

---

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

---

---

УДК 621.96

**РАСКРОЙ ПОЛУФАБРИКАТОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВОВ ТИТАНА  
МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ****© 2025 г. С. Н. Полянский<sup>1, \*</sup>, С. В. Бугаков<sup>2</sup>, Л. В. Мальцев<sup>2</sup>,  
И. С. Ольков<sup>2</sup>, В. А. Александров<sup>3</sup>**<sup>1</sup> *Компания «Инновационные технологии», Екатеринбург, Россия*<sup>2</sup> *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия*<sup>3</sup> *Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия  
\*e-mail: psn50@mail.ru*

Поступила в редакцию 07.06.2024 г.

После доработки 11.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

В статье рассмотрен раскрой полуфабрикатов и изделий из сплавов титана методом лазерной резки. Изучен мировой рынок потребителей и производителей систем лазерной обработки. Проведены опытные работы на натуральных образцах горячедеформированных плит и штамповок. Выполнена оценка производительности и показателей качества поверхности плоскости реза. Представлены результаты исследований показателей качества поверхности плоскости реза и приповерхностных зон термического влияния.

*Ключевые слова:* резка, титан, толстые плиты, показатели качества поверхности плоскости реза, лазер волоконный, вспомогательный газ

**DOI:** 10.31857/S0235711925020114, **EDN:** DFRPGB

Разработчик производственного процесса резки и раскроя изделий и полуфабрикатов стоит перед выбором наиболее рационального метода для каждого конкретного предприятия. Эффективность процесса разделительной резки металла характеризуется производительностью и качеством. Оптимальное решение зависит от правильного выбора метода резки, параметров режима и конструкции. При выборе метода резки все большее значение приобретают показатели качества поверхности (ПКП) плоскости реза и приповерхностных зон металла.

В процессе разработки, как правило, рассматривают две ведущие технологии: лазерная (ЛР) и гидроабразивная резка (ГАР). Стоимость станков ГАР ниже стоимости аналогичного оборудования ЛР. Технология ГАР наиболее универсальна, в то же время лазер — это уникальная скорость и точность при резке металлов толщиной до 25.4 мм. В сравнении с ЛР ГАР имеет более высокие расходы на эксплуатацию и обслуживание. ЛР доминирует в процессах резки изделий из среднеуглеродистых сталей; ГАР — это «швейцарский нож» для инструментальных сталей [1].

При изготовлении деталей, близких по форме к конечному продукту, технология ГАР имеет преимущества, поскольку отсутствует зона термического влияния (ЗТВ). Это особенно важно при резке больших толщин и высоколегированных материалов.

Высокая стоимость разрезаемого материала (титановые сплавы и т.п.) требует применения метода резки с минимальным количеством потерь металла при условии

получения требуемых ПКП плоскости реза. В этом случае производительность операции отступает на второй план.

Низкая производительность процесса, в частности, ГАР, требует для выполнения производственной программы большого количества оборудования и производственных площадей, повышенных затрат на обслуживание.

Преимущества ЛР: высокая скорость и точность, экономия материала за счет малой ширины пропила и сравнительно низкой величины ЗТВ для операций термической резки, отсутствие деформаций обрабатываемых материалов, изготовление сложнейших форм и получение отверстий малого диаметра [2].

Главным минусом ЛР является ограниченность по толщине прорезаемых материалов. Традиционные системы ЛР не позволяют использовать технологию для деталей толщиной, превосходящей 25–30 мм. Также следует отметить высокую стоимость оборудования для резки металла лазером.

В последнее десятилетие ЛР претерпевает изменения. На смену газовым CO<sub>2</sub> лазерам на сцену вышел силовой волоконный лазер. Волоконный лазер в 3 раза эффективнее CO<sub>2</sub> лазера, имеет меньшую стоимость обслуживания и более высокую продолжительность работы. Следующую генерацию систем лазерной резки называют прямодиодным лазером. Для сравнения эффективность (КПД) CO<sub>2</sub> лазера составляет 10%, волоконного 30%, диодного — до 50 [3].

