

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.9.048.3

Применение вибрационного анализа для оценки эрозии фокусирующих трубок гидроабразивных установок при криогенном охлаждении

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

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² АО «ТРВ-инжиниринг»

Application of vibration analysis to evaluate waterjet installation focusing tube erosion under cryogenic cooling

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

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Joint Stock Company TMC-engineering

Рассмотрена проблема эрозионного изнашивания фокусирующих трубок. Выдвинута феноменологическая гипотеза о защитных свойствах криогенного охлаждения благодаря образованию ледяного слоя в струеформирующем канале. Рассмотрены известные способы виброакустического мониторинга состояния оборудования, генерирующего ультразвуку. Подготовлен и проведен эксперимент по криогенному охлаждению фокусирующих трубок: изготовлено дополнительное оборудование, собрана экспериментальная установка на режущей головке гидроабразивного станка, проведено криогенное охлаждение фокусирующей трубки с одновременной обработкой титановых заготовок и регистрацией показаний датчиков вибрации. Получена вибрационная картина работы неохлажденной и охлажденной фокусирующих трубок. По полученным данным сделаны выводы о режимах криогенного охлаждения, способах дополнительной криогенной защиты и сформулированы рекомендации по дальнейшему направлению исследований в области технологии криогенного охлаждения при гидроабразивной обработке.

EDN: LYREKC, <https://elibrary/lyrekc>

Ключевые слова: гидроабразивная ультразвуку, жидкий азот, фокусирующая трубка, спектральная плотность мощности колебаний

The problem of erosive wear in focusing tubes is considered. A phenomenological hypothesis is put forward about the protective properties of cryogenic cooling caused by an ice layer

forming in the jet-forming channel. The known methods for vibroacoustic state monitoring in equipment generating ultrajets are considered. An experiment on cryogenic cooling for focusing tubes was prepared and conducted: additional equipment was manufactured, an experimental setup was assembled on a waterjet machine's cutting head, and cryo-cooled focusing tubes underwent simultaneous titanium blank processing while vibration sensor readings were recorded. A vibration pattern from the operation of an uncooled and cooled focusing tube was obtained. Based on the data obtained, conclusions were made regarding the cryogenic cooling modes, additional cryoprotection methods, and recommendations formulated for further research in the field of cryogenic cooling technology for waterjet processing.

EDN: LYREKC, <https://elibrary/lyrekc>

Keywords: hydroabrasive ultra-jet, liquid nitrogen, focusing tube, spectral power density of oscillations

Гидроабразивная резка, являясь универсальным методом, применяется в таких высокотехнологических отраслях промышленности, как космическая индустрия, авиа-, ракето-, автомобиль- и судостроение. Возможность обработки сложных материалов, включая металлы, композиты, керамику и многослойные структуры, делает этот метод широко востребованным [1–3]. Исследование повышения эффективности гидроабразивной резки можно считать актуальной задачей [4–6].

Цель исследования — минимизировать эрозионную нагрузку на фокусирующую трубку (ФТ) после криогенного охлаждения. Метод исследования состоит в сравнении вибрационных картин работы неохлажденной и охлажденной ФТ. Снижение объема спектральной плотности мощности (СПМ) виброускорений косвенно свидетельствует об образовании ледяного слоя на внутреннем канале ФТ и выполнении им защитных функций.

Непосредственное наблюдение за процессом весьма затруднено экстремальными условиями эксплуатации [7]. В процессе смешивания и ускорения абразивные частицы постоянно сталкиваются и трутся о внутреннюю стенку струеформирующего тракта, что приводит к истиранию смесительной камеры и ФТ. Износ ФТ является одной из основных причин, приводящих к снижению качества и эффективности обработки. Участок наиболее сильного эрозионного изнашивания находится на стыке смесительной камеры и ФТ [8].

Известны способы криогенного охлаждения режущего инструмента, такие как подача крионосителя в зону резания, в том числе и через специальные каналы в инструменте. Эти технологии запатентованы компаниями Okuma (Япония), производящей металлорежущие

станки, и 5ME (США), изготавливающей криогенный режущий инструмент и системы подвода крионосителя через шпиндель [9]. Предполагается, что этот опыт можно экстраполировать на технологию гидроабразивной обработки.

По результатам экспериментального исследования [10] установлено, что после криогенного охлаждения металл приобретает устойчивость к гидроабразивной ультраструйной эрозии. Для реализации криогенного охлаждения необходим точный термодинамический контроль процесса работы гидроабразивного оборудования. Захват абразивов в криогенной гидроабразивной ультраструе (ГАУС) — сложный процесс из-за возможного замерзания и закупорки канала подачи абразива [11]. Испытания, проведенные с подмешиванием абразивов в струи жидкого азота, показали, что криогенная ГАУС режет аналогично традиционной ГАУС [12].

Исследование виброакустической картины является достаточно популярным методом при мониторинге состояния ФТ [13]. В работе [14] наблюдали за картиной акустической эмиссии и измеряли кинетическую энергию ГАУС с помощью конденсаторного микрофона, установленного на режущей головке. Акустическая сигнатура оказалась эффективным индикатором кинетической мощности ГАУС и ее изменений, обусловленных давлением жидкости, в то время как изменения, вызванные абразивом, не были обнаружены.

