

Поиск решений по перфорированию микроотверстий в хромистых и хромоникелевых сталях

© А.Б. Люхтер¹, К.В. Скворцов², А.А. Вознесенская¹,
А.С. Ежов², А.А. Бекетов³

¹ Инжиниринговый центр при ВлГУ, Владимир, 600000, Россия

² ООО «ИЦ при ВлГУ», Владимир, 600000, Россия

³ КБ «Арматура» филиала ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, Ковров, 601909, Россия

Рассмотрено формирование микроотверстий в диапазоне 50...150 мкм в хромоникелевой стали с большой плотностью расположения с помощью наносекундного лазерного излучения. Описана последовательность применения технологических подходов и операций. Создана модель воздействия лазерного излучения на поверхность хромоникелевой стали. Составлены диаграммы распределения тепловых полей для разного количества импульсов. Определена оптимальная последовательность прошивки отверстий в целях снижения тепловой нагрузки на заготовку, что позволяет избежать температурного коробления детали. Для повышения качества кромок получаемых микроотверстий предложен ряд технологических подходов, благодаря использованию которых удалось снизить количество продуктов выплеска жидкой фазы на поверхность обрабатываемой детали. Обоснована целесообразность применения дополнительного технологического подхода при применении лазерной микроперфорации. Разработана технология лазерной прошивки микроотверстий.

Ключевые слова: волоконный лазер, лазерная микрообработка, ультраперфорация, микроотверстия, хромоникелевая сталь.

Введение. Лазерная обработка материалов, в частности микроперфорация, является актуальным направлением исследований, так как затрагивает практически все направления современного промышленного производства. По сравнению с традиционными методами лазерная обработка обладает следующими преимуществами:

- осуществляется бесконтактно неизнашивающимся инструментом;
- характеризуется высокой точностью и производительностью технологического процесса;
- применяется для широкого круга технологических материалов (от прозрачных диэлектриков до тугоплавких металлов).

Лазерная микрообработка проводится с использованием широкого круга лазерных систем. Основное требование, обусловленное материалом обрабатываемого образца, — минимальная длительность импульса. В мировой практике применяются фемто- и пикосекундные системы, реже — системы с длительностью импульса 1 нс, что

объясняется механизмом электрон-фотонных взаимодействий в веществе. В нашем случае рассмотрен технологический подход получения ультраперфорированной поверхности на лазерной установке с длительностью импульса 100 нс.

Основная часть. Предприятиям, занимающимся производством изделий с применением узлов, содержащих микроотверстия, зачастую приходится решать задачу о покупке технологической установки для микроперфорации. Наилучшим образом в этом отношении подходит лазерный комплекс. Специализированные фемто- и пикосекундные лазеры — дорогостоящие установки и зачастую имеют чрезмерно широкие функциональные возможности, которые по разным причинам не полностью могут быть задействованы в производственном цикле предприятия. Следовательно, необходима установка, созданная на базе недорогой лазерной системы, которая позволит производить обработку, удовлетворяющую требованиям конечного потребителя.

За последние 10–15 лет волоконные лазерные системы активно вытесняют газовые и твердотельные лазерные системы с производственных линий. Применение современных лазерных систем дает возможность повысить производительность, качество обработки, снизить трудоемкость выполняемых операций [1]. Совокупность технологических приспособлений и подходов при лазерной обработке позволяет существенно снизить стоимость установки для микроперфорации, построив ее на базе серийно выпускаемой наносекундной лазерной установки отечественного производства, стоимость которой значительно ниже стоимости пико- и фемтосекундных систем. Применение волоконных лазерных систем для внедрения в производственные процессы имеет ряд преимуществ перед твердотельными лазерными системами: высокий КПД — до 40 %; изолированную оптическую систему; удобство в эксплуатации; длительный срок службы.

Перед коллективом была поставлена задача разработки технологии прошивки микроотверстий в хромистых и хромоникелевых сталях со следующими параметрами: диаметром входного отверстия 80 ± 5 мкм; диаметром выходного отверстия 60 ± 5 мкм; толщиной пластины 500 мкм; шероховатостью входной и выходной поверхности $R_a = 2$ мкм; производительностью не менее 4 отверстий в секунду. Технологию следовало отработать на базе серийно выпускаемой лазерной технологической установки, оснащенной волоконным наносекундным лазерным модулем, длиной волны излучения 1064 нм, длительностью импульса 100 нс и частотами повторения 10...100 кГц. Установка оснащена плоскопольным фокусирующим объективом и приспособлениями перемещения в трех ортогонально расположенных линейных координатах.

