

УДК 620.1

Разработка методики ультразвуковой диагностики эксплуатационно-технологических характеристик поверхностного слоя материала изделий РКТ

10, октябрь 2012

М. И. Абашин⁽¹⁾, М. В. Хафизов⁽²⁾, А. С. Проваторов⁽³⁾

*Аспиранты^(1,2), студент⁽³⁾,
кафедра «Технологии ракетно-космического машиностроения»*

*Научный руководитель: А. Л. Галиновский,
кандидат технических наук, доктор педагогических наук,
профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
texhelp@list.ru
maks126@mail.ru

Проблема надежной и безопасной работы металлических конструкций с каждым годом становится все более актуальной. Обеспечение гарантируемой безопасной эксплуатации ответственных объектов в течение заданного срока службы требует контролирования целого ряда эксплуатационно-технологических параметров, в частности, пластичности, выработанного ресурса материала в наиболее нагруженных зонах конструктивных элементов. Установление ресурса, учет его расхода и определение остаточного ресурса металлических деталей технических устройств является сложной проблемой, решение которой зависит от многочисленных внешних и внутренних воздействующих факторов.

На сегодняшний день известны экспресс-методы, сочетающие в себе некий вид технологического воздействия, например, механическое, лазерное или электрохимическое с параллельной или последовательной фиксацией параметров этого воздействия – диагностических признаков – из анализа которых можно получать самую различную технологическую информацию об объекте воздействия: твердость материала, дефектность структуры, прочность и т.д.

Например, использование лазерного воздействия с параллельной регистрацией и анализом акустико-эмиссионной картины позволяет делать выводы о физико-механических свойствах материала [1], а по параметрам электрохимической обработки можно судить о неоднородностях структуры и химического состава в поверхностных слоях сталей и сплавов после воздействия нагрузок функционирования [2].

Также, подобную методику можно совмещать и непосредственно с процессом формообразования, что позволит существенно сократить сроки производства.

Однако при воздействии лазерного излучения на поверхность диагностируемого объекта происходит сильный разогрев и, как следствие, структурно-фазовые превращения в материале, что приводит к снижению объективности подобного вида диагностики. А электрохимическому воздействию подвергаются только проводящие материалы, что делает его неприменимым для определения свойств такого современного материала, как, например, конструкционная керамика.

В качестве технологического воздействия предлагается использовать новый перспективный способ раскроя листовых материалов – гидрорезание, обладающий рядом преимуществ в качестве аппарата ультразвуковой экспресс-диагностики параметров качества материала деталей РКТ. Среди достоинств такие как:

- низкая температура в зоне воздействия струи на деталь
- малая глубина наклепа поверхностного слоя
- схожесть механизма накопления повреждений при гидроэрозионном разрушении с естественным механизмом старения и износа материалов в процессе их работы.

Также аппарат ультразвуковой диагностики (УСД) можно применять и для изделий, которые в процессе эксплуатации подвергаются периодическому контролю технического состояния. Главным требованием к таким объектам является контролепригодность, а именно, свойство изделия, характеризующее его приспособленность к контролю заданными средствами [3].

Рассматриваемый УСД занимает промежуточное положение между совокупностью методов неразрушающего контроля и классическими разрушающими методами испытаний материалов и конструкций.

Суть процесса УСД состоит в реализации следующих основных этапов [4]:

1. На исследуемый объект оказывается кратковременное контрольно-диагностическое воздействие высокоскоростной струей жидкости, вызывающее гидроэрозию его поверхностного слоя. Воздействие осуществляется при определенных режимах: заданном рабочем давлении жидкостной или абразивно-жидкостной струи, ее диаметре, требуемом угле падения, рациональной кинематике движения по диагностируемой поверхности (индентирование или скрайбирование) и т.д.

2. Затем определяются параметры ультразвуковой эрозии, такие как:

– характеристики гидрокаверны: макро- и микротопография ее поверхности и близлежащей области, а также эрозионный унос массы у некрупногогабаритных деталей или образцов;

– масс-геометрические параметры частиц, эродированных с поверхности объекта диагностирования: их количество, законы распределения и т.д.

