

УДК 621.23.000:241

О ФОРМИРОВАНИИ ПРОФИЛЬНОЙ ЗОНЫ ТЕРМО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА ПРИ ЛАЗЕРНО-СТРУЙНОЙ ОБРАБОТКЕ КОЛЬЦЕВЫМ СОПЛОМ**В. Ю. Холодный**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: v.kholodnyi@gmail.com

Рассмотрены результаты исследований лазерно-струйной технологии обработки материалов как одного из перспективных методов резки различных изделий. На основании существующих мировых разработок рассмотрены особенности создания профилей насадков (переходного участка) для оптимального формирования лазерно-струйного потока. Создано оптимальное отверстие полости насадка, удовлетворяющее всем заявленным требованиям. С помощью программы Mathcad проведено моделирование распространения светового потока, как в полости насадка, так и в свободной струе. Было проведено математическое моделирование потока жидкости через полости построенных насадков в программной среде FlowVision. Проведены исследования на имитационной установке и на лазерно-струйном комплексе ЛСК-400-5. Диаметр струи должен быть больше диаметра луча лазера на величину ее распада.

Ключевые слова: лазерно-струйная обработка, отверстия, высокоэнергетический поток.**ЩОДО ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЬНОЇ ЗОНИ ТЕРМО-ГІДРОДИНАМІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЗРАЗКА ПРИ ЛАЗЕРНО-СТРУМЕНЕВІЙ ОБРОБЦІ КІЛЬЦЕВИМ СОПЛОМ****В. Ю. Холодный**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: v.kholodnyi@gmail.com

Розглянуто результати досліджень лазерно-струменевої технології обробки матеріалів як одного з перспективних методів різання різних виробів. На підставі існуючих світових розробок розглянуті особливості створення профілів насадків (перехідної ділянки) для оптимального формування лазерно-струминного потоку. Створено оптимальний отвір порожнини насадка, що задовольняє всім заявленим вимогам. За допомогою програми Mathcad проведено моделювання розповсюдження світлового потоку як в порожнині насадка, так й у вільному струмені. Було проведено математичне моделювання потоку рідини через порожнини побудованих насадків у програмному середовищі FlowVision. Проведено дослідження на імітаційній установці і на лазерно-струменевому комплексі ЛСК-400-5. Діаметр струменя повинен бути більшим за діаметр променя лазера на величину його розпаду.

Ключові слова: лазерно-струминна обробка, отверстия, високоенергетичний потік.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Развитие продукции машиностроения неразрывно связано с расширением и внедрение новых технологий для обработки различных материалов, обладающих особыми свойствами (которые практически не поддаются традиционными методами механической обработки материалов). В последнее время начали получать распространение новые методы резки различных изделий, среди которых наиболее перспективным является лазерно-струйный метод, основанный на одновременном действии на обрабатываемую поверхность как теплового, так и струйного потоков [1]. Сочетание этих потоков позволяет осуществлять такое влияние на обрабатываемую поверхность, при котором термическое высоко градиентное поле локализуется на исключительно малом участке поверхности в результате мощного теплоотвода, обеспечиваемого высокоскоростным потоком жидкости. Следует отметить, что также активно развиваются технологии обработки материалов струйно-лазерным потоком, обеспечивающим пульсирующее термо-гидродинамическое влияние на обрабатываемую поверхность и способным достаточно эффективно выполнять обработку металлов, керамики, металлических и неметаллических композитов. Промышленно данные технологии используются для раскроя кремниевых чипов [2], однако существуют определенные решения по использованию данного процесса и для выполнения обработки сверхпрочных мате-

риалов [3].

Кроме получения сквозных резов, в заготовках существует необходимость выполнения и операций прошивки – выполнения отверстий малого диаметра цилиндрической или профильной формы. При этом лазерно-струйный метод может быть особо востребованным, поскольку обладает высокой производительностью и стабильностью получаемых форм отверстий. В настоящее время существует необходимость в систематизации наработок и подходов к вопросу обеспечения стабильности геометрической формы отверстий, требуемого качества и минимальности деструкции прилегающих к зонам обработки участков. Этим обуславливается актуальность данных исследований.

