

УДК 621.373.826
DOI: 10.15372/PMTF202315338

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ АВИАЦИОННОГО АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ

В. Б. Шулятьев, М. А. Гулов, Е. В. Карпов*,
А. Г. Маликов, А. А. Филиппов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mails: shulyat@rambler.ru, gulovy@mail.ru, evkarpov@mail.ru, smalik@ngs.ru,
filippov@itam.nsc.ru

Представлены результаты испытаний на растяжение и малоцикловую усталость образцов из алюминий-литиевого сплава системы Al–Mg–Li, полученных методом лазерно-плазменной резки, проведенной импульсным CO₂-лазером в струе аргона при одновременном воздействии на материал лазерного излучения и плазмы оптического разряда. В результате испытаний на малоцикловую усталость установлено, что количество циклов нагружения, которые выдержал образец, полученный методом лазерно-плазменной резки, более чем в два раза превышает количество циклов, которые выдержали образцы, полученные обычной лазерной резкой непрерывным излучением.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, лазерная резка, оптический разряд, зона термического влияния, механические испытания, усталостная долговечность

Введение. Лазерная резка металлов широко применяется в различных отраслях промышленности, что обусловлено высокими скоростью и качеством обработки. Высокая точность резки и малая шероховатость поверхности реза позволяют использовать вырезанные лазером детали без дополнительной обработки. Лазерная резка алюминия и сплавов затруднена вследствие большого коэффициента отражения лазерного излучения и высокой теплопроводности материала [1]. При интенсивном отводе тепла из области реза в материал происходит быстрое охлаждение боковых стенок канала реза и расплава, что вызывает увеличение вязкости и коэффициента поверхностного натяжения расплава, затрудняет удаление расплава, приводит к образованию грата и механических неоднородностей на поверхности реза. Для повышения эффективности удаления расплава и уменьшения шероховатости поверхности резка проводится при высоком давлении и большом расходе технологического газа даже в случае малой толщины разрезаемого листа. В экспериментах [2] резка листов алюминиевого сплава толщиной 1 мм проводилась при давлении

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-29-20187) и Правительства Новосибирской области. Механические испытания проведены с использованием оборудования Института гидродинамики СО РАН, исследование области зарождения усталостных трещин — с использованием оборудования центра коллективного пользования “Механика” (Институт теоретической и прикладной механики СО РАН).

0,7 \div 1,1 МПа, в [3] — при давлении 1,5 МПа. В экспериментах [4] листы толщиной 1,5 мм разрезались при давлении 0,5 \div 0,6 МПа, при толщине разрезаемых листов 2 мм давление технологического газа составляло 1,0 \div 1,4 МПа [5]. В [6] для уменьшения шероховатости листы алюминиевого сплава толщиной 1,5 и 2,0 мм разрезались при давлении, равном 1,5 МПа.

Экспериментально установлено, что наилучшее качество реза достигается при использовании в качестве технологического газа аргона [6, 7]. В работах [7, 8] этот результат объясняется тем, что аргон обладает большой динамической вязкостью и, являясь инертным газом, не образует тугоплавких химических соединений с разрезаемым материалом. Однако на практике при лазерной резке алюминиевых сплавов применяется азот. Азот не обеспечивает такого высокого качества реза, как аргон, но имеет меньшую стоимость, что существенно при большом расходе газа. Для снижения затрат при резке алюминиевых сплавов в качестве технологического газа используется также воздух. В экспериментах [9] с помощью волоконного лазера разрезались листы алюминиевого сплава AA2B06-T4 толщиной 0,5 и 1,0 мм при давлении воздуха до 1,5 МПа. Таким образом, при резке алюминиевых сплавов вследствие большого расхода технологического газа оптимальный с точки зрения качества реза аргон не используется.

