

Экспериментальное исследование температурного воздействия при криогенном охлаждении фокусирующих трубок гидроабразивных установок

© А.Л. Галиновский¹, П.В. Круглов¹, К.С. Самсонов¹,
В.С. Медведь², Н.А. Изотов¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

²АО «ТРВ-инжиниринг», Королёв, 141076, Российская Федерация

Изучен вопрос эрозии фокусирующих трубок. Предложена гипотеза, согласно которой криогенное охлаждение способно защищать поверхность струеформирующего канала за счет возникновения ледяного слоя в зоне образования ультразвука. Рассмотрены современные подходы к температурному мониторингу состояния оборудования для генерации ультразвука. Организован и проведен эксперимент: создана испытательная система на базе гидроабразивной режущей головки, осуществлено криоохлаждение фокусирующей трубки в ходе обработки титановой заготовки с параллельной фиксацией тепловизионной картины. Дополнительно исследованы профили микронеровностей полученных экспериментальных заготовок. Сравнение температурных изображений охлажденной и неохлажденной фокусирующей трубки позволило сделать выводы об эффективности криогенных режимов, предложить усовершенствованные методы защиты и наметить перспективные направления для исследований в области криотехнологий при гидроабразивной резке.

Ключевые слова: гидроабразивная ультразвука, жидкий азот, фокусирующая трубка, тепловизор, контурграф

Введение и теория. Метод гидроабразивной резки активно применяется благодаря его универсальности [1–3]. Повышение производительности гидроабразивного резания и эффективности данной технологии остается значимой исследовательской задачей [4–6]. Основная цель данной работы — минимизировать эрозионную нагрузку на фокусирующую трубку (ФТ) при использовании криогенного охлаждения.

Непосредственное наблюдение за процессом весьма затруднено из-за экстремальных условий эксплуатации [7]. Абразивные частицы при смешивании и ускорении непрерывно сталкиваются и взаимодействуют с внутренними стенками струеформирующего канала, вызывая износ смесительной камеры и ФТ. Именно в результате эрозии ФТ, в основном, ухудшается качество и снижается производительность обработки. Наибольшая степень износа наблюдается в зоне соединения смесительной камеры и ФТ [8].

Криогенное охлаждение применяют для увеличения режущей силы при обработке материалов «низкой» и «средней» твердости. Имеются данные о способах охлаждения ФТ таким образом, чтобы образовывалась ледяная фракция для разрезания замороженных полуфабрикатов [9] и пластов угля [10].

Компании Okuma (Япония, производитель металлорежущих станков) и 5ME (США, создатель криогенных инструментов и систем охлаждения) запатентовали технологии, связанные с криогенным охлаждением, в частности, повышающую эффективность обработки технологию подачи криоагента в область резания через каналы внутри инструмента или шпиндель оборудования [11]. Существует гипотеза о том, что методы криогенного охлаждения применимы к гидроабразивной обработке. Опыты показали [12], что криообработанный металл приобретает сопротивляемость к эрозии, производимой гидроабразивной ультраструей (ГАУС). Ключевым условием реализации данной технологии является точное управление тепловыми режимами гидроабразивных установок. Удержание абразивных частиц в криоохлажденной струе сопряжено с трудностями, такими как обледенение и блокирование каналов подачи абразива [13]. Эксперименты с добавлением абразивного материала в струи жидкого азота продемонстрировали, что криогенная ГАУС обеспечивает резку, сопоставимую по эффективности с классической гидроабразивной обработкой [14].

