

УДК 921.9.048.7
DOI: 10.12737/17323

С.А. Кочергин, начальник лаборатории
(ФГУП «НПО «Техномаш», Москва),
Ю.А. Моргунов, к.т.н.,
Б.П. Саушкин, д.т.н.
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))
E-mail: sbp47@mail.ru

Научоёмкая технология снижения гратообразования при импульсной лазерной резке листового материала

Выявлены условия и предложены средства минимизации грата при резке листового материала из титанового сплава BTI-0 и стали 12X18H10T. Исследовано влияние наложения колебаний ультразвукового (УЗ) диапазона на гратообразование, влияние смачиваемости нижней кромки расплавом металла на качество реза, влияние давления вспомогательного газа на снижение гратообразования. Полученные результаты позволяют на 30...60 % снизить объем грата.

Ключевые слова: величина грата; ультразвуковые колебания; ширина реза; лазерное излучение; давление газа; скорость резки.

S.A. Kochergin, laboratory head
(FSUE «Research and Manufacturing Association «Technomash»,
Yu.A. Morgunov, c.en.s.,
B.P. Saushkin, d.en.s.
(Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI))

Science intensive technology of burr formation decrease at pulse laser cutting of sheet material

Conditions are revealed and means are offered for minimizing burr formation at cutting of sheet material made of titanium alloy BTI-0 and steel 12X18H10T. The influence of imposing of mechanical vibrations in ultrasound range on burr formation was investigated and the possibility of reducing the amount of burr with ultrasonic influence was showed. The influence of wetting of a lower edge of molten metal on a cutting quality was investigated, the possibility of reducing the burr amount using coating was showed. The influence of pressure of an auxiliary gas on reducing the amount of burr was investigated and importance of this parameter was confirmed. The results allow 30-60 % reduction in the amount of burr under otherwise equal conditions.

Keywords: amount of burr; ultrasonic vibrations; cutting width; laser beam; gas pressure; cutting speed.

В работе [1] рассмотрены схема действующих сил и вытекающее из нее выражение, описывающее условие равновесия капли расплава на нижней кромке реза (рис. 1). Отмечено, что отрыв жидкой фазы или формирование элемента грата на кромке зависят от баланса сил, действующих на каплю.

Показано, что капля остается на образце при соблюдении условия равновесия действующих

сил, которое можно представить в виде

$$F_{\text{пн}} \sin \theta = mg + F_{\text{Т}}, \quad (1)$$

где $F_m = mg$ – сила тяжести; $F_{\text{пн}}$, $F_{\text{Т}}$ – силы соответственно поверхностного натяжения и трения при контакте капли с потоком газа; θ – краевой угол смачивания.

Расчеты, основанные на статистических исследованиях геометрических размеров грата, показали, что силы $F_{\text{пн}}$ и $F_{\text{Т}}$ имеют один порядок

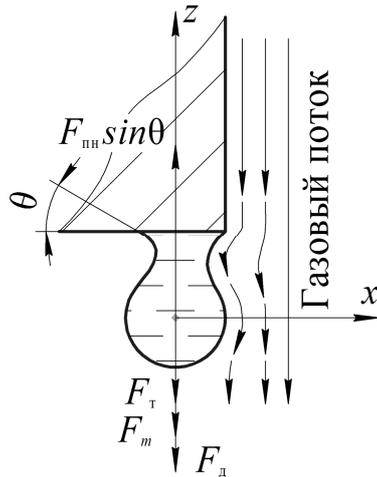


Рис. 1. Модель формирования капли грата в поперечном сечении

величины ($\sim 10^{-3}$ Н) и значительно превышают гравитационную силу. На основании условия (1) рассмотрены следующие пути снижения объема грата:

- наложение на каплю расплава дополнительной силы F_d с нарушением условия равновесия;
- снижение краевого угла смачивания нижней

кромки реза расплавом путем нанесения специальной обмазки;

– увеличения газодинамической силы F_T за счет увеличения скорости прокачки газа.