3. Полученные результаты сравниваются с эталонными характеристиками и/или между собой на различных участках диагностируемой поверхности объекта исследования. По разнице результатов сравнения судят о параметрах качества контролируемого участка (участков) поверхности, например, об остаточном ресурсе конструкционного материала, и/или его эксплуатационно-технологической поврежденности, а также делается заключение о текущем и прогнозном состоянии объекта в целом.

Его отличительная особенность состоит в весьма щадящем локально-диспергирующем диагностическом воздействии на поверхность объекта анализа, которое затем, в случае необходимости, технологически достаточно просто может быть устранено.

В связи с этим, процедура экспресс-оценки параметров состояния исследуемой поверхности не способна, в большинстве практически важных случаев контроля, привести к существенному изменению параметров состояния объекта диагностирования, например, опасному увеличению общей поврежденности. Причем контрольно-диагностическое ультразвуковое воздействие может оказываться на нерабочие поверхности детали или изделия с последующей экстраполяцией полученных результатов анализа на рабочие поверхности.

Важным элементом ультразвукового экспресс-контроля является формирование не только совокупности информативных признаков УСД, но и математическое моделирование процесса гидроэрозии с целью определения технологически помехозащищенных, безразмерных обобщенных параметров и критериев. Это существенно и положительно влияет на результативность и качество экспресс-диагностирования, сокращает требуемое число и трудоемкость прямых экспериментов.

Кроме того, в ряде случаев [5, 6] удается получить достаточно общие аналитические или численные математические зависимости, связывающие в единый контрольно-диагностический комплекс: свойства исследуемого материала – режимы ультразвукового диагностирования – критериальные параметры и информативные признаки гидроэрозии.