Алюминиевые сплавы широко применяются в авиастроении. К механическим характеристикам деталей авиационных и космических изделий предъявляются повышенные требования. Механические характеристики вырезанных лазером деталей являются недостаточно большими, для того чтобы лазерная резка применялась как финишная технологическая операция в авиакосмической промышленности. Поэтому на практике после завершения лазерной резки проводится механическая обработка, что лишает лазерную резку одного из главных преимуществ — возможности использования вырезанных деталей без дополнительной обработки. В экспериментах [10] с использованием CO₂-лазера разрезался лист алюминиевого сплава 2024 T3 системы Al-Zn-Mg толщиной 1,6 мм. Обнаружено, что усталостная прочность вырезанных образцов недостаточна для применения лазерной резки как финишной операции при изготовлении деталей в авиационном производстве. Авторы [10] объясняют этот вывод возникновением трещин на неоднородной поверхности реза в зоне термического влияния (ЗТВ). Подобные результаты получены в экспериментах [11], в которых также с помощью CO₂-лазера разрезались листы алюминий-литиевых сплавов толщиной 1,5 и 3,0 мм. В [11] на основе результатов механических испытаний сделан вывод, что использование лазерной резки в качестве технологической операции при изготовлении деталей в авиационной промышленности возможно только при условии последующей механической обработки поверхности реза.

В работе [12] предложен и экспериментально реализован новый метод резки алюминиевых сплавов — лазерно-плазменная резка. Резка проводится с помощью импульсного CO₂-лазера с непрерывной накачкой и модуляцией добротности резонатора, в качестве технологического газа используется аргон. Отличие метода состоит в том, что при каждом лазерном импульсе формируется оптический разряд [13] в потоке аргона, резка проводится при одновременном воздействии на материал лазерного излучения и плазмы разряда. Экспериментально установлено, что при резке листов алюминий-литиевых сплавов толщиной 1,5 и 2,0 мм методом лазерно-плазменной резки рез без грата и с малой шероховатостью может быть получен при значении давления аргона 0,05 МПа, что существенно меньше, чем при обычной лазерной резке.

Алюминий-литиевые сплавы являются перспективными для использования в авиационной промышленности вследствие малой плотности, что позволяет уменьшить массу авиационных конструкций [14]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование прочности и сопротивления усталостному разрушению образцов из алюминий-

литиевого сплава системы Al–Mg–Li, вырезанных методом лазерно-плазменной резки, а также сравнение полученных образцов с образцами, вырезанными в условиях, когда оптический разряд не формируется.

1. Используемые материалы и методы. Разрезались листы алюминий-литиевого сплава 1420 системы Al–Mg–Li, толщина которых составляла 1,5 мм. Сплав имел следующий химический состав (массовая доля): Al — 92,6 %, Li — 2,1 %, Mg — 5,2 %, Zr — 0,1 %. Лазерно-плазменная резка проводилась импульсным CO₂-лазером с непрерывной накачкой и механической модуляцией добротности резонатора [15]. В лазере использован самофильтрующийся оптический резонатор, форма лазерного пучка близка к форме гауссова пучка с основной модой TEM₀₀, параметр качества пучка лазера (beam parameter product) равен BPP = 4,7 мм · мрад. Модуляция добротности осуществляется с помощью вращающегося медного диска с щелями. Без диска-модулятора лазер работает в режиме генерации непрерывного излучения. Для резки использовался плоский стол с числовым программным управлением. Излучение фокусировалось на материал одиночной ZnSe-линзой с фокусным расстоянием 63,5 мм, диаметр фокального пятна, рассчитанный как сумма дифракционного размера и диаметра области рассеяния вследствие сферической aberrации, равен 110 мкм. Соосно с излучением через коническое сопло с выходным диаметром 3 мм подавалась струя технологического газа, в качестве которого использовался аргон с объемной долей 99,998 % или атмосферный воздух.

Резка проводилась при частоте следования импульсов $f = 40$ кГц и средней мощности лазерного излучения $W_{av} = 1,5$ кВт. Осциллограмма импульса показана на рис. 1 (W — мгновенная мощность лазерного излучения). Максимальная мощность импульса, полученная в результате численного интегрирования, равна $4,2 \cdot 10^4 \div 4,6 \cdot 10^4$ Вт. Также выполнялись резы при непрерывном лазерном излучении без диска-модулятора.