В основе сделанных далее расчетов и рассуждений лежит гипотеза о возможности интенсификации удаления капель расплава с нижней кромки поверхности реза за счет использования силы инерции. Для реализации этой гипотезы к поверхности разрезаемого материала в окрестностях контакта излучения с веществом подводились механические колебания ультразвукового диапазона. Схемы подвода УЗ-колебаний представлены на рис. 2.

Использовали магнитострикционную головку с концентратором, обеспечивающими следующие параметры колебаний на торце концентратора: частота 18 кГц, амплитуда 10...20 мкм. Предварительные эксперименты показали, что схема рис. 2, *г* подвода звуковой энергии является наиболее эффективной. Результаты экспериментов, полученные при использовании этой схемы, представлены на рис. 3. Видно, что наложение УЗ-колебаний приводит к снижению размеров частиц грата и, судя по микрофотографиям нижней кромки – к уменьшению массы грата.

Однако радикального устранения графообра-

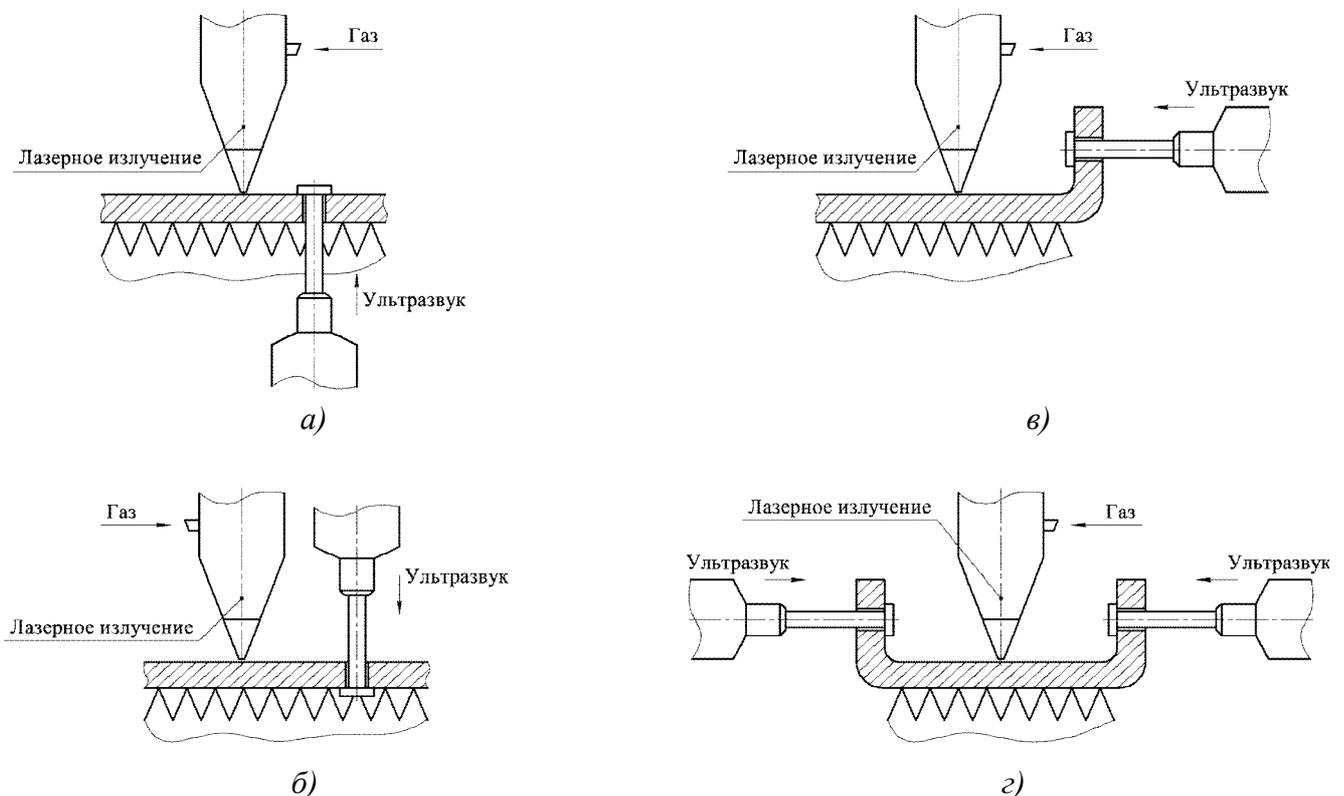


Рис. 2. Экспериментальные схемы лазерной резки с наложением механических колебаний ультразвукового диапазона частот: *а* – с нижней части образца; *б* – с верхней части образца; *в* – с торцевой части образца; *г* – с торцев образца

