

Оригинальное исследование

УДК 621.9.015

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_365

EDN: JHFUPK

Разработка технологии перфорации жаровых труб, покрытых термозащитным покрытием

Я.П. Мигдалев^{1,2}, Е.В. Раевский¹¹ Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ», Москва, Россия;² Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Современные газотурбинные двигатели требуют повышения рабочей температуры для увеличения эффективности, что приводит к экстремальным термическим нагрузкам на материалы. Температура продуктов сгорания в авиадвигателях может превышать точки плавления используемых жаропрочных сплавов, что ограничивает их применение. Для защиты рабочих деталей применяются термозащитные покрытия и системы охлаждения с использованием перфорационных отверстий. Технология лазерной перфорации является перспективным методом, обеспечивающим высокую точность и экономическую эффективность при изготовлении отверстий в жаровых трубах с термозащитным покрытием. Разработка и оптимизация таких технологий актуальны для авиационно-космической отрасли и общего машиностроения, где требуется баланс между качеством, производительностью и стоимостью.

Цель работы — разработка рационального технического решения для лазерной перфорации жаровых труб с нанесенным термозащитным покрытием, обеспечивающего оптимальное сочетание точности, качества поверхности и производительности. Работа направлена на анализ существующих методов перфорации, их сравнение и обоснование выбора оптимальной технологии.

Материалы и методы. В работе проведен технический анализ существующих решений перфорации как на примере авиационно-космических, так и общепромышленных применений. Рассмотрены варианты выполнения перфорации жаровых труб по имеющимся в открытых источниках данным. Экспериментальная часть включала использование серийной установки пятикоординатной лазерной обработки СЛП1520 с волоконным лазером.

Результаты. Анализ показал, что лазерная перфорация превосходит альтернативные методы по точности и скорости обработки. Оптимальные параметры лазерного излучения обеспечивают минимальное термическое воздействие на термозащитное покрытие и высокую воспроизводимость. Эксперименты выявили, что использование длиннофокусного объектива обеспечивает стабильность диаметра и формы отверстий, а нанесение защитной пасты с нитридом бора позволяет исключить появление выплесков вокруг отверстий.

Заключение. Лазерная перфорация является эффективным решением для изготовления охлаждающих отверстий в жаровых трубах с термозащитным покрытием. Предложенная технология обеспечивает высокую точность, качество и воспроизводимость, что делает ее предпочтительной для авиационно-космических применений. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния защитной пасты на величину измененного слоя.

Ключевые слова: жаровая труба; термозащитное покрытие; лазер; сверление; перфорация.

Как цитировать

Мигдалев Я.П., Раевский Е.В. Разработка технологии перфорации жаровых труб, покрытых термозащитным покрытием // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 365–373. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_365 EDN: JHFUPK

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_365

EDN: JHFUPK

Development of Punching Technology for Combustion Liners with Thermal Control Coatings

Yakov P. Migdalev^{1,2}, Eugene V. Raevskiy¹¹ Research and Production Center "Lasers and equipment TM", Moscow, Russia;² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The efficiency of a contemporary gas turbine engines can be improved by increasing the operating temperature inside the engine, resulting in extreme thermal stress on materials. The temperature of combustion products inside aircraft engines can reach temperatures exceeding the melting points of the alloys used, limiting their applications. To protect working parts, thermal control coatings and cooling systems with punch holes are used. Laser perforation is a promising method that provides high precision and cost-effectiveness of hole punching processes for combustion liners with thermal control coatings. The development and improvement of such technologies is relevant for the aerospace industry and general mechanical engineering, where a balance between quality, performance, and cost is required.

AIM: To develop an efficient laser perforation solution for combustion liners with thermal control coating, providing an optimal combination of precision, surface quality, and performance. The paper analyzes and compares existing punching methods to support the choice of the best possible technology.

METHODS: The paper provides a technical analysis of existing perforation solutions for aerospace and general industrial applications. Punching options for combustion liners are considered based on data from open sources. The experimental part included the use of a serial five-axis laser processing machine SLP520 with a fiber laser.

RESULTS: Analysis showed that laser perforation outperforms alternative methods in terms of accuracy and processing speed. Optimal laser radiation parameters ensure the lowest thermal effect on the thermal control coating and high repeatability. Experiments showed that a long-focus lens ensures fixed diameter and shape of the holes and a boron nitride protective paste helps prevent splashes around the holes.

CONCLUSION: Laser perforation is an effective punching solution for cooling holes in combustion liners with thermal control coating. The proposed technology provides high precision, quality, and repeatability, making it preferable for aerospace applications. Further research may be aimed at studying the effect of protective paste on the thickness of the modified layer.