В работе [15] на основе метода акустической эмиссии осуществляли мониторинг процесса в реальном времени, позволяющий обнаруживать аномальные события и потенциальные неисправности оборудования.

Авторами статьи [16] применен подход, основанный на измерении рабочей вибрации. Ис-

следована чувствительность частоты моды ФТ к развивающемуся износу ФТ и продемонстрирована возможность отслеживания этой частоты по сигналу вибрации, получаемому на акселерометре трехкомпонентном (АТК).

В работе [17] акустические датчики используются для обнаружения проникновения струи с целью автоматического контроля времени выдержки, чтобы предотвратить расслаивание при обработке композитов.

Также, колебания, приложенные к заготовке [18] и соплу [19], не всегда являются вредным или побочным явлением. Их можно вызывать намеренно в виде наложенных ультразвуковых вибраций для улучшения качества шероховатости поверхностей [20].

Технологическое обеспечение и методы. Для генерации ГАУС использован станок гидроабразивной резки WJS NC4020E (Швеция), внешний вид которого показан на рис. 1. Размер внутреннего струеформирующего канала ФТ составляет 0,76 мм, размер сопла — 0,25 мм, диафрагмы — 4,0 мм. Песок — гранатовый MESH 80. Время обработки одной детали — 6,5 мин, расход песка — 0,3 кг/мин.

Для криогенного охлаждения ФТ спроектирован специальный теплообменник с изменением конфигурации от змеевика [21] к твердотельному цилиндру с двухконтурным спиральным каналом внутри (рис. 2).

Двухконтурный спиральный теплообменник (ДСТ) изготовлен методом SLM-печати [22]. Решение задачи достаточности отводимой теплоты (тепловой баланс) приведено в работе [23]. Экспериментальная установка собрана на режущей головке станка (рис. 3)



Рис. 1. Внешний вид станка гидроабразивной резки WJS NC4020E

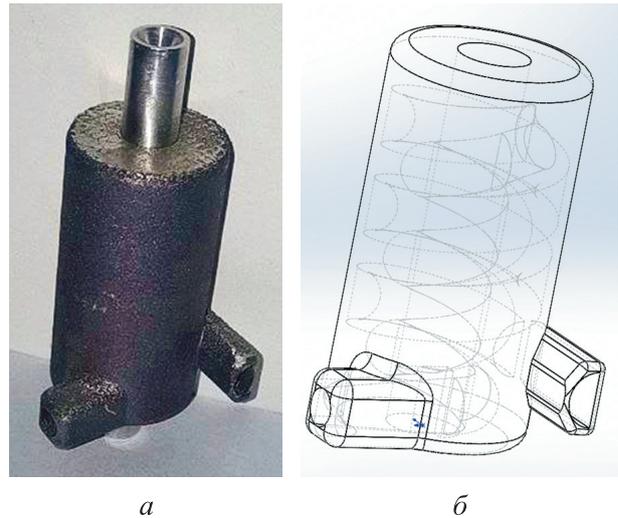


Рис. 2. Внешний вид (а) и 3D-модель (б) ДСТ

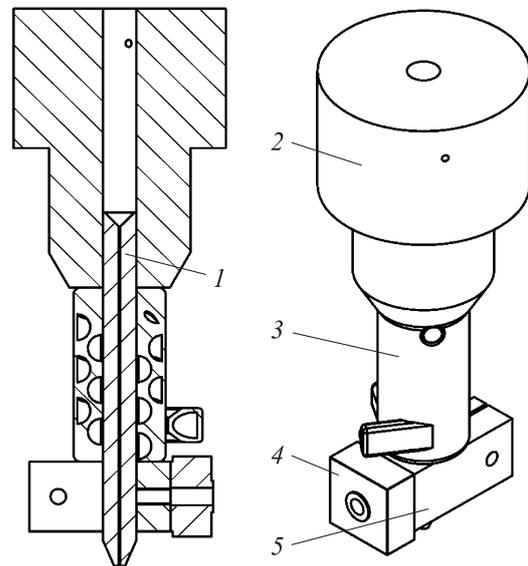


Рис. 3. 3D-модель экспериментальной установки: 1 — ФТ; 2 — режущая головка гидроабразивного станка; 3 — ДСТ; 4 и 5 — АТК и кронштейн для его крепления

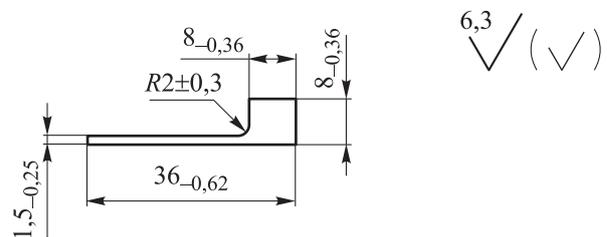


Рис. 4. Эскиз обрабатываемой заготовки

Эскиз обрабатываемой заготовки, выполненной из титанового сплава ОТ4-1, показан на рис. 4. Толщина плиты — 15 мм.

Хладагент, содержащийся в сосуде Дьюара (рис. 5, а), подавался в зону резания с помощью крионасоса (рис. 5, б).