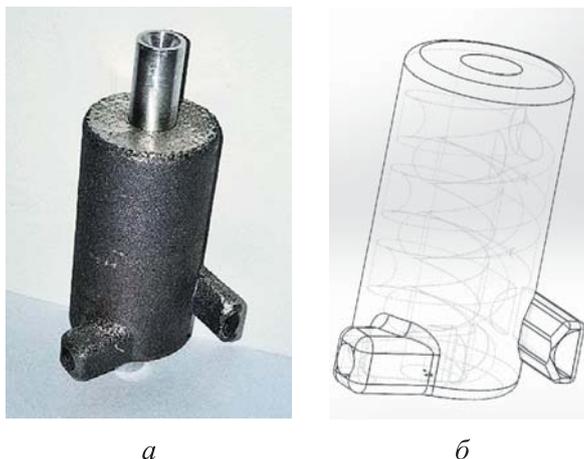
Согласно консенсусному мнению, температура на поверхности ФТ находится в диапазоне 30...75 °С [15, 16]. При более высоком давлении (например, 600...1000 МПа) увеличивается скорость струи и кинетическая энергия, что приводит к большему выделению теплоты на границах ФТ [17]. В случае резки стали струями сверхвысокого давления (до 1000 МПа), из-за локализованного преобразования энергии из кинетической в тепловую температура может превышать 450 °С на некоторых отдельных участках ФТ [18]. Чаще всего для измерения температуры в зоне резания применяют инфракрасные камеры и термомпары. Значения температур, зафиксированные обоими способами одновременно, могут различаться на 30 °С. Считается, что термомпары обеспечивают более точные подповерхностные показания, но их требуется более тонко настроить и прицельно разместить вблизи режущей кромки [19].

Технологическое обеспечение и методы. Для генерирования ГАУС использовался станок водоструйной резки с ЧПУ NC4020E (рис. 1). Диаметр внутреннего струеформирующего канала ФТ составляет 0,76 мм, сопла — 0,25 мм, размер диафрагмы 4,0 мм. Применяется песок гранатовый MESH 80, расход песка 0,3 кг/мин. Время обработки одной детали 6,5 мин.

Первоначальный теплообменник классической змеевиковой формы [20] был модернизирован и приобрел форму монолитного цилиндра, внутри которого создан двухконтурный спиральный канал для эффективного криогенного охлаждения ФТ (рис. 2). Двухконтурный спиральный теплообменник (ДСТ) изготовлен методом SLM-печати, как описано в [21]. Формулировка и решение задачи по обеспечению достаточности теплоотвода (тепловой баланс) представлены в [22].



Рис. 1. Установка для гидроабразивной резки NC4020E (Швеция)



а

б

Рис. 2. Изготовленный образец ДСТ (а) и его прозрачная 3D-модель (б)

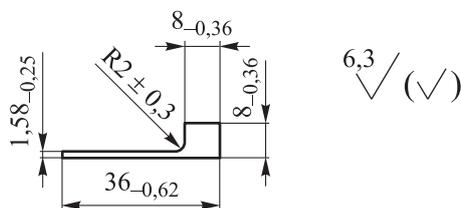


Рис. 3. Эскиз обрабатываемой детали

Эскиз обрабатываемой детали представлен на рис. 3, толщина плиты 15 мм, материал — титановый сплав ОТ4-1.

Хладагент, содержащийся в сосуде Дьюара (рис. 4, а), подавался в зону резания с помощью крионасоса (рис. 4, б).



Рис. 4. Сосуд Дьюара с жидким азотом 20 л (а) и крионасос (б) для подачи в него хладагента

Параметры шероховатости обрабатываемых экспериментальных заготовок измерялись с помощью контурографа (рис. 5), температура — с помощью тепловизора (рис. 6). Технические характеристики универсального контурографа OPTACOM VC-10UL представлены ниже:

Разрешение по осям X и Z , мкм	0,002
Разрешение на кончике стилуса, мкм	0,003
Система измерения	Оптическая инкрементная и бесконтактная по всем осям (X, Z, T)
Точность, мкм	$\pm (0,5 + L/100)$

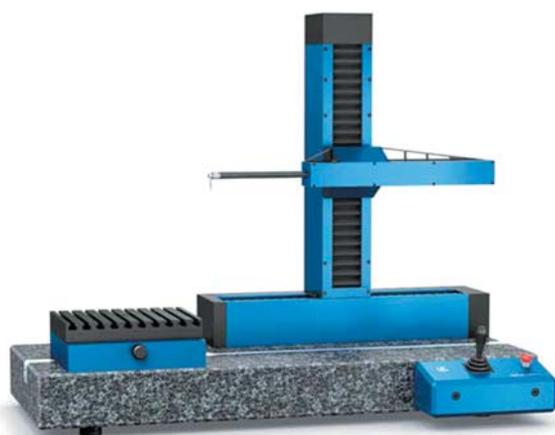


Рис. 5. Контурограф OPTACOM VC-10UL



Рис. 6. Тепловизор Fluke Ti95

Технические характеристики тепловизора Fluke Ti95 приведены ниже:

