

Экспертно-критериальная оценка потенциала результативности различных технологий мезодиагностики качества материалов и изделий из них

© А.А. Барзов¹, В.М. Корнеева², В.С. Пузаков³, И.С. Корнеев²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, 119991, Российская Федерация

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, Российская Федерация

³Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, 111250, Российская Федерация

На примере анализа прогрессивных способов экспресс-диагностики функционального качества поверхностного слоя различных материалов и изделий из них путем применения инструментария мезодиагностики поврежденности структуры объектов исследования предложен экспертно-аналитический подход к прогнозированию потенциала результативности данных информационно-физических технологий. Сформулированы оценочные параметры потенциала результативности различных методов мезодиагностирования. Приведено их рейтинговое ранжирование аппаратом экспертного анализа. Показано, в частности, что усталостно-магнитная технология мезодиагностирования обладает наиболее значимым научно-прикладным потенциалом в решении информационно-физических задач инженерии поверхностных структур для изделий, изготовленных из ферромагнитных материалов. Предложены конкретные конструктивно-технологические схемы, иллюстрирующие возможности данного вида операционной мезодиагностики.

Ключевые слова: мезодиагностирование, экспертно-критериальный анализ, напряженно-деформированное состояние, магнито-усталостная эрозия

Введение. Производству авиационной и ракетно-космической техники с высокими требованиями по надежности требуется опережающее развитие методов и средств контроля и диагностики состояния данных объектов при их изготовлении и последующей эксплуатации. Поэтому реализация информационно-диагностического потенциала результативности инновационных технологий мезодиагностирования качества командных деталей изделий ответственного назначения на ключевых этапах их жизненного цикла — значимая проблема проектирования, изготовления и эксплуатации летательных аппаратов всех типов.

Аппарат мезодиагностики (от греч. *mesos* — средний, промежуточный) физико-механических свойств различных материалов и изделий из них занимает промежуточное место между инструментарием неразрушающих методов контроля дефектности данных объектов анализа (ОА) и технологиями, связанными с их разрушением в процессе испытаний. Обычно при проведении процедуры мезодиагностирования

происходит целенаправленное функционально допустимое изменение параметров состояния локальной зоны в структуре ОА, как правило, на его поверхности, и по результатам изучения этих изменений определяется степень поврежденности (дефектности) материала в рассматриваемой области. Характерными примерами технологий мезодиагностирования (ТМД) могут служить способы измерения твердости поверхностного слоя материала ОА путем анализа результатов вдавливания соответствующего индентора, фрикционные испытания на износостойкость поверхностей трения и тому подобные информационно-физические технологии.

Основная позитивная черта ТМД состоит в рациональном сочетании требуемой информативности разрушающих материал испытаний с возможностью обеспечения последующего функционирования ОА как единого целого [1–3].

Цель данной работы — формирование экспертно-аналитического подхода к прогнозированию потенциала результативности новых ТМД, который должен повысить объективность оценивания ожидаемого качества инновационных диагностических средств обеспечения надежности изделий авиационной и ракетно-космической техники на ключевых этапах их жизненного цикла.

Учитывая, что развитие инструментария операционных ТМД следует рассматривать как важный резерв в обеспечении качества изделий ответственного назначения, разработка такого подхода к экспресс-оценке потенциала возможностей инновационных методов получения требуемой инженерно-технической информации, основанного на допустимом изменении параметров состояния материала ОА, — актуальная задача современного промышленного производства.

Обобщенно-рейтинговая формализация параметров оценивания информационно-физического качества различных технологий мезодиагностирования. Трудноформализуемый характер задачи по прогнозированию потенциала результативности прогрессивных методов и средств ТМД предопределяет возможность ее квалитетически приемлемого решения в рамках экспертно-критериального анализа [4–6]. В связи с этим допустим, что уровень или потенциал ожидаемой результативности какой-либо ТМД в рейтингово-обобщенном виде можно представить так:

$$R = f(r_1, r_2, \dots, r_n), \quad (1)$$

где R — рейтинг рассматриваемой ТМД, определяющий потенциал ее информационных возможностей в конкретных условиях применения для соответствующего класса ОА; r_i — i -й оценочный критерий или характеристический параметр, от величины которого функционально зависит значение R ; $i = 1, 2, \dots, n$ — общее число анализируемых параметров.