Цель работы – исследование формирования профильной зоны термо-гидродинамического разрушения поверхности образца при лазерно-струйной обработке кольцевым соплом.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Существующие струйно-лазерные системы, представленные в [4], построены по принципу струйной камеры с прозрачным окном, через которое лазерный луч (рис. 1, [5]) вводится в струйный поток. Однако такие камеры являются нетехнологичны в изготовлении, требуют частой замены оптических элементов – прозрачного окна. Наличие самого окна ограничивает уровень давления, который может быть создан гидравлической системой.

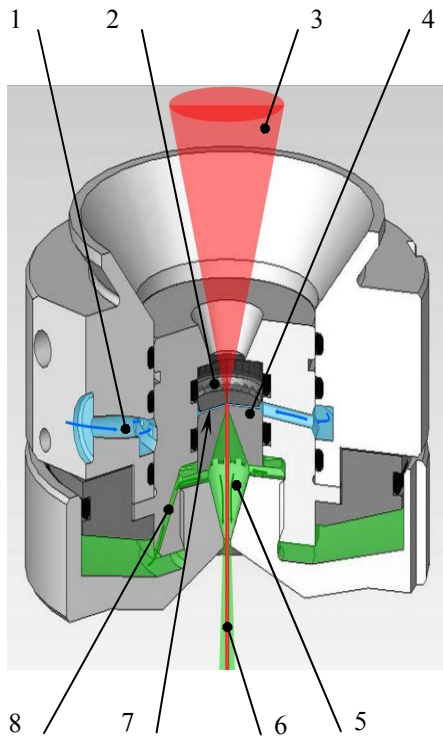


Рисунок 1 – Устройство для формирования струйно-лучевого потока производства фирмы Synova (Швейцария): 1 – канал для подвода хладагента в камеру; 2 – оптический элемент окна, предназначенного для ввода лазерного луча в струю хладагента; 3 – лазерный луч; 4 – насадок с соплом; 5 – камера для формирования струи хладагента путем введения под давлением нейтральных газов (гелия); 6 – струя хладагента с введенным в нее лучом лазера и «оболочкой» из нейтрального газа; 7 – камера с подводимым хладагентом; 8 – канал для подвода к формируемой струе нейтральных газов

К недостаткам подобного устройства также можно отнести отсутствие переходного участка в насадке (необходимого для формирования струи), и, как следствие, необходимость создания на выходе из насадка «подпирающего» давления нейтральными газами (например, гелием) удерживающего струю от распада и высокоточного позиционирования лазерного луча относительно формируемой струи, т.к. перетяжка каустики в этом случае должна находиться на входе сформированной струи жидкости.

Для устранения указанных недостатков и расширения технологических возможностей, а также реализации гибридных технологий обработки, предложено использовать струйные камеры с кольцевыми соплами (рис. 2), в которых оптические элементы отсутствуют, а введение луча лазера в струю жидкости происходит в самом кольцевом пространстве.

При этом, учитывая, что исследования по разработке струйных камер с кольцевыми соплами еще не завершены, дальнейшие лабораторные исследования протекающих процессов по формированию струйно-лазерного потока производились с использованием имитационной установки, конструктивно аналогичной установкам компании Synova.

