

УДК 620.179

## Ультраструйная абразивно-жидкостная диагностика биметаллических рабочих органов сельскохозяйственных орудий

М.А. Янко, А.Л. Галиновский, В.С. Болдырев, М.И. Абашин

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Ultrajet abrasive diagnostics of bimetallic agricultural machinery

M.A. Yanko, A.L. Galinovskiy, V.S. Boldyrev, M.I. Abashin

Bauman Moscow State Technical University

■ Применение биметаллов для создания рабочих органов сельскохозяйственных орудий является перспективным ввиду повышения надежности, обеспечения стойкости, наличия эффекта самозатачивания, увеличения ресурса и снижения эксплуатационных затрат. Выбор материалов для создания биметаллических заготовок, а также подбор технологии изготовления и режимов предполагает значительную вариативность входных параметров. Рациональные значения можно выбрать экспериментальными методами, однако такой путь сложен и экономически не оправдан. В связи с этим необходимо искать новые методы испытаний, способные дать объективные данные об основных эксплуатационных параметрах орудий сельскохозяйственного назначения. Приведены результаты имитационной ультразвуковой диагностики, которая сможет стать эффективным средством оценки качества материалов и готовых изделий — сельскохозяйственных орудий.

**EDN:** ABKBUZ, <https://elibrary/abkbuz>

**Ключевые слова:** биметаллические рабочие органы, самозатачивание инструмента, износостойкость почвообрабатывающих органов, абразивный износ, сельскохозяйственные орудия

■ The use of bimetallics for the creation of working parts of agricultural implements is promising due to increased reliability, durability, the presence of a self-sharpening effect, an increase in service life and a reduction in operating costs. The selection of materials for creating bimetallic blanks, as well as the selection of manufacturing technology and operating modes, involves significant variability in input parameters. Rational values for these parameters can be determined through experimental methods. However, this approach is complex and not economically feasible. In this regard, it is necessary to seek new testing methods that would provide an objective picture of the key performance parameters of agricultural implements. This article examines the results of ultra-jet simulation diagnostics, which could become an effective means of assessing the quality of materials and finished products—agricultural implements.

**EDN:** ABKBUZ, <https://elibrary/abkbuz>

**Keywords:** bimetallic agricultural machinery, self-sharpening tool of tillage tool, wear resistance, abrasive wear, agricultural implements

Современное производство рабочих органов сельскохозяйственных орудий характеризуется созданием сложных технических систем, к надежности и долговечности которых предъявляются высокие требования. Другими словами, современный рабочий орган сельскохозяйственных орудий — это полноценное сложное инженерное изделие, от качества которого зависит аграрное производство. В частности, надежность и долговечность диска бороны (ДБ) напрямую определяют экономические показатели эксплуатации сельскохозяйственного оборудования, включая затраты на ремонт и запчасти, качество обработки почвы, эффективность выполнения работ в сжатые сроки, например в пиковые периоды полевых работ.

Одним из основных факторов обеспечения и поддержания заданного уровня надежности изделия на всех этапах жизненного цикла является эффективная система контроля и диагностики [1–3]. Существуют различные методы контроля: ультразвуковые, вихретоковые, акустико-эмиссионные, радиоволновые, тепловые и др. [4]. Их непрерывное развитие и совершенствование обусловлено необходимостью повышения точности, достоверности и скорости получения диагностической информации, что влияет на безопасность эксплуатации, сокращение затрат на техническое обслуживание и ремонт, а следовательно, и на конкурентоспособность машиностроительной продукции. Тем не менее, необходимо создавать и внедрять новые методы диагностики, в том числе основанные на имитационном воздействии на объект исследования.

К таким методам можно отнести разрабатываемую на кафедре СМ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана технологию ультразвуковой диагностики (УСД), отличающуюся тем, что в диагностический инструмент, представляющий собой ультразвуковую жидкости, можно вводить различные присадки и добавки (полимерный порошок, абразив, пластификаторы, газы, жидкий азот и др.). Введение добавок и создание диагностических суспензий — это инструмент моделирования и имитации условий эксплуатации. Так, учитывая, что ДБ эксплуатируются в абразивной среде (почвы) суспензией для диагностики могут выступать жидкости с введенными в их состав абразивными материалами.