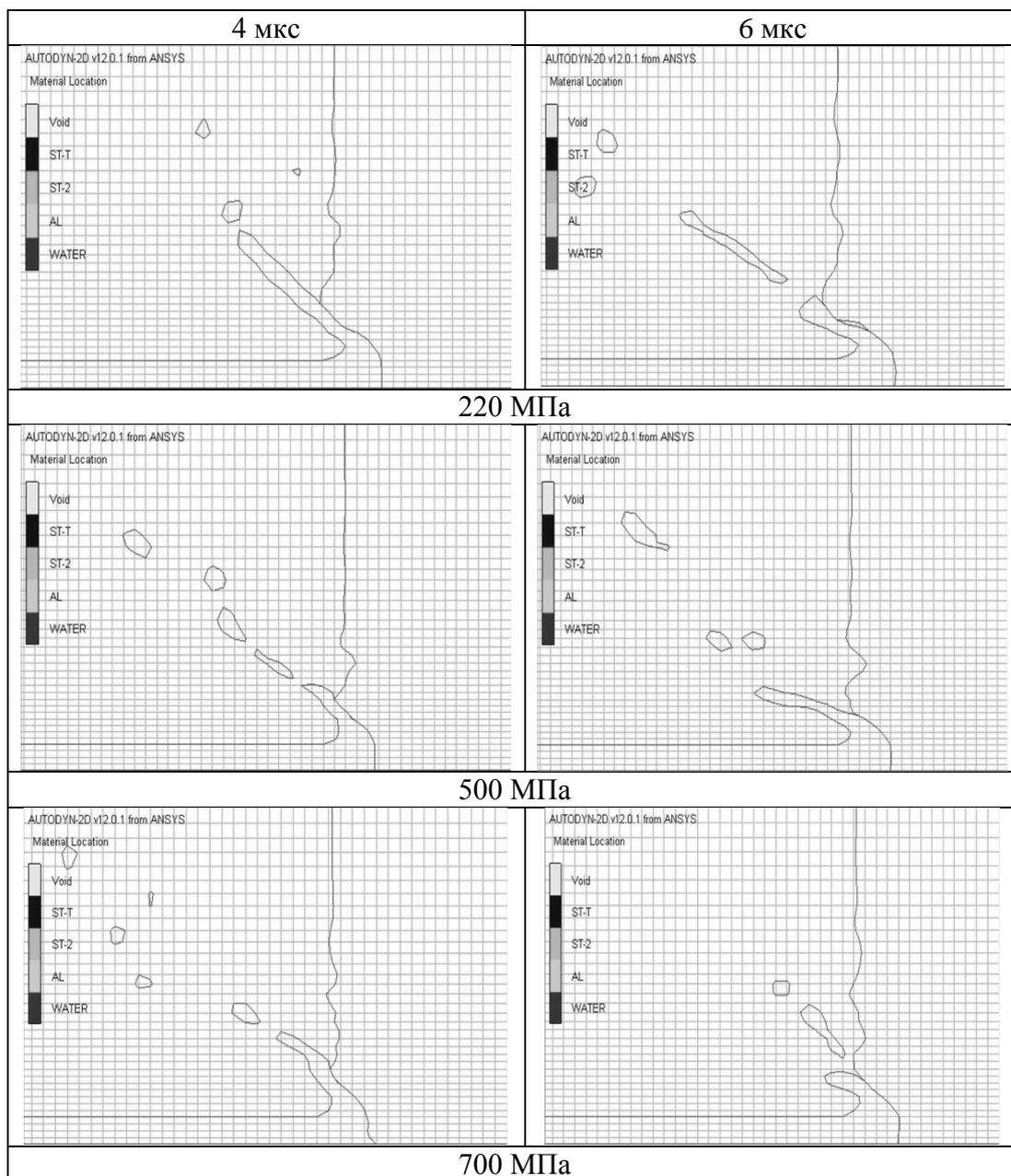


Рис. 1. Результаты численного моделирования взаимодействия гидроструи с преградой при заданных различных значениях предела текучести

С целью выявления информативных признаков процесса УСД было проведено математическое моделирование процесса ударного торможения струи воды о стальную преграду. Параметры струи и преграды были выбраны следующие: скорость струи 500 м/с, диаметр струи 0,2 мм, плотность воды 1000 кг/м³, критерий разрушения деформационный. При расчете варьировался предел текучести: 220 МПа, 500 МПа и 700 МПа, что показано на рис. 1. Полученные параметры гидроэрозии поверхности материала представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты численного моделирования удара струи о металлическую преграду

	Предел текучести материала, МПа					
	220		500		700	
Время воздействия, мкс	4	6	4	6	4	6
Глубина гидрокаверны, мм	0,200	0,250	0,130	0,175	0,125	0,150
Высота валика оттеснения, мм	0,060	0,060	0,050	0,050	0,020	0,020
Ширина гидрокаверны, мм	0,300	0,300	0,275	0,275	0,275	0,275
Отношение высоты валика к глубине гидрокаверны	0,30	0,24	0,38	0,29	0,16	0,13

Из результатов моделирования видно, что с ростом предела текучести уменьшается глубина гидрокаверны и высота валика пластического оттеснения материала, что полностью соответствует ожиданиям, т.к. известно, что с увеличением прочности увеличивается контактная стойкость и стойкость к индентированию. Определенный интерес представляет отношение высоты валика пластического оттеснения материала к глубине гидрокаверны. С увеличением времени воздействия эта величина уменьшается вследствие увеличения глубины гидрокаверны и постоянства высоты валика.