Новые генерации систем ЛР имеют наиболее высокие показатели скорости реза, точности, КПД, надежности и ресурса по сравнению с традиционными системами лазерной обработки. Стоимость инновационных систем ЛР ниже традиционных аналогов. Также повышена стойкость компонентов и снижены трудозатраты на обслуживание систем.

Выполнен анализ мирового рынка машин ЛР в период 2023–2032 гг. [4]. Показаны размеры рынка, тренды, технологии и пользователи машин, а также сделан прогноз развития. Мировой рынок машин ЛР вырастет от \$4.56 млрд до \$7.3 млрд в 2027 г. Среднегодовой рост составит 9.8%. В перечень ключевых продавцов включены: Bystronic; Coherent; IPG Photonics; Mazak Optonics; TRUMPF [5].

Аналогичный анализ проведен в исследовании [6, 7]. Отмечается увеличение доли волоконных лазеров в процессах резки, сварки и др. Перечень ключевых игроков полностью совпадает с предыдущим анализом работы [4]. В работе [8] проведено изучение глобального рынка лазеров высокой мощности. Изучены производители, области применения и рынки. Среди производителей выделяют явных лидеров компании IPG Photonics; TRUMPF; Rofin; Coherent [9].

Компания IPG Photonics [5] является мировым лидером производства силовых волоконных лазеров. Доля компании в этом сегменте рынка составляет 80% [9], НТО «ИРЭ-Полюс» (Фрязино) входит в состав IPG Photonics. Достоинства силовых волоконных лазеров и новые разработки источника высокой мощности представлены в работе [10].

На основании проведенного анализа можно утверждать, что лазерная обработка является одной из приоритетных технологий в операциях обработки материалов, а также одной из последних новаций производителей компонентов и полуфабрикатов из сплавов титана для авиакосмической индустрии.

Анализ метода лазерной резки и раскроя изделий и полуфабрикатов показывает тенденцию продвижения в направлении роста толщины в операциях резки металла, в том числе титановых плит до 30–70 мм [10, 11]. ЛР вытесняет плазменную резку из этого диапазона толщин. Мощность используемых на производстве волоконных лазеров, соответственно, увеличивается с 3–6 кВт до 15–25 кВт, что расширяет не только диапазон использования машин, но и значительно повышает их производительность.

Проведено изучение ПКП плоскости реза и приповерхностных зон металла. Представлены методы математического моделирования и изучения физики процесса в широком диапазоне интенсивности лазерного излучения и свойств обрабатываемых материалов [12]. Отмечена важность снижения бороздчатости в процессе ЛР толстых плит.

В работе [13] исследовали отклонение от перпендикулярности плоскости реза и шероховатость поверхности в процессе ЛР листов титана Grade 5 (Ti6Al4V). Найдены зависимости параметров ЛР на ПКП плоскости реза (отклонение от перпендикулярности и шероховатость). Оптимальный выбор газа или смеси газов позволяет минимизировать стоимость резки при одновременном росте производительности.

В работе [14] проведены исследования поверхности плоскости реза и приповерхностных зон. Определены величины ЗТВ, твердости, шероховатости, высоты заусенцев [14]. В ходе испытаний использовали широко используемый в авиационной промышленности сплав Ti6Al4V [14]. В результате определили, что толщина металла и скорость резки оказывают наибольшее воздействие на ПКП. Для решения задачи предлагают повысить мощность излучения и увеличить давление газа. Было показано, что это приводит к превышению шума в зоне обслуживания [14].

Представлены решения для улучшения характеристик ПКП плоскости реза [15]. Выполнены исследования по оптимизации величины пропила, отклонения от перпендикулярности и шероховатости поверхности плоскости реза плит из сплава Ti6Al4V в процессе резки CO<sub>2</sub> лазером.