При проведении лазерной микрообработки материалов, в частности металлов, следует избегать чрезмерного нагрева областей обра-

ботки. Нагрев вносит нежелательные влияния: от образования жидкой фазы до деформации всей детали [2]. Для снижения температурного вклада следует подбирать параметры лазерного излучения, чтобы максимальное количество лазерной энергии тратилось на удаление материала [3]. Использование «коротких» фемто- и пикосекундных импульсов позволяет добиться «холодной обработки». Мощность излучения, частота следования импульсов, длительность импульса — все эти параметры подбирают для каждого обрабатываемого материала индивидуально.

Для проведения исследования использовалась технологическая установка с достаточно длительным импульсом (100 нс), неудобным для решения задач в области микрообработки. Наносекундный режим обработки является условно пороговым, в результате воздействия импульса которого происходит как разлет свободных молекул, атомов и ионов, так и образование жидкой фазы, когда вещество выплескивается и разбрызгивается [4].

В ходе работы были решены следующие задачи: по снижению теплового вклада в процесс обработки; по нахождению оптимального способа снижения шероховатости входной и выходной плоскости и ультраперфорированной поверхности металла.

Высокая энергетическая составляющая процесса лазерной обработки приводит к интенсивному плазмообразованию. Лазерно-индуцированная плазма к тому же обладает хорошим экранирующим эффектом, который рассеивает и поглощает лазерное излучение. При этом материал не удаляется, но повышается температура области обработки за счет разогрева плазменного факела. Поэтому необходимо подбирать частоту следования импульсов и мощность лазерного излучения таким образом, чтобы процесс обработки носил «холодный» характер. Оптимальным считается подбор, при котором каждый последующий импульс приходил бы в момент остывания лазерно-индуцированной плазмы [5]. Тем не менее, чрезмерное уменьшение частоты импульсов и средней мощности негативно влияет на технологическую производительность.

При выполнении лазерной микрообработки материалов и прошивке сквозных отверстий важно знать, как распределяется интенсивность в поперечном профиле обрабатываемого пучка [6]. Поперечный профиль распределения интенсивности лазерного излучения в пучке — это «рабочий инструмент» при обработке, непосредственно влияющий на динамику и эффективность процесса микрообработки: конусность микроотверстий, чистоту кромок и топологию поверхности материала около отверстия [3].

Измерение поперечного профиля интенсивности в фокальной плоскости объектива проводилось с помощью измерителя попереч-

ного профиля лазерного пучка VeamStar-FX. Интенсивность в пучке имеет форму, очень близкую к распределению Гаусса (рис. 1). Измерение проводилось в фокальной плоскости объектива. По уровню половины мощности излучения поперечный размер составил 28 мкм, продольный — 31 мкм.

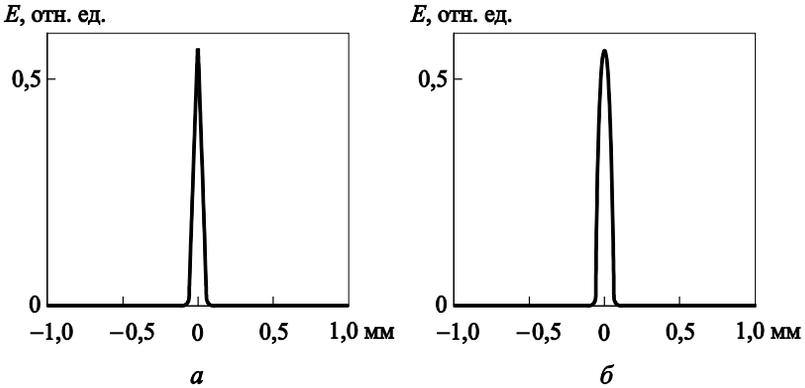


Рис. 1. Поперечный профиль распределения интенсивности в лазерном пучке:
a — по оси *X*; *б* — по оси *Y*

Обработка поверхности нержавеющей стали AISI 304 выполнена при следующих параметрах лазерного излучения:

Частота следования импульсов..... 20 кГц;
Средняя мощность 20 Вт;
Число импульсов в точку обработки..... 100

Результат обработки оказался несоответствующим требованиям (рис. 2).

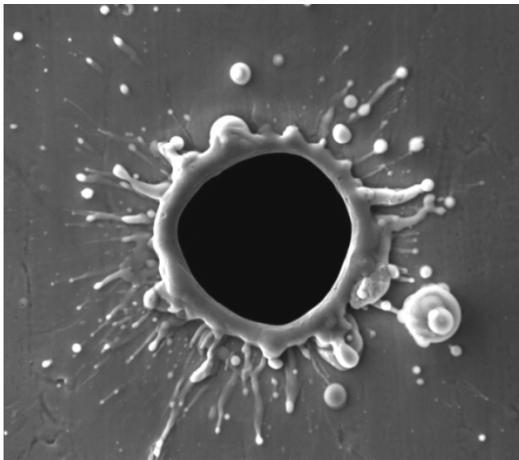


Рис. 2. Изображение выходного отверстия, полученное с помощью растрового электронного микроскопа

