

ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А. Г. Сухов¹, д. т. н., М. М. Малыш¹, к. т. н.,
 М. О. Ледер², С. В. Леднов²
¹ЗАО "РЦЛТ", <http://rc.lt.pf>, Екатеринбург,
 Россия;
²ПАО "Корпорация "ВСМПО-Ависма", Верхняя
 Салда, Свердловская область, Россия

Лазерная резка обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами резки, но процессы лазерной резки титановых сплавов изучены мало. В статье приведены результаты исследований, которые раскрывают возможности применения лазерной резки для изготовления деталей из титановых сплавов сложной формы с элементами малых размеров, а также для резки деталей больших толщин.

В настоящее время широко применяются методы резки металла с использованием высококонцентрированных источников энергии [1]. Одним из перспективных процессов является газолазерная резка, основанная на механизме разрушения металлов плавлением или испарением с выдуванием продуктов расплава из зоны реза различными газами. Лазерная резка обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами резки, основными из которых являются следующие:

- возможность резки объемных изделий;
- локальность воздействия, отсутствие контакта с обрабатываемым изделием;
- малая зона термического влияния;
- отсутствие поволоки и короблений деталей;
- высокая скорость и точность обработки;
- энергосбережение, минимизация отходов;
- отсутствие потребности в финишных операциях;
- универсальность, возможность обработки различных материалов.

Процессы лазерной резки титановых сплавов мало изучены и касаются в основном резки с использованием инертных газов [2, 3]. Ниже представлены результаты исследования лазерной резки титанового сплава VST-2 толщиной 3 мм; 6,5 мм; 9 мм и 12 мм. Резка производилась на лазерных комплексах: TRUMPF TruLaser 5030 Classic, оснащенный CO₂-лазером мощностью 6 кВт, и TLC1005 с CO₂-лазером мощностью 5 кВт.

LASER CUTTING OF TITANIUM ALLOYS

A. G. Sukhov¹, Doc. of Tech. Sc., M. M. Malysh¹, Cand. of Tech. Sc., M. O. Leder², S. V. Lednov²,
¹JSC "RCLT", www.en.rc.lt.pf, Ekaterinburg, Russia;
²PSC "VSMPO-Avisma Corporation",
www.vsm-po.ru, Verkhnyaya Salda, Sverdlovsk region, Russia

Laser cutting has several advantages in comparison with other cutting methods, but laser cutting processes of titanium alloys have been studied little. The results of the experiments are given in the article. They have shown the possibility of using laser cutting for the manufacture of parts from titanium alloys of complex shape with small elements, and also its application for cutting large-thickness parts.

At present, methods of cutting metal using highly concentrated energy sources are widely used [1]. One of the promising processes is gas-laser cutting, based on the mechanism of destruction

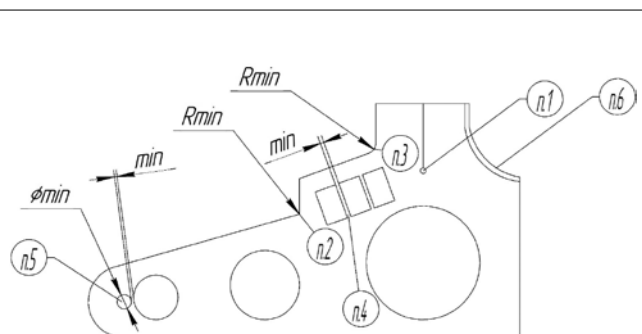


Рис. 1. Схема исследования образца лазерной резки: п. 1 – врезка с последующим прямолинейным резом; п. 2 – резка минимально-возможного внутреннего радиуса с остановкой; п. 3 – резка минимально возможного внутреннего радиуса без остановки; п. 4 – резка минимально-возможной технологической перемычки; п. 5 – вырезка круглого отверстия минимально возможного диаметра; п. 6 – резка с наклоном (получение фаски под сварку)

Fig. 1. Scheme of the laser cutting sample: p.1 – insert with subsequent rectilinear cut; p.2 – cutting the minimum possible internal radius with a stop; p.3 – cutting the minimum possible internal radius without a stop; p.4 – cutting the minimum possible technological jumper; p.5 – cutting a circular hole of the minimum possible diameter; p.6 – cutting with tilt (obtaining a bevel for welding)

Режущий газ – гелий; сопло с выходным диаметром 2,3 мм. Режимы резки образцов указаны в табл. 1.

Резка осуществлялась по схеме (рис. 1), разработанной с учетом целей оптимизации эксперимента по лазерной резке изделий с различной геометрией и последующих исследований образцов с интересующими зонами.