В работах [16, 17] представлено изучение влияния вспомогательного газа в операции ЛР листов из сплава Ti6Al4V. Цель исследований состоит в оценке влияния на ПКП плоскости реза вспомогательного газа (аргон, азот).

В результате анализа работ по изучению и исследованию процесса ЛР изделий, в том числе из сплавов титана, сформулированы основные положения и зависимости для оценки ПКП.

При ЛР величину отклонения от перпендикулярности кромки и количество окарины можно уменьшить или ликвидировать путем подбора оптимальных параметров, таких, как скорость и направленность реза, высота сопла над поверхностью металла, мощность источника.

Вспомогательный газ — ключевой переменный параметр, который определяет ПКП плоскости реза. Выбор вспомогательного газа — аргон, азот, сжатый воздух — определяет продолжительность и стоимость операции.

Чем выше чистота реза, тем больше расход вспомогательного газа [12].

Для резки титана наиболее предпочтительными являются инертные газы, такие, как аргон и гелий или смеси аргона с гелием [16]. Обычно применяют смесь с 25% гелия, хотя иногда необходима смесь с 50% гелия. Использование аргона и азота по сравнению с иными газами, например, с применением гелия, значительно снижает затраты.

Величина давления и расход технологического газа позволяет осуществлять продувку расплавленного металла на всю толщину сечения, что определяет ПКП и обеспечивает достижение минимальных значений отклонения от перпендикулярности и ширины пропила.

Правильный выбор параметров вспомогательного газа уменьшает величину газонасыщенного т.е. альфированного слоя на поверхности реза, и, соответственно, снижает потери металла и затраты на операции удаления дефектного слоя кромки реза.

Геометрические ПКП (отклонение от перпендикулярности, шероховатость, бороздчатость и дефекты) поверхности плоскости реза зависят от скорости резки и рабочего источника. Чем ниже скорость и выше мощность, тем меньше шероховатость, но тем больше перегрев кромки. Низкая скорость резки приводит к увели-

чению ширины пропила и увеличивает размер ЗТВ. Перегрев кромок реза изменяет фазовый состав сплава Ti6Al4V.

Высокая скорость резки обеспечивает меньшую зону, подвергнутую тепловому воздействию, которая требует меньше времени на вторичную обработку для ее удаления. При превышении скорости возможно непрорезание металла по толщине.

Анализ тенденций развития технологии и оборудования резки и раскроя металлических изделий позволяет сделать вывод об актуальности работы по решению задачи раскроя плит среднего диапазона толщин, в частности, из титановых сплавов.

Рост объема производства изделий из сплавов титана послужил поводом для изучения возможности применения технологии ЛР в процессах удаления облоя штамповок и изготовления компонентов из плит титановых сплавов толщиной (10–60 мм).

**Цель опытных работ** — определение параметров резки для получения максимальной производительности с получением требуемых ПКП и приповерхностных зон металла. Критерием оценки качества приповерхностных слоев служит величина зоны термического влияния (ЗТВ). Так же, как и геометрические характеристики плоскости реза (отклонение от перпендикулярности, шероховатость, бороздчатость и дефекты).

Уровень требований оценки ПКП установили из условия получения качества разделительного реза. (ГОСТ Р ИСО 9013-2022. Резка термическая. Классификация резов. Геометрические характеристики изделий и допуски по качеству).

При подготовке опытных работ изучены рекомендации ведущих мировых производителей компонентов из сплавов титана (ВСМПО, Timet etc.).

Требования к ПКП реза, виды дефектов и др. приведены в стандарте DIN EN ISO 9013 и ГОСТ 14792.

Выполнены опытные и исследовательские работы по изучению показателей ПКП, размера ЗТВ, параметров технологического процесса.

Важно отметить, что величина ЗТВ не должна превышать величины припуска на механическую обработку изделий.

Представлены результаты опытных работ и исследований ПКП и приповерхностных зон плоскости реза.

Ключевым варьируемым параметром установили скорость относительного перемещения «инструмент–деталь» в операции раскроя изделий из сплавов титана толщиной 10–60 мм.