Рис. 5. Внешний вид сосуда Дьюара с жидким азотом вместимостью 20 л (а) и крионасоса (б)

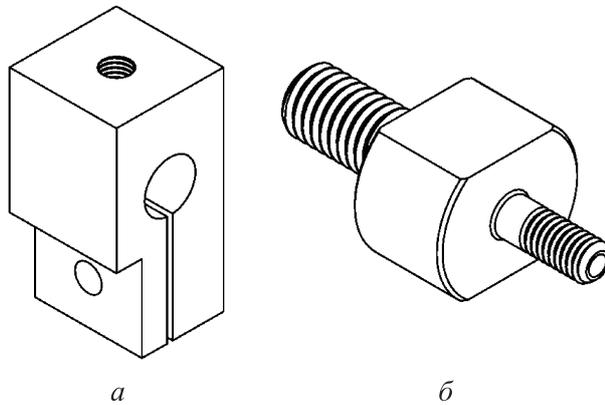


Рис. 6. Внешний вид специального кронштейна (а) и штуцера-переходника (б)

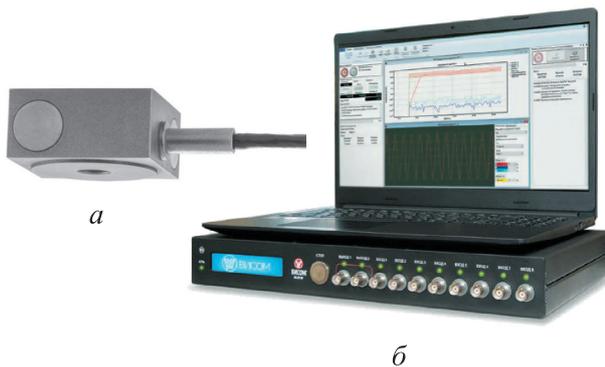


Рис. 7. Внешний вид датчика АТК (а) и прибора ВС-301(б)

Для крепления АТК на корпусе ФТ изготовлен специальный кронштейн (рис. 6, а), для соединения ДСТ с криогенным трубопроводом — штуцер-переходник (рис. 6, б).

При экспериментальном определении уровней вибрационного нагружения на ФТ до и после криогенного охлаждения использован

трехкомпонентный вибропреобразователь АР2038-10 (рис. 7, а) производства ООО «ГлобалТест», предназначенный для измерения вибрационного и ударного ускорений.

Техническая характеристика вибропреобразователя АР2038-10

| | |
|--|--------------------|
| Коэффициент преобразования, мВ/(м·с ⁻²) | 1 |
| Относительный коэффициент поперечного преобразования | Менее 0,05 |
| Рабочий диапазон частот, Гц | 0,5...12 000 |
| Максимальное значение амплитуды измеряемого ускорения, м/с ² | 5000 |
| Максимальный удар (пиковое значение) | 1000g |
| Частота установочного резонанса в осевом направлении, кГц | Более 35 |
| Уровень среднеквадратичного значения собственного шума при частоте 1...10 000 Гц, м/с ² | 0,005 |

Вибропреобразователь подключали к системе управления виброиспытаниями ВС-301 (рис. 7, б) производства ООО «Висом», предназначенной для сбора и регистрации вибрационных и ударных нагружений.

Техническая характеристика системы управления виброиспытаниями ВС-301

| | |
|---|--------------------|
| Диапазон частот, Гц | 0,1...35 000 |
| Разрешение аналогово-цифрового преобразователя/цифро-аналогового преобразователя, бит | 24 |
| Напряжение питания, В | 100...240 |
| Рабочая температура, °С | 5...50 |
| Частота напряжения питания, Гц | 47...63 |

Уровень вибрационного нагружения фиксировали в условиях криогенного охлаждения ФТ путем прокачки азота через ДСТ на образце № 3 и без криогенного охлаждения на образце № 2. Старт регистрации вибрационного нагружения осуществляли за одну минуту до начала резания образца, конец — через 1 мин после завершения резания образца.

Гидроабразивная обработка титановой заготовки в режиме криогенного охлаждения включала в себя следующие этапы:

- пробное резание образца № 1 без криогенного охлаждения (рис. 8, а);
- размещение ДСТ на ФТ гидроабразивного станка; присоединение АТК к специальному кронштейну и подключение к прибору управления ВС-301;
- резание образца № 2 без криогенного охлаждения (рис. 8, б) с регистрацией показаний АТК;