Особую сложность для диагностики представляют композиционные и разнородные материалы, среди которых выделяется класс би-

металлов. Эти материалы, состоящие из двух или более слоев разнородных металлов, сочетают в себе свойства своих компонентов, что позволяет достигать уникальных эксплуатационных характеристик: высокой прочности и износостойкости одного слоя с коррозионной стойкостью или высокой электропроводностью другого.

Широкое распространение в промышленности получили такие биметаллические системы, как сталь + цветной металл (например, сталь + алюминий для энергетики и транспорта), сталь + нержавеющая сталь (для химических производств), а также триботехнические пары сталь — баббит в подшипниковой продукции [5, 6].

Изготовление ДБ из биметалла — перспективное направление развития сельскохозяйственных орудий. По сути, это решение задачи перехода от затрат на поддержание, свойственных для обычных ДБ, к стратегии инвестиций в качество и эффективность. Хотя стоимость биметаллических дисков выше, они будут окупаться за счет улучшения указанных экономических показателей. Также имеются и технические преимущества, например эффект самозатачивания инструмента. В процессе работы более мягкий основной слой изнашивается быстрее, чем твердый рабочий. В результате на инструменте постоянно образуется и поддерживается острая микроскопическая кромка из твердого сплава.

Для экспериментального исследования и сравнительного анализа взяты образцы биметалла, где основной слой выполнен из стали 30, а рабочий слой — из высокоуглеродистой стали типа 9ХФ. Эффект самозатачивания проявляется в процессе эксплуатации, в том числе благодаря более легкому входу в почву и эффективному резанию, что уменьшает нагрузку на трактор и позволяет экономить топливо [7]. Это открывает возможность использования менее мощных и тяжелых тракторов для предотвращения образования уплотненного слоя (плужной подошвы). Кроме того, сопротивление абразивному износу у биметалла выше, чем у традиционной стали, применяемой при производстве ДБ. Это позволит значительно реже заменять ДБ в процессе эксплуатации, что резко сократит затраты на запчасти.

Применение биметаллических ДБ вместо металлических обеспечивает и агротехнические преимущества: высокое качество обработки

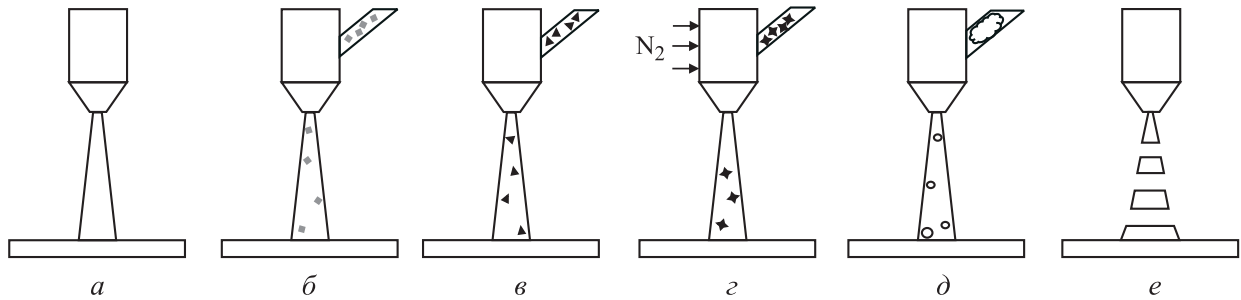


Рис. 1. Схемы УСД с использованием чистой (а), полимерной (б), абразивной (в), водолеяной (г), газонасыщенной (д) и дискретной (е) гидроструй

почв, чистое перерезание корневых систем сорняков, равномерность рыхления, стабильное залегание в почве на заданную глубину и отсутствие крупных кромкообрезных частей почвы, что сохраняет влагу. Все это является залогом равномерных всходов и развития растений. Второстепенный же эффект от внедрения биметаллических ДБ состоит в решении проблем ресурсосбережения, т. е. использования меньшего объема металла и энергии на их производство.

Цель исследования — разрешить научное противоречие, состоящее, с одной стороны, в перспективном создании биметаллических ДБ и их отсутствии в линейке отечественных производителей, а с другой — в широких диагностических возможностях УСД, которая до сих пор не была апробирована в качестве имитационного диагностического инструмента на рабочих органах сельскохозяйственных орудий.

**Ультразвуковые технологии.** На сегодняшний день в машиностроении накоплен большой опыт применения ультразвуковых технологий [8, 9]. С помощью абразивно-жидкостных струй выполняются многие операции, в частности резание и очистка поверхности [10–12]. Кроме того, имеется достаточное количество исследований по инновационному использованию гидроструй с целью диагностики материалов (рис. 1) [13–17].