Для толщин 9 мм и 12 мм отсутствует зона п. 6 – резка с наклоном. На рис. 2 и 3 представлен внешний вид исследуемых образцов: а – поверхность входа лазерного излучения; б – поверхность выхода лазерного излучения. Поверхности входа луча лазера для разных толщин идентичны.

of metals by melting or evaporation with the blowing of melt products from the cutting zone by means various gases. Laser cutting has several advantages in comparison with other cutting methods, the main ones being the following:

- possibility of cutting large-volume products;
- locality of exposure, absence of contact with the workpiece;
- small zone of thermal influence;
- absence of deformation and warping of details;
- high speed and accuracy of processing;
- energy saving, waste minimization;
- no need for finishing operations;
- versatility, possibility of processing various materials.

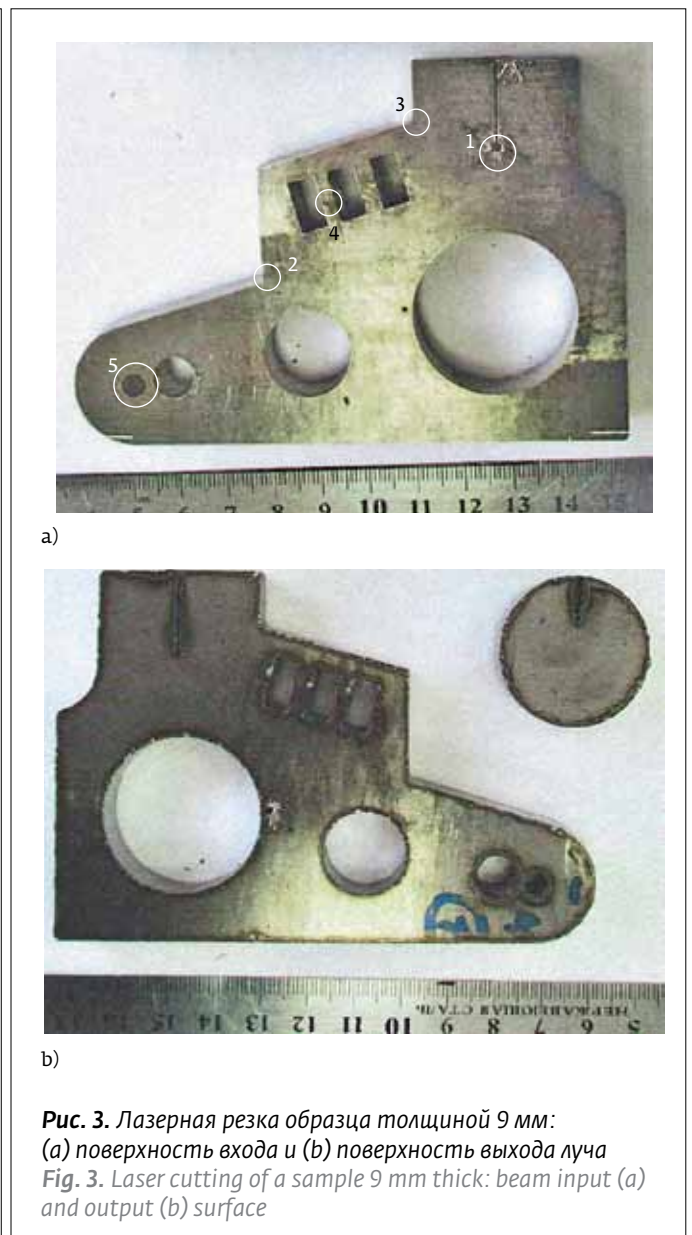
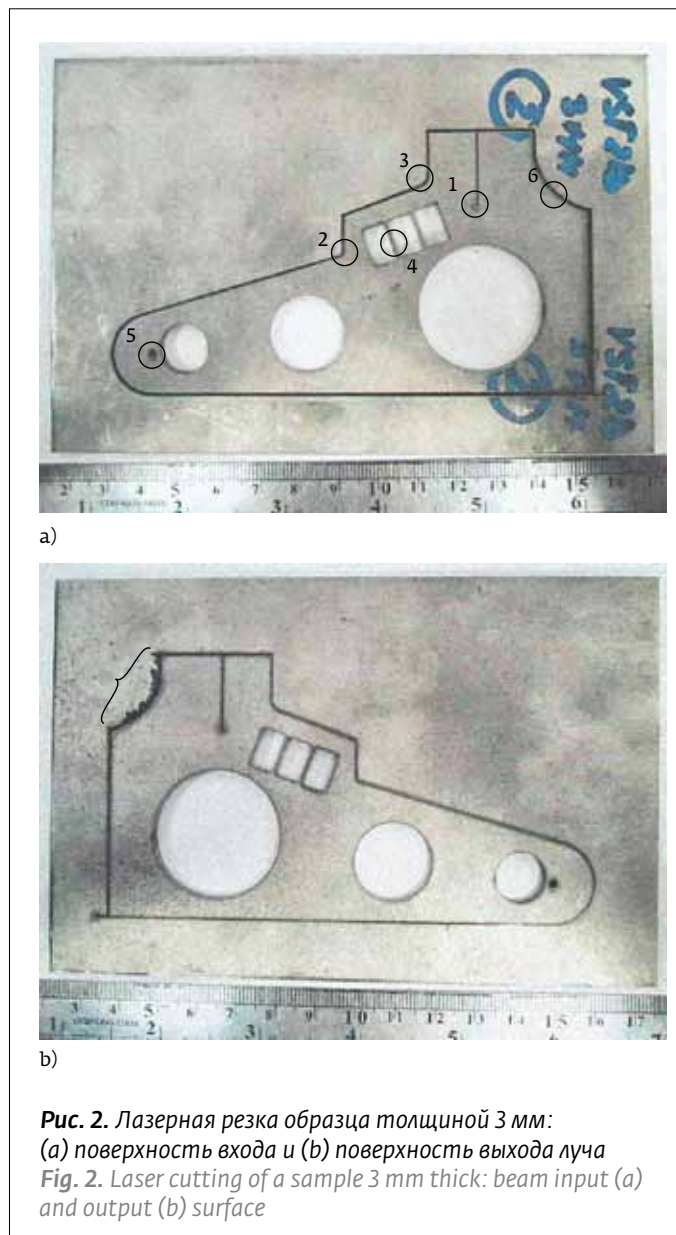