При резке с аргоном реализован метод лазерно-плазменной резки [10]. Этот метод отличается как от обычной лазерной резки, когда все излучение поглощается на поверхности материала, так и от плазменной резки, когда плазма создается электрическим разрядом. При разрезании листов сплава системы Al–Mg–Li, имеющих толщину 1,5 мм, с использованием данного метода получен качественный рез (без грата и с малой шероховатостью поверхности) при давлении аргона 0,05 МПа, что в 10–20 раз меньше, чем это необходимо при обычной лазерной резке непрерывным излучением. При резке с воздухом оптический разряд не формируется.

Высокое качество реза при малом (по сравнению с резкой непрерывным лазером) давлении технологического газа при лазерно-плазменной резке может быть обусловлено вли-

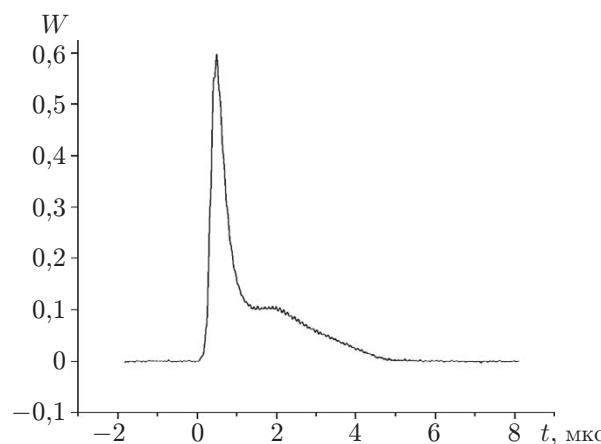


Рис. 1. Осциллограмма лазерного импульса ($W_{av} = 1,5$ кВт, $f = 40$ кГц)

янием следующих факторов. Во-первых, коэффициент поглощения лазерного излучения больше, чем при обычной лазерной резке, поскольку наряду с поглощением на поверхности материала происходит объемное поглощение в плазме разряда. При этом наблюдается перераспределение лазерной энергии на поверхности канала реза. Лазерное излучение поглощается преимущественно на фронте реза, а энергия плазмы передается расплаву, находящемуся на боковых стенках. Влияние нагрева расплава на боковых стенках на качество лазерного реза ранее исследовалось в работе [16]. Во-вторых, часть лазерной энергии затрачивается на удаление расплава: при оптическом пробое аргона вблизи поверхности реза создается область высокого давления, возникают ударные волны [17, 18], формируются струи в направлении распространения лазерного луча [17], что оказывает силовое воздействие на расплав и приводит к повышению эффективности его удаления.

Для получения изображения кромки реза и измерения ширины ЗТВ использовался лазерный сканирующий конфокальный микроскоп Olympus LEXT. Структура зоны зарождения усталостных трещин исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEISS EVO MA15. Механические испытания образцов проводились с использованием электромеханической универсальной испытательной машины Zwick/Roel Z100.

2. Результаты исследования и их обсуждение. При лазерно-плазменной резке в диапазоне скоростей $2,5 \div 4,0$ м/мин получен рез без гата с шероховатостью поверхности $2,5 \div 2,6$ мкм.

На рис. 2 показаны фотографии кромки реза при резке импульсным и непрерывным излучением с аргоном и воздухом. Резка проводилась при скорости 4 м/мин. Образцы были отшлифованы и протравлены в реактиве Келлера, выявлена ЗТВ с измененной структурой вблизи поверхности реза. Из рис. 2 следует, что грат отсутствует только на поверхности образца, вырезанного импульсным излучением с оптическим разрядом в потоке аргона, т. е. методом лазерно-плазменной резки. При резке непрерывным излучением с аргоном и воздухом высота гата достигает 0,5 мм.