Keywords: combustion liner; thermal control coating; laser; drilling; perforation.

To cite this article

Migdalev YaP, Raevskiy EV. Development of Punching Technology for Combustion Liners with Thermal Control Coatings. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):365–373. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_365 EDN: JHFUPK

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность разработки технологии перфорации жаровых труб, покрытых ТЗП, определяется, в том числе, восстановлением самолетостроения для гражданской авиации в РФ. К примеру, на сегодняшний день Минпромторгом РФ в рамках комплексной программы развития авиационной отрасли заявляется, что по итогам выполнения программы к 2031 году будет выпущено 994 гражданских самолета.

Одной из задач данной программы является производство отечественных комплектующих, в том числе авиационных двигателей. С учетом успешной реализации программ импортозамещения и подготовки серийного производства акционерным обществом «Объединенная двигателестроительная корпорация» предусмотрено до 2030 года производство 4964 единиц двигателей в обеспечение серийного выпуска самолетов и вертолетов отечественного производства [1].

При производстве современных газотурбинных двигателей необходимо изготавливать большое количество охлаждающих отверстий в различных деталях двигателя, в том числе в жаровых трубах, изготовленных из жаропрочных сплавов на основе никеля и покрытых ТЗП.

Лазерное сверление является хорошо зарекомендовавшей себя технологией обработки различных деталей в авиационных двигателях благодаря возможностям обработки широкого спектра материалов (в т.ч. диэлектриков и композитных материалов), высокой производительности процесса, минимальному тепловложению и возможностям обработки деталей под разными углами.

К охлаждающим отверстиям в компонентах авиационных двигателей предъявляются повышенные технические требования: отсутствие трещин, малые значения шероховатости и измененного слоя, отсутствие выплесков и наплывов со стороны входа и выхода, а также малые овальность и конусность.

Большинство предыдущих исследований по сверлению жаропрочных сплавов на основе никеля, как с нанесенным ТЗП, так и без, направлены на изучение влияния на качество получаемых отверстий типов лазерных источников и их параметров, таких как частота и длительность импульсов, средняя и пиковая мощность, плотность мощности и т.д.

R. Bathe и G. Padmanabham в [2] было проведено исследование сверления отверстий в In718, покрытом ТЗП, Nd:YAG лазером и выявлено влияние длительности импульса и плотности мощности на диаметр и конусность отверстий. Увеличение плотности мощности и длительности импульса приводит к увеличению диаметра отверстий и уменьшению конусности, но при этом к появлению микротрещин как в ТЗП, так и металле.

S. Marimuthu и др. в [3], а также M. Naеem в [4] показали преимущества непрерывных и квазинепрерывных (QCW) волоконных лазеров по сравнению с Nd:YAG

лазерами при сверлении отверстий в жаропрочных сплавах на основе никеля. Преимуществами являются: скорость сверления отверстий, качество получаемых отверстий, в частности, меньший измененный слой, почти полное отсутствие микротрещин и отслоения ТЗП.

Xiaomaо Sun и др. в работе [5] провели экспериментальные исследования тепловых эффектов при сверлении In718 с ТЗП пикосекундным лазером. Согласно результатам экспериментов, при достижении необходимой пороговой энергии импульса, частота повторения импульсов является наиболее важным фактором, влияющим на накопление тепла, при сверлении пикосекундным лазером.

Changlong Zheng и др. (см. [6]) на основе экспериментальных данных, а также термомеханической модели классифицируют и описывают механизм появления и поведения трещин при скоростном сверлении пикосекундным лазером. Согласно результатам расчетов и экспериментов, предпочтительной оказывается стратегия сверления с использованием низкой частоты повторения импульсов для улучшения качества отверстий.

Sezer H.K. и др. в [7] исследовали влияние угла наклона луча на величину зоны термического влияния и поведение ТЗП при лазерном сверлении. Было установлено, что при уменьшении угла к поверхности образца увеличивается зона термического влияния, а также увеличивается размер трещин в ТЗП.

McNally и др. в своем исследовании [8] отмечают важность и преимущества лазерного сверления деталей авиационных двигателей, в том числе покрытых ТЗП.