Таблица 1. Режимы лазерной резки образцов титанового сплава VST2B

Table 1. Modes of laser cutting of samples of VST2B titanium alloy

Толщина металла, мм Metal thickness, mm	Характеристика лазерного пучка Laser beam characteristics		Скорость резки, м / мин Cutting speed, m / min	Давление газа, бар Gas pressure, bar
	Мощность, Вт Power, W	Частота, Гц Frequency, Hz		
3,0	4 000	10 000	4	17
6,5	4 000	10 000	2	19
9,0	5 500	20 000	1,8	19
12,0	5 800	20 000	1,4	19

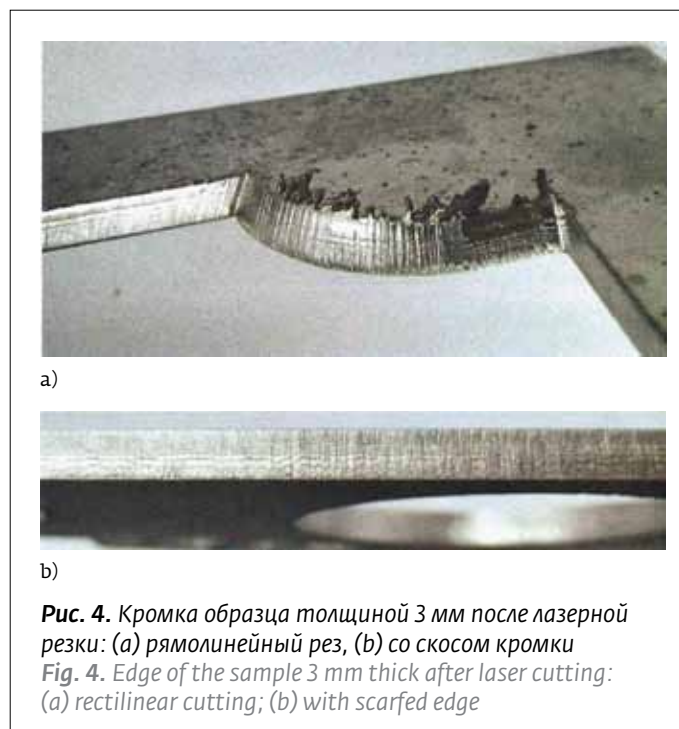
Состояние поверхности на выходе луча для разных толщин отличается разной степенью образования грата.

Поверхность реза для образцов толщиной 3 мм; 6 мм и 9 мм ровная без выраженной шероховатости (рис. 4 и 5а), на поверхности реза образца толщиной 12 мм имеются вертикальные штрихи (рис. 5б), образованные струей режущего газа.

Для исследования макро- и микроструктур интересующих зон были вырезаны соответствующие образцы и изготовлены шлифы. Анализ макроструктуры проводился на бинокляре OLYMPUS SZX 7, анализ микроструктуры проводился на оптическом микроскопе OLYMPUS GX 71, замеры величины зоны термического влияния произведены с помощью программы ANALYSIS.

The processes of laser cutting of titanium alloys have been underexplored, and concern mainly cutting with the use of inert gases [2,3]. Below are the results of a laser cutting of VST-2 titanium alloy with a thickness of 3 mm, 6.5 mm, 9 mm and 12 mm. Cutting was performed on laser complexes TRUMPF TruLaser 5030 Classic, equipped with a CO₂-laser with a power of 6 kW and TLC1005 with a CO₂-laser with a power of 5 kW. Cutting gas is helium; output diameter of a nozzle is 2.3 mm. Cutting modes for samples are shown in Table 1. In order to minimize the experimental laser cutting with various geometries and subsequent study of samples with the zones of interest, the cutting was carried out according to the scheme shown in Fig. 1.