Ширина ЗТВ измерялась в трех сечениях по толщине листа на расстояниях $0,25t$, $0,50t$ и $0,75t$ от верхней поверхности листа. В табл. 1 приведены осредненные по трем сечениям значения ширины h ЗТВ для различных режимов резки. Из табл. 1 следует, что минимальная ширина ЗТВ достигается при лазерно-плазменной резке.

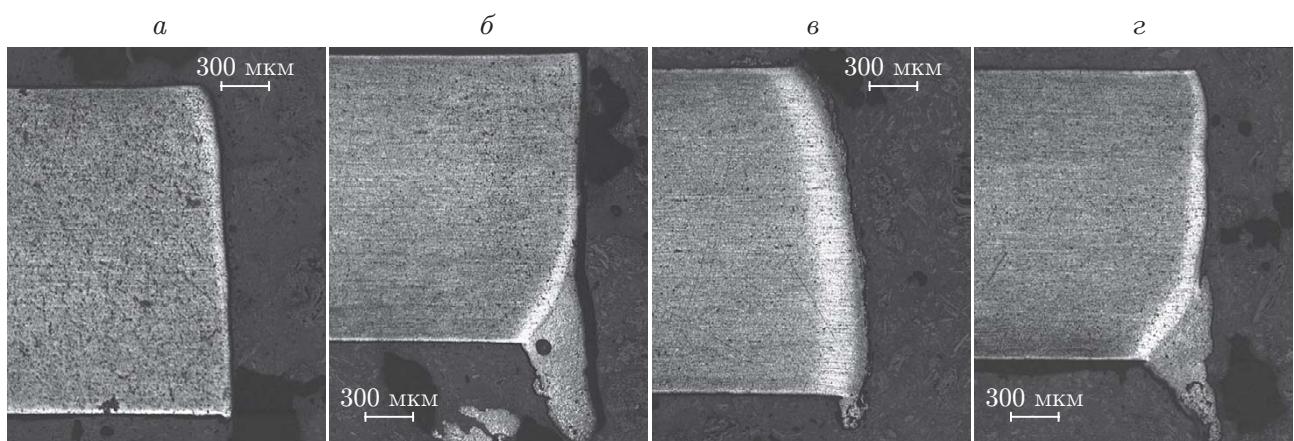


Рис. 2. Фотографии кромки реза при импульсном (а, в) и непрерывном (б, г) излучении:

а, б — аргон, в, г — воздух; светлые области — зона термического влияния с измененной кристаллической структурой

Таблица 1

Ширина зоны термического влияния

Газ	h , мкм	
	Импульсное излучение	Непрерывное излучение
Аргон	52	66
Воздух	188	106

Таблица 2

Количество циклов до разрушения N при испытаниях на малоцикловую усталость

Газ	N	
	Импульсное излучение	Непрерывное излучение
Аргон	18 930	7235
Воздух	13 515	6646

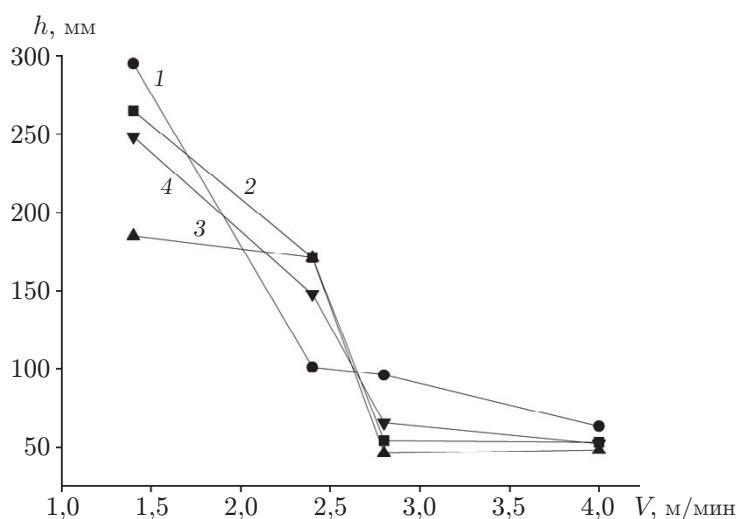


Рис. 3. Зависимость ширины h зоны термического влияния от скорости резки V при лазерно-плазменной резке в различных сечениях по толщине t листа:
1 — $0,25t$, 2 — $0,5t$, 3 — $0,75t$, 4 — среднее по трем сечениям значение