Во всех приведенных исследованиях изучалось лазерное сверление отверстий в жаропрочных сплавах на никелевой основе с нанесенным ТЗП и без него, воздействие лазерным излучением осуществлялось со стороны металла с покрытием.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования для изучения возможности лазерного сверления жаропрочных сталей на никелевой основе с нанесенным термозащитным покрытием, с воздействием лазерного излучения со стороны металла без покрытия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА

Материал и экспериментальная установка

Лазерное сверление отверстий, расположенных под углами 40°, 60°, 75° и 90° к нормали поверхности, выполнялось в образцах из жаропрочной стали марки ХН50ВМТЮБ (ЭП648-ВИ). На внутренней поверхности нанесено термозащитное покрытие $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ с подслоем ПНХ20К20Ю. При обработке часть образцов была покрыта пастой нитрида бора со стороны ТЗП.

Эксперименты по сверлению проводились на серийной установке пятикоординатной лазерной обработки СЛП520 (рис. 1). Лазерная установка предназначена для сварки,

резки и перфорации деталей сложной формы. Комплекс разработан для задач авиационного двигателестроения, с учетом требований к высокой точности и качеству обработки деталей.

Установка оснащена емкостным датчиком для автоматического управления фокусом, а также системой машинного зрения, которая позволяет распознавать профиль обрабатываемой поверхности для базирования относительно реперных точек и базовых поверхностей.

При проведении экспериментов был использован волоконный лазер. Излучение передавалось по оптоволокну диаметром 50 мкм до коллиматора с фокусным расстоянием 100 мм. Фокусирующие линзы использовались с фокусным расстоянием 64 мм и 145 мм. Рассчитанные по формуле (1) из [9] диаметры сфокусированного излучения составили 32 мкм и 73 мкм соответственно.

$$d = 2 \left(\omega_1 \cdot \frac{f_2}{f_1} \right) \quad (1)$$

где ω_1 — радиус излучения на выходе из волокна, f_1 — фокусное расстояние коллиматора, f_2 — фокусное расстояние объектива.

Отверстия изготавливались на плоских образцах. В каждом ряду выполнялось несколько отверстий с одинаковыми параметрами с использованием одной стратегии обработки. После проведения лабораторных исследований были определены оптимальные параметры и выполнена обработка объемного имитатора жаровой трубы.

Металлографический анализ отверстий

При подготовке образцов соблюдалась особая осторожность, поскольку термозащитное покрытие очень хрупкое. Образец зажимался таким образом, чтобы режущий диск проходил сначала через термозащитное покрытие, для минимизации его повреждений. Затем образцы запрессовывались в бакелит, после чего шлифовались с последовательным уменьшением зернистости шлифовальной бумаги и финишной полировкой алмазной пастой. Чтобы выявить измененный слой, образцы были протравлены.

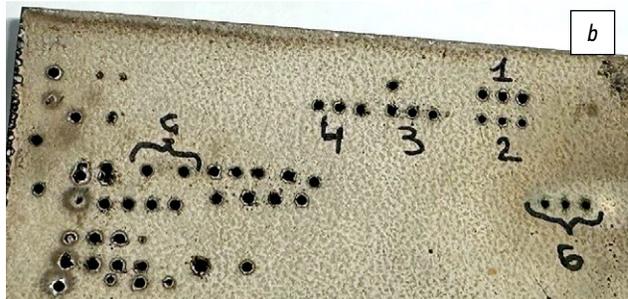
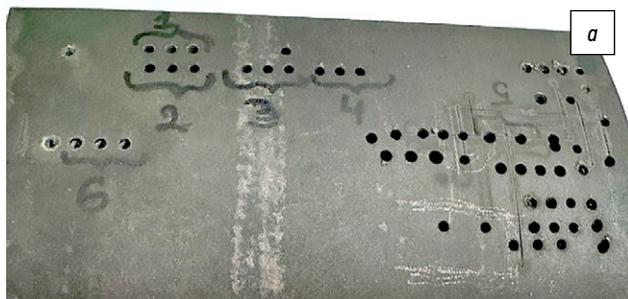


Рис. 2. Общий вид отверстий: *a* — вид со стороны входа лазерного излучения; *b* — вид со стороны выхода лазерного излучения.
Fig. 2. General view of the holes: *a*, view from the laser input side; *b*, view from the laser output side.



Рис. 1. Серийная установка пятикоординатной лазерной обработки СЛП520.

Fig. 1. Serial three-axis laser processing machine SLP 520.