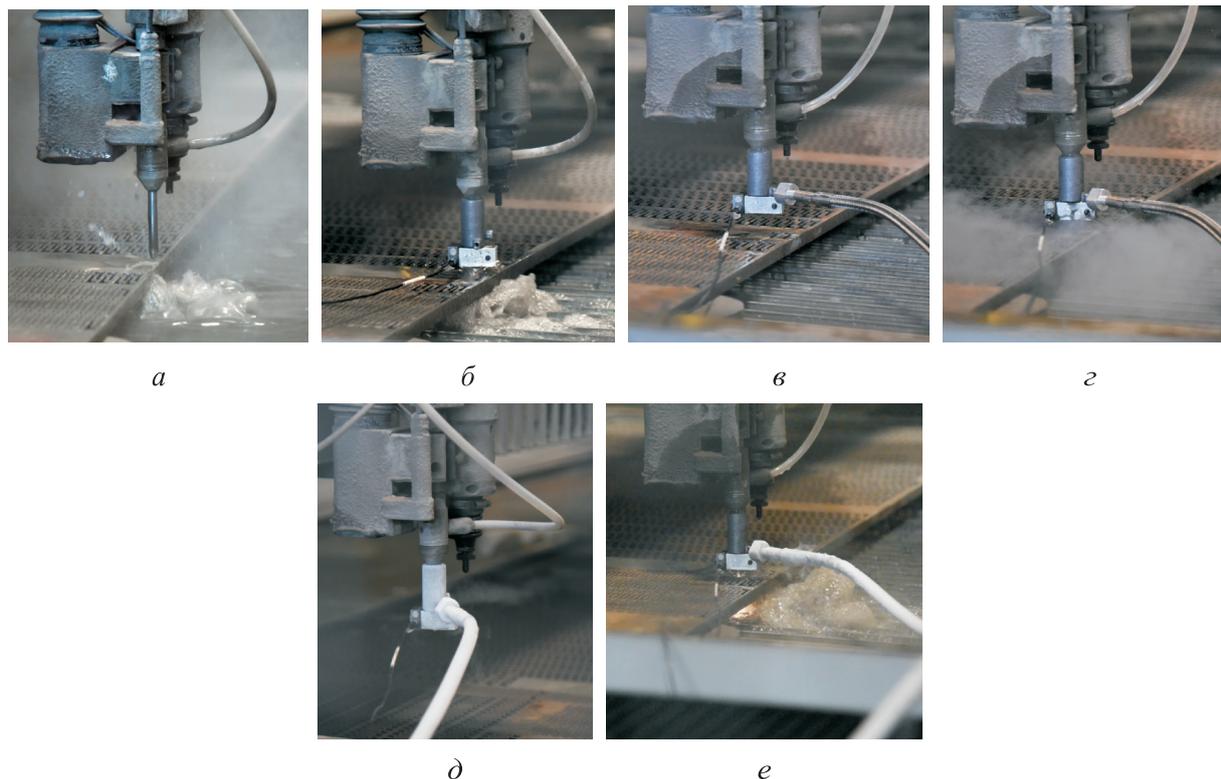


Рис. 8. Этапы гидроабразивной обработки титановой заготовки в режиме криогенного охлаждения

- присоединение криогенного трубопровода (рис. 8, в) и криогенное охлаждение ФТ путем прокачки жидкого азота через ДСТ (рис. 8, г, д);
- резание образца № 3 с регистрацией показаний АТК (рис. 8, е);

Машинное время обработки одного резания по управляющей программе составляло 6 мин.

Результаты исследования. Данные вибрационных процессов, полученные вибропреобразователем, обрабатывали в пакете постэспериментальной обработки измерительной информации WinPos Expert. Проведена нерекурсивная фильтрация сигнала на основе гармонического ряда Фурье. Устранение явления Гиббса реализовано через умножение коэффициентов Фурье на сглаживающие множители (окно) Хемминга. На основе дискретного преобразования Фурье определена СПМ для каждого участка записи вибрационного процесса при гидроабразивной резке. На основании экспериментальных данных получено среднее квадратичное значение виброускорения в диапазоне до 500 Гц по осям X и Y, до 300 Гц по оси Z.

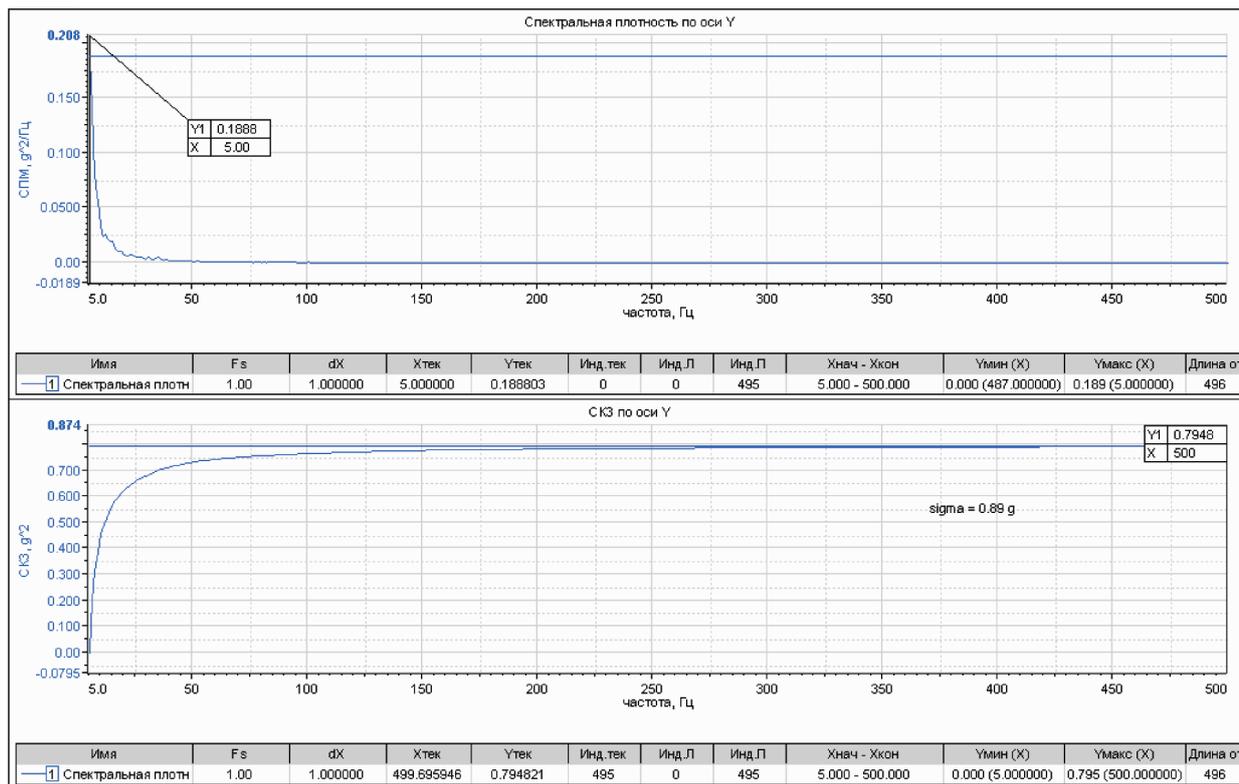
Пример регистрации показаний датчика АТК при резании образца № 2 без криогенного

