиме «лазерного плазмотрона» – происходит оптический пробой газа, и часть лазерной энергии передаётся материалу через плазму оптического разряда. Резка с аргоном в настоящих экспериментах происходила в присутствии яркого плазменного факела, при резке с воздухом факел не наблюдался.

Оптический разряд возникает в свободной струе аргона (рисунок 8), плазменное образование имеет размеры по свечению в видимом диапазоне 3...5 мм поперёк лазерного луча и 10...12 мм вдоль луча. Оптический разряд в аргоне поддерживается и в процессе резки. Пороговая интенсивность пробоя неочищенного воздуха атмосферного давления излучением CO_2 -лазера имеет величину $2 \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$ [13], такие интенсивности в экспериментах не достигались, и оптический разряд в свободной струе воздуха не возникал. Во время резки с воздухом интенсивный плазменный факел также не наблюдался. Известно [9], что порог оптического пробоя газа снижается в присутствии твердой мишени. Пороговая интенсивность слабо зависит от материала мишени, и для аргона она приблизительно на порядок величины меньше, чем для воздуха. Таким образом, при резке с воздухом условия пробоя или не достигаются, или достигаются только вблизи пика импульса, и лишь относительно небольшая доля энергии импульса вкладывается в плазму.



Рисунок 8 – Оптический пульсирующий разряд в струе аргона,
 $P = 0,05 \text{ МПа}$, $W = 1,5 \text{ кВт}$, $f = 40 \text{ кГц}$, $F = 63,5 \text{ мм}$.

По результатам измерений, в плазме оптического разряда в свободной струе аргона поглощается 60 % лазерной мощности. В условиях резки доля поглощенной мощности может быть другой, но она должна оставаться существенной и большей, чем в случае воздуха. Резка алюминиевого сплава импульсно-периодическим лазером с высокой импульсной мощностью, когда часть лазерной энергии передаётся материалу через объёмное поглощение в плазме оптического разряда, имеет существенное отличие от обычной лазерной резки. В то же время, резка в

присутствии плазмы оптического разряда плазмотрона отличается и от плазменной резки, когда плазма создаётся электрическим разрядом без участия лазера.

Способ резки, при котором происходит комбинированное воздействие на материал лазерного излучения и плазмы оптического разряда, можно назвать лазерно-плазменной резкой. Насколько известно авторам, такой режим резки реализован впервые. Полученные результаты не позволяют определить относительный вклад в формирование реза разных каналов подвода энергии – непосредственного поглощения материалом и передачи энергии через плазму оптического разряда, это может быть предметом дальнейших исследований. Назовём лишь возможные процессы, которые могут быть существенными при лазерно-плазменной резке.

К поглощению лазерного излучения на поверхности материала добавляется объёмное поглощение в плазме. Плазма оптического разряда при интенсивности $10^8 \dots 10^9$ Вт/см² имеет высокую температуру – до $(15 \dots 20) \cdot 10^3$ [11, 13], энергия плазмы передаётся расплаву на фронте реза и боковым стенкам, в том числе путём радиационного нагрева. В плазме создаётся область повышенного давления, возникают ударные волны [11, 14], формируются струи в направлении распространения лазерного луча [11]. Это может повышать эффективность удаления расплава из канала реза. Возможно, дополнительный нагрев и силовое воздействия со стороны плазмы являются причиной меньшей шероховатости поверхности в нижней части реза по сравнению с верхней. При обычной лазерной резке, когда расплав удаляется только силами давления и вязкого трения потока газа, шероховатость имеет большую величину в нижней части реза. Наличие в канале реза плазмы при высокой температуре и нагрев боковых стенок, по-видимому, и обуславливают различие в структуре поверхности реза при резке с аргоном и воздухом. В случае резки с воздухом часть капель расплава, сорванных с фронта реза давлением отдачи паров, осаждаются и затвердевают на боковых стенках, формируя зернистую структуру. При резке с аргоном сорванные с фронта капли могут не достигать боковой поверхности реза, полностью или частично испаряясь в нагретой плазме. Долетевшие жидкие капли попадают на плёнку горячего расплава и не создают локальных неоднородностей. В итоге формируется характерная для лазерной резки бороздчатая структура поверхности реза. О возможности уменьшения шероховатости путем нагрева боковых стенок лазерного реза сообщалось в [15, 16].