Для определения наличия выплесков и наплывов вокруг отверстий, наличия сколов и отслоения термозащитного покрытия, а также измерения измененного слоя и микротрещин был проведен осмотр поверхности полученных отверстий на электронном микроскопе TESCAN MIRA3 LMN. Количественная оценка измененного слоя проводилась путем измерения в восьми равноудаленных точках вдоль передней и задней кромок отверстий. Были проанализированы все отверстия, полученные на каждом режиме сверления. В результатах приведено максимальное значение измененного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Серия 1

В ходе первой серии эксперимента было просверлено шесть матриц отверстий на разных режимах обработки

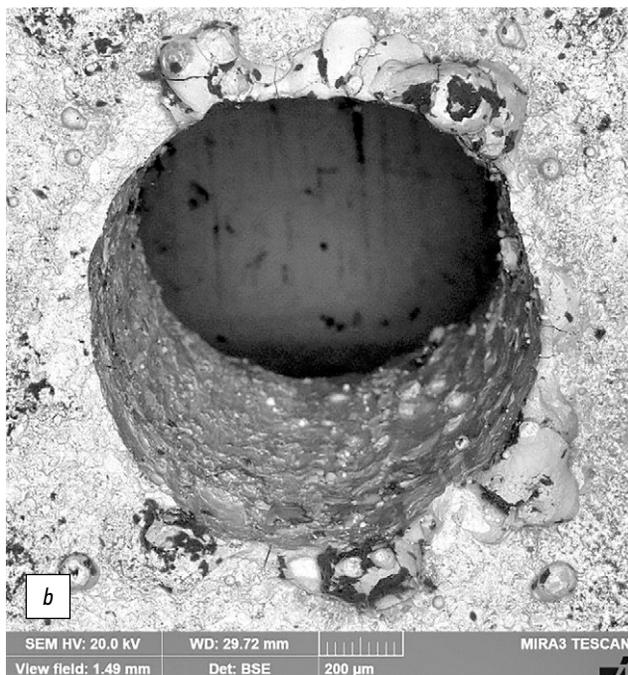
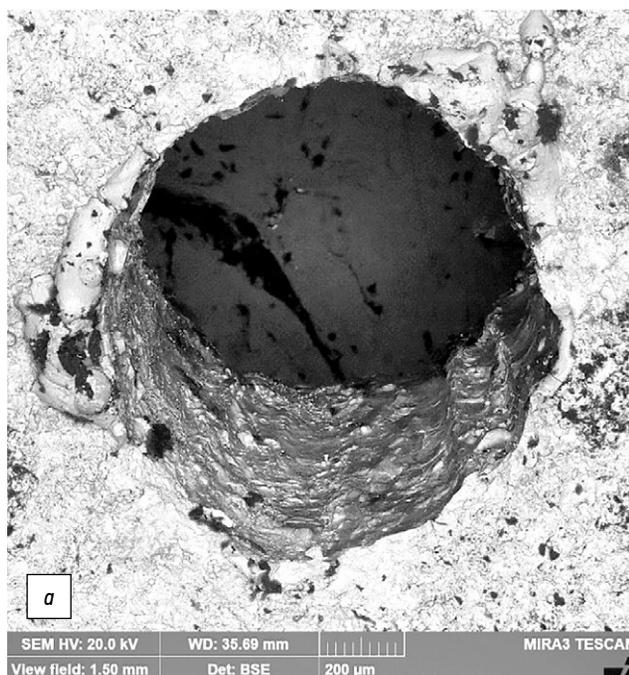


Рис. 3. Выплески, вид со стороны выхода: *a* — режим № 3; *b* — режим № 4.
Fig. 3. Splashes, view from the output: *a*, mode 3; *b*, mode 4.

с использованием объектива с фокусным расстоянием 64 мм. Общий вид отверстий приведен на рис. 2. Осмотр поверхности, проведенный на электронном микроскопе, показал, что сколов термозащитного покрытия вблизи отверстий не имеется.

Микроанализ, проведенный на микрошлифах, приготовленных вдоль отверстий, показал, что:

- Фактическая толщина образца с учетом ТЗП составляет от 2,53 до 2,61 мм.
- Фактический угол выполнения отверстий к поверхности образца составляет 90°.
- Все отверстия сквозные, берега отверстий ровные, без волнистости. На режимах № 3 и № 4 по берегам отверстий имеются выплески (рис. 3).
- Диаметр отверстий не стабильный, меняется по глубине отверстия и имеет форму песочных часов: на входе в отверстие больше, на выходе меньше, в середине отверстия самый минимальный диаметр (рис. 4).
- В измененном слое и в материале образца трещин не выявлено.
- Отслаиваний/повреждений ТЗП по границе с основным материалом в процессе сверления не имеется. Результаты микроанализа приведены в табл. 1.

