УДК 621.3, 629.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ВОДОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Ю. Чэнь, С. Ли, С. Чэнь*, Х. Ли, С. Сюй*

Школа машиностроения Технологического университета г. Хэфэй, 230009 Хэфэй, Китай * Школа машиностроения и электротехники Университета им. Цзяньчжу провинции Аньхой, 230601 Хэфэй, Китай E-mails: chenyuanlong@hfut.edu.cn, lix1117@163.com, xhenxh@163.com, 18856967717@163.com, xinxu1121@163.com

Исследуется влияние скорости струи воды и угла ее наклона на свойства поверхности после ее лазерно-водоструйной обработки. Установлено, что с увеличением угла наклона струи воды глубина лазерно-водоструйной обработки поверхности увеличивается, однако скорость увеличения уменьшается, если угол наклона струи воды увеличивается с 60 до 75°. При увеличении скорости струи воды глубина лазерно-водоструйной обработки поверхности увеличивается.

Ключевые слова: лазерно-водоструйная обработка, карбид кремния, угол наклона струи, скорость струи.

DOI: 10.15372/PMTF20220103

Введение. Карбид кремния — хрупкий керамический материал, обладающий высокой термостойкостью, твердостью, стойкостью к окислению и химической стойкостью [1], что обусловливает его широкое применение в различных областях, в том числе в машиностроении, металлургии и электронике [2]. Однако физические свойства керамических материалов существенно затрудняют их обработку с использованием обычных методов, кроме того, качество обработки поверхности таких материалов часто очень плохое. Лазерная обработка является новой технологией обработки металлов, неметаллов и труднообрабатываемых материалов [3]. Однако при лазерной обработке материал подвергается фототермическому воздействию, в результате чего на его поверхности образуются шлаки и происходит абляция, что ухудшает качество обработки. Поэтому, для того чтобы избежать недостатков традиционных методов лазерной обработки, было предложено использовать одновременно лазер и струю воды [4]. Лазерно-водоструйная обработка — технология нового типа, обеспечивающая высокую эффективность лазерной обработки с одновременным охлаждением поверхности. Струя воды, поглощающая тепло на поверхности материала, уменьшает тем самым область термического воздействия и предотвращает растрескивание материала вследствие уменьшения градиента температуры. Также струя воды удаляет с поверхности металла шлаки, образующиеся при обработке лазером, вследствие

Работа выполнена при финансовой поддержке Главной лаборатории естественных наук провинции Аньхой (грант № КJ2019A0798) и Научного фонда естественных наук Университета им. Цзяньчжу провинции Аньхой (грант № 2019QDZ20).

[©] Чэнь Ю., Ли С., Чэнь С., Ли Х., Сюй С., 2022

чего улучшается качество обработки поверхности. В работе [5] приведены результаты резания листов низкоуглеродистой стали и титана с использованием волоконного лазера и струи воды, а также волоконного лазера и газа, находящегося под высоким давлением. Установлено, что в первом случае требуется бо́льшая энергия лазера, чем во втором. В [6] изучалось влияние скорости струи и диаметра сопла на качество лазерной обработки при использовании струи воды, а также выполнена оптимизация этих параметров. В работе [7] исследовалось влияние мощности лазера и скорости резания на ширину и микроструктуру пропилов древесины при использовании обычной лазерной резки и лазерной резки со струей воды. Показано, что ширина прорези увеличивается с увеличением мощности лазера и уменьшается с уменьшением скорости резания. Также в [7] установлено, что при резании со скоростью 50 мм/с при мощности лазера 6 Вт получается прорезь небольшой ширины с гладкой поверхностью.

В работе [8] изучалось влияние лазерного ультрафиолетового луча и струи воды на термозащитные покрытия. Установлено, что струя воды может очистить протравленную поверхность, не разрушая покрытие. Охлаждение струей воды позволяет уменьшить область температурного нагрева и предотвратить образование микротрещин.

Существует большое количество работ, в которых исследовалось влияние лазерной и водоструйной обработки на различные материалы. Однако влияние угла наклона и скорости струи воды на качество обработки поверхности изучено недостаточно.