Сравним результаты настоящей работы по качеству реза и эффективности с полученными в [4], где разрезался алюминиевый сплав 2024-T3 толщиной 3 мм с использованием непрерывного CO₂-лазера. Поскольку разрезались листы разной толщины, эффективность резки будем характеризовать энергией деления $E_c = W/Vt$ [Дж/мм²] [17]. Для получения высокого качества реза авторы [4] рекомендуют производить резку с аргоном при давлении аргона 0,8...1 МПа и при лазерной мощности 2,5...3 кВт, наиболее полные данные приведены для мощности 2,5 кВт. Результаты [4] и настоящей работы приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение результатов [4] и настоящей работы

Источн.	Сплав	t, мм	W, кВт	Газ	P, бар	V, м/мин	Ес, Дж/мм ²	Ra, мкм	Грат, мм
Данная работа	1420	1,5	1,5	Аргон	0,5	4	15	2,7	0
	В-1461	2	1,5	Аргон	0,5	2,2	20,4	5,3	0
Rivero 2010	2024-T3	3	2,5	Аргон	8	3	16,6	13	1,35

Удельные затраты энергии E_c при резке имеют в настоящей работе и в [4] сопоставимую величину. Главное различие состоит в том, что при лазерно-плазменной резке импульсно-периодическим лазером с высокой импульсной мощностью получен рез без грата при давлении аргона 0,05 МПа, в то время как при резке непрерывным лазером имеется значительный грат при давлении 0,8 МПа. Грат в [4] образуется и при давлении 1 МПа, хотя имеет и меньшую величину – 0,15 мм. Имеющиеся данные не дают возможности сравнить качество реза при одинаковой толщине листа, но приведённые разными авторами результаты лазерной резки алюминиевых сплавов позволяют говорить о том, что для достижения качественного реза необходимо давление газа, существенно превышающее 0,05 МПа. В работе [18] резка листов толщиной 1 мм проводилась при давлении 0,7...1,1 МПа, в [3] листы толщиной 1,5 мм разрезались при давлении 0,5...0,6 МПа, при толщине 2 мм давление имело величину 1...1,4 МПа [5].

Выводы

Экспериментально исследованы характеристики реза и влияние вспомогательного газа (аргона или воздуха) на качество реза при резке алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Li толщиной $t = 1,5$ мм и В-1461 системы Al-Cu-Li-Mg-Zn толщиной $t = 2$ мм импульсно-периодическим CO₂-лазером с модуляцией добротности в условиях интенсивного испарения материала. Установлено, что поверхности реза имеет разную пространственную структуру при использовании аргона и воздуха. В случае воздуха поверхность является зернистой и наблюдается грат, в случае аргона поверхность имеет бороздчатую структуру и существует диапазон скоростей резки, в котором грат отсутствует. При использовании аргона происходит оптический пробой, и в процессе резки поддерживается пульсирующий оптический разряд в потоке газа. Лазерную резку в сопровождении оптического разряда в газе можно назвать лазерно-плазменной резкой. Насколько известно авторам, такой режим резки реализован впервые. Проведено сравнение затрат лазерной энергии на единицу толщины листа и единицу скорости резки при лазерно-плазменной резке алюминиевого сплава с известными данными для непрерывного CO₂-лазера. Удельные затраты лазерной энергии на образование качественного реза имеют в обоих случаях близкую величину.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания на 2021–2023 гг., проект № 121030900259-0.