Определена зависимость ширины h ЗТВ образцов, полученных методом лазерно-плазменной резки, от скорости резки V (рис. 3). С увеличением скорости резки ширина ЗТВ уменьшается и при $V > 2,8$ м/мин изменяется незначительно. Таким образом, ЗТВ имеет минимальную ширину при скорости резки $V = 3 \div 4$ м/мин, близкой к максимальной.

Проведены механические испытания образцов, полученных методом лазерно-плазменной резки и непрерывным излучением, на малоцикловую усталость и на растяжение. Образцы вырезались при скорости $V = 3,8$ м/мин, близкой к максимальной, при которой ЗТВ имеет минимальную ширину. Образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84), при этом одна из боковых кромок была подвергнута шлифовке.

Статические испытания на разрыв проводились при скорости движения подвижной траверсы, равной 1 мм/мин, деформация измерялась контактным экстензометром. Испытания на малоцикловую усталость выполнялись при амплитуде нагрузки $50 \div 400$ МПа с частотой 0,25 Гц. Результаты испытаний приведены в табл. 2. Количество циклов нагружения, которые выдержал образец, полученный методом лазерно-плазменной резки, более чем в два раза превышает количество циклов, которые выдержали образцы, полученные обычной лазерной резкой непрерывным излучением в струе аргона и воздуха и в 1,4 раза превышает количество циклов, которые выдержал образец, вырезанный импульсным излучением в струе воздуха, когда оптический разряд не формируется. Диаграмма нагрузления при испытаниях на малоцикловую усталость при резке с аргоном представлена на

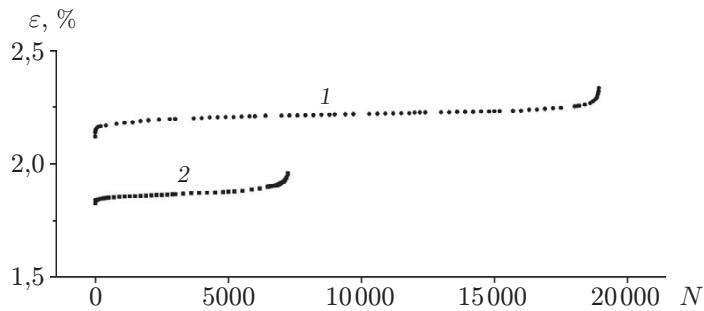


Рис. 4. Диаграмма нагружения при испытаниях на малоцикловую усталость:

1 — резка импульсным излучением, 2 — резка непрерывным излучением

рис. 4. Видно, что число циклов до разрушения N при резке непрерывным излучением существенно меньше, несмотря на то что при данной амплитуде нагружения значения деформации ε меньше, чем при лазерно-плазменной резке.

На рис. 5 показаны поверхности излома при испытаниях на малоцикловую усталость образцов, полученных при резке с аргоном импульсным излучением (лазерно-плазменная резка) и непрерывным излучением. Левая поверхность излома соответствует боковой поверхности, которая перед испытанием была подвергнута шлифовке, правая поверхность излома — поверхности, на которой сохранена структура лазерного реза и присутствуют характерные для лазерной резки непрерывным излучением борозды и грат. На рис. 5 видно, что в случае резки непрерывным излучением усталостная трещина расположена вблизи кромки, где сохранена структура реза, а в случае лазерно-плазменной резки — вблизи кромки, подвергнутой шлифовке, в ходе которой были удалены как рельеф поверхности реза, так и ЗТВ. Таким образом, при лазерно-плазменной резке необработанная поверхность реза не является дополнительным фактором, инициирующим развитие усталостных трещин. Однако после резки непрерывным излучением на необработанной поверхности реза возникает усталостная трещина. Это может быть обусловлено тем, что при наличии граты контактирующая с ним область поверхности реза охлаждается медленнее, в результате чего ширина ЗТВ больше, чем в отсутствие граты.