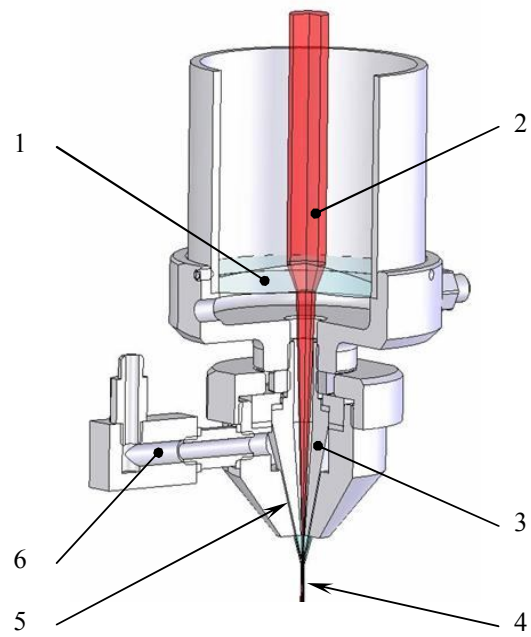


Рисунок 2 – Устройство для формирования струйно-лучевого потока: 1 – оптический элемент для фокусировки лазерного луча; 2 – лазерный луч; 3 – коническая вставка; 4 – сформированный струйно-лучевой поток; 5 – кольцевой конический канал для подвода хладагента; 6 – канал подвода хладагента

С целью приближения режима истечения потока хладагента из насадки к ламинарному, было принято решение, в отличии от конструкции Synova, использовать профилированный переходный участок, соединяющий камеру и сопловой насадок. Это позволило также создавать насадки с выходным сечением канала, отличным от окружности.

Для проведения имитационного эксперимента были созданы специальные насадки, исходя из следующих соображений:

- обеспечение компенсации несоосности луча лазера и свободной струи жидкости;
- исключение обратного отражения луча в сторону оптической системы;
- обеспечение полного отражения луча лазера за счет отсутствия его разделения на границе сред (жидкость–воздух).

Необходимость компенсации несоосности обусловлена удаленностью источника лазерного излучения от сопла насадка и особенностями регулировки их взаимного положения. В тоже время необходимость использования переходных участков для образования струи обусловлена тем, что диаметр луча лазера при использовании сопел с профилями канала, отличных от круглого, должен быть гарантировано большим максимального размера сечения сопла. Таким образом, с помощью переходного участка, используя эффект полного отражения луча от его стенок, возможно добиться максимально эффективного использования силы свечения лазера.

В связи с этим был проведен анализ литературных источников, предлагающих различные методики по моделированию сопел [6–9]. В результате

установлено, что ограниченный по форме канала практически нет. Однако для конкретной конфигурации требуется соответствующий переходной участок. (определяемый профилем с использованием формул Витошинского, коноидального, конического и др.). Сами каналы имеют сужающиеся переходные участки (рис. 3), а касательные, проведенные к любой из точек профиля (для данных кривых) имеют переменный угол наклона к оси самого насадка. Следовательно, существует высокая вероятность того, что в случае несоосности луча со струей жидкости, произойдет частичная потеря светового потока из-за его рассеивания.

Проведенный анализ показал, что из всех рас-

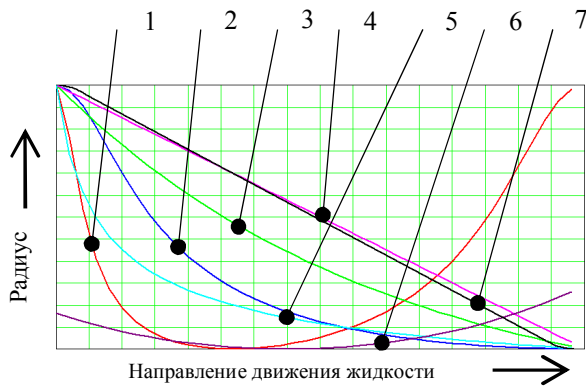


Рисунок 3 – Результаты моделирования продольного сечения профилей переходного участка насадка: 1 – по формуле Витошинского согласно [6], 2 – по формуле Витошинского согласно [9], 3 – экспоненциального, 4 – конического без скруглений в переходных зонах, 5 – коноидального, 6 – катеноидального, 7 – конического с учетом скруглений в переходных зонах