Благодаря возможности формирования струй разного состава (абразивных, водолеяных, полимерных) открываются широкие перспективы для имитационной диагностики материалов. Другими словами, можно вводить в струю такие материалы, которые наиболее подходят к условиям эксплуатации деталей. В частности, для оценки износостойкости почвообрабатывающих органов целесообразно использовать в качестве добавки абразивные

частицы, так как в условиях абразивного износа эксплуатируются почвообрабатывающие диски.

Эксперименты по УСД проведены на установке для гидроабразивной резки материалов модели Flow Mach 3 №1313b (рис. 2).

**Экспериментальные исследования по абразивно-жидкостной УСД.** В качестве объектов исследования выступали четыре биметаллических образца с разной термообработкой, изготовленные по заказу кафедры СМ-12 в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси. Биметаллические образцы представляли собой пластины из двух сталей 9ХФ и 30 толщиной 1,2 и 4 мм соответственно, полученные по технологии сварки взрывом. Пятый образец выполняли из вязкой и прочной стали 65Г, используемой в производстве ДБ на сегодняшний день.

На первом этапе эксперимента проводили абразивно-жидкостную УСД каждого образца. Режимы оборудования были следующими: дав-

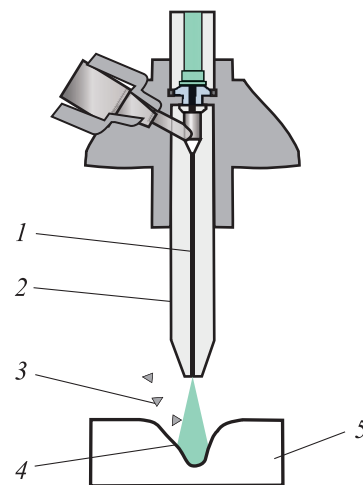


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда для УСД:

1 — ультразвугу; 2 — гидросопло; 3 — частицы материала; 4 — гидрокаверна; 5 — материал

ление в системе — 400 МПа; расстояние от среза сопла до поверхности диагностируемой детали — 10 мм; скорость подачи головки — 17 мм/с; расход рабочей жидкости (воды) — 3,6 л/мин; концентрация абразива (массовая) — 15 %. Время диагностики составляло 5 с.

На втором этапе измеряли геометрические параметры гидрокаверн с помощью лазерного конфокального микроскопа LEXT OLS5100. Результаты измерений геометрических параметров гидрокаверны — глубины  $h$ , площади

сечения  $S$ , ширины  $a$  — и 3D-модель ее поверхности приведены на рис. 3,  $a$ – $z$ .

Результаты лазерной конфокальной микроскопии гидрокаверн на поверхности биметаллических образцов после УСД показаны на рис. 4.

Для оценки достоверности результатов УСД эти же образцы прошли имитационные испытания на износ, в ходе которых в течение заданного времени в одинаковых условиях они изнашивались в абразивной среде с основными параметрами, указанными в табл. 1.