При обработке вокруг отверстия сформировался валик расплава высотой порядка 60 мкм, поверхность образца покрылась «градом», образованным в результате разбрызгивания расплава обрабатываемого материала. При попадании сфокусированного лазерного излучения на поверхность обрабатываемого материала образовалась каверна, форма которой очень близка к форме поперечного распределения интенсивности в лазерном пучке. Исследования показали, что уменьшение энергии на краях лазерного луча повышает чистоту кромок образуемого отверстия, а также способствует снижению конусности. Так как процесс лазерного разрушения материала носит некоторый пороговый характер, необходимо исключить краевые области пучка, вносящие недостаточный для протекания абляции энергетический вклад, но значительно повышающие температуру кромок, что, как следствие, приводит к увеличению образования жидкой фазы [7].

Прецизионная обработка деталей, работающих на ответственных участках различных систем, невозможна без проведения предварительного моделирования процессов обработки в специализированных программах, вследствие чего можно избежать длительных циклов подбора оптимальных режимов обработки. Предварительное моделирование процесса обработки, анализ механизма протекания процесса и выявление граничных зависимостей, в рамках которых находится оптимальный режим обработки, позволяют значительно сократить время на разработку и повысить качество получаемого продукта.

Исходя из заданных требований к обрабатываемой детали и параметров лазерной технологической установки, были сформированы входные данные, построена модель, проведен ее анализ, сделан вывод о динамике протекающих процессов. Для подтверждения правильности выходных данных компьютерного моделирования проведен натурный эксперимент, подтверждающий правильность модели.

Моделирование процесса лазерной обработки поверхности нержавеющей стали проходило путем анализа распределения тепловых полей на программном комплексе SolidWorks Simulations. В качестве входных данных использовался диапазон рабочих параметров лазерной установки: область воздействия лазерного излучения составила 30...80 мкм, средняя мощность 1...20 Вт, коэффициент поглощения материала лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1064$ нм составил 0,6, длительность импульса 100 нс — параметр неизменный, частота следования импульсов 10...1000 кГц. На основании этих данных осуществлялось моделирование с целью добиться максимально резкого градиента температур в приграничной области обработки, так как при плавном распределении температур получение резкой кромки (применительно к задачам микроперфорации) не представляется

возможным. В результате накопления тепловой энергии происходит оплавление и чрезмерное разбрызгивание жидкой фазы обрабатываемого материала. Оптимален режим, формирующий наиболее резкий переход от максимальной температуры к минимальной, при котором осуществляется наименьший тепловой вклад в процесс обработки, а большая часть энергии расходуется на удаление материалов (испарение, абляция). С помощью моделирования определены оптимальные параметры:

Длительность импульса, нс	100
Частота следования импульсов, кГц.....	20
Средняя мощность, Вт	20

Проводилось моделирование воздействия четырех импульсов, следующих друг за другом с частотой 20 кГц. Поскольку применение наносекундной системы неизбежно приводит к образованию жидкой фазы металла, при обработке особое внимание было уделено перекрытию и распространению тепловых полей.

Правый ряд изображений на рис. 3 соответствует распределению тепловых полей по окончании воздействия лазерного импульса, левый — показывает остаточный нагрев, возникающий перед приходом следующего импульса. Перепады температур обозначены цветом: синий — 300 К, красный — свыше 5 000 К. Установлено, что по достижении такой температуры происходит 100%-ное удаление материала из зоны воздействия. Максимальная (расчетная) температура в момент прихода импульса составляла, К: 36 000 для первого импульса, 37 000 — для второго, 38 000 — для третьего и 39 000 — для четвертого. Остаточная температура перед приходом каждого следующего импульса повышалась на ≈ 350 К. Распределение тепловых полей происходило вглубь материала и было ограничено в краевых областях при диаметре 90 мкм.

Для проверки результатов компьютерного моделирования провели серию натуральных экспериментов. Лазерное излучение фокусировалось на поверхность образца из нержавеющей стали посредством плоскопольной фокусирующей системы. Согласно данным, полученным путем моделирования, определены оптимальные параметры обработки, а именно: частота следования 20 кГц; средняя мощность 20 Вт; диаметр лазерного пучка в области обработки 30 мкм. Поверхность образца обработана следующим образом. Область обработки состояла из четырех зон воздействия: в первую зону приходилось по 1 импульсу в точку фокусировки, во вторую — по 2, соответственно, в третью и четвертую зоны по тому же алгоритму. Методом растровой электронной микроскопии исследованы полученные образцы, профиль образованных каверн, их глубина и диаметр.