Пространственное разрешение (IFOV), мрад	5,6
Система фокусировки	Нерегулируемый фокус 46 см (18 дюймов) и выше
Тепловая чувствительность (NETD), °C, при температуре объекта 30 °C (100 мК)	≤0,1
Диапазон измеряемых температур, °C (°F), не калибруется ниже -10 °C	-20...+250 °C (-4...+482 °F)

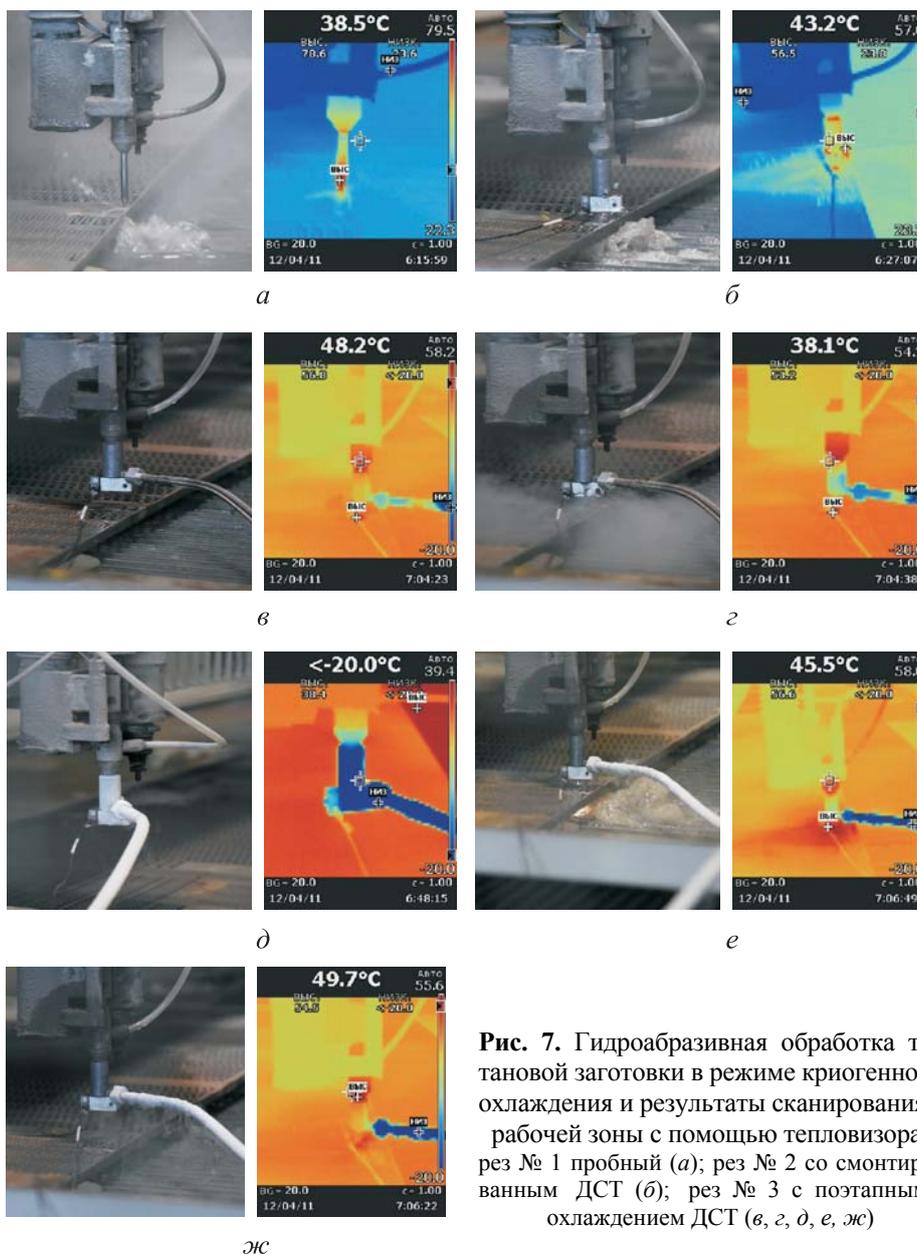


Рис. 7. Гидроабразивная обработка титановой заготовки в режиме криогенного охлаждения и результаты сканирования рабочей зоны с помощью тепловизора: рез № 1 пробный (а); рез № 2 со смонтированным ДСТ (б); рез № 3 с поэтапным охлаждением ДСТ (в, г, д, е, ж)