В данной работе с использованием однофакторного метода испытаний исследуется влияние угла наклона и скорости струи воды на глубину обработки поверхности карбида кремния.

1. Исследование ударного воздействия струи воды на поверхность материала и на ее охлаждение. Анализируется ударное и охлаждающее воздействие струи воды на обрабатываемую поверхность. В момент удара струи по твердой поверхности создается давление гидроудара *P*, которое удовлетворяет соотношению [9]

$$P = (E_w/C_0)v\sin\theta$$

 $(E_w -$ модуль упругости струи воды; $C_0 -$ скорость звука в струе; $\theta -$ угол между струей и твердой поверхностью; v -скорость струи воды). При лазерно-водоструйной обработке поверхности происходит конвективный теплообмен между лазером и водой.

Коэффициент теплопереноса характеризует степень охлаждения поверхности струей воды. Чем больше коэффициент теплопереноса, тем большее количество тепла передается струе и тем более существенно охлаждается поверхность.

Существует следующее соотношение между скоростью струи и коэффициентом теплообмена с поверхностью материала [10]:

$$h = \operatorname{Nu}_{\mu} \lambda l^{-1}, \qquad \operatorname{Nu}_{\mu} = \begin{cases} 0.715 \operatorname{Re}^{1/2} \operatorname{Pr}^{0.4}, & 0.15 < \operatorname{Pr} < 3, \\ 0.797 \operatorname{Re}^{1/2} \operatorname{Pr}^{1/3}, & \operatorname{Pr} > 3. \end{cases}$$

Здесь h — коэффициент теплообмена поверхности; Nu_{μ} — число Нуссельта; λ — теплопроводность; l — размер пластины в направлении вектора скорости струи; Re, Pr — числа Рейнольдса и Прандтля.

2. Экспериментальное оборудование и исследуемый материал. В эксперименте использовалась пластина из карбида кремния размером $20 \times 20 \times 5$ мм. На рис. 1 представлена схема лазерно-водоструйной установки.

В эксперименте использовался твердотельный лазер HGL-LMY500 (средняя мощность 500 Вт, сила тока 100÷400 А, ширина импульса 0,1÷20,0 мс, частота излучения 0÷150 Гц, скорость резания 0,1 мм/с). Длина волны лазера равна 1064 нм, диаметр многомодового



Рис. 1. Схема лазерно-водоструйной установки:

1 — блок управления, 2 — источник питания, 3 — трубка с водой, 4 — водоструйная система, 5 — компьютер, 6 — насос, 7 — вода, 8 — форсунка, 9 — струя воды, 10 — излучающая и передающая система, 11 — вспомогательный газ, 12 — луч лазера, 13 — рабочая пластина, 14 — поддерживающая пластина, 15 — контейнер, 16 — верстак

круглого пятна — 0,2 мм. Головка лазера располагалась перпендикулярно поверхности пластины, струя воды была направлена под различными углами к этой поверхности.

3. Влияние угла наклона струи на глубину прорези. Влияние угла наклона струи и ее скорости на глубину обработки поверхности карбида кремния исследовалось с помощью однофакторного экспериментального метода. Эксперименты проводились с использованием лазерного луча, имеющего следующие характеристики: сила тока — 110 A, ширина импульса — 0,6 мс, частота излучения — 30 Гц, скорость сканирования — 2 мм/с.

В эксперименте 1 при заданной скорости струи 12 м/с угол ее наклона менялся и составлял 30, 45, 60, 75°. В эксперименте 2 при заданном угле наклона струи 45° изменялась ее скорость, которая составляла 8, 12, 16, 20 м/с.

Для вычисления силы, с которой струя ударяет по поверхности материала при различных углах наклона, использовались метод жидких объемов и пакет FLUENT. При моделировании удара струи задавались скорость на входе и давление на выходе. На стенке ставилось условие непроскальзывания. Задавались различные углы наклона струи на выходе, давление на выходе полагалось равным атмосферному давлению. Использовалась стандартная модель турбулентности. При изменении угла наклона струи прочие параметры задачи оставались неизменными. Результаты численного моделирования представлены на рис. 2.