For thicknesses of 9 mm and 12 mm, the zone of p.6 – cutting with tilt, is absent. Figures 2 and 3 show the appearance of the samples under study: a – laser radiation input surface; b – laser radiation output surface. The



Результаты исследования зоны термического влияния (ЗТВ) приведены в табл. 2. Результаты геометрических измерений образцов представлены в табл. 3.

Измерения геометрии реза в исследуемых зонах показали следующие результаты:

- зона № 1: диаметр врезки 0,7 мм, ширина реза от 0,4 до 0,6 мм (зависит от толщины разрезаемого металла);
- зоны № 2 и № 3: техника выполнения лазерной резки минимально возможных радиусов с остановкой и без остановки не оказывает влияния на качество реза. Минимальный радиус реза составляет 0,5 мм (зона № 2);
- зона № 4: минимальная толщина технологической перемычки вырезаемой лазерной резкой составляет: 1 мм для образцов толщиной 3,0 и 6,5 мм; и варьируется в диапазоне от 3 до 4 мм для образцов толщиной 9 и 12 мм (лазерный пучок оказывает термическое влияние на технологическую перемычку по всей толщине);
- зона № 5: минимальный диаметр вырезанного отверстия составляет 2 мм для толщин 3,0 и 6,5 мм, 4,3 мм – для толщины 9,0 мм и 3,3 мм – для толщины 12,0мм.

Типичная микроструктура основного металла образцов разных толщин представлена на рис. 6. Определение величины зоны термического влияния проводилось металлографическим методом

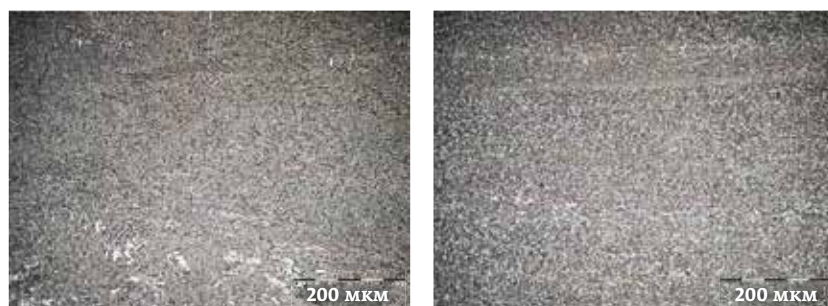


Рис. 6. Микроструктура основного металла образцов ($\times 200$): (a) толщиной 3 мм со значением микротвердости 364–380 HV_{01} ; (b) толщиной 6 мм, 9 мм и 12 мм со значением микротвердости 364–386 HV_{01}

Fig. 6. Microstructure of the base metal of the samples ($\times 200$): (a) 3 mm thick with a microhardness value of 364–380 HV_{01} ; (b) a thickness of 6 mm, 9 mm and 12 mm with a microhardness value of 364–386 HV_{01}

input surfaces of the laser beam for different thicknesses are identical. The state of the surface at the exit of the beam for different thicknesses differs in the different degree of formation of the burr.

Surface of cut for samples 3, 6 and 9 mm thick is even without expressed roughness (Figures 4 and 5a), there are vertical strokes on the cutting surface of a sample 12 mm thick (Figure 5b) formed by a jet of cutting gas.

To study the macro- and microstructures of the zones of interest, the corresponding samples were cut out and the polished sections were manufactured. The macrostructure analysis was performed using OLYMPUS SZX 7 binocular, the microstructure analysis was carried out using OLYMPUS GX 71 optical microscope, the measurements of the zone of thermal influence were made using AnalySIS program. The results of the study of the heat-affected zone (HAZ) are given in Table 2. The results of geometrical measurements of the samples are shown in Table 3.

Measurements of the cutting geometry in the examined zones showed the following results:

- zone No. 1: the diameter of the insert is 0.7 mm, the width of the cut is from 0.4 to 0.6 mm (depending on the thickness of the metal being cut),
- zones Nos. 2 and 3: the technique of performing laser cutting of the minimum possible radii with a stop and without a stop does not affect the quality of the cut. The minimum cutting radius is 0.5 mm (zone No. 2),

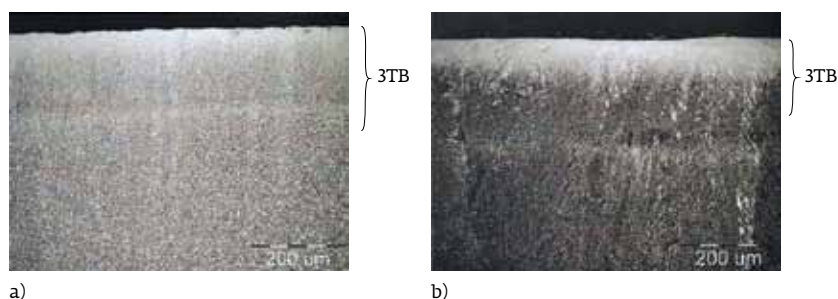


Рис. 7. Микроструктура ЗТВ образцов толщиной 3 мм (a) и 6,5 мм (b) после лазерной резки ($\times 200$)