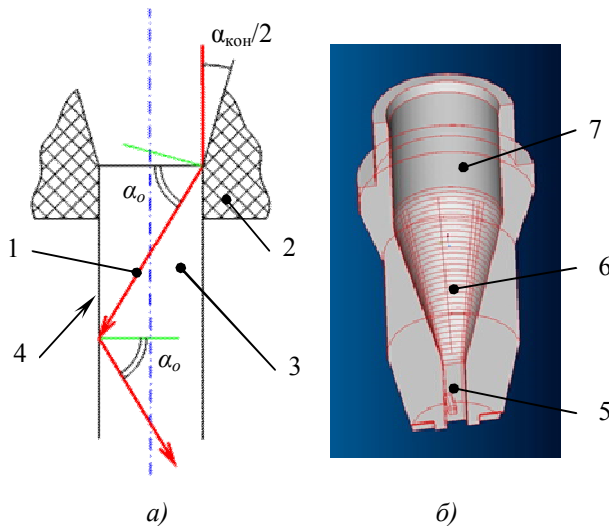


Рисунок 4 – Насадок и принцип его построения: а – расчетная схема определения величины половины угла образующей конуса переходного участка насадка (1 – луч лазера; 2 – насадок; 3 – струя жидкости; 4 – граница сред «вода – воздух»); б – фрагмент 3D модели насадка с квадратным сечением со пла, изготовленного для проведения исследований на имитационной установке (участки: 1 – сопло постоянного поперечного сечения; 2 – переходной конусной конфигурации; 3 – начальный участок)

смотренных конфигураций переходного участка только коническая может обеспечить постоянство предельного угла полного отражения луча независимо от величины смещения лазерного источника (рис. 4,а). Полученные результаты подтвердили данное предположение. К тому же переходный конический участок наиболее конструктивно приспособлен для компенсации неточности в изготовлении и наиболее технологичен при изготовлении (рис. 4,б). На рис. 5 приведены результаты визуализации моделирования интенсивности свечения лазерного луча на поверхности обрабатываемой детали в случае несоосности расположения луча и струи хладагента.

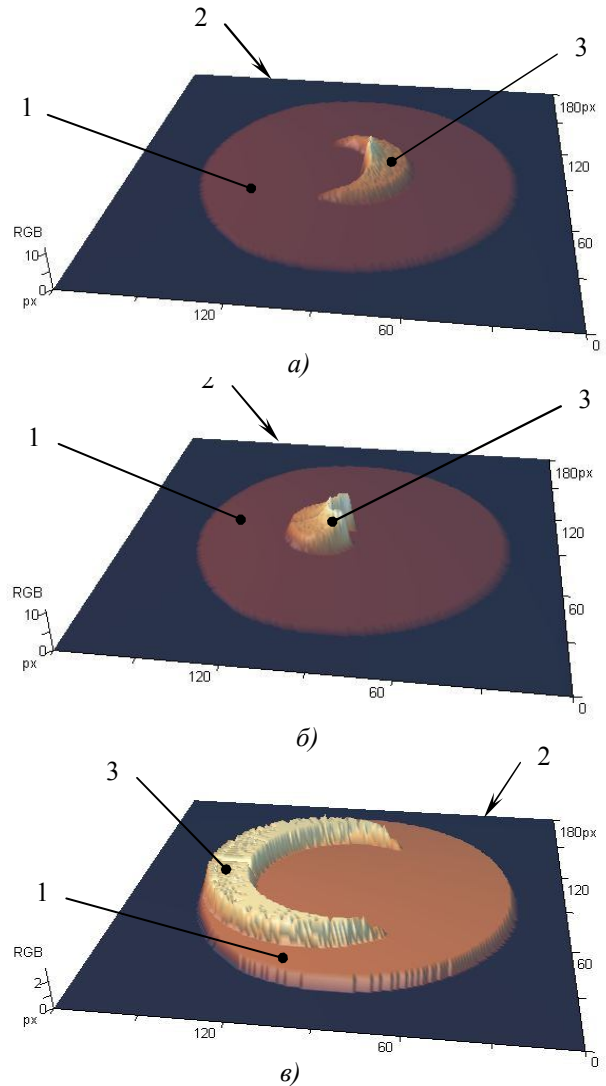


Рисунок 5 – Визуализация моделирования силы свечения отпечатка лазерного луча на поверхности обрабатываемой детали с несоосностью луча и струи хладагента в 0,1 мм. Отверстие сопла выполнено в форме круга: а – высота струи хладагента – 5 мм; б – высота струи хладагента – 10 мм; в – высота струи хладагента – 16 мм; 1 – отпечаток светового потока луча лазера, проникающий сквозь струю хладагента без преломления; 2 – часть луча лазера, отраженная от конусного участка насадка и границ сред «вода-воздух»; 3 – поверхность обрабатываемой детали

С учетом размеров компонентов ранее созданной имитационной установки в расчетах были приняты следующие параметры: лазерный луч диаметром 2,2 мм, диаметр струи жидкости 2 мм и несоосность взаимного их расположения 0,18 мм. Исследования проводились в среде Mathcad.