Серия 2

В ходе второй серии эксперимента было выполнено сверление двух образцов с использованием объектива с фокусным расстоянием 145 мм. Один из образцов был покрыт пастой с нитридом бора для оценки влияния антипригарного покрытия

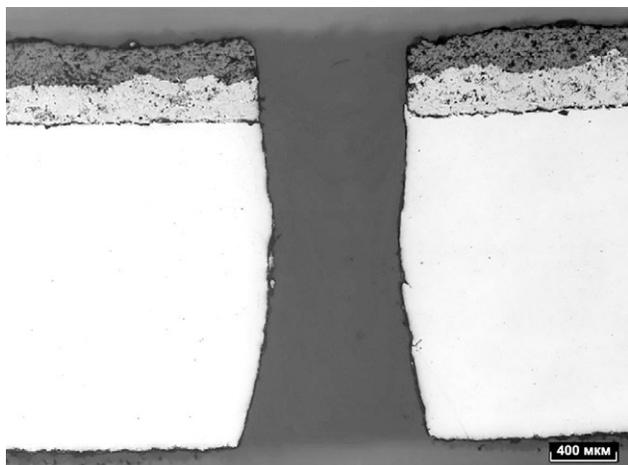


Рис. 4. Форма песочных часов.
Fig. 4. Hourglass shape.

Таблица 1. Результаты микроанализа отверстий, полученных в ходе первой серии эксперимента

Table 1. Microscopic analysis of holes punched during the first series of experiments

Номер режима	Высота выплесков, мкм	Глубина измененного слоя по берегам отверстий, мкм
1	-	26
2	-	33
3	до 120	27
4	до 106	31
5	-	29
6	-	65

на высоту выплесков. Было просверлено по восемь матриц отверстий на каждом образце, используя одинаковые технологические режимы, но при различной стратегии сверления. Четные ряды — трепанирование, нечетные — по офсетной стратегии. Общий вид образцов приведен на рис. 5, 6.

Осмотр поверхности образцов, проведенный на электронном микроскопе TESCAN MIRA3 LMH, показал, что сколов термозащитного покрытия вблизи отверстий не имеется. На поверхности образцов со стороны выхода лазерного излучения, преимущественно на образце без защитной пасты с нитридом бора, вокруг отверстий имеются выплески и наплывы.

Микроанализ, проведенный на микрошлифах, приготовленных вдоль отверстий, показал, что:

Фактическая толщина образцов с учетом ТЗП составляет от 2,6 до 2,7 мм.

Фактический угол выполнения отверстий к поверхности образца составляет 90° , 75° , 60° , 40° .

Все отверстия сквозные, берега отверстий ровные, без волнистости, следов от врезания луча лазера на всех исследованных образцах не имеется.

Диаметр отверстий стабильный, форму песочных часов не имеет (рис. 7).

В измененном слое и в материале образца трещин не выявлено.

Отслаиваний/повреждений ТЗП по границе с основным материалом в процессе сверления не имеется.

Результаты микроанализа образцов приведены в табл. 2 и 3.

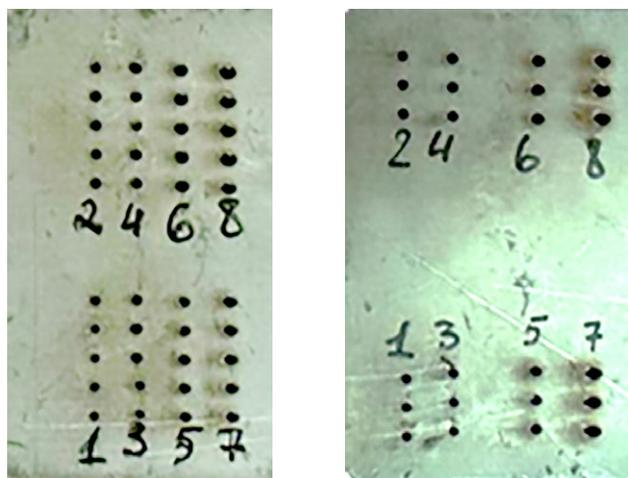


Рис. 5. Общий вид отверстий со стороны входа лазерного излучения: *a* — образец, покрытый пастой; *b* — образец без пасты.

Fig. 5. General view of the holes from the laser input side: *a*, sample covered with paste; *b*, sample without paste.