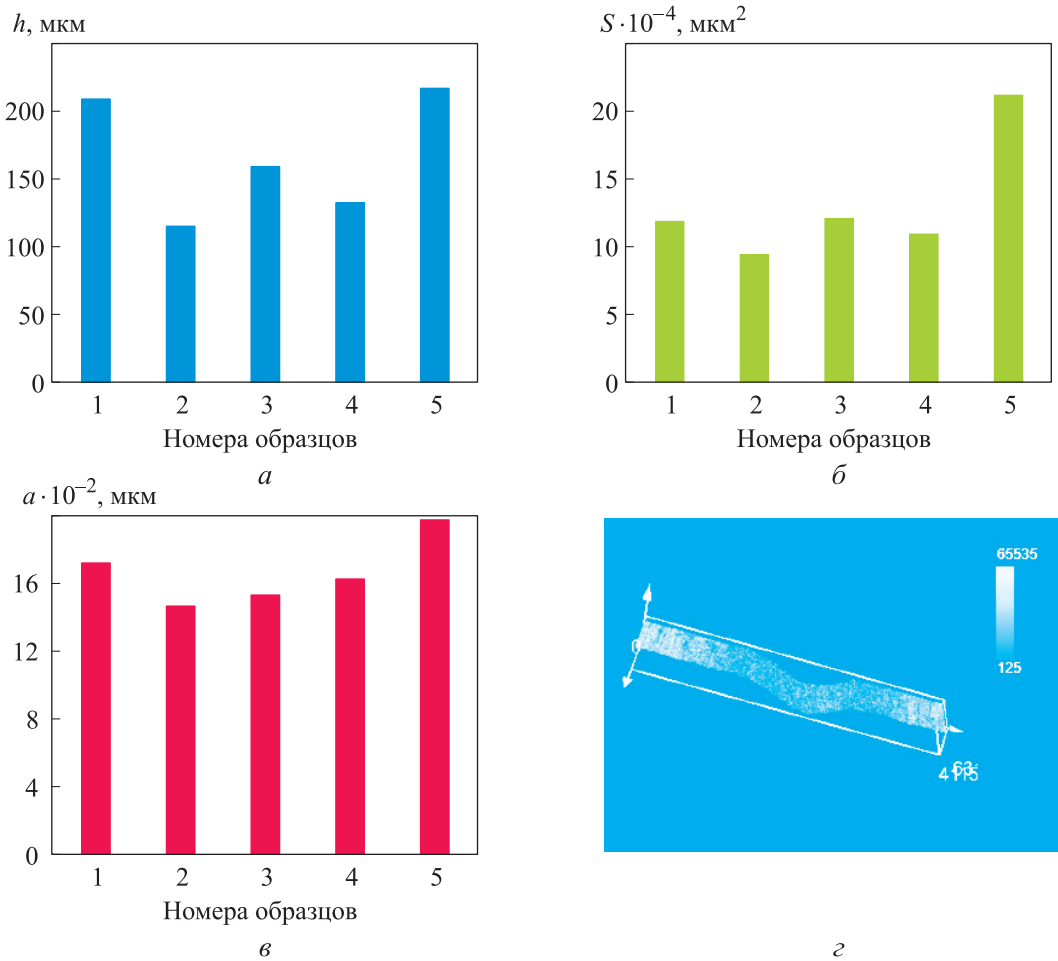


Рис. 3. Результаты измерения глубины  $h$  (а), площади сечения  $S$  (б), ширины  $a$  (в) гидрокаверны и 3D-модель ее поверхности (z)

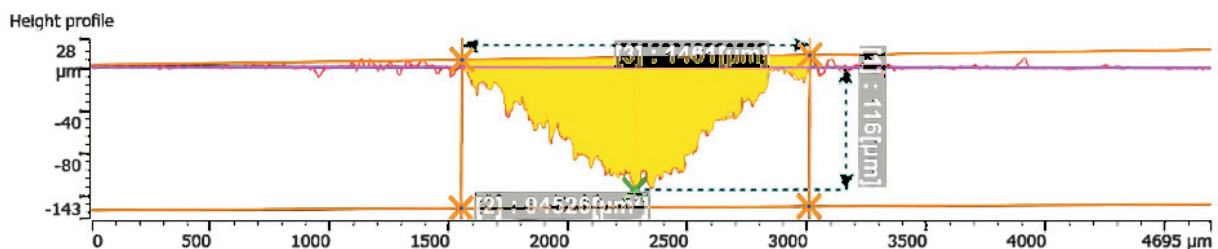


Рис. 4. Результаты лазерной конфокальной микроскопии гидрокаверн на поверхности биметаллических образцов после УСД

Таблица 1

**Основные параметры абразивной среды  
для имитационных испытаний**

Параметр	Значение
Размер частиц, мм	0,5...2,0
Коэффициент пористости	0,65
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1600
Пористость, %	40
Влажность, %	10

Для экспериментальной апробации имитационных испытаний использовали фрезерный станок модели 676, на шпинделе которого с помощью двух металлических дисков диаметром 0,15 м закрепляли образцы из биметалла с разной термообработкой (рис. 5, а). После их закрепления шпиндель опускали в контейнер с абразивной средой (песком) и запускали процесс вращения шпинделя в заранее установлен-

ном режиме времени и частоты вращения (рис. 5, б).

После имитационных испытаний фиксировали унос массы материала для каждого из образцов посредством аналитических весов Cubis с точностью измерения до 0,0001 г. Результаты расчета уноса массы образцов по данным имитационных испытаний на износ и УСД приведены в табл. 2.