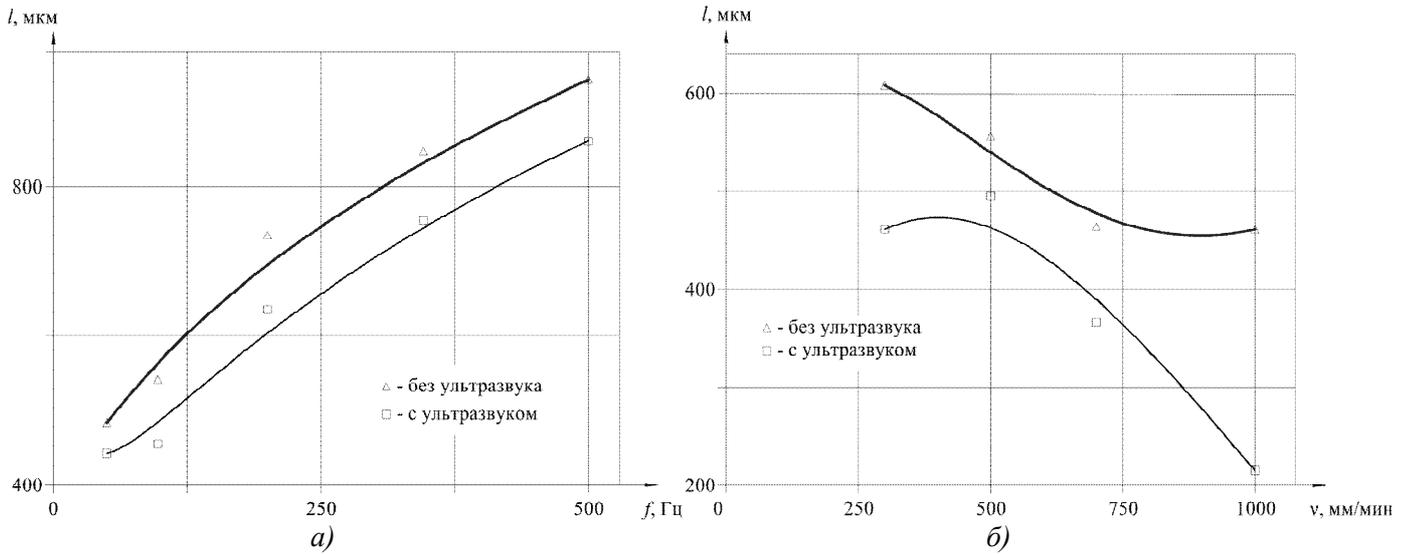


Рис. 3. Зависимость высоты грата: *a* – от частоты следования импульсов ($P = 1$ кВт; $p = 1,0$ МПа; $v = 500$ мм/мин; $f_{y3} = 20 \dots 22$ кГц); *б* – от скорости резки ($P = 1$ кВт; $f = 100$ Гц; $p = 1,0$ МПа; $f_{y3} = 20 \dots 22$ кГц)

зования в наших экспериментах не наблюдалось. Чтобы выяснить причину наблюдаемого явления произведём оценку сил, действующих на каплю расплава.

По имеющимся микрофотографиям находим близкий к максимальному объём единицы грата $V = 0,072$ мм³. При плотности коррозионно-стойкой стали $\rho = 8$ г/см³ находим близкую к максимальной массу капли грата, г.:

$$m_0 = \rho V = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,072 = 5,8 \cdot 10^{-4}$$

Тогда гравитационная сила, Н, действующая на единичный элемент грата:

$$F_{гp} = m_0 g = 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 = 5,6 \cdot 10^{-6}$$

Оценим величину силы инерции при наложении на каплю расплава УЗ-колебаний, описываемых синусоидальной функцией:

$$y = A \sin \omega t, \quad (2)$$

где A – амплитуда; ω – круговая частота.