Figure 7. Microstructure of HAZ of the samples with a thickness of 3 mm (a) and 6.5 mm (b) after laser cutting ($\times 200$)

Таблица 2. Результаты исследования зоны термического влияния на образцах из сплава VST-2 после лазерной резки

Table 2. Results of the study of the heat-affected zone on samples of VST-2 alloy after laser cutting

Толщина листа, мм Sheet thickness, mm	Зона исследования Examination zone		Глубина ЗТВ, мкм HAZ depth, μm		Значения микротвердости ЗТВ (с 50 мкм от поверхности с шагом 100 мкм), $\text{HV}_{0,1}$ HAZ microhardness value (with 50 μm from the surface with 100 μm increment), $\text{HV}_{0,1}$
			металлографически (вход-выход лазера) by metallography (laser input-output)	по замерам микротвердости by microhardness measurements	
3	1	Зона входа (в плане) Input zone (in plan)	120	100	437, 382, 373, 373, 356
		Зона прямолинейного реза (в сечении) Straight cut zone (in cross-section)	160–180	200 (выход / output)	405, 400, 344, 364, 356, 344
	2	200	–	–	
	3	210–220	–	–	
	4	180–360	300 (выход / output)	442, 382, 396, 348, 348, 333	
	5	130–400–300	–	–	
	6	280–540	–	–	
6,5	1	Зона входа (в плане) Input zone (in plan)	680	700	391, 442, 426, 447, 447, 448, 400, 382, 386, 377
		Зона прямолинейного реза (в сечении) Straight cut zone (in cross-section)	160–240	100 (выход / output) 200 (выход / output)	400, 377, 373, 364, 364, 426, 431, 361, 364, 373, 360
	2	190–260	–	–	
	3	200–200 (грат 900) (burr 900)	–	–	
	4	160–160 (грат-1000) (burr 1000)	грат-1000 / burr 1000	464, 464, 454, 454, 466, 465, 436, 437, 442, 518	
	5	340–200–280	–	–	
	6	440–260–1060	–	–	
9,0	1	Зона входа (в плане) Input zone (in plan)	550	550	382, 391, 405, 415, 426
		Зона прямолинейного реза (в сечении) Straight cut zone (in cross-section)	248–560	500 (выход / output)	380, 396, 410, 426
	2	328–1065	–	–	
	3	192–657	–	–	
	4°	360–1634	1560 (выход / output) 980 (выход / output)	532, 540, 533, 518, 526, 511, 466, 415, 400, 410, 437, 454, 450	
	5	160–1210	–	–	

Таблица 2. Продолжение

Table 2. Continuation

Толщина листа, мм Sheet thickness, mm	Зона исследования Examination zone	Глубина ЗТВ, мкм HAZ depth, μm		Значения микротвердости ЗТВ (с 50 мкм от поверхности с шагом 100 мкм), $\text{HV}_{0,1}$ HAZ microhardness value (with 50 μm from the surface with 100 μm increment), $\text{HV}_{0,1}$
		металлографически (вход-выход лазера) by metallography (laser input-output)	по замерам микротвердости by microhardness measurements	
12,0	1 Зона входа (в плане) Input zone (in plan)	440–865	1050	511; 442; 460; 431; 420; 431; 420; 410; 410; 400
	1 Зона прямолинейного реза (в сечении) Straight cut zone (in cross-section)	640–1700	1700 (выход / output)	400; 393; 391; 382; 420; 415; 431; 436; 431; 447
	2	до 890	–	–
	3	801–1097	–	–
	4	280–1554	На выходе – толщина перемычки At the output – jumper thickness	436; 430; 410; 405; 400; 405; 400; 431; 421; 430
5	300–1978	–	–	

* Для образца толщиной 9 мм для зоны № 4 шаг при измерении микротвердости составил 200 мкм

* For a sample 9 mm thick, for zone No. 4, the increment for measuring the microhardness is 200 μm

и методом измерения микротвердости. Микротвердость измерялась на твердомере DuraScan50 с нагрузкой 100 г с расстояния 50 мкм от поверхности реза с шагом 100 мкм до выхода на основной металл. Микротвердость основного металла образца толщиной 3,0 мм составляет 364–380 HV_{01} ; образца толщиной 6,5 мм – 364–386 HV_{01} ; образца толщиной 9,0 мм – 390–405 HV_{01} ; образца толщиной 12,0 мм – 380–405 HV_{01} . Определение величины зоны термического влияния методом измерения микротвердости проведено выборочно на нескольких образцах, т.к. результаты при измерении величины зоны термического влияния металлографическим методом и методом измерения микротвердости имеют незначительное расхождение (20–60 мкм).