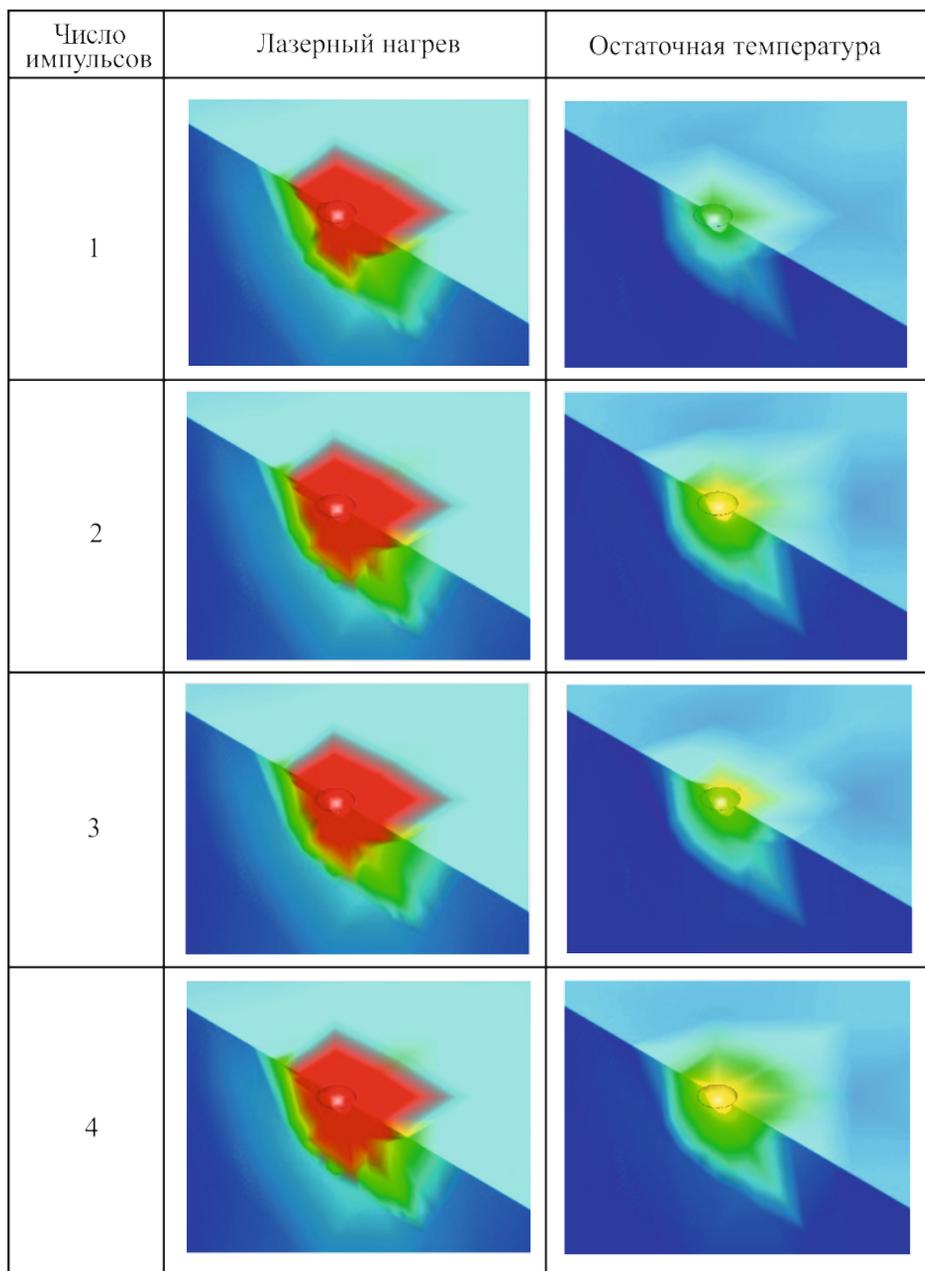


Рис. 3. Распределение тепловых полей

Диаметры образованных каверн лежали в диапазоне 77...83 мкм, для расчета использовался средний диаметр — 80 мкм независимо от количества импульсов, пришедших в область обработки (в данном эксперименте от 1 до 4 импульсов). Средние значения глубин и диаметров каверны в соответствии с энергетическим вкладом (количеством импульсов) приведены на рис. 4.