Из приведенных результатов следует, что наличие конусной части насадка позволяет наиболее полно использовать энергию свечения, «загоняя» ее в геометрию струи. При этом размещение отраженной части луча относительно основного отпечатка зависит от высоты струи жидкости.

Однако луч, сформированный кольцевым соплом, смыкается, вследствие чего возможны существенные нарушения режима течения в определенных его зонах, что требует проведения дополнительных модельных экспериментов, направленных на установление закономерности распределения давлений и скоростей в потоке. Зоны, в которых будут происходить максимальные изменения, очевидно, будут зонами максимальных потерь мощности лазерного излучения. Кроме того, оценка изменений градиента скорости на поверхности натекания позволит уточнить механизм повреждения и раз-

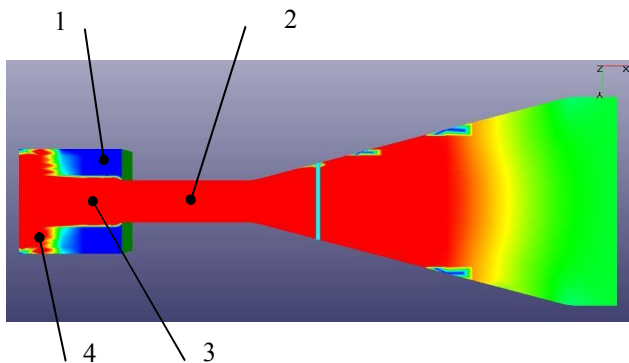


Рисунок 6 – Результат моделирования истечения жидкости из сопла насадка в программной среде FlowVision: 1 – окружающий свободную струю воздух; 2 – участок насадка с профилированным отверстием; 3 – свободная струя жидкости; 4 – растекающийся после соударения поток

Точечная визуализация массива данных, полученных в результате расчета, позволяет установить не только распределение скоростей в потоке, а и определить изменение интенсивности лазерного излучения при условии, что распределение интенсивности на перетяжке каустики в плоскости смыкания струи соответствует закону Гаусса (рис. 8).

Так, становится очевидным, что существует четкое расстояние от среза сопла до поверхности обработки, где затраты мощности излучения и, соответственно, возможная производительность обработки является наибольшей; по этому сечению возможно резкое снижение как точности воспроизведения контура, так и производительности процесса (рис. 9). На основании данных моделирования проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили указанные соображения и позволили изучить особенности процесса лазерно-струйного резки материалов, в которых $h/D_c > 1,0$ (отношение тол-

прочнения материала, на основе которого возможно прогнозирование формообразования при струйно-лазерной обработке.

Для изучения данного вопроса было принято решение о проведении моделирования протекающих процессов, а именно, её гидравлической составляющей, которое выполняли в среде FlowVision (рис. 6). Считали, что струйный поток формируется соплом с изменяемой геометрией проточной части. В зависимости от условий возможны следующие формы выходного отверстия (сопла): круглый, прямоугольный с закругленными углами, овальный. При этом диаметр отверстия сопла насадка составляла 2 мм; скорость потока жидкости на входе в насадок – 14...50 м/с. Ставилась задача оценить перепад скоростей в свободном потоке (за чертой сопла) и выявить зоны максимальной неустойчивости, в которых, согласно полученным ранее результатам, возможен максимальный ущерб для прозрачности и, соответственно, максимальное рассеивание излучения лазера. При выполнении расчетов получен массив данных, состоящий из 5594 строк координат по осям x и y , и значений скорости по оси x (рис. 7).