Дважды дифференцируя, получаем:

$$y'' = -A \omega^2 \sin \omega t, \quad (3)$$

где знак минус означает, что ускорение направлено в сторону, обратную направлению перемещения. Анализируя это уравнение, получаем, что максимальное ускорение соответствует моменту изменения знака перемещения, т.е. в нижней и верхней точках колебаний.

Оценивая величину силы инерции при максимальном ускорении ($A = 10$ мкм, $f = 18$ кГц), получаем $F_{и} = 0,074$ Н.

Сила сцепления капли с металлической подложкой определяется, как

$$F_{пн} = \sigma P, \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение; P – периметр капли.

Периметр капли определяем по микрофотографии образца $P \approx 1 \dots 2$ мм.

Поверхностное натяжение расплава железа при 1550 °С по данным работы [2] составляет:

$$\sigma = 1,865 \text{ Н/м}, F_{пн} = 1,865 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,0037 \text{ Н.}$$

Из приведённых расчетов видно, что сила инерции, действующая на каплю расплава, на порядок выше силы поверхностного натяжения. Казалось бы, эффект инерционного «стряхивания» капель расплава при направлении колебаний параллельно оси лазерного луча должен проявиться в полной мере, что противоречит данным эксперимента.

Две причины выступают на первый план при объяснении данного противоречия. Первая из них заключается в том, что попадая на «холодную» поверхность нижней кромки, расплав очень быстро остывает (105...106 К/с), и принятое в расчете значение σ для расплава железа становится некорректным. Действительно, при частоте 20 кГц за характерное время (период колебания равный 50 мкс) поверхность остывает на 5...50 °С, что заметно снижает поверхностное натяжение расплава в условиях кристаллизации.

Вторая причина связана с тем, что УЗ-колебания передаются на жидкую каплю от твёрдой стенки со значительным затуханием из-за нежёсткой связи жидкой и твёрдой фаз. Поэтому, принятая выше оценка для макси-

мального ускорения является завышенной.

В связи со сказанным интересно рассмотреть возможность исследования резонансного эффекта для решения технологической задачи.

Для этого выполним оценку частоты собственных колебаний капли расплава. При сферической форме капли в соответствии со статистическими данными средний радиус капли $R = 50$ мкм. Коэффициент поверхностного натяжения расплава примем равным $1,865$ Н/м [2].

Воспользовавшись решением, приведенным в работе [3], для оценки частоты собственных колебаний сферической капли, получим

$$\omega^2 = \frac{\sigma}{\rho R^3} l(l-1)(l+2), \quad (5)$$

где l – натуральное число.

Показано, что наименьшая возможная собственная частота колебаний капли соответствует $l = 2$:

$$\omega_2^2 = \omega_{\min}^2 = \frac{8\sigma}{\rho R^3}. \quad (6)$$

Следующая частота при $l = 3$:

$$\omega_3^2 = \frac{30\sigma}{\rho R^3}. \quad (7)$$

При выбранных значениях R и σ значения ω_2 и ω_3 равны соответственно $1,2 \cdot 10^4$ Гц и $2,3 \cdot 10^4$ Гц, т.е. лежат на границе УЗ-диапазона (18 кГц). При использовании УЗ-генератора с функцией настройки частоты можно выходить на окорезонансный режим работы, усиливая эффект «стряхивания» капель.