Последовательность проведения эксперимента:

- пробный рез образца № 1 без охлаждения (рис. 7, а), показания тепловизора записывают;
- монтаж ДСТ на ФТ гидроабразивного станка;
- рез образца № 2 без охлаждения (рис. 7, б), показания тепловизора записывают;
- присоединение криотрубопровода (рис. 7, в) и криогенное охлаждение ФТ путем прокачки жидкого азота через ДСТ (рис. 7, г, д);
- рез образца № 3, показания тепловизора записывают (рис. 7, е, ж).

Машинное время обработки одного реза по управляющей программе составляет 6 мин.

Результаты проведенного эксперимента. При увеличении давления воздуха до 1 атм в системе прокачки хладагента режим работы становится нестабильным: происходит блокирование струеформирующего сопла продуктами заморозки и остановка работы гидроабразивного оборудования (охлаждение при отсутствии ГАУС внутри ФТ приводит к аналогичным последствиям). Это можно объяснить тем, что скорость намерзания ледяного слоя внутри фокусирующей трубки превышает скорость истирания (уноса частиц) этого слоя. При давлении 0,5 атм система «намерзание — истирание» находится в положении динамического равновесия. Можно сделать вывод, что рабочее давление воздуха в системе подачи хладагента около 0,5 атм, при нем снижается вибрационное воздействие на струеформирующее сопло смесительной камеры и станок для гидроабразивной резки работает эффективно.

На каждой стадии эксперимента проведены замеры температуры рабочей зоны с помощью тепловизора Fluke Ti95 (см. рис. 6). Результаты позволяют зафиксировать снижение температурной нагрузки снаружи ФТ на 20...30 °С, что по сути является показателем эффективности ДСТ (рис. 7). По аналогии с лезвийным инструментом, у ФТ

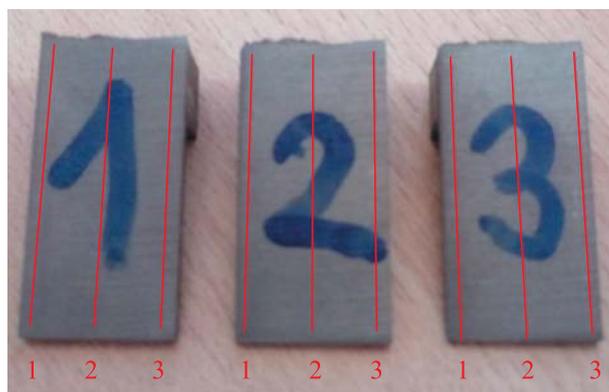


Рис. 8. Изготовленные образцы: № 1 — пробный рез; № 2 — без охлаждения; № 3 — с криоохлаждением

снижение температуры (в том числе криогенное) в зоне активного резания или эрозии положительно влияет на стойкость и производительность инструмента [23]. Снижение температурной нагрузки также может быть полезно при обработке термочувствительных заготовок, таких как медицинские или взрывчатые вещества [24].

Шероховатости поверхностей изготовленных образцов (рис. 8) были измерены на контурографе (см. рис. 5).

Результаты измерения шероховатости поверхностей в сечениях представлены на рис. 9 и обобщены на рис. 10.