Как правило, для трудноформализуемых оценочных суждений, к которым относится рассматриваемая задача построения единого подхода к прогнозированию потенциала возможностей какой-либо инновационной ТМД, реальным способом поиска практически значимого решения является использование аппарата экспертно-критериального анализа (ЭКА). Данный аппарат основан на квазиобъективизации совокупности субъективных суждений профильных специалистов-экспертов о рассматриваемом ОА каким-либо формализованным способом. Поэтому, считая, что оценочные суждения достаточно квалифицированных экспертов близки к некоторым гипотетически истинным или номинальным значениям параметров r_{hi} в (1), данное соотношение можно представить в виде

$$R_H + \Delta R = f(r_{h1} + \Delta r_1, r_{h2} + \Delta r_2, \dots, \Delta r_{hn} + \Delta r_n), \quad (2)$$

где R_H — истинное или номинальное, причем априори неизвестное, т. е. фактически гипотетическое, значение рейтинга потенциала возможностей рассматриваемой ТМД; ΔR — отклонение (погрешность) реально вычисленного тем или иным способом рейтинга данной ТМД; r_{hi} — гипотетически точные или номинальные значения параметров r в (1), функционально влияющие на истинный рейтинг потенциала возможностей конкретной ТМД; Δr_i — априори неизвестные отклонения (погрешности) данных параметров от своих номинальных значений; $i = 1, 2, \dots, n$, так же как и ранее общее число параметров, характеризующих R .

Заметим, что фактически $(r_{hi} + \Delta r_i)$ в (2) означает количественно выраженное, например, в баллах от 1 до 10, оценочное суждение эксперта о величине i -го критерия, характеризующего ОА в целом, в данном случае — рассматриваемую ТМД. Достаточно обоснованно положим, что для квалифицированных оценочных суждений экспертов справедливы неравенства вида

$$\Delta r_i < r_{hi}. \quad (3)$$

Тогда, разлагая исходное соотношение (2) в ряд Тейлора с учетом справедливости (3), т. е. относительной малости Δr_i , после очевидной линеаризации получим выражение вида

$$R = R_H + \Delta R = f(r_{hi}) + \sum_{i=1}^n k_i \Delta r_i, \quad (4)$$

где, как известно, k_i определяется так:

$$k_i = \partial f(r_{hi}) / \partial r_i, \quad (5)$$

причем фактически k_i — это коэффициенты влияния малых отклонений Δr_i на общее значение ΔR .

Далее, формально полагая, что

$$\Delta r_i = r_i - r_{ni}, \quad (6)$$

и считая в первом приближении функциональную структуру (1) линейной комбинацией r_i из (4) с учетом (6), окончательно получим

$$R = \sum_{i=1}^n k_i r_i, \quad (7)$$

где R — рейтинг рассматриваемого варианта ТМД, фактически определяющий потенциал ее возможной или точнее ожидаемой результативности, полученный путем ЭКА мнений специалистов-экспертов в данном вопросе; k_i — коэффициент влияния r_i оценочного критерия в формировании итогового (суммарного) уровня рейтинга анализируемой ТМД с позиций рассмотрения потенциала ее информационно-физических возможностей; r_i — оценочно-количественно, например, выраженное в баллах, суждение конкретного эксперта о величине i -го параметра (критерия), характеризующего рейтинг данного вида ТМД.

Заметим, что структура полученного соотношения (7), которое в данном случае используется для формализации результатов ЭКА, хорошо известно в квалиметрии как способ обработки мнений экспертов методом взвешенной суммы [4–6].

Критерии оценивания рейтинга потенциала возможностей инновационных технологий мезодиагностирования. В результате обсуждения поставленной перед экспертами задачи на первом этапе анализа они отметили, что структура соотношения (7), исходя из сущности рассматриваемой проблемы ЭКА в области ТМД и других разнопрофильных инноваций, должна иметь следующую математическую формализацию итогового потенциала результативности или функционального рейтинга R для рассматриваемого ОА:

$$R = K_{\text{И}}^{-1} (\text{Э}/\text{С}), \quad (8)$$

где $K_{\text{И}}$ — коэффициент, определяемый степень изученности рассматриваемой инновации, в данном случае какой-либо операционной ТМД; Э — предполагаемая функциональная, например, эксплуатационная эффективность анализируемой ТМД, фактически определяемая линейной моделью ЭКА вида (7); С — ожидаемые затраты в стоимостном выражении, необходимые для реализации потенциала

возможностей анализируемого предположения инновационного характера, которые в принципе могут быть детализированы по модели, аналогичной соотношению (7).