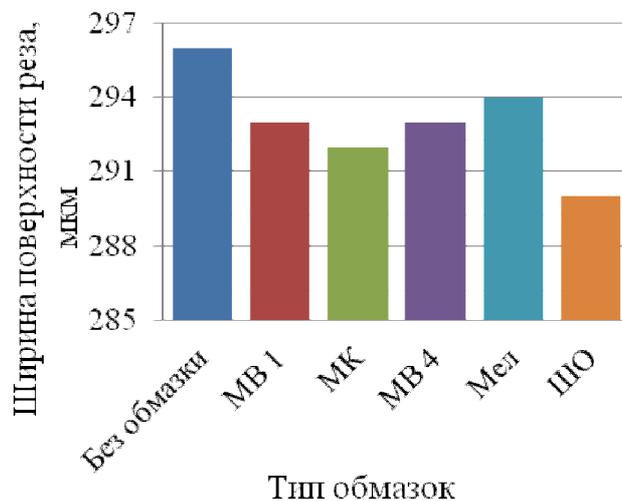
Представленная в [1] модель графообразования позволяет предположить, что уменьшение объема графа возможно за счет снижения смачиваемости нижней кромки реза.

Для проверки данной гипотезы были проведены экспериментальные исследования с использованием пяти видов обмазок: масло вакуумное ВМ1, ВМ4, масло компрессорное, суспензия мела, суспензия графита в вакуумном масле (обмазка штампов для горячей штамповки). Выбор обмазок носил случайный характер, так как в литературе практически отсутствуют какие-либо рекомендации по использованию обмазок для повышения качества резки.

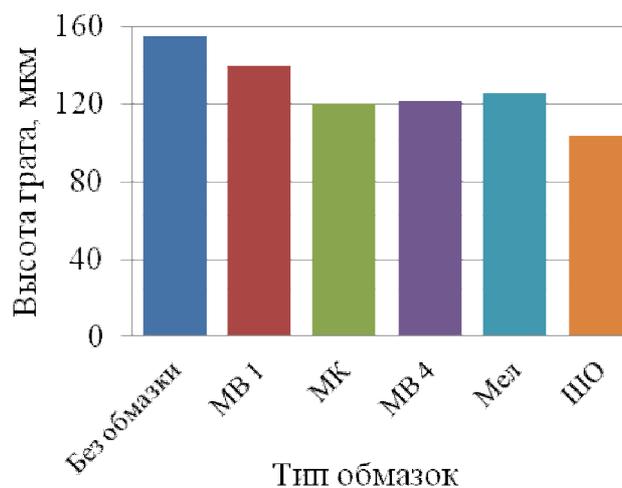
Для реализации этой гипотезы на нижнюю поверхность листового материала из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т наносилась обмазка.

Резка выполнялась при одинаковых параметрах режима: мощность излучения 700 Вт; скорость резки 1,0 м/мин; давление газа 1,0 МПа.

В качестве вспомогательного газа использовался азот. Проведенный анализ показал, что, использование обмазок приводит к некоторому уменьшению ширины реза (рис. 4, а), что, вероятно, связано с охлаждающим воздействием обмазок на стенки реза.



а)



б)

Рис. 4. Ширина реза (а) и высота графа (б) при резке коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т при использовании обмазок

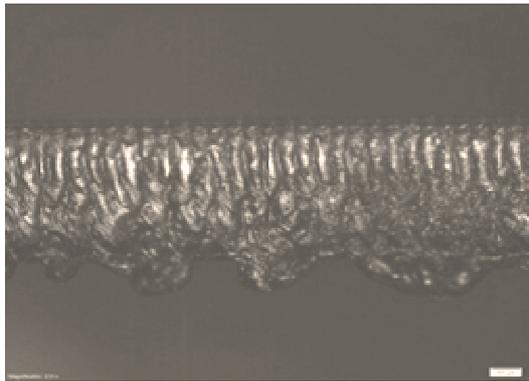
Из рис. 4, б видно, что использование обмазок приводит к снижению высоты графа на 30...40 %, за счет снижения краевого угла смачивания твердой фазы расплавом металла и соответствующего уменьшения силы поверхностного натяжения. На рис. 5 представлены фотографии поверхностей реза в зависимости от вида обмазки.

Лучшие результаты получены при использовании штамповой обмазки.