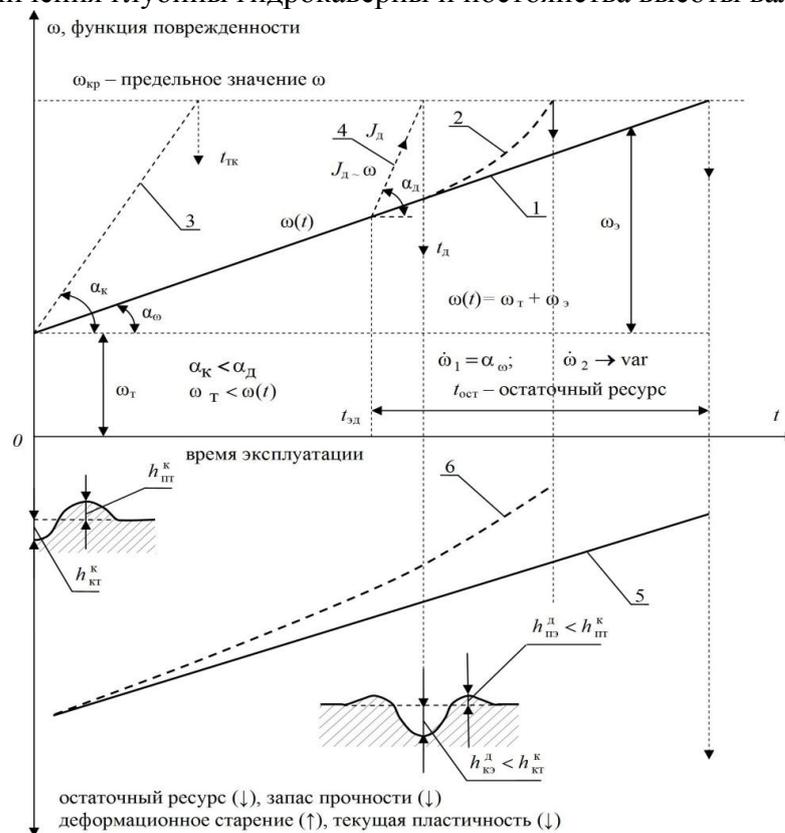


Рис. 2. Иллюстрация процедуры ультразвукового контроля и диагностики при оценке эксплуатационно-технологических параметров исследуемого объекта
 1 – линейное приближение в решении задачи диагностирования и оценки остаточного ресурса (5) ($\alpha = const$); 2 – экспоненциальное приближение оценки остаточного ресурса (6) ($\alpha = \alpha\omega$); 3 – оценка технологической поврежденности ω_T при технологическом контроле качества; 4 – текущая (эксплуатационная) диагностика состояния (поврежденности) объекта анализа.

В качестве примера на рис. 2 [4] схематично показана возможность экспресс-оценки эксплуатационно-технологической поврежденности – $\omega(t)$ детали или изделия при выходном технологическом контроле (индекс «к») и в процессе эксплуатации (индекс «э»), путем ультразвукового контрольно-диагностического гидроэрозионного воздействия интенсивностью J . На рис. 2 графически учтено, что $J = f(\omega)$. Данное обстоятельство,

даже в линейном или экспоненциальном приближении, вполне соответствует физико-технологической сущности рассматриваемой задачи и позволяет достаточно просто осуществить процедуру количественной оценки ряда важнейших эксплуатационно-технологических параметров: прочности, пластичности и других текущих параметров, характеризующих состояние поверхностного слоя объекта анализа. В частности, из схемы изменения $\omega(t)$, представленной на рис. 2, следует возможность экспресс-оценки исходной, технологической поврежденности ω_t деталей на этапе их выходного технологического контроля. Кроме того, согласно представленной схеме, путем ультразвукового экспресс-диагностирования вполне возможно определение остаточного ресурса ($t_{ост}$) изделия в реальном масштабе времени.

Экспериментальные исследования подтверждают возможность использования аппарата УСД для оценки эксплуатационно-технологических свойств материала деталей, в частности, для проверки пригодности УСД при контроле поврежденности и пластичности материала в процессе эксплуатации был проведен следующий эксперимент на 9 одинаковых образцах после усталостных испытаний. Первый образец испытывался до образования макротрещины (или его поломки) с одновременной регистрацией числа циклов нагружения N , служащим точкой отсчета испытаний остальных 8 образцов, для которых устанавливалось число циклов соответственно $0,1N$, $0,2N$, $0,3N$, $0,4N$, $0,5N$, $0,6N$, $0,7N$ и $0,8N$, и выполнялись аналогичные действия. Затем на образце №3 были подобраны оптимальные режимы ультразвукового воздействия, заключающиеся в оптимальной глубине для исследования при помощи профилографа образовавшейся гидрокаверны. Режимы воздействия: рабочее давление струи 3700...3800 атм., рабочая подача 15 мм/с, диаметр водяного сопла 0,25 мм, рабочая жидкость – вода. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты обработки данных после УСД

№ образца	1	2	3	4	5	6(р.)	7(р.)	8	9(р.)
Число циклов нагружения	4341	8681	13022	17363	21750	23716	24873	26044	4340 8
Глубина гидрокаверны, мкм	143, 7	140,9	79,4	107,7	148,2	168,7	161,2	187,2	154,8
Высота валика пластического оттеснения, мкм	44,3	35,6	35,3	37,8	26,9	14,0	19,3	24,0	12,8
Масса до УСД, г	13,0 5	13,05	13,12	13,13	13,07	12,91	12,98	13,04	13,10
Масса после УСД, г	13,0 0	13,01	-	13,10	13,03	12,87	12,92	12,99	13,03
Изменение массы, г	0,05	0,04	-	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07