Полученные при испытаниях на растяжение ($\sigma-\varepsilon$)-диаграммы нагружения образцов, вырезанных импульсным и непрерывным излучением, практически совпадают (рис. 6). Испытывался также образец, обе поверхности которого были подвергнуты шлифовке. При этом прочность на растяжение образцов, вырезанных лазером, и прочность шлифованного образца приблизительно одинаковы. Таким образом, существенного влияния способа резки (импульсным или непрерывным излучением) на прочность образцов не обнаружено.

Заключение. Проведено сравнение механических характеристик образцов, вырезанных из листа сплава системы Al–Mg–Li толщиной 1,5 мм различными методами: методом лазерно-плазменной резки, когда резка осуществляется импульсным CO₂-лазером с модулированной добротностью в струе аргона при одновременном воздействии на материал лазерного излучения и плазмы оптического разряда, и методом обычной лазерной резки с использованием непрерывного излучения, а также импульсного излучения в струе воздуха, когда оптический разряд не формируется. Резка проводилась при давлении технологического газа, равном 0,05 МПа.

Метод лазерно-плазменной резки позволил получить образцы без граты, в то время как на образцах, вырезанных непрерывным излучением, всегда присутствовал грат. С увеличением скорости ширина ЗТВ при лазерно-плазменной резке уменьшается, при скорости $V > 3$ м/мин зависимость становится слабой, грат отсутствует. Образцы вырезались при