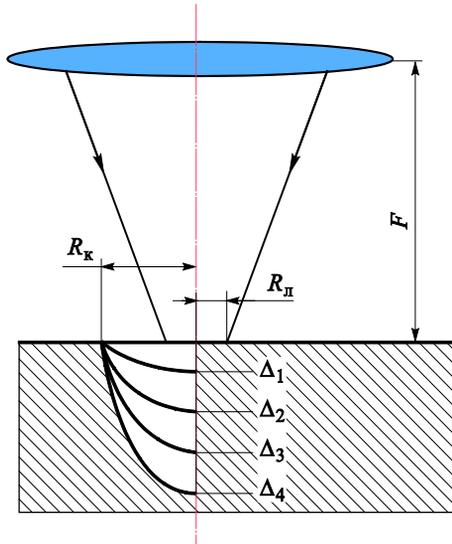


Рис. 4. Схема эксперимента лазерного воздействия на образец с изображением областей удаленного материала:

F — фокусное расстояние; R_k — радиус каверны, мкм;
 R_l — радиус лазерного пучка, мкм; Δ — средняя глубина каверны

Для зон, в которые было направлено по 1 импульсу, средняя глубина образованных каверн составила $\Delta_1 = 21$ мкм, для зон воздействия 2 импульсов — $\Delta_2 = 46$ мкм, 3 и 4 импульсов — $\Delta_3 = 59$ и $\Delta_4 = 90$ мкм соответственно. На основании этих данных вычислен объем удаленного из зоны обработки материала (таблица).

**Усредненные данные удаления материала
 после лазерной обработки**

Число импульсов	Средняя глубина каверны Δ , мкм	Средний удаленный объем $V \cdot 10^3$, мкм ³
1	21	55
2	46	133
3	59	191
4	90	310

Для проверки подлинности компьютерного моделирования проведено сравнение полученных результатов с результатами анализа образцов (рис. 5). Отклонения расчетных данных от реальных, по разным параметрам, составили менее 5 %, среднее отклонение — менее 3 %, что позволяет сделать вывод о возможности применения данной модели для расчета оптимального режима воздействия лазерного излучения при выполнении микроперфорации. Моделирование процесса позволило определить оптимальный режим обработки прошивки микроотверстия.

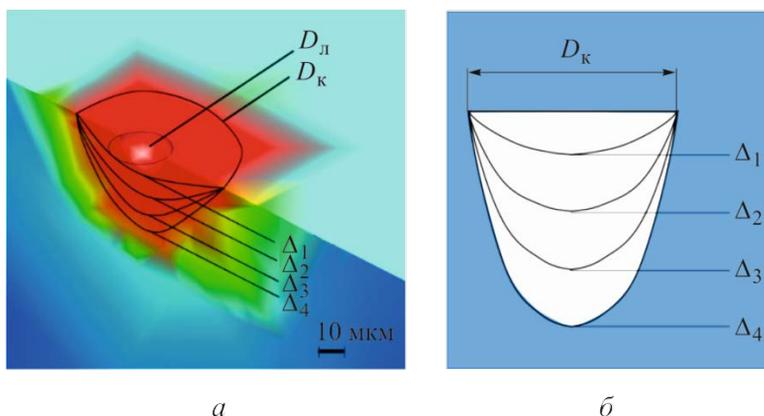


Рис. 5. Сравнение данных компьютерного моделирования (а) и результатов обработки экспериментальных данных (б):

$D_{л}$ — диаметр лазерного пучка; $D_{к}$ — диаметр образованной каверны; Δ — средняя глубина каверны

Для снижения тепловой нагрузки на обрабатываемую деталь, удаления максимально возможного количества разогретого материала из области обработки и доведения образованного отверстия до заданного размера процесс микроперфорации был разделен на три этапа. Первый этап (рис. 6, а) заключался в формировании входной каверны, далее проходило изменение фокусного расстояния оптической системы на глубину, равную половине толщины обрабатываемой поверхности, что приблизительно соответствовало положению дна образованной каверны. Такой подход дал возможность внести максимальное количество энергии в процесс «удаления» материала. Если не осуществить «перефокусировку» системы, получим нежелательную расходимость пучка лазерного излучения и, как факт, снижение плотности мощности, что приведет не к удалению материала, а к дополнительному разогреву поверхности каверны. Изменение положения фокуса оптической системы относительно области обработки обуславливает бóльшую продуктивность процесса удаления материала (см. рис. 6, б). Совокупность этих действий позволяет сформировать сквозное отверстие. Оно обладает большой конусностью 2:1, что, однако, не удовлетворяет заданным требованиям. Далее происходит увеличение диаметра выходного отверстия (рис. 6, в). Лазерное излучение фокусируется на боковые стенки отверстия, таким образом увеличивая этот диаметр. Материал со стенок удаляется как через входное, так и выходное отверстия канала. Это позволяет снизить тепловую нагрузку на кромки входного отверстия, что значительно повышает качество кромок и поверхности обрабатываемой детали.