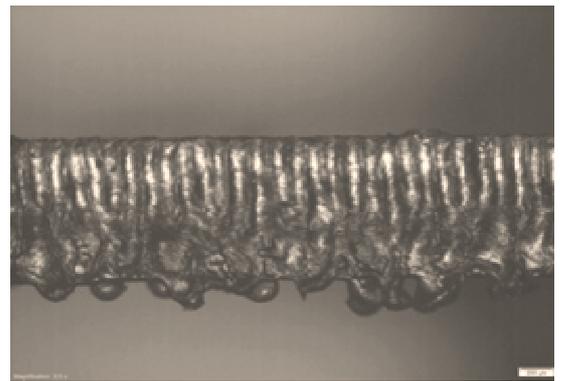
При анализе влияния вспомогательного газа на характеристики реза выполнены эксперименты по разрезанию пластины из титанового сплава BT1-0 толщиной 2 мм. Эксперименты проведены при фокусном расстоянии 150 мм, мощности излучения 700 Вт, скорости резки 2,5 м/мин.

Как видно из графиков (рис.6), ширина реза уменьшается с возрастанием давления вспомо-

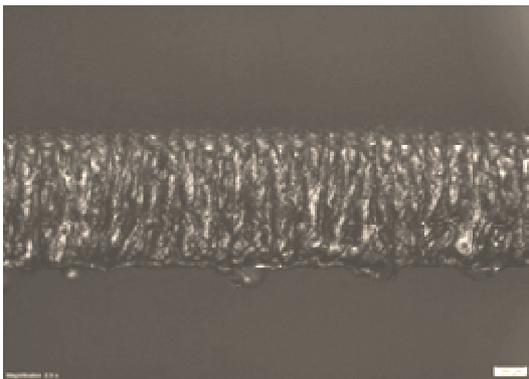
гательного газа, однако шероховатость поверхности реза повышается. Снижение ширины реза можно объяснить охлаждающим действием газа на стенки реза, а некоторое повышение шероховатости газодинамическим (турбулизация) воздействием газовой струи на жидкую пристеночную фазу. Количество и величина грата снижаются при увеличении давления, однако полностью ликвидировать грат не удастся (рис.7).



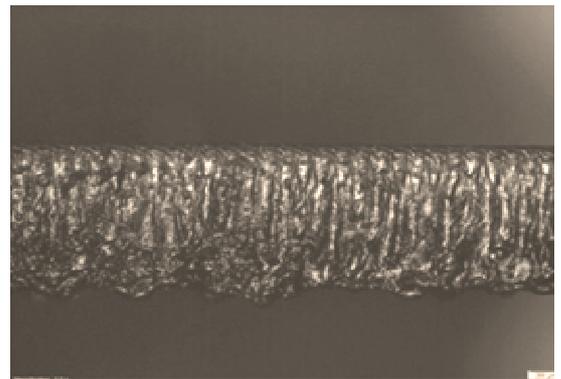
a)



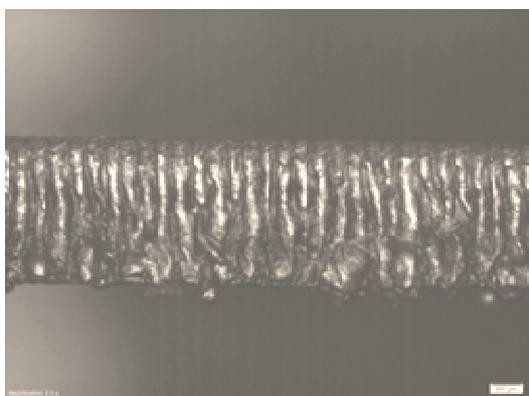
б)



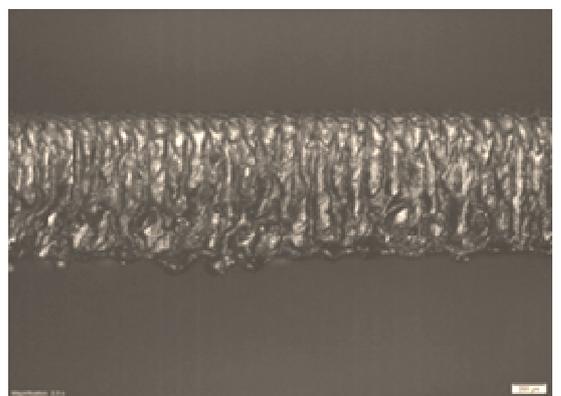
в)