р. – образец разрушился при испытаниях

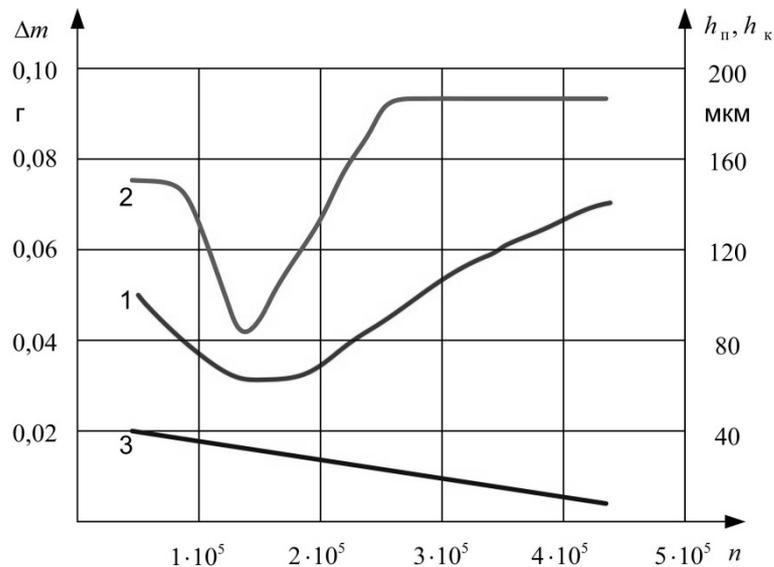


Рис. 3. Графики изменения глубины гидрокаверны (1) массы (2) и высоты валика пластического оттеснения (3) и при ультразвужном воздействии в зависимости от числа циклов нагружения n – число циклов нагружения, Δm – изменение массы образца, $h_{п}$ – высота валика пластического оттеснения материала из зоны действия струи, $h_{к}$ – глубина образовавшейся гидрокаверны.

Из результатов эксперимента (рис. 3) видно, что с ростом поврежденности уменьшается высота валика пластического оттеснения металла, это, в свою очередь, свидетельствует об уменьшении пластичности металла и не противоречит существующим представлениям о механизме накопления поврежденности. Из анализа графиков изменения глубины гидрокаверны виден экстремум, соответствующий 3-му и 4-му образцу. Налицо уменьшение эрозионного износа, объясняемое упрочнением образца вследствие действия нагрузки, что характерно для малоуглеродистых сталей.

Обобщая вышеизложенное, а также используя некоторые материалы ранее выполненных работ в области УСД [7], можно в табулированном виде представить технологически предварительные рекомендации по обеспечению информативной результативности ультразвужного диагностирования и экспресс-оценок ключевых параметров качества поверхностного слоя, частично показанные в табл. 3.

Таблица 3. Рекомендации по ультразвужному диагностированию и оценке эксплуатационно-технологических параметров

№ п.п.	Контролируемый или диагностируемый параметр	Информативные признаки и критерии	
		приоритетные	вспомогательные
1	Прочностные характеристики поверхностного слоя, контактная жесткость	Масс-геометрические параметры гидрокаверны и эродированных частиц	Закономерности распределения эродированных микрочастиц, их безразмерные параметры
2	Микротвердость, пластичность поверхности, величина наклепа	Параметры валика пластического оттеснения материала мишени	Глубина гидрокаверны, параметры эродированных микрочастиц
3	Уровень остаточных и действующих напряжений	Форма гидрокаверны, интенсивность гидроэрозии	Распределение эродированных частиц по размерам
4	Поврежденность, остаточный ресурс,	Закономерности распределения	Экзоэлектронная эмиссия, параметры

	деформационное старение	эродированных частиц	гидрокаверны и эродированных частиц
--	-------------------------	----------------------	-------------------------------------

Прокомментируем отдельные положения, представленных в таблице 2 рекомендаций. Например, стабильность и/или вариативность самих условий ультразвукового диагностирования рекомендуется контролировать путем измерения и анализа информативных признаков акустического излучения (АИ). Это объясняется высокой чувствительностью интенсивности ударно-волнового возмущения зоны ультразвукового взаимодействия к граничным условиям натекания высокоскоростной гидроструи на твердотельную мишень. По мере образования гидрокаверны эти условия существенно изменяются в сторону снижения волновой динамики взаимодействия, что в свою очередь является косвенным признаком, свидетельствующим об изменении (увеличении) текущих геометрических размеров и формы гидрокаверны, образующейся в месте удара ультразвуку о поверхность объекта контроля или диагностирования.