Несмотря на проведенные работы по поиску оптимального режима обработки исходя из параметров существующего лазерного комплекса,

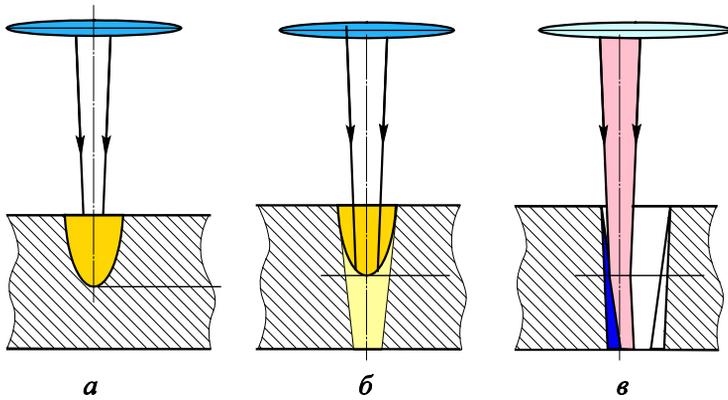


Рис. 6. Схема поэтапного формирования микроотверстия:

а — входное «глухое» отверстие; *б* — сквозной канал;

в — размерная обработка сквозного отверстия

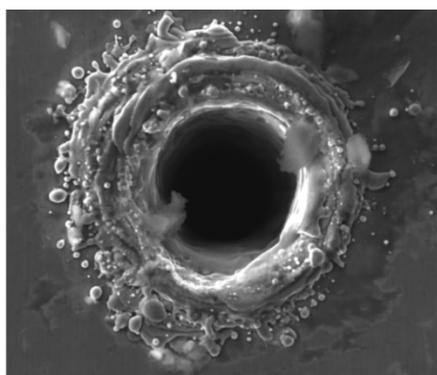
не удалось добиться заданных значений шероховатости входных и выходных плоскостей детали. Основными дефектами входной плоскости стали «град» и валик, образованные в результате выхода и затвердевания жидкой фазы, разбрызгивания материала на поверхности. На выходной плоскости детали также наблюдался достаточно высокий валик, а «град» отсутствовал, так как его наличие характерно для входной плоскости обрабатываемой детали. При выполнении микроперфорации достаточно большой плотности (девять отверстий на 1 мм^2) внутренние напряжения, образовавшиеся в результате лазерного воздействия на материал, оказывали существенное влияние на геометрию детали и происходило температурное коробление [8].

Рассмотрим совокупность методов, способствующих повышению качества получаемой поверхности, снижению температурной нагрузки и улучшению последующей обработки для достижения заданных значений шероховатости поверхностей изделия.

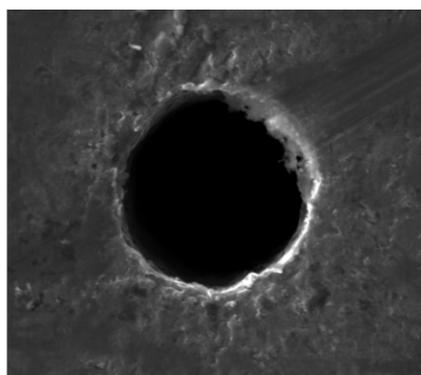
Снизить количество «града» на обрабатываемой поверхности позволяют специальные антипригарные средства, наносимые на поверхность металла при проведении микроперфорации. Защитное покрытие создает препятствие брызгам и выброшенной жидкой фазе материала для их «прилипания» к поверхности изделия. Помещение выходной поверхности образца в ванну с дистиллированной водой улучшает качество выходных кромок отверстий и исключает сильное коробление детали. Выявлено, что при большой плотности обработки происходит закипание жидкости, приводящее к образованию воздушных карманов, которые негативно отразились на геометрии получаемой детали. Избавиться от этого помогла система принудительной циркуляции жидкости, обеспечившая подвод потоков жидкости к поверхности детали. Ламинарный поток жидкости способствовал повышению эффективности теплоотвода и исключению образования воздушных карманов,

тем самым избегая температурной деформации изделия. Для повышения качества ультраперфорированной поверхности произвели последующую электрохимическую обработку, в результате чего с поверхности были удалены брызги, «град», валики на входных и выходных плоскостях отверстий.

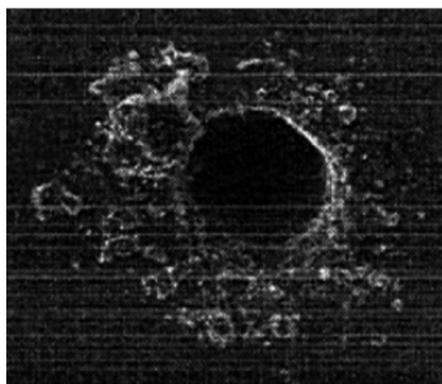
Результаты лазерной микрообработки нержавеющей стали с использованием различных комплексов представлены на рис. 7. Здесь хорошо заметны характерные брызги и выплеск материала на поверхность входной плоскости (рис. 7, а). Результаты обработки на комплексе LDesigner FM с подобранным режимом и произведенной дополнительной электрохимической постобработкой поверхности изделия иллюстрирует рис. 7, б, обработки специализированными лазерными комплексами, предназначенными для выполнения прецизионной обработки материалов лазерным излучением, — рис. 7, в и 7, г. Основным отличием является длительность импульсов рассмотренных установок. Если сравнить рис. 7, б и 7, г, результаты обработки вполне сопоставимы, когда стоимость установок отличается практически на порядок.