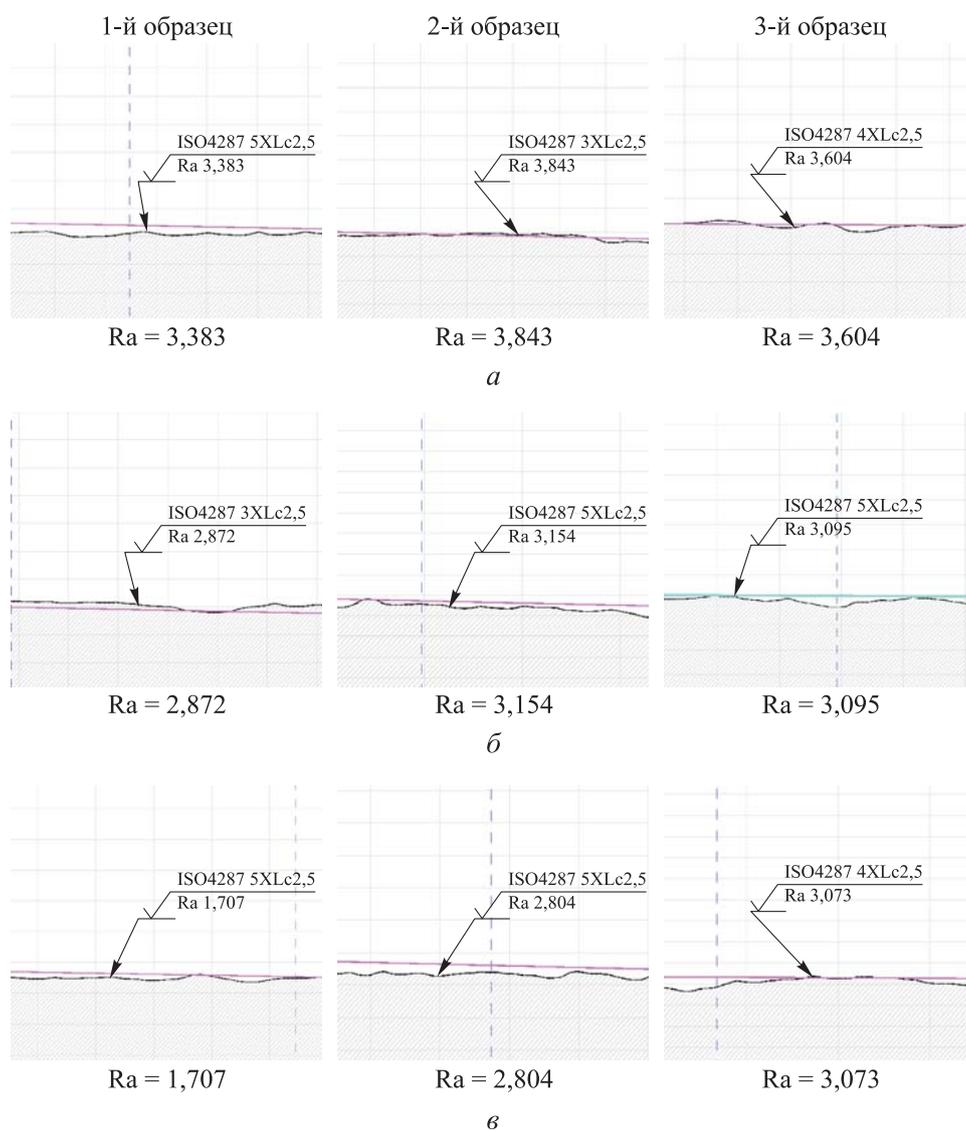


Рис. 9. Шероховатости образцов, измеренные по трем сечениям: 1-е (а), 2-е (б), 3-е (в)