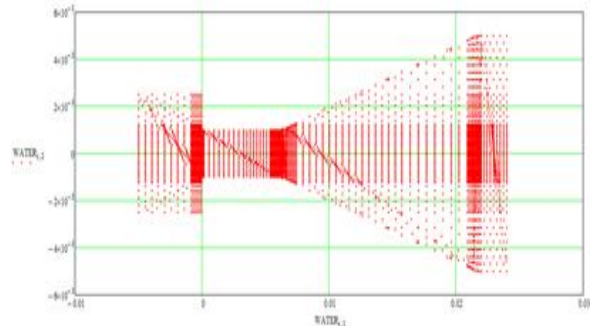


Рисунок 7 – Массив точек, полученный в среде FlowVision, характеризующий скоростной режим движения потока жидкости

щины к пересечению струи и перетяжке каустики сфокусированного луча). Нами также установлено этапность процесса и его квазициклический характер. Цикличность проявляется на нескольких гармониках и определяется как условиями течения жидкости, так и частотой следования импульсов лазера; практически не зависит от структуры обрабатываемого материала и физико-механических свойств его компонентов. Экспериментально подтверждено существование пиковых амплитуд на частотах $(0,2-0,25)n_1$ и $(2,4-3,5)n_1$. Опыты выполняли с твердотельным лазером с длиной волны $\lambda = 1062$ нм, и сопловым устройством с $D_c = 0,25$ мм. Решение тепловой задачи для гаммы материалов от действия сосредоточенного источника тепла и теплосйомника с интенсивным массопереносом показало, что в самом поверхностном слое происходят преобразования, связанные с изменением структуры слоя и его и химического состава. Показано, что на поверхности контакта «струя–обрабатываемое тело» во время

действия лазерного излучения при определенных условиях возникает плазма, которая ведет к образованию граничного слоя с пресыщенным паром, толщина которого циклически изменяется и зависит от режимов воздействия. Наличие парового слоя с остатками жидкости в полостях микродефектов создает условия для предшествующего развития магистральных трещин и активного слияния дефектов, следовательно, создаются условия для высокоинтенсивного массопереноса сверхмалыми частицами.

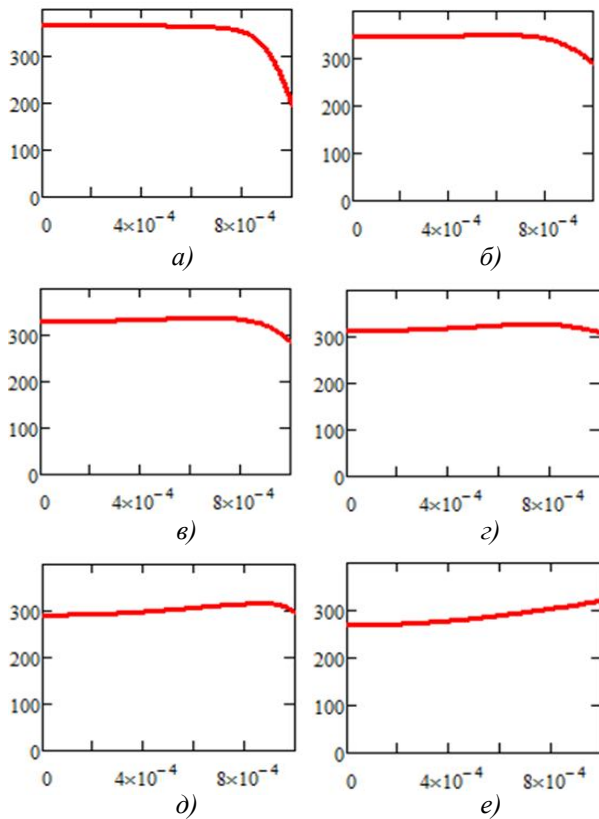


Рисунок 8 – Уменьшение скорости потока на торце насадка и на каждом следующем миллиметре свободного истечения жидкости за насадком, которое ведет к соответствующему снижению интенсивности лазерного излучения. Графические представления приведены от оси струи (слева) до границы проекции отверстия насадка (справа): *a* – торец сопла; *b* – *e* – расстояния от торца сопла с шагом 1,0 мм, где *e* – поверхность обработки