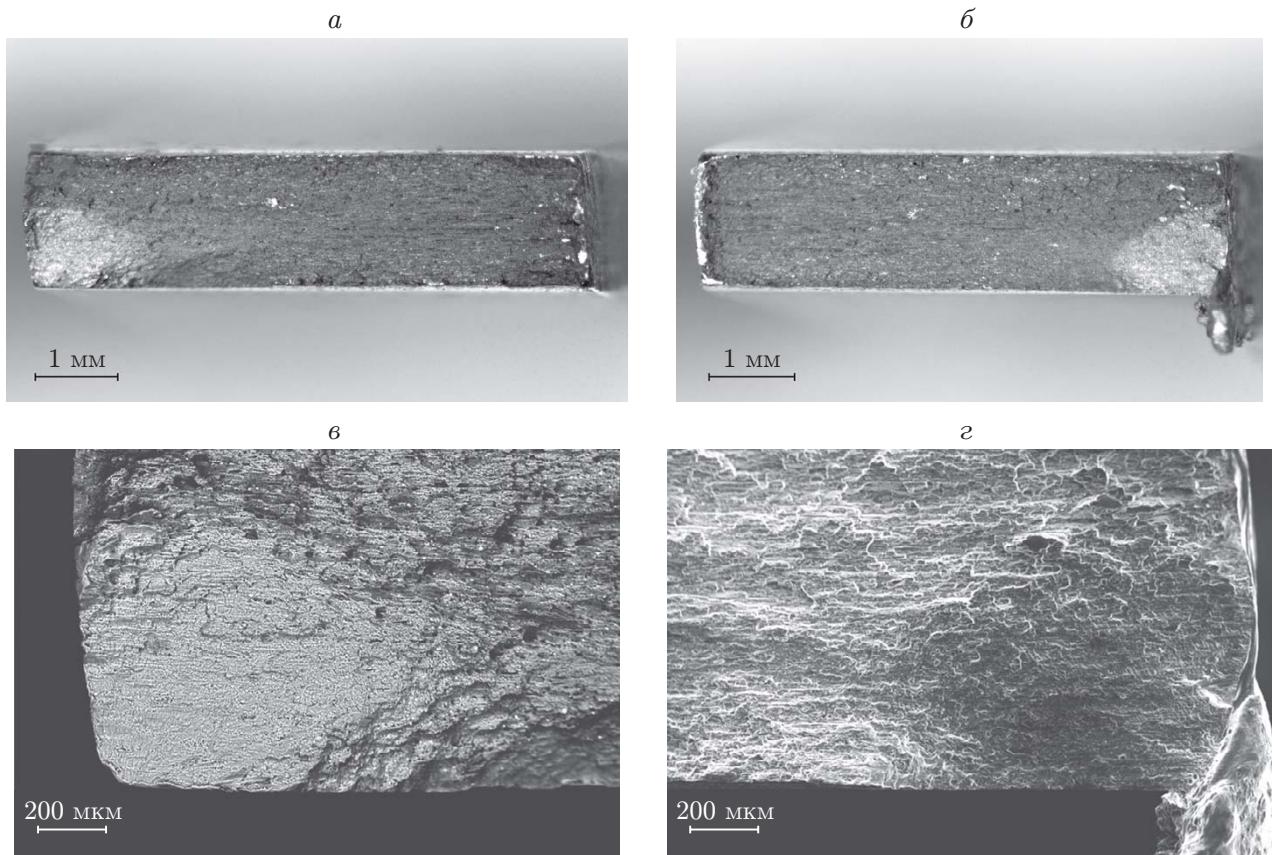


Рис. 5. Поверхности излома при испытаниях на малоцикловую усталость при резке с аргоном:

a, б — общий вид, *в, г* — область зарождения трещины; *a, в* — лазерно-плазменная резка, *б, г* — лазерная резка непрерывным излучением

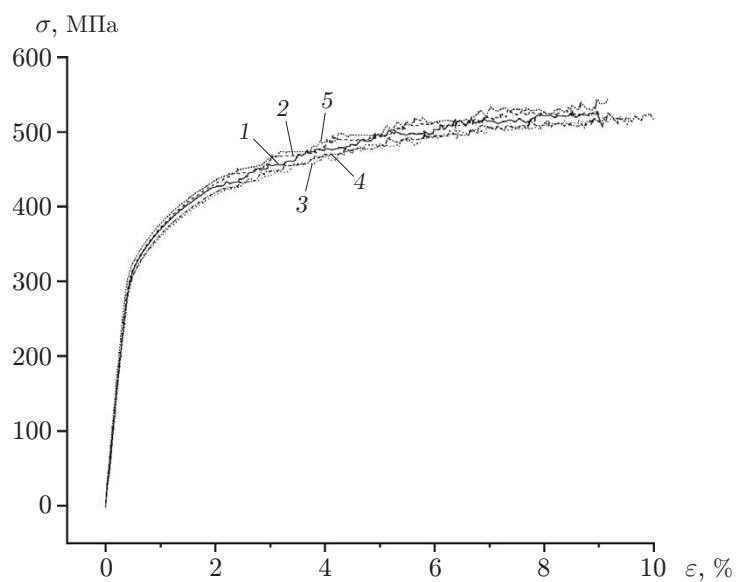


Рис. 6. Диаграмма нагружения при испытаниях на растяжение:

1, 3 — импульсное излучение, *2, 4* — непрерывное излучение; *1, 2* — резка с аргоном, *3, 4* — резка с воздухом; *5* — шлифованный образец, вырезанный механическим способом