охлаждения по осям Y, Z и X приведен на рис. 9, а–в.

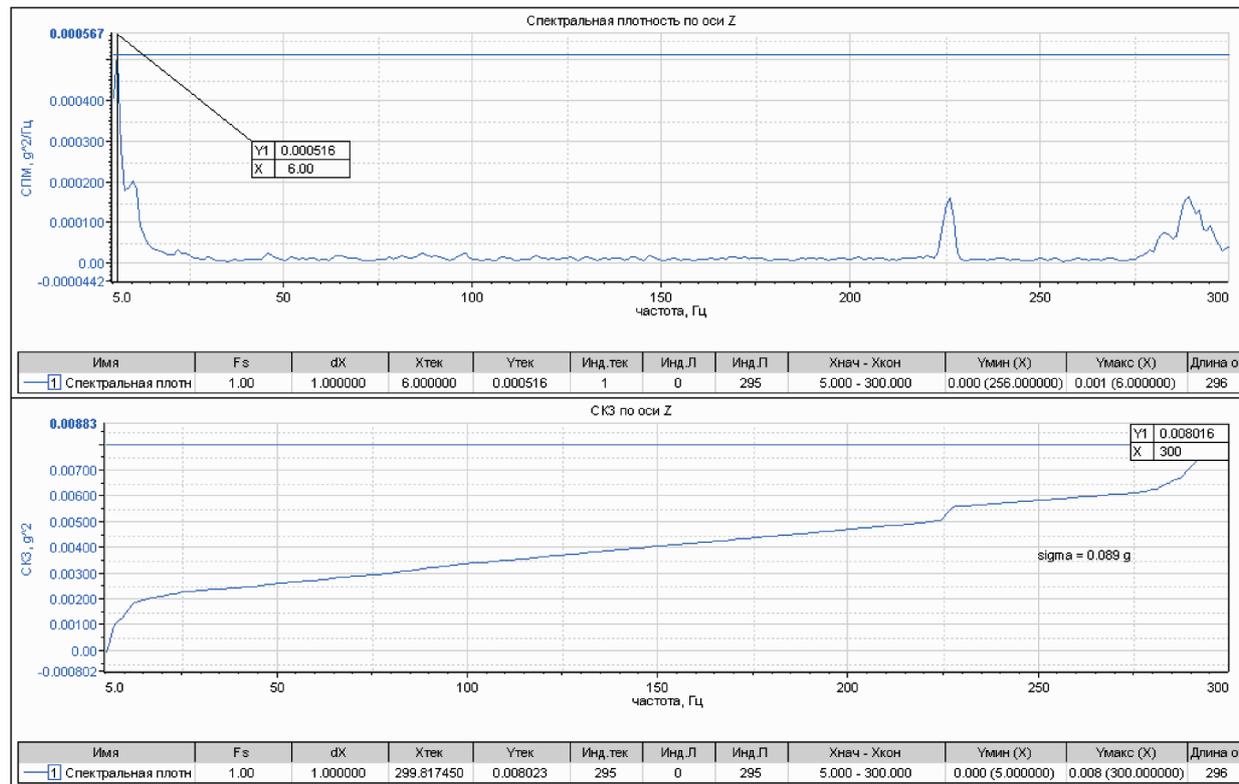
По результатам анализа обработанной измерительной информации установлено, что при прокачке жидкого азота с давлением 0,5 атм происходит снижение уровня СПМ по осям X, Y и Z на 85,8, 97,6 и 29,9 % соответственно. При повышении давления воздуха в системе прокачки хладагента до 1 атм наблюдается существенное увеличение уровня СПМ, что может свидетельствовать о нестабильном режиме работы.

Рост уровня СПМ среднее квадратичное значения ускорения обусловлен тем, что при давлении 1 атм скорость замерзания ледяного слоя внутри ФТ превышает скорость истирания (уноса частиц) этого слоя. При давлении 0,5 атм система замерзания — истирание находится в положении динамического равновесия. Это позволяет заключить, что рабочее давление воздуха в системе подачи хладагента должно составлять около 0,5 атм для снижения вибрационного воздействия на струеформирующее сопло смесительной камеры и эффективной работы станка гидроабразивной резки.