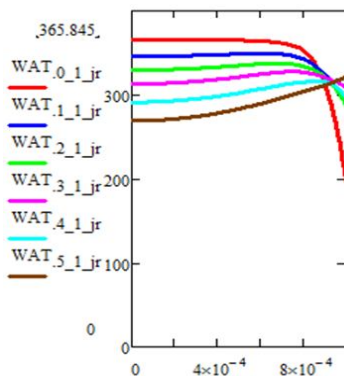


Рисунок 9 – Уменьшение интенсивности излучения и его распространение за ожидаемый контур: соответствующими кривыми обозначена зона распространения излучения

Полученные теоретические посылки позволили предложить действенные средства для изменения формы проявления струйно-лазерного потока, при этом эффективность такого изменения является достаточно высокой. Поэтому после выполнения модельных экспериментов перешли к проведению исследований формирования профильного отверстия в заготовках из нержавеющей стали марки 12Х17 толщиной 1,5 мм. Исследования проводили на установке ЛСК-400-5, режимы: давление натекания – 60 МПа, время обработки – 0,2 с. Контроль осуществлялся с помощью: частота импульса – 65 Гц, манометр образцовый (5 – 500 МПа), вакуумметр (0,5 – 10 мм.в.с.), датчик давления LNA-300, датчик разряжения LNR-25.

Установлено, что наиболее точно воспроизводится круглое сечение, однако и другие формы (в частности, квадрат и эллипс) являются достаточно точными (рис. 10, а, б).

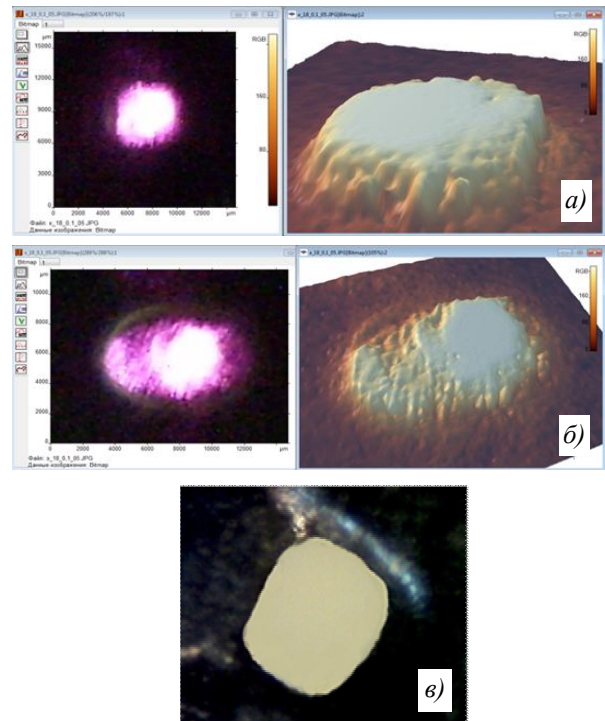


Рисунок 10 – Формы луча, полученные соответствующим профилированием среза сопла: *a*) квадрат со скругленными углами; *б*) эллипс фото реального отверстия; *в*) отверстие, полученное при профилировании потока

ВЫВОДЫ. Таким образом, дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение точности воспроизведения формы. Учитывая, что в свободной струе жидкости, относительно проекции кромочной части сопла, происходит изменения скорости потока жидкости в сторону ее уменьшения, можно предположить об аналогичных изменениях оптических свойств струи в сторону их ухудшения. Исходя из сказанного, в последующих исследованиях, следует обратить внимание на возможность увеличения размеров профилированного отверстия на величину толщины слоя жидкости, определяемого резким падением скорости потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Salenko O., Fomovska V., Dudyuk O., Mana. About some results of exploration of water jet guided laser onto the solids' surface // *Unitex-10: International scientific conference 19–20 November 2010, Gabrovo 2010*. – PP. 414–421
2. Salenko A., Dudyuk V., Mana O. About effects of stream-beam influence on a surface of firm bodies // *Unitex-09: International scientific conference*. – Gabrovo, 2009. – Vol. 3. – PP. 462–468. — *Laser workshop: Mittweida – Germany*.
3. *Jets methods of cutting carbide and super hard material* // Salenko O., Schetinin V., Fomovska L. – Lambert Academic Publisher. – Germani, 2013. – 118 p.
4. Synova (2002): *The water jet guided laser*. – Synova S.A., Switzerland. – Cied 28 March 2006. [Electronic resources.