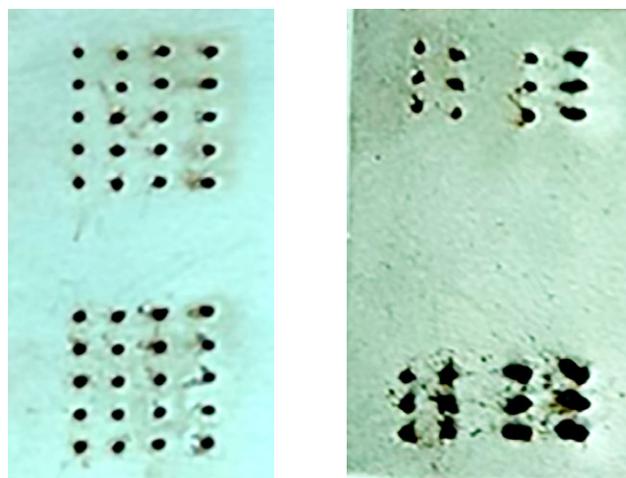


Рис. 6. Общий вид отверстий со стороны выхода лазерного излучения: *a* — образец, покрытый пастой; *b* — образец без пасты.

Fig. 6. General view of the holes from the laser output side: *a*, sample covered with paste; *b*, sample without paste.

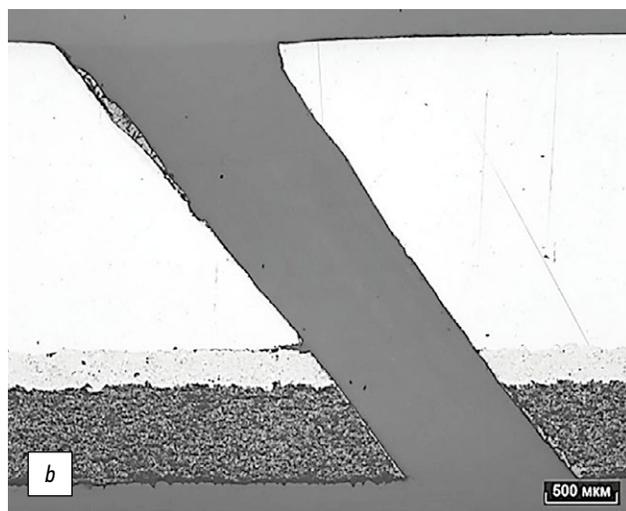
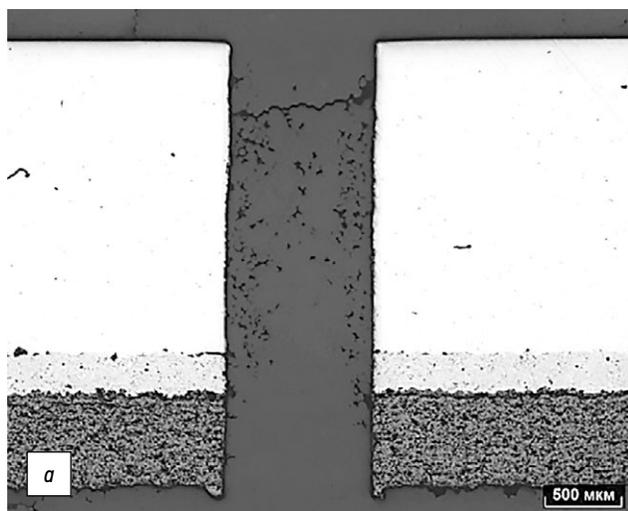


Рис. 7. Микрошлифы отверстий: *a* — 90° к поверхности; *b* — 40° к поверхности.

Fig. 7. Microsections of holes: *a*, at 90° to the surface; *b*, at 40° to the surface.

Таблица 2. Результаты микроанализа на образце с пастой

Table 2. Microscopic analysis of a sample with paste

Номер матрицы	Угол наклона к поверхности, °	Высота выплесков, мкм	Глубина измененного слоя, мкм
1	90	22	25
2	90	45	55
3	75	–	31
4	75	–	63
5	60	34	28
6	60	–	67
7	40	–	30
8	40	–	76

Таблица 3. Результаты микроанализа на образце без пасты

Table 3. Microscopic analysis of a sample without paste

Номер матрицы	Угол наклона к поверхности, °	Высота выплесков, мкм	Глубина измененного слоя, мкм
1	90	–	20
2	90	–	23
3	75	–	28
4	75	105	31
5	60	73	30
6	60	173	68
7	40	84	29
8	40	238	74

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования проводились для изучения лазерного сверления отверстий в жаропрочном сплаве на основе никеля с нанесенным термозащитным покрытием при воздействии лазерного излучения со стороны металла без покрытия. Результаты представлены с соответствующими иллюстрациями.