г)



д)



е)

Рис. 5. Влияние обмазок на величину грата:

a – без обмазок; *б* – масло вакуумное MB1; *в* – масло компрессорное; *г* – масло вакуумное MB 4; *д* – суспензия мела; *е* – графит с вакуумным маслом MB4

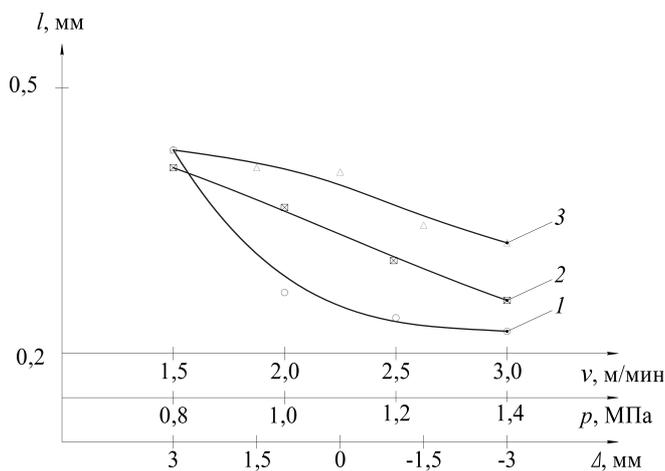


Рис. 6. Зависимость средней величины элементарного гратта от положения фокального пятна (1), давления (2), скорости (3)

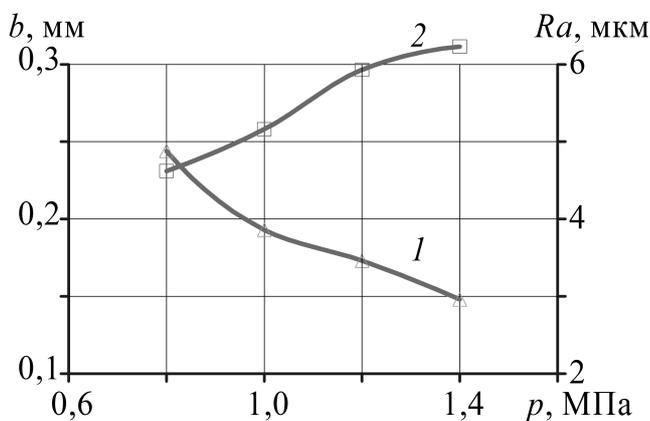


Рис. 7. Зависимости ширины реза (1) и параметра шероховатости (2) от давления вспомогательного газа

Заключение

В результате проведенных исследований выявлена возможность снижения объема гратта при ультразвуковом воздействии и предложены мероприятия по усилению этого эффекта. Показана возможность снижения объема гратта при использовании обмазок и предложена эффективная обмазка – суспензия графита в вакуумном масле. Подтверждено влияние давления вспомогательного газа на снижение объема граттообразования при лазерной резке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочергин С.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Особенности формирования гратта при импульсной лазерной резке тонкостенных заготовок // СТИН. 2015. №10. С. 33–36.
2. Ершов Г.С., Черняков В.А. Строение и свойства жидких и твердых металлов. М.: Metallurgy, 1978. 248 с.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 520 с.

REFERENCES

1. Kochergin S.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Features of formation of burr under pulsed laser cutting of thin-walled workpieces. STIN. 2015, no. 10. Pp. 33–36.
2. Ershov G.S., Chernyakov V.A. The structure and properties of liquid and solid metals. Moscow: Metallurgy, 1978. 248 p.
3. Kukhling Kh. Handbook of physics. Moscow: Mir, 1982. 520 p.

Рецензент д.т.н. В.В. Овчинников



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7

<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбокова.

Сдано в набор 04.12.2015. Подписано в печать 20.01.2016.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7