На втором этапе реализации ЭКА эксперты пришли к выводу, что для достаточно аргументированного представления Э количество оценочных критериев не должно быть более 5, т. е. в (1) и далее должно быть $n = 5$. Причем, исходя из информационно-физической сущности рассматриваемой задачи по прогнозированию качества перспективных видов ТМД, эксперты предложили шесть оценочных критериев, значимость которых, также определенная ими по результатам ЭКА, представлена в табл. 1.

1. Информационная содержательность (ИС) — критерий, характеризующий степень достаточности уровня получаемой информации при использовании анализируемого вида ТМД в научно-прикладном аспекте, связанном с решением конкретной задачи.

2. Технологичность реализации (ТР) — параметр, комплексно отражающий имеющуюся возможность технической реализации инновационного предложения, прогрессивной разработки или нового конструкторско-технологического решения при современном уровне развития технологий при допустимой степени затратности освоения штатного производства ОА.

3. Масштаб применения (МП) — параметр, характеризующий отрасли рационального использования перспективного вида ТМД. Косвенно критерий МП отражает универсальность применения данного метода ТМД в сфере реального производства.

4. Жизненный цикл (ЖЦ) — предполагаемое время, затрачиваемое не только на реализацию разработки, но и, что самое важное, на продолжительность ее результативного применения в сфере реальной экономики.

5. Эффективная сочетаемость (ЭС) — параметр, характеризующий возможность встраивания анализируемой разработки в существующую систему контроля и диагностики функционального качества различных ОА для повышения эффективности применения данной базовой системы.

6. Стоимостные затраты (СЗ) — характеристика всех основных видов затрат в стоимостном выражении на весь цикл освоения инновационной разработки, включая подготовку кадрового обеспечения и расходов на патентование новых конструкторско-технологических решений.

**Значимость оценочных критериев, характеризующих потенциал
ожидаемой результативности прогрессивных видов ТМД**

№	Наименование оценочного критерия	Принятые сокращения	Значимость, в баллах 1–10
1	Информационная содержательность	ИС	9,3/0,4
2	Технологичность реализации	ТР	9,0/0,5
3	Масштаб применения	МП	8,8/0,6
4	Жизненный цикл	ЖЦ	8,7/0,6
5	Эффективная сочетаемость	ЭС	8,4/0,8
6	Стоимостные затраты	СЗ	7,9/1,1
<p><i>Примечание.</i> В числителе графы 4 показана осредненная величина экспертных оценок, в знаменателе — модуль разброса мнений экспертов (\pm) относительно среднего значения.</p>			

По результатам ЭКА значимости оценочных критериев, представленных в табл. 1, можно сделать предварительные выводы:

– согласно данным табл. 1, значимость оценочных критериев достаточно высокая, причем просматривается тенденция увеличения разброса мнений экспертов по мере снижения средней оценки значимости критерия, что в дальнейшем заслуживает отдельного понимания и изучения психологических аспектов процедуры ЭКА в целом;

– эксперты отметили специфику использования критерия ЭС в ЭКА потенциала результативности ТМД, так как именно за счет рационального встраивания конкретной разновидности анализируемого способа мезодиагностирования в действующую систему обеспечения качества возможно существенное повышение вероятности ее функционирования на практике.

Таким образом, на втором этапе разрабатываемого подхода к оценке потенциала возможностей прогрессивных ТМД были не только сформулированы необходимые оценочные критерии, но и определена их значимость в количественном выражении.

Третий, функционально ключевой, этап реализации разработки предлагаемого подхода состоял в наработке массива сравниваемых вариантов ТМД, который включал в себя как достаточно известные, по сути, традиционные методы, так и пока проблемные методы получения требуемой информации об ОА, в частности о параметрах состояния материала поверхностного слоя и изделий из них.