В ходе выполнения исследований были получены следующие важные результаты:

1. Для сверления ровных и стабильных по форме и диаметру отверстий необходимо использовать объектив с фокусным расстоянием 145 мм.

2. При сверлении образцов с воздействием лазерного излучения со стороны металла без покрытия сколов и отслоений ТЗП не наблюдается.

3. Нанесение защитной пасты с нитридом бора позволяет почти исключить появление выплесков вокруг отверстий, но при этом прослеживается увеличение глубины измененного слоя в сравнении с образцом без пасты, что требует дополнительных исследований.

4. Сверление по оффсетной стратегии позволяет получать меньшую глубину измененного слоя и меньшую высоту выплесков в случае сверления образца без пасты.

5. При уменьшении угла наклона к поверхности обрабатываемой поверхности глубина измененного слоя увеличивается незначительно.

Таким образом, лазерное сверление может быть успешно использовано для перфорации отверстий в жаровых трубах с нанесенным на внутренней поверхности термозащитным покрытием. Необходимы дальнейшие экспериментальные

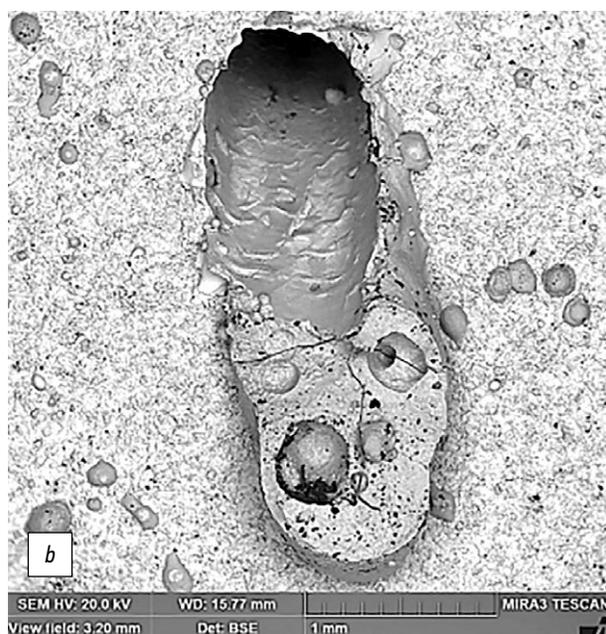
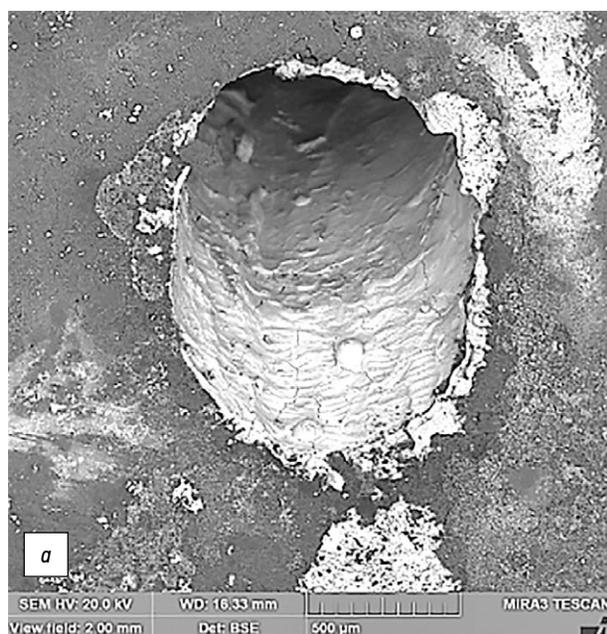


Рис. 8. Сравнение качества отверстий, просверленных под углом 40° к поверхности. Вид со стороны выхода лазерного излучения: *a* — образец, покрытый пастой; *b* — образец без пасты.

Fig. 8. Qualitative comparison of holes drilled at 40° to the surface. View from the laser output side: *a*, sample covered with paste; *b*, sample without paste.