Отсутствие значительного снижения вибрационных нагрузок при давлении 0,5 атм по оси Z можно объяснить особенностями кинематики гидроабразивного станка.

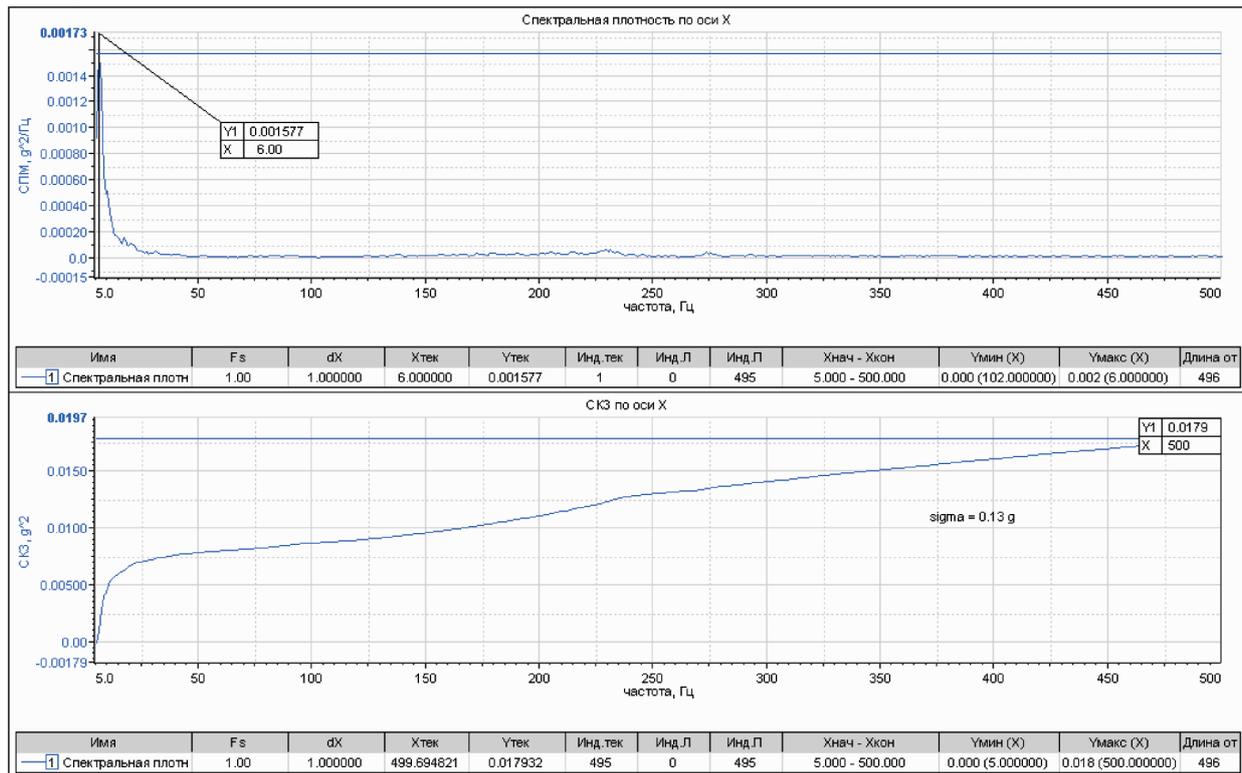


a



b

Рис. 9 (начало). Примеры регистрации показаний датчика АТК при резании образца № 2 без криогенного охлаждения по осям Y (a), Z (б) и X (в)



б

Рис. 9 (окончание). Примеры регистрации показаний датчика АТК при резании образца № 2 без криогенного охлаждения по осям Y (а), Z (б) и X (в)

Установлено, что при отсутствии ГАУС внутри ФТ охлаждение приводит к остановке станка из-за блокирования внутреннего канала ФТ продуктами заморзки.

Выводы

1. Показано, что криогенное охлаждение ФТ следует выполнять при включенной ГАУС. Рабочее давление воздуха в системе подачи хладагента должно составлять около 0,5 атм.
2. Снижение уровня СПМ среднеквадратичного значения виброускорения по осям X, Y и Z

соответственно на 85,8 , 97,6 и 29,9 % свидетельствует об эффективности криогенной защиты от эрозионного износа.

3. Для улучшения теплопередачи между ФТ и ДСТ рекомендовано использовать термопасту.

4. В дальнейших исследованиях будут сформулированы методические рекомендации по проектированию промышленного образца теплообменника для непрерывного криогенного охлаждения в автоматическом режиме.