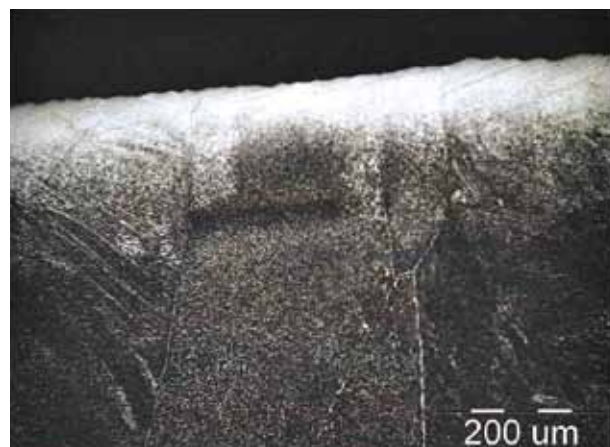
Установлено, что для толщины металла 3 мм грат отсутствует для различных конфигураций резки (см. рис. 2). Грат наблюдается для остальных толщин при вырезке отверстий и технологических перемычек. Поверхность реза не требует какой-либо дополнительной обработки, кроме зачистки от грата. Зона термического влияния (ЗТВ) зависит от толщины металла и составляет 6–8% толщины разрезаемого образца для режимов резания № 1–3. При вырезке отверстий (режим

- zone No. 4: the minimum thickness of the technological jumper cut by laser cutting is 1 mm for thicknesses of 3.0 and 6.5 mm and – from 3 to 4 mm for thicknesses of 9 and 12 mm. The laser beam is heat-affecting technological jumper across the entire thickness,
- zone No. 5: the minimum diameter of the cut hole is 2 mm for thicknesses of 3.0 and 6.5 mm, 4.3 mm for

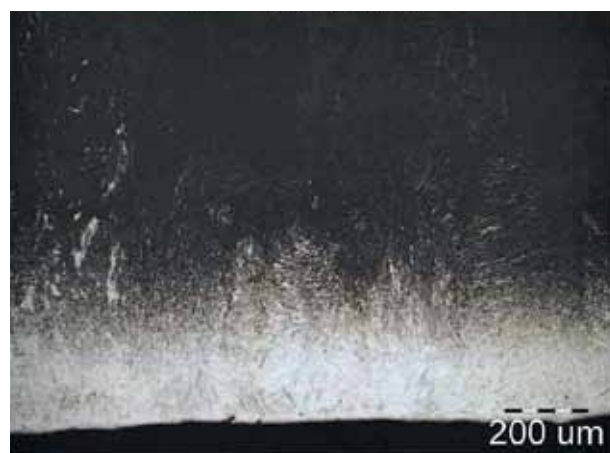
Таблица 3. Результаты геометрических измерений образцов

Table 3. Results of geometric measurements of samples

Толщина образцов, мм Sample thickness, mm	Размеры, мм Sizes, mm		
	минимальный диаметр minimal diameter		толщина перемычки jumper thickness
	вход струи Jet input	выход струи Jet output	
3,0	2,02	1,92	0,91–0,96
6,5	2,14	1,96	0,91–0,96
9,0	4,56	4,21	3,60–4,00
12,0	3,30	3,38	2,95–3,00



a)



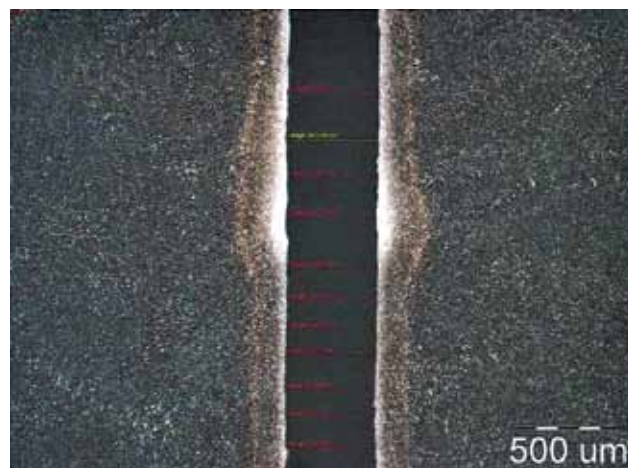
b)

Рис. 8. Микроструктура ЗТВ образцов толщиной 9 мм (а) и 12 мм (б) после лазерной резки ($\times 200$)

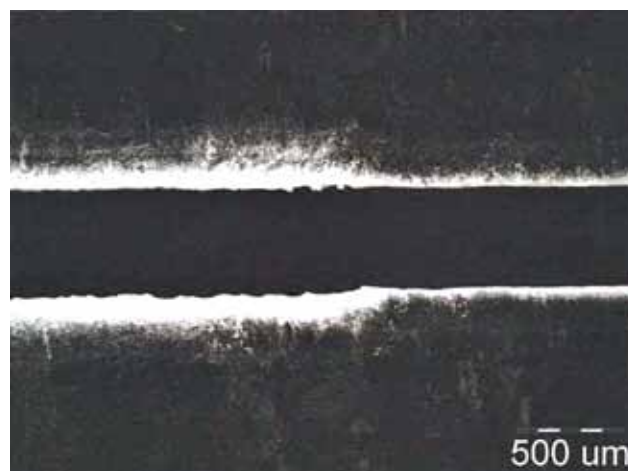
Figure 8. Microstructure of the HAZ of samples 9 mm thick (a) and 12 mm (b) after laser cutting ($\times 200$)