Сила удара струи по поверхности материала увеличивается с увеличением угла наклона струи. При увеличении угла θ до 75° сила удара продолжает увеличиваться, но с меньшей скоростью. На рис. 3 показано влияние угла наклона струи на глубину прорези.

Из результатов, приведенных на рис. 2, 3, следует, что при $\theta = 30, 45, 60, 75^{\circ}$ максимальное давление материала составляет 20, 35, 50, 58 кПа соответственно (скорость струи



Рис. 2. Распределение статического давления P_{st} вдоль пластины при различных углах наклона струи θ :

 $1-\theta=30^\circ,\,2-\theta=45^\circ,\,3-\theta=60^\circ,\,4-\theta=75^\circ$



Рис. 3. Влияние угла наклона струи на глубину прорези: $a - \theta = 30^{\circ}, \ \delta - \theta = 45^{\circ}, \ e - \theta = 60^{\circ}, \ e - \theta = 75^{\circ}$

равна 12 м/с). При увеличении угла наклона струи с 30 до 60° давление при ударе увеличивается на 15 кПа, при этом увеличение градиента является максимальным, поэтому глубина прорези увеличивается. При дальнейшем увеличении угла наклона струи глубина прорези увеличивается незначительно. Таким образом, с увеличением угла наклона струи качество обработки, вообще говоря, не улучшается. Это обусловлено тем, что при большом угле наклона расстояние между струей воды и лучом лазера небольшое. В случае если струя и луч находятся на большом расстоянии, струя оказывает более значительное влияние на качество обработки лазером. При большой скорости струи воды в области удара образуется "туман", который не только поглощает большое количество энергии лазера, но и оказывает экранирующее влияние на луч лазера. Эти выводы подтверждаются экспериментальными данными.

4. Влияние скорости струи на глубину прорези. Численный анализ влияния скорости струи на силу ее соударения с поверхностью обрабатываемого материала проводился с использованием метода, описанного в п. **3**. Результаты численного анализа приведены на рис. 4.



Рис. 4. Распределение статического давления P_{st} вдоль пластины при ударе струи, имеющей различную скорость v_j :

 $1-v_j=8$ м/с, $2-v_j=12$ м/с, $3-v_j=16$ м/с, $4-v_j=20$ м/с



Рис. 5. Влияние скорости струи воды на глубину прорези: $a - v_j = 8 \text{ м/c}, \ 6 - v_j = 12 \text{ м/c}, \ 6 - v_j = 16 \text{ м/c}, \ r - v_j = 20 \text{ м/c}$

При скорости струи, равной 8 м/с, давление на поверхность материала минимально; при увеличении скорости струи давление на поверхность материала постепенно увеличивается. При угле наклона струи, равном 45° , и скорости струи $v_j = 8$, 12, 16, 20 м/с максимальное давление струи на поверхность материала равно 18, 35, 67, 100 кПа соответственно. Теоретически с увеличением ширины струи ударное воздействие на поверхность материала увеличивается. При лазерно-водоструйной обработке чем выше скорость струи, тем больше глубина прорези и существеннее увеличение градиента. Однако в реальных условиях обработки нужно учитывать большое количество факторов, поэтому результаты обработки могут оказаться противоположными ожидаемым. При большой скорости удара водоструйная установка будет вибрировать, оказывая существенное влияние на фокус лазерного луча и размер области удара.

На рис. 5 показано влияние скорости струи на глубину прорези. Видно, что с увеличением скорости струи сила ее удара и глубина прорези увеличиваются. При этом расплавленный шлак, образовавшийся при облучении лазером, вымывается из области обработки поверхности, в результате чего уменьшается потеря энергии вследствие поглощения ее шлаком. К тому же глубина обработки поверхности материала струей увеличивается, но при скорости струи, равной 12 м/с, скорость увеличения глубины уменьшается. Это может быть обусловлено тем, что при небольшой скорости струи ее воздействие на материал невелико и шлак практически не вымывается. Кроме того, вследствие интенсивного конвективного теплообмена между водой, карбидом кремния и лучом лазера увеличиваются потери энергии лазера и уменьшается количество энергии, действующей на поверхность материала. Таким образом, преобладает охлаждающее воздействие струи воды. При увеличении скорости струи до 16 м/с глубина обработки поверхности лазерно-водяной струей увеличивается. При дальнейшем увеличении скорости струи, несмотря на то что интенсивность теплообмена также увеличивается, сила удара струи значительно возрастает и ее ударное воздействие становится доминирующим. Некоторое количество энергии лазера поглощается водой, однако силы удара струи достаточно для компенсации потери энергии и увеличения глубины обработки.