Для выполнения поставленных задач выбраны системы лазерной обработки компании IPG Photonics.

Изготовлен роботизированный комплекс лазерной резки (РКЛР) для удаления облоя штамповок и раскроя плит из сплавов титана (рис. 1).



Рис. 1. Установка лазерной резки LASER CUT 3015-3-2-S.

Силовой источник — иттербиевый волоконный лазер ЛС-20 (IPG/ИРЭ-Полус). Мощность лазера составляет 20 кВт. Длина волны 1060–1080 нм. Режим работы постоянный, либо импульсный. Фокусное расстояние линзы 400 мм. Расходомер вспомогательного газа Bronkhorst IN-FLOW F-116 AL-AGD-44-V.

В качестве вспомогательного газа применяли аргон, азот, сжатый воздух. Резку проводили при давлении вспомогательного газа 20–26 бар.

Точность перемещения обеспечивается промышленным роботом KUKA KR C4. Повторяемость позиционирования робота  $\pm 0.05$  мм. Габарит: 6000 × 2100 × 800 мм. Масса 6000 кг.

После операции резки для проведения опытов отбирали темплеты от натуральных полуфабрикатов на фиксируемой стадии изготовления. От каждого темплета вырезаны и изготовлены образцы. Толщина образцов 10–60 мм с шагом 5 мм. Комплект образцов включает участки прямого и криволинейного реза, входа/выхода струи лазера.

Проведены макро- и микроанализ поверхности плоскости реза и зон материала образцов, прилегающих к границе реза. Кроме того, измеряли микротвердость по глубине зоны реза прибором ПМТ-3М.

Контроль геометрических размеров обработанного изделия производили индивидуальным шаблоном, ПКП плоскости реза поверхности проверяли визуально по эталону сравнения.

Для опытов выбран сплав Ti6Al4V. Состояние металла темплетов — горячедеформированное после термообработки.

Проведен выбор оптимальных режимов работы системы лазера на натуральных горячедеформированных плитах и штамповках серийного производства.

Согласно условиям исследований, образцы для определения ЗТВ должны быть изготовлены из того же сплава и в том же состоянии, что и обрабатываемое в дальнейшем изделие.

После химического осветления поверхности образцов поковки производили контроль геометрических размеров, осуществляли исследование поверхности реза и приповерхностных участков металла.

Проведен раскрой титановой плиты толщиной 55 мм с помощью лазера ЛС-20 мощностью 10, 15, 20 кВт в среде азота и аргона (табл. 1).

**Таблица 1.** Зависимость скорости резки от мощности лазера и типа вспомогательного газа

№ темплета	Мощность излучения, кВт	Скорость резки, мм/мин	Тип газа
1	10	175	Азот
2	10	190	Аргон
3	15	300	Аргон
4	20	400	Аргон

Поверхность реза плит из сплава Ti6Al4V толщиной 55 мм с применением азота — без металлического блеска, окисленная, коричнево-желтого цвета, имеется участок с цветами побежалости голубого и желтого цвета. На поверхности выхода лазера характерно наличие цветов побежалости по периметру и наличие грата (рис. 2а). Использование аргона позволяет устранить эти недостатки (рис. 2б).

Макро- и микроструктура исследованы в сечениях через участки с цветами побежалости, с выходом на поверхность резания. Макроструктура образцов матовая, ЗТВ блестящая, выявлено, что величина ЗТВ выше в зоне с более глубоким рельефом.

Рельеф поверхности реза толщины 55 мм визуально разделяют на части: с неглубокими бороздками (расстояние от поверхности до 15 мм), и далее глубина бороздок увеличивается с максимальным ухудшением на выходе струи.