В число сравниваемых способов реализации информационно-физических принципов ТМД были включены следующие виды контрольно-исследовательских испытаний и оценивания параметров функционального качества материала поверхностного слоя различных ОА:

1) процедура склерометрирования (СМП), микроцарапания (скрайбирования) материала поверхностного слоя соответствующим индентором. В результате СМП формируется поверхностная микробороздка и образуются мелкодисперсные частицы разрушения материала поверхностного слоя, имеющие место, как правило, для достаточно хрупких материалов. Эти итоговые физико-технологические характеристики процедуры СМП и являются основными информационно-диагностическими параметрами или признаками данной разновидности ТМД;

2) стандартные испытания материала поверхностного слоя на износостойкость — фрикционно-усталостные испытания (ФУИ), как правило, входят в протокол изучения эксплуатационно-технологических параметров материала поверхностного слоя, в том числе функционального качества различных покрытий. Информационно-диагностические параметры операции ФУИ во многом аналогичны результатам СМП, причем основными параметрами являются объем «истертого» твердотельным индентором материала поверхностного слоя, а также форма образующейся при этом лунки и ее шероховатость;

3) эрозионно-усталостное изнашивание (ЭУИ) материала поверхностных структур, в первую очередь осуществляемое, как правило, весьма энергоемкой аэро- или гидроструей, содержащий мелкодисперсные твердые частицы, в том числе имеющие абразивные свойства. Процедура ЭУИ значимо дополняет арсенал ТМД параметров качества материала поверхностного слоя, а ее информационно-диагностические параметры во многом подобны информационным параметрам СМП и ФУИ;

4) струйно-эрозионное диспергирование (СЭД), основанное на ударно-динамическом воздействии энергоэкстремальной гидроструи на материал поверхностного слоя. Этот процесс сопровождается диспергированием (эрозией) материала поверхностного слоя, а его информационно-диагностические параметры включают в себя размеры, форму и шероховатость поверхности малоразмерной каверны, образующейся в месте воздействия гидроструи, а также массо-геометрические характеристики эродированных частиц материала поверхностного слоя. Заметим, что в научно-прикладном отношении операция по информационно-диагностическому обеспечению качества поверхностных структур методом СЭД является наименее изученной, что объясняется в том числе и необходимостью создания компактной гидроструи, имеющей плотность потока мощности $\sim 1 \text{ МВт/мм}^2$, которая реализуется при рабочем гидродавлении в технологическом оборудовании $\sim 300 \dots 400 \text{ МПа}$. Причем в настоящее время данное оборудование достаточно широко используется для реализации известной обрабатывающей производственной технологии по гидро- или гидроабразивному резанию самых различных материалов;

5) усталостно-магнитное диспергирование (УМД) — пока проблемный способ бесконтактного локального микроразрушения материала поверхностного слоя, обладающего ферромагнитными свойствами, путем воздействия на него высокоэнергетического изменяющегося во времени магнитного поля. Информационно-диагностические параметры данной инновационно-диагностической операции практически аналогичны этим параметрам для СЭД, но технически операция по УМД реализуется значительно проще и технологичнее.

По стандартной процедуре экспертного оценивания с использованием соотношения (8) и нормирования расчетных значений рейтинга технологий мезодиагностирования были получены следующие предварительные (табл. 2) и итоговые результаты, представленные в табл. 3. При этом именно по величине параметра $K_{И}$ (см. табл. 2) наблюдается максимальный разброс мнений экспертов. Величина $K_{И}$ не только обобщенно характеризует ожидаемую научно-прикладную новизну анализируемой разработки, предложения, конструкторско-технологического решения и т. д., но и косвенно учитывает их патентоёмкость, т. е. отражает возможность использования конкретной инновации в качестве соответствующего нематериального актива ее авторов и/или организации, в которой они работают.

Таблица 2

Результаты ЭКА количественного оценивания потенциала возможностей сравниваемых операций ТМД

№	Наименование операции ТМД	Принятые сокращения	Значения параметров		
			Э	С	$K_{И}$
1	Склерометрирование поверхности	СМП	0,70	0,56	0,74
2	Фрикционно-усталостные испытания	ФУИ	0,78	0,62	0,91
3	Эрозионно-усталостное изнашивание	ЭУИ	0,73	0,75	0,82
4	Струйно-эрозионное диспергирование	СЭД	0,91	0,96	0,46
5	Усталостно-магнитное диспергирование	УМД	0,89	0,52	0,34

Примечание. УМД оценивалось для изделий из ферромагнетиков.