Заключение. В работе с использованием однофакторного метода обработки результатов экспериментов исследовано влияние угла наклона и скорости струи воды на глубину обработки поверхности материала лазерным лучом. Получены следующие основные результаты.

При фиксированной скорости струи воды по мере увеличения угла наклона струи глубина обработки поверхности материала увеличивается. Установлено, что чем больше угол наклона струи воды, тем больше сила ее удара по поверхности материала, при этом вымывается образовавшийся шлак, упрочняется слой, уменьшается степень поглощения энергии лазера и упрощается обработка поверхности материала.

При фиксированном угле наклона струи воды по мере увеличения ее скорости глубина лазерно-водоструйной обработки поверхности материала увеличивается, но скорость ее увеличения незначительна при скорости струи, равной 12 м/с. Установлено, что вследствие интенсивного конвективного теплообмена между водой, карбидом кремния и лучом лазера увеличивается потеря энергии лазера и уменьшается количество энергии, действующей на поверхность материала. В случае если скорость струи мала, преобладает ее охлаждающее воздействие на поверхность материала, что приводит к увеличению потерь энергии лазера. Однако при большой скорости струи доминирующей становится сила ее удара по поверхности материала, в результате чего увеличивается глубина обработки этой поверхности.

Результаты, полученные в работе при исследовании лазерно-водоструйной обработки карбида кремния, могут быть использованы при обработке других материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- Yu W. C., Hu X. B., Cui Y. X., et al. Laser ablation of 6H–SiC single crystals and spectral characterization // Spectroscopy Spectral Anal. 2016. V. 36, N 4. P. 1255–1260.
- Feng S., Huang C., Wang J., et al. Investigation and modelling of hybrid laser-water jet micromachining of single crystal SiC wafers using response surface methodology // Materials Sci. Semiconductor Process. 2017. V. 68. P. 199–212.
- Maboudian R., Carraro C., Senesky D. G., et al. Advances in silicon carbide science and technology at the micro- and nanoscales // J. Vacuum Sci. Technol. A. 2013. V. 31, N 5. 050805.
- Lee T., Jang D., Ahn D., et al. Effect of liquid environment on laser-induced backside wet etching of fused silica // J. Appl. Phys. 2010. V. 107, N 3. 033112.
- Madhukar Y. K., Mutlick S., Nath A. K. An investigation on co-axial water-jet assisted fiber laser cutting of metal sheets // Optics Lasers Engng. 2016. V. 77. P. 203–218.

- Ng Y. K., Guannan D. The stability of 30 μm-diameter water jet for jet-guided laser machining // Intern. J. Adv. Manufactur. Technol. 2015. V. 78, N 5–8. P. 939–946.
- 7. Yang C., Jiang T., Yu Y., et al. Study on surface quality of wood processed by water-jet assisted nanosecond laser // BioResources. 2018. V. 13, N 2. P. 3125–3134.
- 8. Chang Y. Mathematically modeling of water jet-assisted ultraviolet-laser machining of thermal barrier coatings // IOP Conf. Ser. Materials Sci. Engng. 2018. V. 439, N 3. 032001.
- Feng S., Huang C., Wang J., et al. An analytical model for the prediction of temperature distribution and evolution in hybrid laser-waterjet micro-machining // Precision Engng. 2017. V. 47. P. 33–45.
- Webb B., Ma C.-F. Single-phase liquid jet impingement heat transfer // Adv. Heat Transfer. 1995. V. 26. P. 105–217.

Поступила в редакцию 21/VII 2020 г., после доработки — 24/VIII 2020 г. Принята к публикации 28/IX 2020 г.