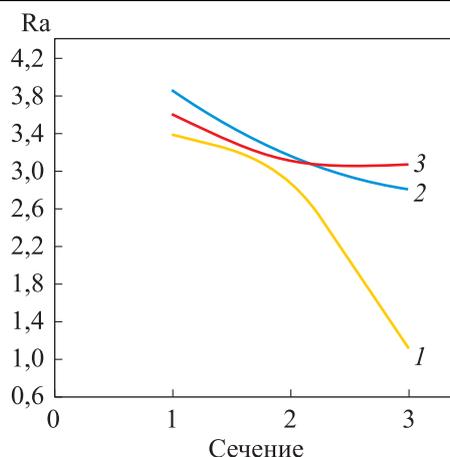


Рис. 10. Динамика изменения шероховатости образцов № 1, 2, 3 по трем сечениям

Обсуждение результатов и выводы. Криогенное охлаждение является эффективным способом снизить эрозионную нагрузку на фокусирующую трубку гидроабразивного станка. Рабочее давление воздуха в системе подачи хладагента около 0,5 атм. Крио-охлаждение должно производиться при включенной ГАУС. Для снижения теплотерь DST рекомендуется использовать теплозащитные покрытия. Анализ шероховатости поверхностей не выявил существенных различий между образцами до (№ 1, № 2) и после криогенной обработки (№ 3). В настоящее время вопросы импортозамещения в ракетно-космическом машиностроении имеют важное государственное значение. Дальнейшие исследования можно посвятить выработке практических рекомендаций по конструированию промышленного теплообменника, способного работать в автоматизированном режиме с поддержкой непрерывного криогенного охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Thakur P., Raut D.N., Siddiqui F. Recent applications, developments and challenges in waterjet technology. *Recent Innovations in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRITDME 2020*. Singapore, Springer Singapore, 2022, pp. 141–155.
- [2] Alsofi M.S. State-of-the-art in abrasive water jet cutting technology and the promise for micro- and nano-machining. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 1–14.
- [3] Абашин М.И., Герасимова А.М., Вдовин А.А. Импортозамещающие технологии производства расходных элементов гидроструйного оборудования, применяемого для обработки материалов ракетно-космической техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 9 (57), с. 8. URL: <https://engjournal.bmstu.ru/articles/1529/1529.pdf>
- [4] Chomka G., Kasperowicz M., Chodór J., Chudy J., Kukielka L. Possibilities of rock processing with a high-pressure abrasive waterjet with an aspect terms to minimizing energy consumption. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2, paper 647.

- [5] Колпаков В.И., Илюхина А.А. Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 9 (93), с. 1.
URL: <https://engjournal.bmstu.ru/articles/1913/1913.pdf>
- [6] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий ракетно-космического машиностроения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3 (15), с. 23.
URL: <https://engjournal.bmstu.ru/articles/636/636.pdf>
- [7] Jerman M., Zelenak M., Lebar A., Foldyna V., Foldyna J., Valentincic J. Observation of cryogenically cooled ice particles inside the high-speed water jet. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2021, vol. 289, art. no. 116947.
- [8] Du M., Wang H., Dong H., Guo Y., Ke Y. Numerical research on multi-particle movements and nozzle wear involved in abrasive waterjet machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117, pp. 2845–2858.
- [9] McGeough J.A. Cutting of food products by ice-particles in a water-jet. *Procedia Cirp*, 2016, vol. 42, pp. 863–865.
- [10] Deo A., Bagal D.K., Pattanaik A.K., Panda S.N., Barua A., Barkey R.K., et al. Recent advancements in ice jet machining process as an alternative of AWJM. *Materials Today: Proceedings*, 2022. vol. 50, pp. 981–985.
- [11] Wohlfeil F. Radical Technological Innovation: Case Study of Cryogenic Machining by SME. *KIT Scientific Working Papers*, 2015.
- [12] Galinovskiy A.L., Izotov N.A. An experimental study of hydroerosion of surface of a chill metal under the influence of an abrasive-liquid ultra-jet. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2021, vol. 2318. p. 150013.
- [13] Hashish M. Abrasive waterjet machining. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 13, p. 3273.
- [14] Dunsky C.M., Hashish M., Liu H.T. Development of a vanishing abrasive cryogenic jet (VACJET). In: *Proceedings of the 1997 DoD/Industry Coatings Conference*, Las Vegas, Nevada, May, 1997, pp. 13–15.
- [15] Bańkowski D., Młynarczyk P., Hlaváčová I.M. Temperature measurement during abrasive water jet machining (AWJM). *Materials*, 2022, vol. 15, no. 20, paper no. 7082.
- [16] Kartal F. A review of the current state of abrasive water-jet turning machining method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 495–505.
- [17] Pogrebnyak A.V., Perkun I.V., Pogrebnyak V.G., et al. Thermal effects in the flow of a polymer aqueous solution through a hydrocutting jet-forming head. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 1, pp. 137–143.
- [18] Percec A., Trieb F., Pude F. Some investigations into 1,000 MPa pure waterjet cutting. In: *International Conference on Water Jet-Research, Development, Applications*. Cham, Springer International Publishing, 2019, pp. 155–163.
- [19] Chang S., Liu W., Tang J., Lan Y., Long H. Thermal effects and deformation mechanisms in abrasive waterjet machining: insights from Ti-6Al-4V alloy for broader applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, vol. 334, art. no. 118643.
- [20] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Изотов Н.А. *Способ гидроабразивной резки и устройство для его осуществления*. Патент RU 2744633 С1, Российская Федерация, 2020.
- [21] Круглов П.В., Изотов Н.А., Виноградова И.К. Использование SLM-печати при изготовлении криогенного теплообменника для охлаждения фокуси-