Литература

- [1] Thakur P., Raut D.N., Siddiqui F. Recent applications, developments and challenges in water-jet technology. In: *Recent innovations in mechanical engineering*. Springer, 2022, pp. 141–155, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9236-9_14
- [2] Alsoofi M.S. State-of-the-art in abrasive water jet cutting technology and the promise for micro-and nano-machining. *Int. J. Mech. Eng. Appl.*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 1–14, doi: <https://doi.org/10.11648/j.ijmea.20170501.11>
- [3] Сазанов И.И. Физические аспекты гидроабразивной обработки материалов. *Вестник МГПУ. Сер. Естественные науки*, 2014, № 1, с. 72–77.
- [4] Chomka G., Kasperowicz M., Chodór J. et al. Possibilities of rock processing with a high-pressure abrasive waterjet with an aspect terms to minimizing energy consumption. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2, art. 647, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16020647>

- [5] Добровольский И.В., Лях М.М. Выбор оптимальных режимов гидроабразивного резания металла. *Экспозиция Нефть Газ*, 2016, № 4, с. 58–60.
- [6] Иванов В.В., Калашников Е.А. Система управления процессом гидроабразивной резки с закручиванием струи рабочей жидкости. *Computational Nanotechnology*, 2023, т. 10, № 4, с. 63–71, doi: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-4-63-71>
- [7] Jerman M., Zelenak M., Lebar A. et al. Observation of cryogenically cooled ice particles inside the high-speed water jet. *J. Mater. Process. Technol.*, 2021, vol. 289, art. 116947, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116947>
- [8] Du M., Wang H., Dong H. et al. Numerical research on multi-particle movements and nozzle wear involved in abrasive waterjet machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 117, pp. 2845–2858, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07876-9>
- [9] Wohlfeil F. Radical technological innovation: case study of cryogenic machining by 5ME. *KIT Scientific Working Papers*, 2015.
- [10] 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 Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, art. 150013, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035803>
- [11] Dunskey C., Hashish M. Observations on cutting with abrasive-cryogenic jets. *Proc. of the 13th Int. Water Jet Cutting Technology Conf.*, 1996, vol. 21, pp. 679–690.
- [12] Dunskey C.M., Hashish M., Liu H.T. Development of a vanishing abrasive cryogenic jet (VACJET). *Proc. 1997 DoD/Industry Coatings Conf.*, 1997, pp. 13–15.
- [13] Annoni M. A review of waterjet cutting research towards microAWJ and the definition of the waterjet digital twin. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 6, art. 1328, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17061328>
- [14] Copertaro E., Annoni M. Airborne acoustic emission of an abrasive waterjet cutting system as means for monitoring the jet cutting capability. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 123, no. 7, pp. 2655–2667, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10317-w>
- [15] Popan I.A., Cosma C., Popan A.I. et al. Monitoring equipment malfunctions in composite material machining: acoustic emission-based approach for abrasive waterjet cutting. *Appl. Sci.*, 2024, vol. 14, no. 11, art. 4901, doi: <https://doi.org/10.3390/app14114901>
- [16] Copertaro E., Perotti F., Annoni M. Operational vibration of a waterjet focuser as means for monitoring its wear progression. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 116, no. 5, pp. 1937–1949, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07534-0>
- [17] Hashish M. Abrasive waterjet machining. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 13, art. 3273, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17133273>
- [18] Qi H., Qin S., Cheng Z. et al. Towards understanding performance enhancing mechanism of micro-holes on K9 glasses using ultrasonic vibration-assisted abrasive slurry jet. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 64, pp. 585–593, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.048>
- [19] Hou R., Wang T., Lv Z. et al. Experimental study of the ultrasonic vibration-assisted abrasive waterjet micromachining the quartz glass. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 2018, no. 1, art. 8904234, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/8904234>
- [20] Wang H., Yuan R., Zhang X. et al. Research progress in abrasive water jet processing technology. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 8, art. 1526, doi: <https://doi.org/10.3390/mi14081526>
- [21] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Изотов Н.А. *Способ гидроабразивной резки и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2744633. Заявл. 25.08.2020, опубл. 12.03.2021.
- [22] Круглов П.В., Изотов Н.А., Виноградова И.К. Использование SLM-печати при изготовлении криогенного теплообменника для охлаждения фокусирующей трубки установки гидроабразивной резки. В: *Наукоемкие технологии в машиностроении*. Т. 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, с. 41–43.
- [23] Галиновский А.Л., Круглов П.В., Янко М.А. и др. Численное моделирование сверхнизкотемпературного воздействия на гидроабразивные фокусирующие трубки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 3, с. 47–56. EDN: BLQZVW