Список использованных источников

1 **Malikov, A., Orishich, A., Bulina, N., Karpov, E., Sharafutdinov, M.** Effect of post heat treatment on the phase composition and strength of laser welded joints of an Al–Mg–Li alloy, *Mater. Sci. Eng. – A*. 765 (2019) 138302. – doi: 10.1016/j.msea.2019.138302.

2 **Malikov, A., Orishich, A., Golyshev, A., Karpov, E.** Manufacturing of high-strength laser welded joints of an industrial aluminum alloy of system Al-Cu-Li by means of post heat treatment. – *J. Manuf. Process.* – 41 (2019) 101–110. – doi: 10.1016/J.JMAPRO.2019.03.037.

3 **Sharifi, M., Akbarifi, M.** Experimental investigation of the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting-edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy. – *Optik*, 184, 457 (2019).

4 **Riveiro, A., Quintero, F., Lusquinos, F., Comesana, R., Pou, J.** Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 1138–1152.

5 **Stournaras, A., Stavropoulos, P., Salonitis, K. Chryssolouris, G.** An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum. – *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (2009) 61–69.

6 **Jankovic, P., Madic, M., Radovanovic Miroslav, Petkovic, D., Mladenovic, S.** Optimization of Surface Roughness from Different Aspects in High-Power CO₂ Laser Cutting of AA5754 Aluminum Alloy. – *Arabian Journal for Science and Engineering* (2019) 44:10245–10256.

7 **Rivero, A., Quintero, F., J. del Val, Boutinguiza, M., Wallerstein, D., Comesana, R., Lusquinos, F., Pou, J.** Laser cutting of aluminum alloy 2024-T3. – *Procedia Manufacturing*, 13, (396) 2017.

8 **Shulyatyev, V. B., Orishich, A. M.** Cutting of aluminum alloys with a Q-switched repetitively pulsed CO₂ laser under condition of intense material evaporation. – *AIP Conference Proceedings* 2167, 020334 (2019).

9 **Malov, A. N., Orishich, A. M., Shulyatyev, V. B.** High-power repetitively pulsed CO₂ laser with mechanical Q-switching and its application to studies in aerodynamic installations. – *Quantum Electronics*, 41, 1027 (2011).

10 **Shulyatyev, V. B., Orishich, A. M.** Generation of a laser beam with a high peak brightness in a CO₂ laser with continuous pumping and mechanical Q-switching. *AIP Conference Proceedings*, 2019.

11 **Прохоров, А. М., Конов, В. И., Урсу, И., Михэилеску, И. Н.** Взаимодействие лазерного излучения с металлами. – М. : Наука, 1988.

12 *LIA Handbook of Laser Material Processing.* F. Ready, Ed. in Chief, Laser Institute of America, Magnolia Publishing, Inc.

13 **Malov, A. N., Orishich, A. M.** Formation of an optical pulsed discharge in a supersonic air flow by radiation of a repetitively pulsed CO₂ laser. – *Quantum Electronics* 42(9), 843(2012).

14 **Bobarykina, T. A., Malov, A. N., Orishich, A. M., Chirkashenko, V. F., Yakovlev, V. I.** Optical discharge with absorption of repetitive CO₂ laser pulses in supersonic air flow : wave structure and condition of a quasi-steady state. – *Quantum Electronics*, 44(9), 836 (2014).

15 **Hirano K., Fabbro R.** Possible explanations for different surface quality in laser cutting with 1 and 10 mm beams. – *Journal Laser Applications* 24, 012006 (2012). doi: 10.2351/1.3672477.

16 **Orishich, A. M., Golyshev, A. A., Shulyatyev, V. B., Galev, R. V., Kudryavtsev, A. N.** Beam polarization effect on the surface quality during steel cutting by a CO₂ laser. – *Journal of Laser Applications* 30, 012006 (2018). – doi:10.2351/1.5020365.

17 **Steen, W.** *Laser Material Processing*. – Springer, 2003.