- рующей трубки установки гидроабразивной резки. *Материалы XV Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении»*. В 2 томах. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, т. 2, с. 41–43. EDN: CJZCHJ
- [22] Галиновский А.Л., Круглов П.В., Янко М.А., Изотов Н.А. Численное моделирование сверхнизкотемпературного воздействия на гидроабразивные фокусирующие трубки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 3, с. 47–56.
- [23] Chinnasamy M., Rathanasamy R., Kumar Pal S., Kumar Palaniappan S. Effectiveness of cryogenic treatment on cutting tool inserts: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, vol. 108, art. no. 105946.
- [24] Singh N.P., Srinivasu D.S., Babu N.R. Thermal analysis of abrasive waterjet machining process. In: *Proceedings of 10th International Conference on Precision, Meso and Nano Engineering, India*, 2017, pp. 31–34.

Статья поступила в редакцию 31.03.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Галиновский А.Л., Круглов П.В., Самсонов К.С., Медведь В.С., Изотов Н.А. Экспериментальное исследование температурного воздействия при криогенном охлаждении фокусирующих трубок гидроабразивных установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 4. EDN ORNKCU

Галиновский Андрей Леонидович — д-р техн. наук, д-р пед. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru

Круглов Павел Владимирович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kpv17@bmstu.ru

Самсонов Кирилл Сергеевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sams1@bk.ru

Медведь Виктория Сергеевна — инженер, АО «ТРВ-инжиниринг». e-mail: mvbarny@yandex.ru

Изотов Никита Анатольевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: niqmaster@yandex.ru

Experimental study of temperature effects during cryogenic cooling applied to waterjet installation focusing tubes

© A.L. Galinovsky¹, P.V. Kruglov¹, K.S. Samsonov¹,
V.S. Medved², N.A. Izotov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

²JSC “TMC-engineering”, Korolyov, 141076, Russian Federation

The paper studies the issue of focusing tube erosion. A hypothesis proposes that cryogenic cooling can protect the jet-forming channel's surface by emergence an ice layer in the ultra-jet creation zone. Modern approaches to temperature monitoring in ultra-jet generation equipment states are considered. An experiment was organized and conducted: a test system based on a waterjet cutting head was created; the focusing tube was cryo-cooled during titanium workpiece processing with parallel thermal imaging picture recording. Additionally, the microroughness profiles of the obtained experimental workpieces were studied. Comparing temperature images from cooled and uncooled focusing tubes allowed us to assess cryogenic modes' effectiveness, propose improved protection methods, and outline promising research areas for cryotechnology in waterjet cutting.

Key words: hydroabrasive ultra-jet, liquid nitrogen, focusing tube, thermal imager, contourograph

REFERENCES

- [1] Thakur P., Raut D.N., Siddiqui F. Recent applications, developments and challenges in waterjet technology. *Recent Innovations in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRITDME 2020*. Singapore, Springer Singapore, 2022, pp. 141–155.
- [2] Alsoufi M.S. State-of-the-art in abrasive water jet cutting technology and the promise for micro- and nano-machining. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 1–14.
- [3] Abashin M.I., Gerasimova A.M., Vdovin A.A. Import-substituting technologies for the production of consumables for hydrojet equipment used for processing materials for rocket and space technology. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 9 (57), pp. 8. Available at: <https://engjournal.bmstu.ru/articles/1529/1529.pdf>
- [4] Chomka G., Kasperowicz M., Chodór J., Chudy J., Kukielka L. Possibilities of rock processing with a high-pressure abrasive waterjet with an aspect terms to minimizing energy consumption. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2, paper 647.
- [5] Kolpakov V.I., Ilyukhina A.A. Features of mathematical modeling of the destruction of structures made of different materials under the action of a high-speed hydroabrasive jet. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 9 (93), pp. 1. Available at: <https://engjournal.bmstu.ru/articles/1913/1913.pdf>
- [6] Tarasov V. A., Galinovsky A. L. Problems and prospects for the development of hydrojet technologies in rocket and space engineering. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 3 (15), pp. 23. Available at: <https://engjournal.bmstu.ru/articles/636/636.pdf>
- [7] Jerman M., Zelenak M., Lebar A., Foldyna V., Foldyna J., Valentincic J. Observation of cryogenically cooled ice particles inside the high-speed water jet. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2021, vol. 289, art. no. 116947.