№ 5) и технологических перемычек (режим № 4), начиная с толщины 6,5 мм, величина зоны термического влияния увеличивается по мере приближения к поверхности выхода луча лазера. ЗТВ распределена практически равномерно по толщине изделия (рис. 7, 8). При резке титановых сплавов изменения структуры металла в ЗТВ не оказывают влияния на механические свойства вырезанных лазерным лучом деталей при оптимальных режимах. Это подтверждают результаты механических и усталостных испытаний, а также испытаний на общую коррозию, проведенных для деталей, вырезанных лазерным лучом и с помощью гильотинных ножниц.

Ширина реза увеличивается с ростом толщины образца и составляет от 0,4 до 0,6 мм. Качество



a)



b)

Рис. 9. Микроструктура образцов: (а) толщиной 3,0 мм – прямолинейный разрез шириной 420 мкм; (б) толщиной 9,0 мм – прямолинейный разрез шириной 460–590 мкм

Fig. 9. Microstructure of samples: (a) 3.0 mm thick straight cut with a width of 420 μm ; (b) 9.0 mm straight cut with a width of 460–590 μm .

thicknesses of 9.0 mm and 3.3 mm – for a thickness of 12.0 mm.

Characteristic microstructure of the base metal of samples of different thicknesses is shown in Fig. 6. The value of the heat-affected zone was determined by means of metallographic method and microhardness measurement. The microhardness was measured with DuraScan50 hardness gauge with a load of 100 g from a distance of 50 μm from the surface of the cut in increments of 100 μm before reaching the base metal. The microhardness of the base metal of a sample 3.0 mm thick is 364–380 HV_{01} ; that of a sample 6.5 mm thick – 364–386 HV_{01} ; that of a sample 9.0 mm thick – 390–



Рис. 10. Крышка до обработки
Fig. 10. Cover before processing



Рис. 11. Лопатка до обработки
Figure 11. Blade before processing

реза не зависит от радиуса реза и возможной остановки луча (рис. 9). Минимальный радиус реза составил 0,5 мм.

Используя полученные результаты исследований, выполнили опытную лазерную обрезку облоя у двух штампованных поковок из сплава ВТ6: крышки (рис. 10) и лопатки (рис. 11).

Как правило, в качестве технологического газа для газолазерной резки титана используют аргон. Однако при этом качество кромок реза может оказаться неудовлетворительным из-за образования грата, особенно при толщине металла более 3 мм. В нашем случае толщина штамповки по периметру резки изменяется от 6 до 12 мм, поэтому в качестве режущего газа использовали гелий. Работа была выполнена на 5-осевом лазерном технологическом комплексе TRUMPF Laser Cell 1005. Обработка обеих деталей проводилась на мощности лазерного излучения 4,0 кВт соплом диаметром 2,3 мм. При резке детали "Крышка" скорость резки составила 2,1 м/мин, давление режущего

405 HV₀₁; that of a sample 12.0 mm thick - 380-405 HV₀₁. Determination of the value of the heat-affected zone by the method of measuring the microhardness was carried out selectively on several samples, since the results when measuring the value of the heat-affected zone by the metallographic method and the method of measuring the microhardness have a slight discrepancy (20-60 μm).

It has been established that for a metal thickness of 3 mm, no burr is available for various cutting configurations (Figure 2). For the remaining thicknesses, the burr is observed when cutting the holes and technological jumpers. The cutting surface does not require any additional processing, except stripping from the burr.