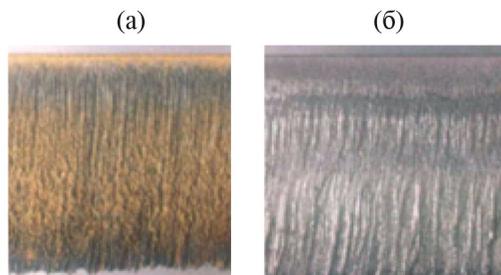


Рис. 2. Плоскость поверхности реза лазером плиты Ti6Al4V толщиной 55 мм: (а) — азот; (б) — аргон.

Показано, что глубина ЗТВ достигает 940 мкм на входе струи и 3600 мкм на выходе струи, значение микротвердости на входе достигает 436 HV<sub>0,1</sub>, что на 20% превышает соответствующее значение основного металла; и достигает 975 HV<sub>0,1</sub> на выходе струи, что на 65% превышает соответствующее значение основного металла.

Отмечено, что измерения глубины ЗТВ различными методами практически совпадают, с погрешность прибора в пределах измерения.

Установлено, что содержание кислорода на участке с окалиной на боковой кромке превышает содержание кислорода в основном металле в 26 раз; на участке в области грата на поверхности выхода луча лазера — в 56 раз.

Предполагается, что участки поверхности с высоким содержанием газовых примесей и микротвердостью до 1887 HV являются потенциальными источниками газонасыщенных дефектов.

Показана возможность резки плит из сплава титана Ti6Al4V лазером мощностью в пределах 10–20 кВт. Определены скорости полного прорезания толщины 55 мм для мощности 10 кВт — 190 мм/мин; 15 кВт — 300 мм/мин.; 20 кВт — 400 мм/мин с применением аргона в качестве защитного газа, ЗТВ не превышает 3.5 мм. При указанных скоростях ПКП реза соответствуют категории качества разделительного реза. Применение азота приводит к снижению производительности и ухудшению ПКП реза. Так скорость резки составила 170 мм/мин. при мощности лазера 10 кВт [16]. Использование сжатого воздуха в качестве вспомогательного газа повышает глубину газонасыщенного слоя до 9500 мкм с величиной микротвердости 1413 HV<sub>0,1</sub>.

Проведены работы по удалению облоя натуральных штамповок из сплавов титана. При выполнении работ использовали лазер ЛС-20 мощностью 20 кВт, вспомогательный газ — аргон. Перед началом операции штамповку позиционировали на универсальном ложементе (рис. 3).



Рис. 3. Установка штамповки перед операцией резки.

В ходе экспериментов определили скорость резки и расходы основных материалов. Скорость принимали в зависимости от требуемых ПКП разрезаемых сечений (табл. 2).

**Таблица 2.** Параметры операции резки

№ поковки	Скорость резки, мм/мин	Периметр контура реза, м	Продолжительность обрезки облоя, с	Расход аргона, м <sup>3</sup> /шт.
1	1200	4.486	236	5.3
2	800	6.146	412	9.2
3	1000	4.564	277	5.3
4	1000	2.149	156	3.1
5	1200	4.478	234	5.1
6	1000	4.208	264	6.0

Установлен диапазон скоростей в пределах 800–1200 мм/мин для резки облоя средней толщиной 34 мм. Продолжительность операции удаления облоя составляет 156–277 с в зависимости от периметра штамповки. Расход вспомогательного газа (аргон) составил 65–82 м<sup>3</sup>/ч.

Внешний вид получаемого изделия показан на рис. 4.

Качество плоскости реза можно оценить по фотографии (рис. 5).



**Рис. 4.** Штамповка с удаленным облоем.



**Рис. 5.** Поверхность плоскости реза лазером.

На основе анализа результатов опытов сделаны выводы и составлена программа работ по оптимизации операции ЛР.

Намечен путь снижения расхода вспомогательного газа за счет применения сопел меньшего диаметра.

В процессе резки наблюдали неоднородность ПКП на отдельных участках периметра. Так, при обработке штамповки № 2 наблюдали единичные участки с окрашиванием кромок цветами побежалости (рис. 6).