Другим характерным примером контрольно-диагностических возможностей ультразвуку является оценка пластических свойств поверхностного слоя путем анализа геометрических параметров валика пластического оттеснения материала из зоны гидроэрозионного воздействия, в частности, высоты валика h_n (рис. 2). Причем при анализе формы и размеров этого валика нужно учитывать весьма вероятное существенное увеличение пластичности исследуемого материала в условиях мощного широкополосного АИ, в первую очередь, в диапазоне ультразвуковых частот, порождаемого интенсивным гидродинамическим, ударно-волновым взаимодействием ультразвуку жидкости (воды) с твердотельной мишенью. Очевидно, что весьма ценная информация об упруго-пластических свойствах материала и их изменениях при ультразвуковом воздействии может быть получена путем последующего измерения микротвердости поверхности гидрокаверны и самого валика пластического оттеснения, а также при их классических металлографических исследованиях, в том числе средствами электронной микроскопии.

Технологически значимая диагностическая детализация данных в таблице 2 осуществима экспериментальным путем, дополненным результатами теоретического анализа специфики процесса ультразвуковой гидроэрозии, выполненного с целью повышения общности выявленных закономерностей. Причем основными элементами численного математического моделирования являются:

- конечно-элементная модель напряженно-деформированного состояния зоны гидродинамического взаимодействия ультразвуку с поверхностью твердого тела;
- вероятностная модель исходной (технологической) дефектности исследуемого материала мишени, например, в виде распределения субмикро- и микротрещин в поверхностном слое;
- модель изменения дефектности материалов в области гидроконтрастного ультразвукового взаимодействия за счет образования, роста и слияния микротрещин по усталостно-волновому и гидрорасклинивающему механизмам, приводящим к отделению дисперсных частиц с поверхности зоны гидроэрозии.

При построении данных моделей необходимо использовать результаты тестовых (установочных) экспериментов, что обеспечит их необходимую информационно-технологическую адекватность, а также позволит верифицировать результаты моделирования при формировании информативных параметров и критериев гидроэрозионного разрушения.

Литература

1. А.с. 1375994 СССР, МПК⁴ G01N3/42. Способ оценки твердости материалов/ Камалов В. С., Барзов А.А., Вдовин А.А., Зарубина О.В. (СССР). – №4053010, заявл. 20.02.1986; опубл. 23.02.1988, Бюл. №12. – 3 с.

2. Итеке, И. Ч. Электрохимический метод диагностики неоднородности структуры и химического состава в поверхностных слоях сталей и сплавов после воздействия нагрузок функционирования : дис. ...канд. техн. наук: 05.17.03 : М., 2003.- 119 с.
3. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.- Введен 1967-01-01. М.: Издательство стандартов, 2000.- 64 с.
4. Абашин, М.И. Физико-технический анализ информационно-диагностического потенциала ультразвуковых гидротехнологий/ М.И. Абашин, А.А. Барзов, А.Л. Галиновский, А.А. Ковалев, К.В. Кучкин, Н.Н. Сысов; Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Физическая гидродинамика.- Препринт.- М., 2010.- 33 с.- №10/2010.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения, М.: Наука, 1974.640 с.
6. Функционально-диагностические возможности ультразвуковых гидротехнологий в обеспечении промышленной безопасности объектов ТЭК. Барзов А.А, Галиновский А.Л., Елагина О.Ю., Жигарев Г.А. Управление качеством в нефтегазовом комплексе, №3, 2010. С 41-46.
7. Барзов А.А., Галиновский А.Л. Технологии ультразвуковой обработки и диагностики материалов – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 246 с.