исследования на скорректированных, с учетом полученных результатов, технологических режимах, с целью исключения появления выплесков и минимизации глубины измененного слоя и исследования влияния защитной пасты с нитридом бора на величину измененного слоя.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Я.П. Мигдалев — поиск публикаций по теме статьи, получение и обработка экспериментальных данных, написание рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений; Е.В. Раевский — редактирование рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: Ya.P. Migdalev: investigation, formal analysis, writing—original draft, writing—review & editing, visualization; E.V. Raevsky: writing—review & editing, expert review, validation. All authors approved the version of the manuscript to be published and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная программа развития транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года. Правительство России. 2022. [internet]. Дата обращения: 27.06.2022. Режим доступа: <http://government.ru/docs/45834/>
2. Bathe R., Padmanabham G. Evaluation of laser drilling of holes in thermal barrier coated superalloys // *Materials Science and Technology*. 2014. Vol. 30, N. 14. P. 1778–1782. doi: 10.1179/1743284713Y.0000000477
3. Marimuthu S., Antar M., Dunleavy J., et al. An experimental study on quasi-CW fibre laser drilling of nickel superalloy // *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 94. P. 119–127. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.03.021
4. Naeem M. Advances in drilling with fiber lasers. In: *Industrial Laser Applications Symposium (ILAS 2015)*. SPIE, 2015. Vol. 9657. C. 24–33. doi: 10.1117/12.2182662
5. Sun X., Dong X., Wang K., et al. Experimental investigation on thermal effects in picosecond laser drilling of thermal barrier coated

- In718 // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 113. P. 150–158. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.12.020 EDN: BVJAXF
6. Zheng C., Shen H., Yao Z., et al. Crack behavior in ultrafast laser drilling of thermal barrier coated nickel superalloy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 282. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116678 EDN: XA00BT
7. Sezer H.K., Li L., Schmidt M., et al. Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. Vol. 46, N. 15. P. 1972–1982. doi: 10.1016/j.ijmactools.2006.01.010
8. McNally C.A., Folkes J., Pashby I.R. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges // *Materials Science and Technology*. 2004. Vol. 20, N. 7. P. 805–813. doi: 10.1179/026708304225017391
9. Тарасов Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981.

REFERENCES

1. Comprehensive program for the development of the transport sector of the Russian Federation until 2030. Government of Russia. 2022. [internet]. Accessed: 27.06.2022. Available from: <http://government.ru/docs/45834/>
2. Bathe R., Padmanabham G. Evaluation of laser drilling of holes in thermal barrier coated superalloys. *Materials Science and Technology*. 2014;30(14):1778–1782. doi: 10.1179/1743284713Y.0000000477
3. Marimuthu S, Antar M, Dunleavy J, et al. An experimental study on quasi-CW fibre laser drilling of nickel superalloy. *Optics & Laser Technology*. 2017;94:119–127. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.03.021
4. Naeem M. Advances in drilling with fiber lasers. In: *Industrial Laser Applications Symposium (ILAS 2015)*. SPIE; 2015;9657:24–33. doi: 10.1117/12.2182662
5. Sun X, Dong X, Wang K, et al. Experimental investigation on thermal effects in picosecond laser drilling of thermal barrier coated In718. *Optics &*

- Laser Technology*. 2019;113:150–158. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.12.020 EDN: BVJAXF
6. Zheng C, Shen H, Yao Z, et al. Crack behavior in ultrafast laser drilling of thermal barrier coated nickel superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;282. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116678 EDN: XA00BT
7. Sezer HK, Li L, Schmidt M, et al. Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006;46(15):1972–1982. doi: 10.1016/j.ijmactools.2006.01.010
8. McNally CA, Folkes J, Pashby IR. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges. *Materials Science and Technology*. 2004;20(7):805–813. doi: 10.1179/026708304225017391
9. Tarasov LV. *Physics of processes in generators of coherent optical radiation*. Moscow: Radio i svyaz; 1981. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

*** Мигдалев Яков Павлович,**

старший-инженер технолог, зам. руководителя
технологической лаборатории; ООО НПЦ "Лазеры
и аппаратура ТМ";

адрес: Россия, 124498, Москва, Зеленоград,

проезд 4922-й, д. 4, стр. 4;

ORCID: 0009-0004-4626-4770;

e-mail: jacob@laser-app.ru

Раевский Евгений Валентинович,

канд. техн. наук, главный конструктор;

ООО НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ";

eLibrary SPIN: 3372-1767;

ORCID: 0000-0002-8009-9885;

e-mail: evr@laser-app.ru

AUTHORS' INFO

*** Yakov P. Migdalev,**

Senior Process Engineer, Deputy Head of the Process
Laboratory; Research and Production Center "Lasers
and equipment TM";

address: 4, Proezd 4922, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia;

ORCID: 0009-0004-4626-4770;

e-mail: jacob@laser-app.ru

Eugene V. Raevsky,

Cand. Sci. (Engineering), Chief Designer, Research
and Production Center "Lasers and equipment TM";

eLibrary SPIN: 3372-1767;

ORCID: 0000-0002-8009-9885;

e-mail: evr@laser-app.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author