**Обсуждение результатов.** Анализ экспериментальных данных показал, что метод УСД можно применять для оценки износостойкости материалов ДБ, в том числе биметаллических, изготовление которых предполагает различные технологические процессы. Важно подчеркнуть, что чувствительность метода достаточно высока и по результатам анализа информативных параметров представляется возможным сделать вывод о необходимой технологической траектории производства по критерию износостой-

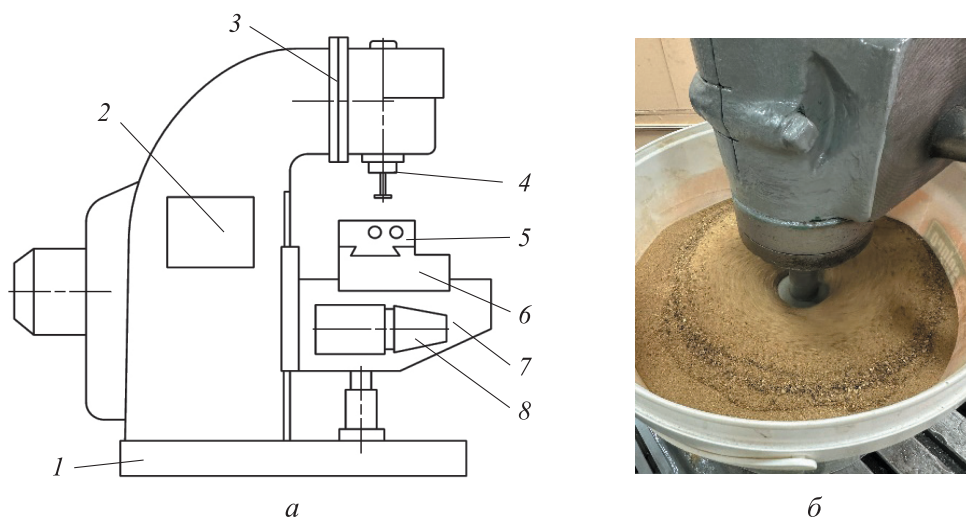


Рис. 5. Схема (а) и внешний вид (б) фрезерного станка для имитационных испытаний: 1 — станина; 2 — коробка скоростей; 3 — поворотная головка; 4 — шпиндель; 5 — рабочий стол; 6 — салазки; 7 — консоль; 8 — коробка подачи

Таблица 2

**Результаты расчета уноса массы образцов по данным имитационных испытаний на износ и УСД**

Номер образца	Режим термообработки образца	Отношение массы уноса после имитационных испытаний к изначальной массе образца	Глубина каверны после УСД, мкм
1	Образец 65Г	0,014	210,006
2	Закалка в воду	0,004	116,000
3	Закалка в воду, отпуск	0,009	160,506
4	Закалка в масло	0,008	133,852
5	Закалка в масло, отпуск	0,013	218,588

кости материала ДБ, и, как следствие, его эксплуатационных возможностях.

Достоверность метода доказана высокими значениями корреляции между информативными параметрами УСД (геометрическими параметрами гидрокаверн) и данными имитационных испытаний, выполненных на специально разработанном стенде (см. рис. 5). Среднее значение коэффициента корреляции для всех экспериментов составило 0,9642.

Как следует из табл. 2, данные лазерной конфокальной микроскопии (см. рис. 3) гидрокаверн, полученных методом УСД, визуальны и количественно подтверждают ранжирование их глубин. Наибольшие глубина и объем гидрокаверны наблюдаются у первого и пятого образцов, что соответствует результатам его износа в ходе стендовых имитационных испытаний. Наименее выраженные параметры гидрокаверны в результате диагностического воздействия отмечены для второго образца, что коррелирует с его минимальной потерей массы.

В целом можно утверждать, что кратковременное имитационное воздействие абразивно-жидкостной ультраструей на образец является адекватным ответом для альтернативного длительного по времени и трудозатратам абразивного изнашивания материала в почвенной среде. Следовательно, геометрические параметры гидрокаверны (глубина, площадь и объем) могут служить достаточно надежным диагностическим признаком для прогнозирования износостойкости материала и выбора технологических режимов их получения.

## Выводы

1. Экспериментальное исследование с применением УСД показало, что вариативность свойств биметалла, заданная разной термооб-

работкой, успешно фиксируется предлагаемым методом.