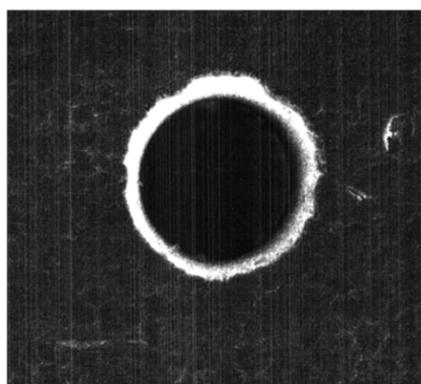
а



б



в



г

Рис. 7. Результат обработки нержавеющей стали на разных лазерных установках: а — на серийно выпускаемом LDesigner-FM; б — на LDesigner-FM с применением дополнительных технологических операций; в — на комплексе МЛП1-0510; г — на комплексе GL.evo

Следует отметить, что подход, описанный в настоящей статье, не является панацеей и применим далеко не во всех случаях. Мировой опыт работ в этой области свидетельствует о необходимости применения коротких и ультракоротких импульсов для проведения точной обработки и создания специализированных систем, изменяющих поперечный профиль распределения интенсивности лазерного излучения [3–5]. Также требуется проведение детального исследования влияния длительности импульса, длины волны и частоты следования импульсов для оптимизации технологических подходов лазерной микрообработки.

Заключение. С помощью компьютерного моделирования определен оптимальный режим воздействия лазерного излучения с учетом наименьшей тепловой нагрузки на обрабатываемую поверхность. Моделирование процесса распространения тепловых полей при лазерной обработке поверхности нержавеющей стали соответствует на 95 % данным, полученным в результате анализа натурального эксперимента. Применение дополнительного технологического подхода постобработки позволило достичь заданных требований: диаметр входного отверстия составил 80 мкм, выходного — 60 мкм; глубина отверстий — 500 мкм; скорость прошивки — четыре отверстия в секунду; шероховатость кромки отверстий до 2 мкм; плотность перфорации 9 отверстий на 1 мм². Задача по разработке технологии лазерной прошивки микроотверстий на базе серийно выпускаемой наносекундной лазерной системы в соответствии с заданными требованиями успешно решена. Суммарная стоимость всех элементов, используемых в ходе проводимых исследований, значительно ниже стоимости специализированных лазерных систем для выполнения микрообработки, что, безусловно, актуально в условиях современной экономики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вакс Е., Миленский М. Сапрыкин Л. *Практика прецизионной лазерной обработки*. Москва, Техносфера, 2013, 677 с.
- [2] Веденов А.А., Гладуш Г.Г. *Физические процессы при лазерной обработке материалов*. Москва, Энергоатомиздат, 1985, 200 с.
- [3] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 664 с.
- [4] Горный С.Г., Григорьев А.М., Патров М.И. и др. Специфика поверхностной обработки металла сериями лазерных импульсов наносекундной деятельности. *Квантовая электроника*, 2002, 32 (10), с. 929–932.
- [5] Liu Y.H., Hu J.D., Zhao L. et al. Accumulation morphology on the surface of stainless steel irradiated by a nanosecond Nd: YAG pulsed laser. *Optics and Laser Technology*, 2010, 42 (4), pp. 647–652.
- [6] Серебряков В.А. Лазерное сверление микроотверстий. *РИТМ*, 2010, № 5, с. 32–34.

- [7] Belforte D.A. *Annual Economic Review «Industrial Laser Solutions for manufacturing»*, January–February, 2016, pp. 6–8.
- [8] Lu Q., Mao S.S., Mao X., Russo R.E. A thermal model of phase explosion for high power laser ablation. *Proceeding of SPIE 4760*, 2002, pp. 959–964.

Статья поступила в редакцию 02.06.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Люхтер А.Б., Скворцов К.В., Вознесенская А.А., Ежов А.С., Бекетов А.А. Поиск решений по перфорированию микроотверстий в хромистых и хромоникелевых сталях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1507>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Люхтер Александр Борисович — канд. техн. наук, советник при ректорате ВлГУ. Научные интересы: лазерная обработка металлов и сплавов, двигатели внутреннего сгорания, а также внедрение лазерных технологий в машиностроении. e-mail: 3699137@gmail.com

Скворцов Константин Васильевич — канд. техн. наук, заместитель генерального директора ООО «Владимирский инжиниринговый центр использования лазерных технологий в машиностроении при ВлГУ» (ООО «ИЦ при ВлГУ»). Автор и соавтор более 20 научных работ по исследованию и компьютерному моделированию микроструктур. e-mail: skv@laser33.ru