– Mode of access: <http://www.synova.ch/microjet.pdf>

5. Martin R. (2014), “Natural diamond cutting using water jet-guided laser”, *Laser LIM* available at: <http://www.synova.ch/conferences> (accessed December 14, 2014).
6. Дейч М.Е. *Техническая газодинамика*. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 669 с.
7. Френкель Н.З. *Гидравлика*. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с.
8. *Обратная задача теории сопла* / У.Г. Пирумов. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
9. Семко А.Н., Локтюшина Ю.В. Об учете сжимаемости при расчете течения в гидроподушке // *Вісник Донецького національного університету, Сер. А: Природничі науки*. – 2011. – № 2. – С. 95–101.

ABOUT THE FORMATION OF THE PROFILE ZONES THERMO-HYDRODYNAMIC DESTRUCTION OF THE SAMPLE SURFACE WITHIN WATER JET GUIDED LASER ANNULAR NOZZLE

V. Kholodnyi

Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: v.kholodnyi@gmail.com

The results of studies of laser-jet materials processing technologies, as one of the promising methods for cutting a variety of products are shown. On the basis of current world developments are considered features profiling nozzles (transition region) for optimal formation of laser-jet flow. Optimal nozzle opening of the cavity, satisfying all the stated requirements have been created. Using a simulation program Mathcad propagation of the luminous flux in the nozzle cavity and in the free jet. Mathematical modeling of fluid flow through the nozzle into the cavity built software environment FlowVision was conducted. Research on the simulation installation and laser-jet complex LSK-400-5 was conducted. The diameter of the jet should be greater than the diameter of the laser ray by the amount of its decay.

Key words: water jet guided laser, hole, power beam effectivity.

REFERENCES

1. Salenko, O., Fomovska, V., Dudyuk, O., Mana (2010) “About some results of exploration of water jet guided laser onto the solids' surface”, *Unitex-10: International scientific conference 19-20 November 2010, Gabrovo 2010*, pp. 414–421.
2. Salenko A., Dudyuk V., Mana O. (2009) “About effects of stream-beam influence on a surface of firm bodies”, *Unitex-09: International scientific conference*, vol. 3, pp. 462–468, Gabrovo, *Laser workshop: Mittweida, Germany*.
3. Salenko, O., Schetinin, V., Fomovska, L. (2013) *Jets methods of cutting carbide and super hard material*, Lambert Academic Publisher, Germany.
4. Synova, S.A. (2002) *The water jet guided laser*, Cied 28 March 2006, Switzerland, [Imp//www.synova.ch/microjet.pdf](http://www.synova.ch/microjet.pdf).
5. Martin, R. (2014), “Natural diamond cutting using water jet-guided laser”, *Laser LIM* available at: <http://www.synova.ch/conferences> (accessed December 14, 2014).
6. Deych M. (1961), *Tekhnicheskaya gazodinamika* [Technical gasdynamics], Gosenergoizdat, Moscow, USSR.

7. Frenkel, N. (1956) *Gidravlika* [Hydraulic], Gosenergoizdat, Moscow, USSR.

8. Pirumov, U. (1988) *Obratnaya zadacha teorii sopla* [Inverse theory of nozzle], Mashinostroyeniye, Moscow, USSR.

9. Semko, A., Loktyushina, Yu. (2011) "On account of the compressibility of the calculation of the flow in the hydro-cushion" // *Вісник Донецького національного університету*, no. 2, pp. 95–101.

Стаття надійшла 23.02.2015.