Таблица 3

Итоговый рейтинг потенциала возможностей сравниваемых операций ТМД, определенный путем ЭКА по соотношению (8)

Сравниваемая операция ТМД	СМП	ФУИ	ЭУИ	СЭД	УМД
Расчетное значение рейтинга	1,70	1,15	1,18	2,06	5,03

Примечание. Рейтинг УМД справедлив только для ферромагнитных материалов.

Необходимо отметить, что высокие значения R для СЭД и УМД объясняются в первую очередь отсутствием полномасштабного теоретического и экспериментального анализа процесса диспергирования

материала поверхностного слоя высоконапорной гидроструей или энергоемким вариативным магнитным полем, в том числе в условиях действия внешних механических напряжений в зоне диагностирования и формирования соответствующего этим процессам комплекса информационно-диагностических параметров.

Кроме того, согласно полученным значениям R , операции СЭД и УМД обладают наиболее высоким рейтингом потенциальных возможностей не только как самостоятельные информационно-диагностические средства анализа параметров функционального качества материала поверхностного слоя, но и как эффективное дополнение к существующей системе определения его эксплуатационно-технологических характеристик.

Перспективы развития результатов исследования. Вышеизложенный формализованный подход к оценке инноваций путем ЭКА, в данном случае прогрессивных ТМД, позволяет наметить перспективы развития полученных результатов. В частности, необходимо подчеркнуть, что при детальном анализе промежуточных результатов ЭКА обращает на себя внимание следующий факт. У всех экспертов отмечалась максимальная оценка критерия ЭС (см. табл. 1), характеризующего сочетаемость УМД с другими методами контроля и диагностирования, в том числе и рассматриваемыми способами осуществления анализируемых вариантов реализации операционных ТМД. Причем именно высокая сочетаемость как важный параметр функционального качества УМД позволяет синтезировать новые комбинированные потенциально высокорезультативные операции ТМД.

Заметим, что наложение на зону диагностирования знакопеременного, достаточно энергоемкого магнитного поля как физической основы УМД не только снижает затратность базового метода диагностирования материала поверхностного слоя у изделий из ферромагнетиков, в первую очередь за счет сокращения времени испытаний, но и позволяет получить более значимую информацию о структурной поврежденности ОА. Это положение связано с реализацией при УМД пока недостаточно изученного механизма магнито-усталостной эрозии материала поверхностного слоя различных ферромагнетиков, физически определяющего изменения и уровень их исходной и текущей дефектности. Поэтому развитие теоретических основ и экспериментального обоснования потенциала прикладной результативности физического механизма энергоэкстремальной магнито-усталостной эрозии и отработки на этой базе технологии УМД, в том числе в комбинации с другими информационно-диагностическими технологиями, является важной задачей становления методологии ТМД в целом.

В качестве иллюстрации вышеизложенного на рисунке показана сочетаемость традиционного варианта конструкторско-технологического решения процедуры УМД с базовой технологией ФУИ, причем

переменное магнитное поле может налагаться на зону фрикционного контакта как одновременно с процессом истирания материала поверхностного слоя, так и следом за ним.