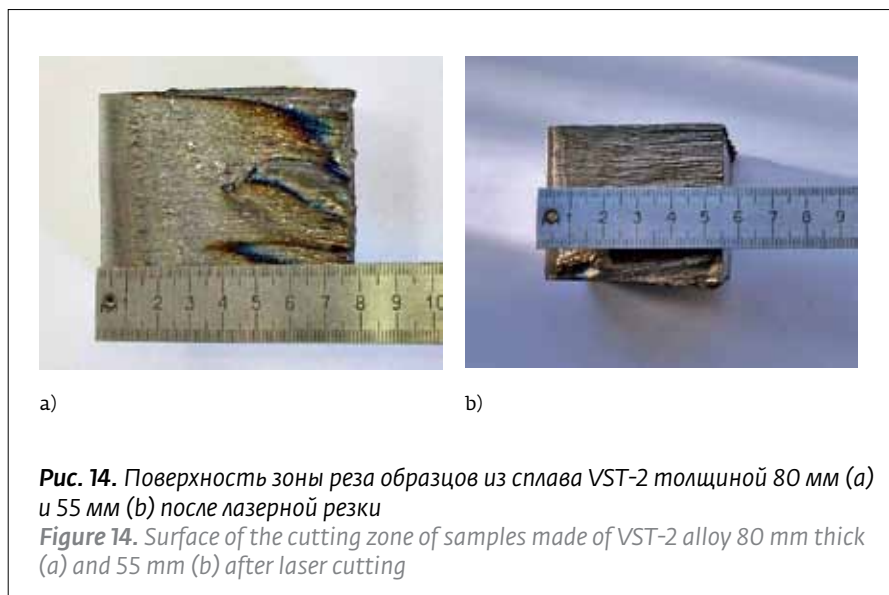
The heat-affected zone depends on the thickness of the metal and is 6-8% of the thickness of the cut sample for cutting modes No. 1 to 3. When cutting holes (mode No. 5) and technological jumpers (mode No. 4), starting from a thickness of 6.5 mm, the value of the heat-affected zone increases as it approaches the exit surface of the laser



Рис. 12. Крышка после обрезки облоя
Figure 12. Cover after trimming of the casting material



Рис. 13. Лопатка после обработки
Figure 13. Blade after processing



газа 17 бар, при обработке "Лопатки", скорость резки – 1,0 м/мин, давление режущего газа 20 бар. Результаты обработки показаны на рис. 12 и 13.

Кроме того, была проведена оценка потенциальных возможностей газолазерной резки титановых сплавов больших толщин. Для этого произвели резку образцов из сплава VST-2 толщиной 55 и 80 мм (рис. 14). Резка проводилась на роботизированном комплексе FLW-10-01 на мощности 10 кВт с применением газа гелия. Поверхность реза в обоих случаях имеет удовлетворительное качество и не требует дополнительной обработки.

Таким образом, исследования показали возможность применения лазерной резки для изготовления деталей из титановых сплавов сложной формы с элементами малых размеров, а также применения ее для резки деталей больших толщин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kuznetsov M.V., Zemlyakov E.V., Babkin K. D.** Review of Laser Technological Heads for Implementation of Industrial Laser Technologies of Metal Material Working. – Photonics, 2016, № 6, p.14–33. DOI:10.22184/1993-7296.2016.60.6.14.33.
2. **Фомин В.М., Ковалев О.Б.** Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. – Физматлит, 2013.
Fomin V. M., Kovalev O. B. The physical basis of laser cutting of thick sheet materials. – Fizmatlit, 2013.
3. Научные результаты НИФТИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.nifti.unn.ru/science/fizika_metallov/.
 Scientific results of NEFT NNSU by. N. I. Lobachevsky. Electronic resource. Access mode: http://www.nifti.unn.ru/science/fizika_metallov/.

beam. The HAZ is almost uniform in the thickness of the product (Figures 7 and 8). When cutting titanium alloys, changes in the structure of the metal in the HAZ do not affect the mechanical properties of the laser beam-cut parts under optimal conditions. This is confirmed by the results of mechanical and fatigue tests, as well as general corrosion tests carried out for parts cut with a laser beam and using guillotine shears.

The width of the cut increases with the thickness of the sample and ranges from 0.4 to 0.6 mm. The quality of the cut does not depend on the radius of the cut and the possible stop of the beam (Figure 9).

The minimum cutting radius was 0.5 mm. Using the obtained experimental results, we performed an experimental laser trimming of a casting material for two stamped forgings made of BT6 alloy: cover (Fig. 10) and blade (Fig. 11).

Typically, argon is used as a process gas for gas-laser cutting of titanium. However, the quality of the edges of the cut may be unsatisfactory because of the formation of the burr, especially when the metal thickness is over 3 mm. In our case, the thickness of the stamp forgings along the perimeter of the cutting varies from 6 to 12 mm, therefore helium was used as the cutting gas. The work was performed on a 5-axis laser technological complex TRUMPF Laser Cell 1005. The both parts were processed at a laser power of 4.0 kW with a nozzle with a diameter of 2.3 mm. When cutting the "Cover" part, the cutting speed was 2.1 m/min, the cutting gas pressure was 17 bar, when processing the "Blade" part, the cutting speed was 1.0 m/min, the cutting gas pressure was 20 bar. The processing results are shown in Figures 12 and 13.

Furthermore, an estimation was made of the possibility of gas-laser cutting of titanium alloys of large thickness – the samples made of VST-2 alloy with a thickness of 55 and 80 mm were cut (Figure 14). The cutting was carried out on a robotic complex FLW-10-01 at a power of 10 kW with the use of helium. The surface of the cut in both cases is of satisfactory quality and does not require additional processing.

Thus, the experiments have shown the possibility of using laser cutting for the manufacture of parts from titanium alloys of complex shape with small elements, and also its application for cutting large-thickness parts.