References

- [1] Thakur P., Raut D.N., Siddiqui F. Recent applications, developments and challenges in water-jet technology. In: *Recent innovations in mechanical engineering*. Springer, 2022, pp. 141–155, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9236-9_14
- [2] Alsoufi M.S. State-of-the-art in abrasive water jet cutting technology and the promise for micro-and nano-machining. *Int. J. Mech. Eng. Appl.*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 1–14, doi: <https://doi.org/10.11648/j.ijmea.20170501.11>
- [3] Sazanov I.I. Physical aspects of hydroabrasive treatment of materials. *Vestnik MGPU. Ser. Estestvennye nauki* [MCU Journal of Natural Sciences], 2014, no. 1, pp. 72–77. (In Russ.).
- [4] Chomka G., Kasperowicz M., Chodór J. et al. Possibilities of rock processing with a high-pressure abrasive waterjet with an aspect terms to minimizing energy consumption. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2, art. 647, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16020647>
- [5] Dobrovolskiy I.V., Lyakh M.M. Selecting the optimum mode of water-jet cutting metal method. *Ekspozitsiya Neft Gaz* [Exposition Oil Gas], 2016, no. 4, pp. 58–60. (In Russ.).
- [6] Ivanov V.V., Kalashnikov E.A. Control system for waterjet cutting process with swirling working fluid jet. *Computational Nanotechnology*, 2023, vol. 10, no. 4, pp. 63–71, doi: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-4-63-71> (in Russ.).
- [7] Jerman M., Zelenak M., Lebar A. et al. Observation of cryogenically cooled ice particles inside the high-speed water jet. *J. Mater. Process. Technol.*, 2021, vol. 289, art. 116947, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116947>
- [8] Du M., Wang H., Dong H. et al. Numerical research on multi-particle movements and nozzle wear involved in abrasive waterjet machining. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 117, pp. 2845–2858, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07876-9>
- [9] Wohlfeil F. Radical technological innovation: case study of cryogenic machining by 5ME. KIT Scientific Working Papers, 2015.
- [10] 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 Conf. Proc.*, 2021, vol. 2318, art. 150013, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035803>
- [11] Dunskey C., Hashish M. Observations on cutting with abrasive-cryogenic jets. *Proc. of the 13th Int. Water Jet Cutting Technology Conf.*, 1996, vol. 21, pp. 679–690.
- [12] Dunskey C.M., Hashish M., Liu H.T. Development of a vanishing abrasive cryogenic jet (VACJET). *Proc. 1997 DoD/Industry Coatings Conf.*, 1997, pp. 13–15.
- [13] Annoni M. A review of waterjet cutting research towards microAWJ and the definition of the waterjet digital twin. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 6, art. 1328, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17061328>
- [14] Copertaro E., Annoni M. Airborne acoustic emission of an abrasive waterjet cutting system as means for monitoring the jet cutting capability. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 123, no. 7, pp. 2655–2667, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10317-w>
- [15] Popan I.A., Cosma C., Popan A.I. et al. Monitoring equipment malfunctions in composite material machining: acoustic emission-based approach for abrasive waterjet cutting. *Appl. Sci.*, 2024, vol. 14, no. 11, art. 4901, doi: <https://doi.org/10.3390/app14114901>
- [16] Copertaro E., Perotti F., Annoni M. Operational vibration of a waterjet focuser as means for monitoring its wear progression. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 116, no. 5, pp. 1937–1949, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07534-0>
- [17] Hashish M. Abrasive waterjet machining. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 13, art. 3273, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17133273>
- [18] Qi H., Qin S., Cheng Z. et al. Towards understanding performance enhancing mechanism of micro-holes on K9 glasses using ultrasonic vibration-assisted abrasive slurry jet. *J. Manuf. Process.*, 2021, vol. 64, pp. 585–593, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.048>
- [19] Hou R., Wang T., Lv Z. et al. Experimental study of the ultrasonic vibration-assisted abrasive waterjet micromachining the quartz glass. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 2018, no. 1, art. 8904234, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/8904234>
- [20] Wang H., Yuan R., Zhang X. et al. Research progress in abrasive water jet processing technology. *Micromachines*, 2023, vol. 14, no. 8, art. 1526, doi: <https://doi.org/10.3390/mi14081526>

- [21] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Izotov N.A. *Sposob gidroabrazivnoy rezki i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for hydro-abrasive cutting and device for its implementation]. Patent RU 2744633. Appl. 25.08.2020, publ. 12.03.2021. (In Russ.).
- [22] Kruglov P.V., Izotov N.A., Vinogradova I.K. [Use of SLM printing in the fabrication of a cryogenic heat exchanger for cooling the focusing tube of a waterjet cutting machine]. V: *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. T. 2 [In: Science-intensive technologies in mechanical engineering, Vol. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2024, pp. 41–43. (In Russ.).
- [23] Galinovskiy A.L., Kruglov P.V., Yanko M.A. et al. Numerical simulation of the ultra-low-temperature effect on the waterjet focusing tubes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2025, no. 3, pp. 47–56. EDN: BLQZVW (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 02.04.2025

Информация об авторах

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru).

КРУГЛОВ Павел Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kpv17@bmstu.ru).

САМСОНОВ Кирилл Сергеевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sams1@bk.ru).

МЕДВЕДЬ Виктория Сергеевна — инженер. АО «ТРВ-инжиниринг» (141076, Королев, Российская Федерация, ул. Орджоникидзе, д. 2А, e-mail: mvbarny@yandex.ru).

ИЗОТОВ Никита Анатольевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: niqmaster@yandex.ru).

Information about the authors

GALINOVSKY Andrey Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Doctor of Science (Pedagogy), Professor, Head of Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru).

KRUGLOV Pavel Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor. Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kpv17@bmstu.ru).

SAMSONOV Kirill Sergeevich — Postgraduate. Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sams1@bk.ru).

MEDVED Victoria Sergeevna — Engineer. Joint Stock Company TMC-engineering (141076, Korolev, Russian Federation, Ordzhonikidze St., Bldg. 2A, e-mail: mvbarny@yandex.ru).

IZOTOV Nikita Anatolyevich — Postgraduate. Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: niqmaster@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Галиновский А.Л., Круглов П.В., Самсонов К.С., Медведь В.С., Изотов Н.А. Применение вибрационного анализа для оценки эрозии фокусирующих трубок гидроабразивных установок при криогенном охлаждении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 1, с. 87–96.

Please cite this article in English as:

Galinsky A.L., Kruglov P.V., Samsonov K.S., Medved V.S., Izotov N.A. Application of vibration analysis to evaluate waterjet installation focusing tube erosion under cryogenic cooling. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 1, pp. 87–96.