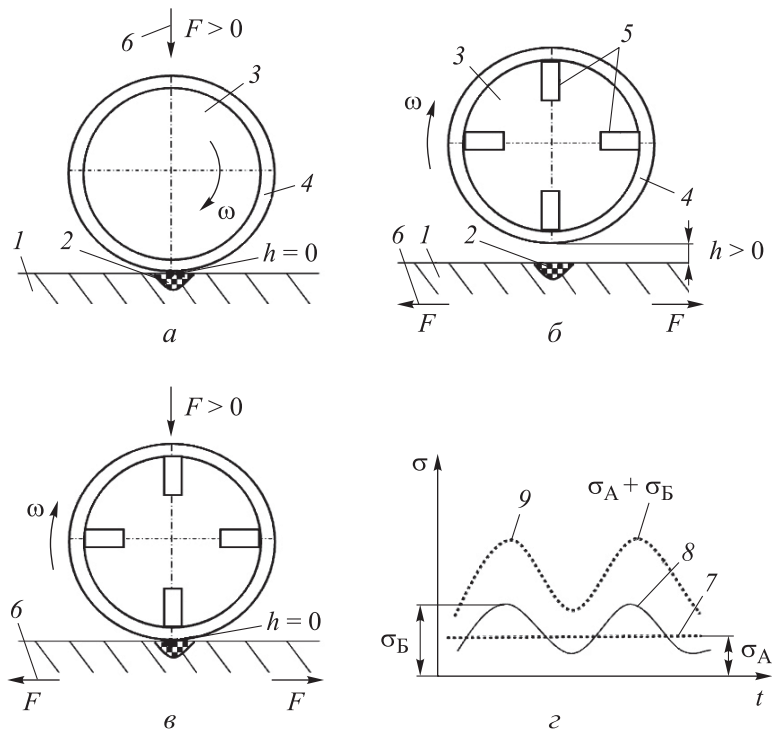


Иллюстрация возможности рационального совмещения операций ТМД на примере синтеза ФУИ+УМД:

a — традиционная схема ФУИ; *б* — классический вариант усталостно-магнитного диспергирования материала поверхностного слоя; *з* — совмещение ФУИ и УМД; *схема* напряженно-деформированного состояния в зоне диспергирования материала поверхностного слоя; *1* — объект анализа — материал поверхностного слоя; *2* — зона диспергирования материала поверхностного слоя при мезодиагностировании; *3* — вращающийся диск; *4* — износостойкое покрытие, истирающее материал поверхностного слоя в зоне *2*; *5* — постоянные магниты; *б* — внешняя сила F , изменяющая напряженно-деформированное состояние в зоне диспергирования *2* материала поверхностного слоя ($F - var$); *7* — напряженно-деформированное состояние в зоне диспергирования *2* при ФУИ; *8* — напряженно-деформированное состояние в зоне диспергирования *2* при УМД; *9* — общее напряженно-деформированное состояние в зоне диспергирования *2* при ФУИ + УМД; h — зазор между *4* и *1*; σ_A , σ_B — условные обозначения напряженно-деформированного состояния в зоне *2* при ФУИ и УМД соответственно; ω — скорость направления вращения диска *3*

Заметим, что важнейший резерв повышения результативности ТМД — формирование в зоне диагностирования дополнительных механических напряжений, в частности путем силового воздействия на ОА. Созданные напряжения не только позволяют управляемо изменить напряженно-деформированное состояние в данной зоне, но и в некоторых случаях обеспечивают моделирование других видов

воздействия на материал поверхностного слоя. Например, согласно основным положениям кинетической или термофлуктуационной теории длительной прочности твердых тел [7–9], можно путем критериально-расчетного изменения напряженно-деформированного состояния в зоне диагностирования физически адекватно моделировать в определенных пределах роль термического фактора в формировании микродефектности материала поверхностного слоя. Следовательно, появляется возможность более результативной идентификации информационно-диагностических параметров кинетики процесса его диспергирования. Поэтому рациональное сочетание различных способов ТМД функционального качества материала поверхностного слоя, дополненное внешним, в частности силовым, физико-энергетическим воздействием на зону диагностирования, следует рассматривать как основную перспективу синтеза новых комплексных ТМД, обладающих необходимыми позитивными отличительными признаками патентоспособности и более высокой эффективностью [10].

Таким образом, реализация на конкретном примере предлагаемой методики ЭКА позволила выделить наиболее перспективные способы ТМД и, как следствие, на этой основе наметить и в будущем осуществить планирование соответствующих теоретических и экспериментальных исследований, направленных на полнейшее раскрытие научно-прикладного потенциала наиболее значимых технологий — СЭД и УМД.

Заключение. Вышеизложенное позволяет сформулировать некоторые выводы и сделать предварительные обобщения.

Применительно к новым ТМД, наиболее востребованным при производстве авиационной и ракетно-космической техники, разработан формализованный подход к прогнозированию их ожидаемого качества. Это позволяет обобщить результаты ЭКА возможностей инновационных ТМД и, следовательно, повысить объективность выбора наиболее значимой информационно-диагностической технологии на предпроектных этапах ее жизненного цикла, тем самым достигая поставленной цели данной работы.