скорости $V = 3,8$ м/мин. При испытаниях на растяжение не выявлено какого-либо различия прочности образцов, вырезанных разными методами. По результатам испытаний на малоцикловую усталость количество циклов нагружения, которые выдержал образец, полученный методом лазерно-плазменной резки, более чем в два раза превышает количество циклов, которые выдержали образцы, полученные обычной лазерной резкой непрерывным излучением в струе аргона и воздуха и в 1,4 раза превышает количество циклов, которые выдержал образец, вырезанный импульсным излучением в струе воздуха, когда оптический разряд не формируется. При этом в образце, полученном методом лазерно-плазменной резки, усталостная трещина возникает в области, где приповерхностный слой был удален шлифовкой. Таким образом, при лазерно-плазменной резке необработанная поверхность реза не является дополнительным фактором, инициирующим развитие усталостных трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Маликов А. Г., Оришич А. М., Витошкин И. Е. и др.** Лазерная сварка разнородных материалов на основе титанового сплава BT20 и алюминиевого сплава В-1461 // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 2. С. 175–186.
2. **Pandey A. K., Dubey A. K.** Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of Duralumin sheet // Optics Lasers Engng. 2012. V. 50. P. 328–335.
3. **Leone C., Genna S., Tagliaferri V.** Cutting of AA6061 by a multimode pulsed Nd:YAG laser with high pressure gas: characterization of kerf geometry and quality // Intern. J. Adv. Manufactur. Technol. 2018. V. 94. P. 925–940.
4. **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. 2019. V. 184. P. 457–463.
5. **Stournaras A., Stavropoulos P., Salonitis K., Chryssolouris G.** An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum // CIRP J. Manufactur. Sci. Technol. 2009. V. 2. P. 61–69.
6. **Ullah S., Li X., Guo G., et al.** Energy efficiency and cut-quality improvement during fiber laser cutting of aluminum alloy in the different hardened conditions // Materials Today Comm. 2022. V. 33. 104236.
7. **Riveiro A., Quintero F., Lusquinos F., et al.** Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy // J. Materials Process. Technol. 2010. V. 210. P. 1138–1152.
8. **Riveiro A., Quintero F., del Val J., et al.** Laser cutting of aluminum alloy 2024-T3 // Procedia Manufactur. 2017. V. 13. P. 396–401.
9. **Ullah S., Li X., Guo G., et al.** Influence of the fiber laser cutting parameters on the mechanical properties and cut edge microfeatures of a AA2B06 T4 aluminum alloy // Optics Laser Technol. 2022. V. 156. 108395.
10. **Carpio F. D., Araujo D., Pacheco F. J., et al.** Fatigue behavior of laser machined 2024 T3 aeronautic aluminum alloy // Appl. Surface Sci. 2003. V. 208/209. P. 194–198.
11. **Григорьев М. В., Огладков М. С.** Влияние механической обработки на механические и усталостные свойства листов из алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1481 // Тр. ВИАМ. 2018. № 4. С. 20–27.
12. **Shulyatyev V., Malikov A., Orishich A.** The effect of assist gases on the quality of edge surface of Al-Li alloys cut with a pulsed Q-switched CO₂ laser // Optik. 2021. V. 231. 166420.
13. **Райзэр Ю. П.** Оптические разряды // Успехи физ. наук. 1980. Т. 132, № 3. С. 549–581.

14. **Маликов А. Г., Оришич А. М., Витошкин И. Е. и др.** Лазерная сварка разнородных материалов на основе термически упрочняемых алюминиевых сплавов // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 5. С. 161–171.
15. **Malov A., Orishich A., Shulyatyev V.** High-power repetitively pulsed CO₂ laser with mechanical Q-switching and its application to studies in aerodynamic installations // Quantum Electron. 2011. V. 41. P. 1027–1032.
16. **Hirano K., Fabbro R.** Possible explanations for different surface quality in laser cutting with 1 and 10 μm beams // J. Laser Applicat. 2012. V. 24. 012006.
17. **Прохоров А. М.** Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров, В. И. Конов, И. Н. Михэйлеску. М.: Наука, 1988.
18. **Бобарыкина Т. А., Чиркашенко В. Ф., Яковлев В. И. и др.** Оптический разряд с поглощением импульсно-периодического излучения CO₂-лазера в сверхзвуковом потоке воздуха: волновая структура и условие квазистационарности // Квантовая электрон. 2014. Т. 44, № 9. С. 836–840.

*Поступила в редакцию 20/VI 2023 г.,
после доработки — 30/VIII 2023 г.
Принята к публикации 1/IX 2023 г.*