2. Значительный разброс в значениях износа (от 0,004 до 0,014) между образцами, имеющими принципиально одинаковую слоистую структуру (сталь 9ХФ + сталь 30), доказывает, что технологические параметры (термообработка) критически важны для реализации преимуществ биметалла перед металлом в ходе создания ДБ.

3. Способность метода УСД дифференцировать эти различия подтверждает его высокую чувствительность. Это открывает возможность применения этого метода не только для контроля готовой продукции, но и для оптимизации технологических режимов производства биметаллических заготовок, позволяя быстро подбирать рациональные значения технологических параметров.

4. Изготовленный по выбранной с помощью УСД рациональной технологии биметаллический материал превосходит по износостойкости традиционную сталь, что является прямым технико-экономическим обоснованием для его применения в производстве ДБ, так как заметно увеличенный ресурс ДБ компенсирует его более высокую первоначальную стоимость.

5. Метод УСД, учитывая локальность воздействия на материал и малую глубину гидрокаверны (по сравнению с общей толщиной ДБ) позволяет осуществлять выходной контроль готовых изделий без их вывода из оборота.

6. Использование лазерной конфокальной микроскопии показало, что анализ геометрических параметров гидрокаверн предоставляет точные количественные данные (3D-профили, глубину, шероховатость), которые можно задокументировать и подвергнуть статистическому анализу в процессе отработки технологического процесса.

## Литература

- [1] Барзов А.А., Беккиев А.Ю., Бочкарев С.В. и др. *Диагностика и прогнозирование качества инноваций*. Старый Оскол, ТНТ, 2019. 328 с.
- [2] Лавриненко В.Ю., ред. *Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении*. Сб. тр. Межд. науч.-тех. конф. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 372 с.
- [3] Комков М.А., Галиновский А.Л., ред. *Технология производства и диагностика качества композитных конструкций ракетно-космической техники*. Старый Оскол, ТНТ, 2021. 420 с.
- [4] ГОСТ Р 56542–2019. *Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов*. Москва, Стандартинформ, 2019. 9 с.

- [5] Первухин Л.Б., Первухина О.Л. Развитие технологии производства биметаллов с использованием энергии взрыва — ключ к решению в кратчайшие сроки проблемы их импортозамещения для стратегических отраслей машиностроения. *Тяжелое машиностроение*, 2024, № 1–2, с. 25–31. EDN: OVBIXA
- [6] Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н. и др. *Структура и свойства коррозионно-стойких и износостойких биметаллических композиционных материалов*. Тула, ТулГУ, 2021. 120 с.
- [7] Коновалов В.И. Сравнительная агротехническая оценка дисковых орудий. *Современные векторы развития науки. Сб. ст. по мат. ежегодной науч.-практ. конф.* Краснодар, КубГАУ, 2024, с. 312–314. EDN: ESHMEX
- [8] Барзов А.А., Сысоев Н.Н. Функционально-физическая классификация ультраструйных гидротехнологий. *Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Сб. тр. II Межд. молодеж. конф.* Москва, Диона, 2018, с. 106–111. EDN: VVBKGA
- [9] Барзов А.А., Галиновский А.Л. Полифункциональные возможности ультраструйной технологии обработки материалов и жидкостей. *Вестник УГАТУ*, 2009, № 4, с. 116–120.
- [10] Барзов А.А., Колпаков В.И., Илюхина А.А. и др. Анализ возможностей глубоководного применения ультраструйных гидрофизических технологий. *Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Сб. тр. II Межд. молодеж. конф.* Москва, Диона, 2018, с. 100–105. EDN: YVBRKH
- [11] Кубагушев Б.Н., Абашин М.И. Анализ возможностей применения ультраструйного гидродиагностирования для обеспечения промышленной безопасности. *Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Сб. тр. II Межд. молодеж. конф.* Москва, Диона, 2018, с. 250–255. EDN VVBKXN
- [12] Барзов А.А., Вельтищев В.В., Галиновский А.Л. и др. Кинетический анализ механизма автоколебаний массовой концентрации дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструю. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 1, с. 55–62, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-55-62>
- [13] Барзов А.А., Григорьев А.С., Сеина Я.Д. и др. Модель прогнозирования ресурсных параметров изделий путем мезодиагностирования их функциональной поврежденности при эксплуатации. *Надежность и качество сложных систем*, 2025, № 1, с. 109–116, doi: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2025-1-14>
- [14] Барзов А.А., Пузаков В.С., Кузнецов А.В. Вероятностная модель процесса эрозии материалов при энергоэкстремальном гидроструйном воздействии. *Наука и техника Казахстана*, 2022, № 3, с. 9–21, doi: <https://doi.org/10.48081/ZFSP1647>
- [15] Абашин М.И. *Ускоренное определение параметров качества поверхностного слоя материала изделий по результатам воздействия на него сверхзвуковой струи жидкости*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 153 с.
- [16] Сюеянь Л., Семашко В.С., Галиновский А.Л. и др. Анализ перспектив применения метода ультраструйной диагностики для оценки износостойкости биметаллического инструмента. *Технология металлов*, 2019, № 5, с. 41–47.
- [17] Кудрявцев В.В., Бочкарев С.В. Анализ перспективных методов контроля качества изделий из композиционных материалов. *Современные проблемы теории машин*, 2022, № 13, с. 88–93, doi: <https://doi.org/10.26160/2307-342X-2022-13-88-93>