На примере сравнительного ЭКА потенциала возможностей нескольких ТМД показана результативность предлагаемого подхода к определению наиболее значимых в научно-прикладном отношении способов оценки параметров функционального качества материала поверхностного слоя. В частности, установлено, что наибольшим потенциалом возможностей из рассматриваемых вариантов ТМД обладает мезодиагностика, основанная на усталостно-магнитном локальном диспергировании материала поверхностного слоя изделий, изготовленных из ферромагнетиков, в первую очередь стальных конструкций ответственного назначения, в том числе сверхдлительной эксплуатации.

Отмечено, что основные перспективы развития ТМД состоят в их рациональном сочетании с существующей контрольно-диагностической системой обеспечения качества различных ОА, а также с физически управляемом изменении напряженно-деформированного состояния материала поверхностного слоя в зоне диагностирования, в первую очередь путем термического и/или механического воздействия на него.

Таким образом, помимо применения при решении трудноформулируемых задач предиктивного характера в сфере новой техники и новых технологий, данный формализованный подход после адаптационно-критериальной конкретизации может быть использован и в других отраслях, в первую очередь непосредственно связанных с реальной экономикой.

В целом наиболее значимая перспектива развития предлагаемого подхода к формализации процедуры экспертно-критериального оценивания — развитие и применение специализированных нейросетей, способных поднять на качественно более высокий уровень объективности данную, во многом субъективную, информационную технологию прикладной квалиметрии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Барзов А.А., Кузнецов А.В., Пузаков В.С., Сысоев Н.Н. *Предиктивные мезотехнологии*. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, 2022, 226 с.
- [2] Ключев В.В., Соснин А.В., Ковалев А.В. и др. *Неразрушающий контроль и диагностика*. Ключев В.В., ред. Москва, Машиностроение, 2003, 656 с.
- [3] 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. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1913>
- [4] Андрианов Ю.М., Субетто А.И. *Квалиметрия в приборостроении и машиностроении*. Ленинград, Машиностроение, 1990, 225 с.
- [5] Барзов А.А., Корнеева В.М., Корнеев С.С. Экспертное обоснование применения ультразвукового способа определения дефектности структуры неоднородных материалов. *Сварочное производство*, 2022, № 2, с. 55–60. DOI: 10.34641/ТМ.2021.231.9.031
- [6] Бушева А.Г., Феофанов А.Н. Отбор участников в состав экспертных групп с помощью метода многокритериальной оптимизации. *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*, 2021, № 3 (5), с. 22–27.
- [7] Черепанов Г.П. *Механика хрупкого разрушения*. Москва, Наука, 1974, 640 с.
- [8] Фрейденталь А.М. Статистический подход к хрупкому разрушению. Г. Либовиц, ред. *Т. 2: Разрушение*. Москва, Мир, 1975, с. 616–645.
- [9] Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. *Кинетическая природа прочности твердых тел*. Москва, Наука, 1974, 560 с.
- [10] Половко А.М., Гуруев С.В. *Основные теории надежности. Практикум*. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2006, 704 с.

Статья поступила в редакцию 14.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Барзов А.А., Корнеева В.М., Пузаков В.С., Корнеев И.С. Экспертно-критериальная оценка потенциала результативности различных технологий мезодиагностики качества материалов и изделий из них. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 5.

Барзов Александр Александрович — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Центра гидрофизических исследований Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Область научных интересов: технология машиностроения, конструирование и методы диагностики материалов.
e-mail: a.a.barzov@gmail.com

Корнеева Вера Михайловна — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: метрология, квалиметрия, контроль, методы диагностики материалов.
e-mail: v_korneeva@list.ru

Пузаков Вячеслав Сергеевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Промышленные теплоэнергетические системы» НИУ «МЭИ». Область научных интересов: надежность, новые методы диагностики материалов.
e-mail: PuzakovVS@mail.ru

Корнеев Иван Сергеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: технология специального машиностроения, методы диагностики материалов.
e-mail: iskorn@icloud.com

Criteria expert assessment of the various technologies efficient potential in meso scale quality diagnostics of the materials and products made of them