Вознесенская Анна Алексеевна — магистрант ВлГУ, инженер «Инжинирингового центра при ВлГУ». Соавтор более 10 научных статей. Специалист в области лазерной микрообработки. e-mail: voznesenskaya@laser33.ru

Ежов Александр Сергеевич — студент ВлГУ, техник ООО «Владимирский инжиниринговый центр использования лазерных технологий в машиностроении при ВлГУ» (ООО «ИЦ при ВлГУ»). Специалист в области компьютерного моделирования и конструирования. e-mail: ezhov@laser33.ru

Бекетов Артём Александрович — инженер-технолог КБ «Арматура» филиала ГКНПЦ им. М.В. Хруничева (г. Ковров). Специалист в области лазерной физики, твердотельных и волоконных лазеров. e-mail: beketov.artiom@mail.ru

Searching for solutions to micro hole perforation in chromium and chromium-nickel steel

© A.B. Lyukhter¹, K.V. Skvortsov², A.A. Voznesenskaya¹,
A.S. Ezhov², A.A. Beketov³

¹ Vladimir State University Engineering Centre of Laser Technology Implementation in Mechanical Engineering, Vladimir, 600000, Russia

² Vladimir State University Engineering Centre JSC, Vladimir, 600000, Russia

³ Armatura Design Bureau, Khrunichev State Research and Production Space Center subsidiary, Kovrov, 601909, Russia

The study considers the problem of high positional density micro hole forming in chromium-nickel steel by nanosecond laser emission. The article describes the sequence of technological approaches and operations. We modelled the effect of laser emission on the surface of chromium-nickel steel. We created heat field distribution diagrams for various numbers of pulses. The data obtained during computer modelling and full-scale experiments are in 97% agreement. We determined the optimum sequence for hole formation so as to decrease thermal loading on the workpiece. This helped to avoid thermal warping of the part. The study suggests a range of technological approaches to increase the edge surface quality of the micro holes obtained. It became possible to decrease the amount of liquid phase products spilling onto the surface of the part being treated. We validate the feasibility of employing additional technological approaches during laser microperforation.

Keywords: fibre laser, laser microfabrication, ultra-perforation, micro holes, chromium-nickel steel.

REFERENCES

- [1] Vaks E., Milenkiy M., Saprykin L. *Praktika pretsizionnoy lazernoy obrabotki* [Practical implementation of precision laser treatment]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013, 677 p.
- [2] Vedenov A.A., Gladush G.G. *Fizicheskie protsessy pri lazernoy obrabotke materialov* [Physical processes during laser treatment of materials]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 200 p.
- [3] Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Manufacturing processes of laser treatment]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 664 p.
- [4] Gornyy S.G., Grigorev A.M., Patrov M.I., Solovyev V.D., Turichin G.A. *Kvant. elektronika — Quantum Electronics*, 2002, vol.32, no.10, pp. 929–932.
- [5] Liu Y.H., Hu J.D., Zhao L., Guo Z.X., Chumakov A.N., Bosak N.A. *Optics and Laser Technology*, 2010, vol. 42, no. 4, pp. 647–652.
- [6] Serebryakov V.A. *Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya (RITM) — Repair. Innovation. Technology. Modernization*, 2010, no. 5, pp. 32–34.
- [7] Belforte D.A. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing*, 2016, no. 1, pp. 6–8.
- [8] Lu Q., Mao S.S., Mao X., Russo R.E. A thermal model of phase explosion for high power laser ablation. *SPIE Proceedings*, 2002, vol. 4760, pp. 959–964.

Lyukhter A.B., Cand. Sci. (Eng.), Councillor to the Rectorate, Vladimir State University. Research interests include laser treatment of metals and alloys, internal combustion engines, introduction of laser technologies to machine-building industry. e-mail: 3699137@gmail.com

Skvortsov K.V., Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director, Vladimir State University Engineering Centre JSC. Author and co-author of more than 20 research papers on computer simulation of microstructures. e-mail: skv@laser33.ru

Voznesenskaya A.A., Engineer, Vladimir State University Engineering Centre of Laser Technology Implementation in Mechanical Engineering. Co-author of more than 10 research papers. She specializes in laser micro-treatment. e-mail: voznesenskaya@laser33.ru

Ezhov A.S., Designer, Vladimir State University Engineering Centre JSC. He specializes in computer simulation and design. e-mail: ezhov@laser33.ru

Beketov A.A., Process Engineer, Armatura Design Bureau, Khrunichev State Research and Production Space Center subsidiary, Kovrov. He specializes in the field of laser physics, solid-state and fiber lasers. e-mail: beketov.artiom@mail.ru