## References

- [1] Barzov A.A., Bekkiev A.Yu., Bochkarev S.V. et al. *Diagnostika i prognozirovaniye kachestva innovatsiy* [Diagnostics and forecasting of innovation quality]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2019. 328 p. (In Russ.).
- [2] Lavrinenko V.Yu., ed. *Innovatsionnyye tekhnologii, oborudovaniye i materialnyye zagotovki v mashinostroenii. Sb. tr. Mezhd. nauch.-tekh. konf.* [Innovative Technologies, Equipment and Materials for Blanking Productions in Mechanical Engineering. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.] Moscow, Bauman MSTU Publ., 2022. 372 p. (In Russ.).

- [3] Komkov M.A., Galinovskiy A.L., eds. *Tekhnologiya proizvodstva i diagnostika kachestva kompozitnykh konstruksiy raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Production technology and quality diagnostics of composite structures for rocket and space technology]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2021. 420 p. (In Russ.).
- [4] GOST R 56542–2019. *Kontrol nerazrushayushchiy. Klassifikatsiya vidov i metodov* [Non-destructive testing. Classification of types and method]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 9 p. (In Russ.).
- [5] Pervukhin L.B., Pervukhina O.L. Developing bimetal production technology using explosive energy is key to quickly solving the problem of import substitution for strategic engineering sectors. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2024, no. 1–2, pp. 25–31. EDN: OVBIXA (in Russ.).
- [6] Sergeev N.N., Sergeev A.N., Kutepov S.N. et al. *Struktura i svoystva korrozionnostoykikh i iznosostoykikh bimetallicheskikh kompozitsionnykh materialov* [Structure and properties of corrosion-resistant and wear-resistant bimetallic composite materials]. Tula, TulGU Publ., 2021. 120 p. (In Russ.).
- [7] Konovalov V.I. [Comparative agrotechnical assessment of disc tools]. *Sovremennye vektory razvitiya nauki. Sb. st. po mat. ezhegodnoy nauch.-prakt. konf.* [Modern Vectors of Science Development. Proc. Annual Sci.-Pract. Conf.] Krasnodar, KubGAU, 2024, pp. 312–314. EDN: ESHMEX (in Russ.).
- [8] Barzov A.A., Sysoev N.N. [Functional-physical classification of ultrasonic hydrotechnologies]. *Novye podkhody i tekhnologii proektirovaniya, proizvodstva, ispytaniy i promyshlennogo dizayna izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. II Mezhd. molodezh. konf.* [New Approaches and Technologies for the Design, Production, Testing and Industrial Design of Rocket and Space Technology Products. Proc. II Int. Youth Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2018, pp. 106–111. EDN: VVBKGA (in Russ.).
- [9] Barzov A.A., Galinovskiy A.L. Polyfunctional capabilities of ultra-jet technology of processing materials and liquids. *Vestnik UGATU*, 2009, no. 4, pp. 116–120. (In Russ.).
- [10] Barzov A.A., Kolpakov V.I., Ilyukhina A.A. et al. [Analysis of the possibilities of deep-sea application of ultrasonic hydrophysical technologies]. *Novye podkhody i tekhnologii proektirovaniya, proizvodstva, ispytaniy i promyshlennogo dizayna izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. II Mezhd. molodezh. konf.* [New Approaches and Technologies for the Design, Production, Testing and Industrial Design of Rocket and Space Technology Products. Proc. II Int. Youth Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2018, pp. 100–105. EDN: YYBPKH (in Russ.).
- [11] Kubagushev B.N., Abashin M.I. [Analysis of the possibilities of using ultra-jet hydrodiagnostics to ensure industrial safety]. *Novye podkhody i tekhnologii proektirovaniya, proizvodstva, ispytaniy i promyshlennogo dizayna izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. II Mezhd. molodezh. konf.* [New Approaches and Technologies for the Design, Production, Testing and Industrial Design of Rocket and Space Technology Products. Proc. II Int. Youth Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2018, pp. 250–255. EDN VVBKXN (in Russ.).
- [12] Barzov A.A., Veltishchev V.V., Galinovskiy A.L. et al. Kinetic analysis of the mechanism of self-induced vibrations of the mass concentration of dispersed-and-solidphase particles into a hydro-ultrajet. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2018, no. 1, pp. 55–62, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-55-62> (in Russ.).
- [13] Barzov A.A., Grigoryev A.S., Seina Ya.D. et al. A model for predicting the resource parameters of products by meso-diagnosing their functional damage during operation. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and Quality of Complex Systems], 2025, no. 1, pp. 109–116, doi: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2025-1-14> (in Russ.).
- [14] Barzov A.A., Puzakov V.S., Kuznetsov A.V. Probabilistic model for extreme-energy hydrojet impact process of material erosion. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan], 2022, no. 3, pp. 9–21, doi: <https://doi.org/10.48081/ZFSP1647> (in Russ.).
- [15] Abashin M.I. *Uskorennoe opredelenie parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya materiala izdeliy po rezultatam vozdeystviya na nego sverkhzvukovoy strui zhidkosti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Accelerated determination of the quality parameters of the surface layer of a product material based on the impact of a supersonic liquid jet on it. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 153 p. (In Russ.).