© A.A. Barzov¹, V.M. Korneeva², V.S. Puzakov³, I.S. Korneev²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

³National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, 111250, Russian Federation

The paper proposes an expert-analytical approach to predicting the performance potential of the information and physical technologies. It is based on analyzing the example of progressive methods in the express diagnostics of the surface layer functional quality of various materials and products made of them using the meso scale diagnostic tools to identify damage to structure of the objects under study. Estimated efficiency potential parameters of various meso scale diagnostic methods are formulated. The expert analysis apparatus is ranking their rating. In particular, the paper shows that the meso scale diagnostic fatigue-magnetic technology provides the most significant scientific and applied potential in solving the information and physical problems in engineering surface structures for the products made of ferromagnetic materials. Specific design and technological schemes are proposed illustrating capabilities of this type of the operational meso scale diagnostics.

Keywords: meso scale diagnostics, expert-criteria analysis, stress-strain state, fatigue-magnetic erosion

REFERENCES

- [1] Barzov A.A., Kuznetsov A.V., Puzakov V.S., Sysoev N.N. *Prediktivnye mezotekhnologii* [Predictive meso scale technologies]. Moscow, Lomonosov MSU, Faculty of Physics, 2022, 226 p.
- [2] Klyuev V.V., Sosnin A.V., Kovalev A.V. et al. *Nerazrushayshchiy kontrol i diagnostika* [Non-destructive testing and diagnostics]. V.V. Klyuev, ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 656 p.
- [3] Kolpakov V.I., Ilyukhina A.A. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya razrusheniya konstruktsiy iz raznykh materialov pod deystviem vysokoskorostnoy gidroabrazivnoy strui [Features of mathematical modeling the destruction of structures of different materials under the high-speed waterjet]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 9. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1913>
- [4] Andrianov Yu.M., Subetto A.I. *Kvalimetriya v priborostroenii i mashinostroenii* [Qualimetry in instrumentation and mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990, 225 p.
- [5] Barzov A.A., Korneeva V.M., Korneev S.S. Ekspertnoe obosnovanie primeniya ultrastruynogo sposoba opredeleniya defektnosti struktury neodnorodnykh materialov [Expert justification of the use of the ultrajet method for determining defectiveness of the heterogeneous material structure]. *Svarochnoe proizvodstvo — Welding Production*, 2022, no. 2, pp. 55–60. <https://doi.org/10.34641/TM.2021.231.9.031>
- [6] Busheva A.G., Feofanov A.N. Otbor uchastnikov v sostav ekspertnykh grupp s pomoshchyu metoda mnogokriterialnoy optimizatsii [Selection of participants in

- expert groups using the method of multicriteria optimization]. *Vestnik MGTU "STANKIN"* — *Vestnik MSTU "STANKIN"*, 2021, no. 3 (5), pp. 22–27.
- [7] Cherepanov G.P. *Mekhanika khrupkogo razrusheniya* [Mechanics of brittle destruction]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 640 p.
- [8] Freudenthal A.M. *Statisticheskiy podkhod k khrupkomu razrusheniyu. T. 2. Razrushenie* [Statistical approach to brittle destruction. Vol. 2. Destruction]. Moscow, Mir Publ., 1975, pp. 616–645.
- [9] Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [Kinetic nature of the solid body strength]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 560 p.
- [10] Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovnye teorii nadezhnosti. Praktikum* [Basic theories of reliability. Practicum]. 2nd ed., rev. and enl. St. Petersburg, BKhV-Petersburg Publ., 2006, 704 p.

Barzov A.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Leading Researcher, Center of Hydrophysical Research, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Research interests: mechanical engineering technology, materials design and diagnostic methods.
e-mail: a.a.barzov@gmail.com

Korneeva V.M., Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Metrology and Interchangeability, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: metrology, qualimetry, control, material diagnostics methods.
e-mail: v_korneeva@list.ru

Puzakov V.S., Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Systems, National Research University "MPEI". Research interests: reliability, new methods in diagnosing materials diagnostics. e-mail: PuzakovVS@mail.ru

Korneev I.S., Student, Department of Rocket and Space Technologies Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: special engineering technologies, material diagnostics methods. e-mail: iskorn@icloud.com