18 **Pandey, A. K., Dubey, A. K.** Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of Duralumin sheet. – *Optics and Lasers in Engineering* 50 (2012) 328–335.

References

1 **Malikov, A., Orishich, A., Bulina, N., Karpov, E., Sharafutdinov, M.** Effect of post heat treatment on the phase composition and strength of laser welded joints of an Al–Mg–Li alloy, *Mater. Sci. Eng. – A*. 765 (2019) 138302. – doi: 10.1016/j.msea.2019.138302.

2 **Malikov, A., Orishich, A., Golyshev, A., Karpov, E.** Manufacturing of high-strength laser welded joints of an industrial aluminum alloy of system Al-Cu-Li by means of post heat treatment. – *J. Manuf. Process.* 41 (2019) 101–110. – doi: 10.1016/J.JMAPRO.2019.03.037.

3 **Sharifi, M., Akbarifi, M.** Experimental investigation of the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting-edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy. – *Optik*, 184, 457 (2019).

4 **Riveiro, A., Quintero, F., Lusquinos, F., Comesana, R., Pou, J.** Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 1138–1152.

5 **Stournaras, A., Stavropoulos, P., Salonitis, K., Chryssolouris, G.** An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum. – *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (2009) 61–69.

6 **Jankovic, P., Madic, M., Radovanovic, Miroslav, Petkovic, D., Mladenovic, S.** Optimization of Surface Roughness from Different Aspects in High-Power CO₂ Laser Cutting of AA5754 Aluminum Alloy. – *Arabian Journal for Science and Engineering* (2019) 44:10245–10256.

7 **Rivero, A., Quintero, F., J. del Val, Boutinguiza, M., Wallerstein, D., Comesana, R., Lusquinos, F., Pou, J.** Laser cutting of aluminum alloy 2024-T3. – *Procedia Manufacturing*, 13, (396) 2017.

8 **Shulyatyev, V. B., Orishich, A. M.** Cutting of aluminum alloys with a Q-switched repetitively pulsed CO₂ laser under condition of intense material evaporation. – *AIP Conference Proceedings* 2167, 020334 (2019).

9 **Malov, A. N., Orishich, A. M., Shulyatyev, V. B.** High-power repetitively pulsed CO₂ laser with mechanical Q-switching and its application to studies in aerodynamic installations. *Quantum Electronics*, 41, 1027 (2011).

10 **Shulyatyev, V. B., Orishich, A. M.** Generation of a laser beam with a high peak brightness in a CO₂ laser with continuous pumping and mechanical Q-switching. – *AIP Conference Proceedings*, 2019.

11 **Прохоров, А. М., Конов, В. И., Урсу, И., Михэилеску, И. Н.** Взаимодействие лазерного излучения с металлами. – М.: Наука, 1988.

12 *LIA Handbook of Laser Material Processing*. F. Ready, Ed. in Chief, Laser Institute of America, Magnolia Publishing, Inc.

13 **Malov, A. N., Orishich, A. M.** Formation of an optical pulsed discharge in a supersonic air flow by radiation of a repetitively pulsed CO₂ laser. – *Quantum Electronics* 42(9), 843(2012).

14 **Bobarykina, T. A., Malov, A. N., Orishich, A. M., Chirkashenko, V. F. Yakovlev, V. I.** Optical discharge with absorption of repetitive CO₂ laser pulses in supersonic air flow: wave structure and condition of a quasi-steady state. – *Quantum Electronics*, 44(9), 836 (2014).

15 **Hirano, K., Fabbro, R.** Possible explanations for different surface quality in laser cutting with 1 and 10 μm beams. *Journal Laser Applications* 24, 012006 (2012). – doi: 10.2351/1.3672477.

16 **Orishich, A. M., Golyshchev, A. A., Shulyatyev, V. B., Galev, R. V., Kudryavtsev, A. N.** Beam polarization effect on the surface quality during steel cutting by a CO₂ laser. – *Journal of Laser Applications* 30, 012006 (2018). – doi:10.2351/1.5020365.