- [8] Du M., Wang H., Dong H., Guo Y., Ke Y. Numerical research on multi-particle movements and nozzle wear involved in abrasive waterjet machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117, pp. 2845–2858.
- [9] McGeough J.A. Cutting of food products by ice-particles in a water-jet. *Procedia Cirp*, 2016, vol. 42, pp. 863–865.
- [10] Deo A., Bagal D.K., Pattanaik A.K., Panda S.N., Barua A., Barkey R.K., et al. Recent advancements in ice jet machining process as an alternative of AWJM. *Materials Today: Proceedings*, 2022. vol. 50, pp. 981–985.
- [11] Wohlfeil F. Radical Technological Innovation: Case Study of Cryogenic Machining by SME. *KIT Scientific Working Papers*, 2015.
- [12] Galinovskiy A.L., Izotov N.A. An experimental study of hydroerosion of surface of a chill metal under the influence of an abrasive-liquid ultra-jet. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2021, vol. 2318. p. 150013.
- [13] Hashish M. Abrasive waterjet machining. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 13, p. 3273.
- [14] Dunskey C.M., Hashish M., Liu H.T. Development of a vanishing abrasive cryogenic jet (VACJET). In: *Proceedings of the 1997 DoD/Industry Coatings Conference*, Las Vegas, Nevada, May, 1997, pp. 13–15.
- [15] Bańkowski D., Młynarczyk P., Hlaváčová I.M. Temperature measurement during abrasive water jet machining (AWJM). *Materials*, 2022, vol. 15, no. 20, paper no. 7082.
- [16] Kartal F. A review of the current state of abrasive water-jet turning machining method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 495–505.
- [17] Pogrebnyak A.V., Perkun I.V., Pogrebnyak V.G., et al. Thermal effects in the flow of a polymer aqueous solution through a hydrocutting jet-forming head. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 1, pp. 137–143.
- [18] Perec A., Trieb F., Pude F. Some investigations into 1,000 MPa pure waterjet cutting. In: *International Conference on Water Jet-Research, Development, Applications*. Cham, Springer International Publishing, 2019, pp. 155–163.
- [19] Chang S., Liu W., Tang J., Lan Y., Long H. Thermal effects and deformation mechanisms in abrasive waterjet machining: insights from Ti-6Al-4V alloy for broader applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, vol. 334, art. no. 118643.
- [20] Barzov A.A., Galinovsky A.L., Izotov N.A. *Method for hydro-abrasive cutting and device for its implementation*. Patent RU 2744633 C1, Russian Federation, 2020.
- [21] Kruglov P.V., Izotov N.A., Vinogradova I.K. Use of SLM printing in the manufacture of a cryogenic heat exchanger for cooling the focusing tube of a waterjet cutting unit. In: *Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference “High-tech technologies in mechanical engineering”*. In 2 vols. Moscow, BMSTU Press, 2024, pp. 41–43. (In Russ.) EDN: CJZCHJ
- [22] Galinovskiy A.L., Kruglov P.V., Yanko M.A., Izotov N.A. Numerical simulation of the ultra-low-temperature effect on the waterjet focusing tubes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 3, pp. 47–56.
- [23] Chinnasamy M., Rathanasamy R., Kumar Pal S., Kumar Palaniappan S. Effectiveness of cryogenic treatment on cutting tool inserts: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, vol. 108, art. no. 105946.
- [24] Singh N.P., Srinivasu D.S., Babu N.R. Thermal analysis of abrasive waterjet machining process. In: *Proceedings of 10th International Conference on Precision, Meso and Nano Engineering*, India, 2017, pp. 31–34.

Galinovsky A.L., D.Sc. (Engineering), D.Sc. (Pedagogical), Head of the Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru

Kruglov P.V., D.Sc. (Engineering), Professor of the Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: kpv17@bmstu.ru

Samsonov K.S., Postgraduate Student of the Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: sams1@bk.ru

Medved V.S., Engineer, JSC “TMC-engineering”. e-mail: mvbarny@yandex.ru

Izotov N.A., Postgraduate Student of the Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: niqmaster@yandex.ru