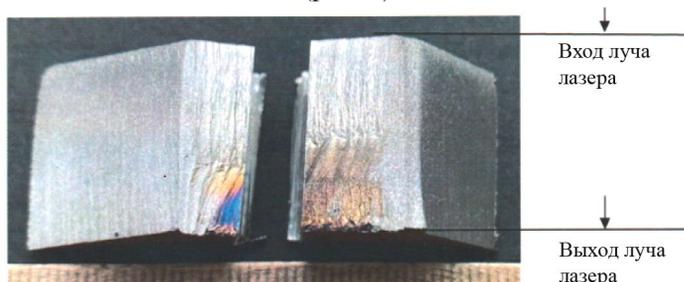


Рис. 6. Шероховатость поверхности плоскости реза поковки из сплава Ti6Al4V, высота грата 34 мм (20–40 мм).

Для устранения этого дефекта и оптимизации режима резки необходимо предварительно определять толщину металла по длине реза. Подобные дефекты наблюдали при резке штамповки № 1 и № 5. В этом случае причиной образования дефекта являлась неоднородность структуры металла, в частности, вследствие наличия трещин.

Микрошлифы изготавливали по стандартной методике. Микроструктуру выявляли в водном азотно-плавиковом растворе. Анализ микроструктуры производили на оптическом микроскопе OLYMPUS GX74 при увеличении  $\times 50$ ,  $\times 100$ ,  $\times 500$ .

За размер ЗТВ принимается толщина области разогрева до  $\beta$ -области + область с ( $\alpha + \beta$ ) измененной структурой.

Изучено поле рассеивания дефекта (ЗТВ) на входе и выходе луча лазера. Подготовлена партия образцов идентичной толщины от серийной партии горячедеформированного полуфабриката.

Выполнено исследование микроструктуры поверхности образцов ЛР плиты сплава Ti6Al4V толщиной 20 мм. Для испытаний представлено 10 образцов. Параметры реза — мощность 12 кВт, режим работы импульсный, скорость резки 650 мм/мин, вспомогательный газ аргон, давление газа 20 бар.

В результате металлографических исследований величины ЗТВ определены значения на входе и выходе струи лазера. Отмечен высокий разброс полученных результатов: на входе 190–436 мкм; на выходе 1800–3425 мкм. Средняя величина ЗТВ на входе составила 321 мкм, на выходе 2537 мкм.

Показана микроструктура образца облоя штамповки Ti6Al4V на входе и выходе струи лазера (рис. 7).

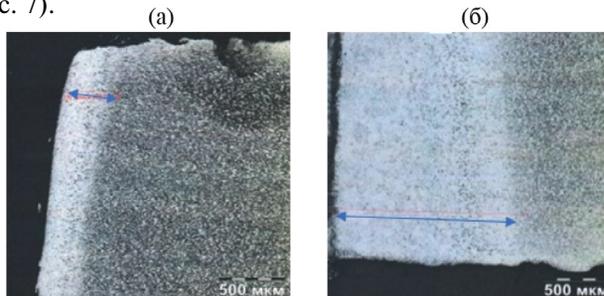


Рис. 7. Микроструктура поверхности плоскости реза поковки из сплава Ti6Al4V, толщина (средняя) грата 34 мм: (а) — вход луча лазера; (б) — выход луча лазера.

В результате исследований установлено, что величина ЗТВ составляет 1–7% от толщины реза. В области ЗТВ образцов Ti6Al4V обнаружены несплошности и трещины.

Выполнено измерение микротвердости участков ЗТВ и основного металла на фиксируемом расстоянии от поверхности плоскости реза (табл. 3).

**Таблица 3.** Микротвердость приповерхностных слоев сплава Ti6Al4V

Область исследования	Расстояние от поверхности, мкм	Микротвердость, НВ
Окалина	60	518–589
Зона переходная	350	382–415
Основной металл	1200	352–373

Наклеп поверхностного слоя составляет 32.0–36.67%.