- [16] Syueyan L., Semashko V.S., Galinovskiy A.L. et al. Analysis of the prospects of ultrajet diagnostics for estimating the wear resistance of bimetallic tool. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 5, pp. 41–47. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Metall.*, 2019, vol. 2019, no. 13, pp. 1389–1394, doi: <https://doi.org/10.1134/S0036029519130366>)
- [17] Kudryavtsev V.V., Bochkarev S.V. Analysis of promising methods of quality control of products made of composite materials. *Sovremennye problemy teorii mashin* [Modern Problems of the Theory of Machines], 2022, no. 13, pp. 88–93, doi: <https://doi.org/10.26160/2307-342X-2022-13-88-93> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 11.11.2025

## Информация об авторах

**ЯНКО Мария Алексеевна** — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [yanko@bmstu.ru](mailto:yanko@bmstu.ru)).

**ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович** — доктор технических 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: [galcomputer@mail.ru](mailto:galcomputer@mail.ru)).

**БОЛДЫРЕВ Вениамин Станиславович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия», НУК ФН; ведущий научный сотрудник лаборатории порошковых материалов и наноматериалов, центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [boldyrev.v.s@bmstu.ru](mailto:boldyrev.v.s@bmstu.ru)).

**АБАШИН Михаил Иванович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: [abashin@bmstu.ru](mailto:abashin@bmstu.ru)).

## Information about the authors

**YANKO Mariya Alekseevna** — Assistant, Department of Rocket and Space Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [yanko@bmstu.ru](mailto:yanko@bmstu.ru)).

**GALINOVSKY Andrei Leonidovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Department of Rocket and Space Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [galcomputer@mail.ru](mailto:galcomputer@mail.ru)).

**BOLDYREV Veniamin Stanislavovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry, NUK FN; Leading Researcher of the Laboratory of Powder Materials and Nanomaterials, NTI Center Digital Materials Science: New Materials and Substances. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [boldyrev.v.s@bmstu.ru](mailto:boldyrev.v.s@bmstu.ru)).

**ABASHIN Mikhail Ivanovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [abashin@bmstu.ru](mailto:abashin@bmstu.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Янко М.А., Галиновский А.Л., Болдырев В.С., Абашин М.И. Ультразвуковая абразивно-жидкостная диагностика биметаллических рабочих органов сельскохозяйственных орудий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 3, с. 70–78.

### Please cite this article in English as:

Yanko M.A., Galinovskiy A.L., Boldyrev V.S., Abashin M.I. Ultrajet abrasive diagnostics of bimetallic agricultural machinery. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 3, pp. 70–78.