17 **Steen, W.** *Laser Material Processing*. – Springer, 2003.

18 **Pandey, A. K., Dubey, A. K.** Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of Duralumin sheet. – *Optics and Lasers in Engineering* 50 (2012) 328–335.

Материал поступил в редакцию 15.06.21.

***В. Б. Шулятьев, А. Г. Маликов**

С. А. Христианович атындағы Теориялық және қолданбалы механика институты Ресей Ғылым академиясының Сібір бөлімшесі,

Ресей Федерациясы, Новосибирск қ.

Материал 15.06.21 баспаға түсті.

МАТЕРИАЛДЫҢ ҚАРҚЫНДЫ БУЛАНУЫ ЖАҒДАЙЫНДА АВИАЦИЯЛЫҚ АЛЮМИНИЙ ҚОРЫТПАЛАРЫН ЛАЗЕРЛІК КЕСУ

Материалдың булануы дамыған кезде сапа модуляциясы мен жоғары шыңы бар импульсті-периодты CO_2 лазерінің сәулеленуімен алюминий қорытпаларын кесу сипаттамалары эксперименталды түрде зерттелді. Қалыңдығы 1,5 мм және 2 мм $Al-Mg-Li$ және $Al-Cu-Li$ жүйелерінің алюминий қорытпаларының парақтары кесіліп, аргон мен ауа технологиялық газ ретінде пайдаланылды. Аргон мен ауаны қолданған кезде кесу бетінің морфологиясы айтарлықтай ерекшеленетіні анықталды. Лазерлік плазмалық кесу режимі алғаш рет кесу процесінде аргон ағынындағы оптикалық разряд сақталған кезде жүзеге асырылды. 0,5 bar аргон қысымымен бетінің төмен кедір-бұдырымен және граттарсыз кесілген, бұл үздіксіз лазермен кесу кезінде жоғары кесу сапасына қол жеткізілетін мәндерден едәуір төмен. Алюминий қорытпасын лазерлік плазмалық кесу және үздіксіз CO_2 лазерімен кесу кезінде жоғары сапалы кесуді жасауға арналған лазерлік энергияның нақты шығындары жақын.

Кілтті сөздер: алюминий-литий қорытпасы, импульстік-периодты CO_2 -лазер, сапа модуляциясы, лазерлік-плазмалық кесу, бетінің сапасы.

***V. B. Shulyatyev, A. G. Malikov**

S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Russian Federation, Novosibirsk.
Material received on 15.06.21.

LASER CUTTING OF AVIATION ALUMINUM ALLOYS UNDER CONDITIONS OF INTENSIVE EVAPORATION OF THE MATERIAL

The characteristics of the aluminum alloys cutting by the radiation of a pulsed periodic CO_2 laser with Q -factor modulation and high peak power, when there is a developed evaporation of the material, are experimentally studied. Sheets of aluminum alloys of the $Al-Mg-Li$ and $Al-Cu-Li$ systems with a thickness of 1.5 mm and 2 mm were cut, and argon and air were used as process gas. It was found that the morphology of the cut surface is significantly different when using argon and air. For the first time, a laser-plasma cutting mode is implemented, when an optical discharge in an argon stream is maintained during the cutting process. A cut with a low surface roughness and no deburring was obtained at an argon pressure of 0.5 bar, which is significantly lower than the values at which a high cut quality is achieved in the case of continuous laser cutting. The specific cost of laser energy for creating a high-quality cut is similar for laser-plasma cutting of aluminum alloy and cutting with a continuous CO_2 laser.

Keywords: aluminum-lithium alloy, pulsed-periodic CO_2 laser, Q -factor modulation, laser-plasma cutting, surface quality.

Теруге 15.06.21 ж. жіберілді. Басуға 29.06.21 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
3,99 Мб RAM
Шартты баспа табағы 13,9. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген З. С. Искакова
Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3809

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz
nitk.tou.edu.kz