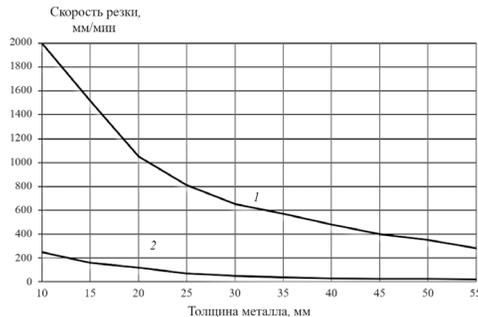
Малая ширина реза минимизирует потери металла, что свидетельствует об эффективности метода ЛР (табл. 4).

**Таблица 4.** Потери металла в зависимости от ширины реза

№ п/п	Толщина, мм	Ширина реза, мм	Потери металла, кг/п.м
1	20	1.5	0.135
2	30	2.0	0.270
3	40	2.5	0.450
4	50	3.0	0.675

Изучено изменение скорости в зависимости от толщины разрезаемого материала и влияние скорости на величину ЗТВ.

Проведены испытания ЛР горячедеформированных плит сплава Ti6Al4V толщиной 10–60 мм. Изучено изменение скорости реза с ростом толщины металла. Значение скорости устанавливали из условия получения ПКП плоскости реза требуемого качества. Категория разделительного реза соответствует Q1 [19, 20]. Данные представлены в сравнении с аналогичными значениями, полученными в процессе гидроабразивной резки с категорией разделительного реза, Q1 (рис. 8).



**Рис. 8.** Зависимость скорости резки плит из сплава титана от толщины металла (разделительный рез): 1 – лазер; 2 – ГАР Q1.

С ростом толщины разрезаемого металла в пределах 10–60 мм скорость разделительного реза методом ЛР уменьшается в 4 раза. По сравнению с гидроабразивной резкой плит толщиной 10 мм скорость ЛР превышает аналогичный параметр ГАР при толщине плит 10 мм в 8 раз, толщиной 60 мм — в 2 раза.

Опыт эксплуатации промышленной системы лазерной резки показал эффективность и надежность работы [18]. Освоен процесс удаления облоя всего сортамента изготавливаемых штамповок. Разработан технологический регламент производственного процесса.

В результате обеспечивается увеличение производительности резки при повышении точности геометрических размеров обрабатываемых поковок, а также снижение безвозвратных потерь металла за счет уменьшения ширины реза при сохранении возможности вовлечения отходов в переплав.

Показана эффективность метода ЛР в операциях резки и раскроя изделий и полуфабрикатов из сплавов титана. Высокая производительность ЛР позволяет сократить производственные площади и снизить эксплуатационные затраты. При этом безвозвратные потери металла в операции ЛР и затраты на операцию удаления ЗТВ компенсирует высокая производительность и точность. Потери металла в зазоре в операции резки методами ЛР и ГАР идентичны.

**Вывод.** Метод ЛР позволяет экономично производить изделия с получением требуемых ПКП плоскости реза и размеров изделий в пределах допуска. Показана возможность резки плит из сплава титана Ti6Al4V волоконным лазером мощностью в пределах 10–20 кВт. Установлены скорости полного прорезания изделий из сплавов титана толщиной 10–60 мм. ПКП плоскости реза соответствуют категории качества разделительного реза. В качестве вспомогательного газа используют аргон.

**Финансирование.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giordano G.* Which Cut is Best, Water or Laser? July 14, 2021. SME Media. URL: <https://www.sme.org/technologies/articles/2021/july/which-cut-is-best-water-or-laser/>
2. Laser cutting. October 24, 2023/ URL: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/laser-cutting/>.
3. *Olexa C. C.* The Future of Laser Technology. August 27, 2014. URL: <https://fsmdirect.com/the-future-of-laser-technology/>
4. The laser Cutting Machine Global Market. 2024–2033/ Published Jan. 2024. URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/laser-cutting-machine-global-market-report>
5. Laser Cutting Machines Market report summarizes top key players overview as TRUMPF, Coherent, Inc, IPG Photonics Corporation, FANUC Corporation, among others. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/laser-cutting-machines-market-102879>
6. Global Laser Cutting Machines Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Technology (Solid-State lasers, Gas Lasers, and Semiconductor Laser), Process (Fusion Cutting, Flame Cutting, and Sublimation Cutting), and End User (Automotive, Consumer Electronics, Defense and Aerospace, Industrial, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2014–2022. May 2017. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/laser-cutting-machines-market>
7. Global Laser Cutting Machines Market by Technology (Solid-State lasers, Gas. URL: [https://reportocean.com/industry-verticals/sample-request?report\\_id=31057](https://reportocean.com/industry-verticals/sample-request?report_id=31057)
8. *Kimla P.* Realities of high-power fiber laser cutting. Nov. 17, 2021. URL: <https://www.industrial-lasers.com/cutting/article/14212263/realities-of-highpower-fiber-laser-cutting>
9. *Sarrafi R., Jia J., Zhang J., Mendes M.* Advances in cutting with ultrahigh-power fiber lasers. Sept. 20, 2022. URL: <https://www.laserfocusworld.com/laser-processing/article/14282662/advances-in-cutting-with-ultrahighpower-fiber-lasers>

10. *Shcherbakov E. A., Fomin V. V., Abramov A. A., Ferin A. A., Mochalov D. V., Gapontsev V. P.* Industrial grade 100 kW power CW fiber laser in Advanced Solid-State Lasers Congress / Eds. G. Huber, P. Moulton. OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2013), paper ATh4A.2. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ASSL-2013-ATh4A.2>
11. *Игнатов А. Г.* Новые тенденции в лазерном раскрое металла // РИТМ машиностроения. 2019. № 7. С. 20. URL: <https://ritm-magazine.com/ru/public/novye-tendencii-v-lazernom-raskroe-metalla>
12. *Kovalev O. B.* Actual principles of the simulation of state-of-the-art technologies of laser processing of materials // Proc. SPIE7996, Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies 2010. 2011. Т. 7996. 799602. <https://doi.org/10.1117/12.887239>
13. *Polyanski S. N., Butakov S. V., Mal'tsev L. V., Olkov I. S., Popov M. A., Leder M. O.* Cutting Methods for Thick Titanium Alloy Slabs // Russian Engineering Research. 2018. V. 38 (9). P. 694. <https://www.metalforgingmagazine.com>
14. *Boudjemline A., Boujelbene M., Bayraktar E.* Surface Quality of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Parts Machined by Laser Cutting // Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 2020. V. 10 (4). P. 6062.
15. *Andersson N., Granberg C.* Laser cutting in Ti-6Al-4V sheet: DOE and evaluation of process parameters Informative. Diploma work. Department of Materials and Manufacturing Technology. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology. 2015. 38 p. URL: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/212a684c-ccad-4875-93e0-b116f12816a/content>
16. *Riveiro A., Quintero F., Boutinguiza M., Del Val J., Comesaña R., Lusquiños F., Pou J.* Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas // Materials 2019. V. 12. P. 157. <https://doi.org/10.3390/ma12010157>
17. *Сморозин Ф. К., Хайруллина Л. Р.* К исследованию процесса лазерной резки титана в газовой струе кислорода и азота // Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах. 2014. Вып. 2 (42). Т. 20. С. 87.
18. *Ледер М. О., Соколов К. В., Бровин М. А., Попов М. В., Полянский С. Н.* РФ Патент 2695092. Способ обрезки облоя штампованных поковок из титановых сплавов, 2019. 8 с.
19. Взаимосвязь параметров реза. URL: <https://jetdivision.ru/stati/2-statya-1.html>
20. *Alsoufi M. S., Suker D. K., Alsabban A. S., Azam S.* Experimental Study of Surface Roughness and Micro-Hardness Obtained by Cutting Carbon Steel with Abrasive WaterJet and Laser Beam Technologies // American Journal of Mechanical Engineering. 2016. V. 4 (5). P. 173.