

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178.15/179.119

Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статической прочности

А. А. Лебедев, И. В. Маковецкий, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек, В. П. Швец

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Определены параметры рассеяния характеристик упругости и прочности алюминиевого сплава и углеродистой стали при массовых испытаниях в идентичных условиях статического деформирования. Подтверждена стадийность деградации материала, связанная с особенностями природы и качеством структурных повреждений, накапливаемых на разных стадиях деформирования, что приводит к нелинейности закона их накопления. Установлена хорошая корреляция между коэффициентом гомогенности Вейбулла и максимальным значением плотности вероятности на кривых логарифмически нормального распределения и распределения Вейбулла. Акцентируется внимание на преимуществах метода LM-твёрдости в отношении получения информации об интегральной картине деградации материала в процессе наработки.

Ключевые слова: твёрдость, статическая прочность, рассеяние свойств, поврежденность, закон распределения.

Введение. Кинетический процесс разрушения материала, подвергнутого кратковременному или длительному нагружению, проявляется в глубоких изменениях структуры на различных масштабных уровнях и, как следствие, физико-механических свойств. Происходящие на разных стадиях деформирования разрывы межатомных, межмолекулярных и других связей приводят к определенной поврежденности материала, т.е. к деградации.

Степень поврежденности материала, связанная с образованием дефектов, должна быть отнесена к категории представительных показателей его качества, которые необходимо контролировать в процессе эксплуатации конструкции. Не случайно в отдельных нормативных документах по оценке ресурса действующих изделий наряду с определением текущих коэффициентов запаса конструкции по пределам текучести и прочности материала предусмотрена обязательная оценка коэффициента запаса по его поврежденности [1]. Поэтому исследования по совершенствованию методов неразрушающего контроля кинетики состояния материала в процессе наработки имеют большое практическое значение.

В настоящее время предпринимаются попытки контролировать кинетику повреждений в процессе эксплуатации различными методами, в том числе по физическим параметрам, характеризующим изменение внутреннего трения, электросопротивления, модуля упругости, твёрдости и других

свойств материала. При выборе метода ориентируются на степень чувствительности используемого параметра к изменению поврежденности и на возможности его определения сравнительно простыми неразрушающими методами.

В этом отношении, как показано в работах [2, 3], выгодно отличается от существующих методов метод LM-твердости, основанный на использовании в качестве коррелируемых с поврежденностью материала не твердости, а статистических параметров рассеяния ее характеристик, полученных при массовых измерениях [4]. Метод опробован в основном на конструкционных сталях и сером чугуна [5] после различных степеней деформирования при статическом растяжении, а также на трубных сталях после наработки различной длительности в системах магистральных трубопроводов [6].

Полученные положительные результаты о работоспособности метода свидетельствуют о целесообразности дальнейших исследований с целью более глубокого его физического обоснования, повышения достоверности и удобств при практическом применении. Прежде всего необходимо раскрыть природу рассеяния значений характеристик твердости и других механических свойств материала, объяснить наблюдаемые закономерности кинетики накопления повреждений по мере наработки в оценке показателями рассеяния и другими методами в связи с влиянием режима нагружения и вида напряженного состояния.

Методика проведения эксперимента. Для развития метода большой интерес представляют результаты исследований возможности определения параметров поврежденности материала по рассеянию значений характеристик упругости, пластичности и статической прочности при массовых испытаниях одинаковых образцов в идентичных условиях деформирования. В рамках этого актуального направления и проведено настоящее исследование.

Учитывая специфику решаемой задачи, особое внимание уделялось обеспечению повторяемости условий и режима испытаний с целью сведения к минимуму влияния на результаты измерений субъективных, инструментальных и приборных ошибок.

Статистическая природа механических свойств материала, связанная с его структурной неоднородностью и наличием дефектов, требует тщательного анализа результатов массовых испытаний с привлечением методов математической статистики и теории случайных процессов, основанных на законах больших чисел (более 200). Однако при решении многих практических задач возможны ограничения. Так, в работе [7] описаны результаты испытаний сплава В95 на усталость при сравнительно высоких напряжениях ($\sigma_{\max}/\sigma_{-1} \geq 1,5$). Опыты показали, что для партий из 10 и 26 образцов расхождение между средними долговечностями не превышает 0,2% при разнице в дисперсии примерно 15%. Эти результаты, а также полученные ранее [2, 3, 5, 6 и др.] дают основание полагать, что приемлемые для решения поставленных в настоящей работе задач экспериментальные данные могут быть получены при испытании партий из 26–28 образцов.

Исследования выполнены на материалах двух классов: малолегированной углеродистой стали 40Х и высокопрочного алюминиевого сплава В95.

Из этих материалов изготавливали пятикратные круглые образцы типа IV с диаметром рабочей части 8 мм и начальной длиной рабочей части 40 мм при строгом соблюдении требований стандарта (ГОСТ 1497–84 [8]), идентичности технологии изготовления, размеров и чистоты поверхности рабочей части. Образцы в количестве по 28 из каждого материала изготавливали из двух одинаковых прутков диаметром 20 мм на токарном станке с применением обычного охлаждения. Шероховатость поверхности рабочей части после точения с минимальной глубиной реза и шлифования не превышала 1,25 мкм. Перед испытанием проводили тщательное измерение размеров рабочей части. Образцы, не соответствующие требованиям стандарта [8], выбраковывали.

Испытания выполняли на машине, снабженной механическим и ручным приводом, что обеспечивало жесткое нагружение, особенно необходимое при определении модуля упругости и предела текучести.

Для измерения осевой и поперечной деформации образца использовали П-образные тензометры. Наличие двух тензометров, закрепленных на диаметрально противоположных сторонах образца, при соответствующем подсоединении каналов измерительных мостов тензорезисторов к измерительной аппаратуре позволяло обнаружить наличие внецентренного растяжения и при необходимости устранить его путем перемонтажа образца в захватах. Для более точной регистрации усилия показания штатного силоизмерителя дублировали тензорезисторным устройством, сигналы которого, как и сигналы резисторов тензометров, регистрировали цифровыми вольтметрами и двухкоординатными самописцами.

Масштаб записи деформации на начальных участках для продольной и поперечной деформации составлял примерно 1500:1 и 3000:1 соответственно. По мере роста пластических деформаций он ступенчато уменьшался.

Экспериментальные результаты. Механические характеристики стали и сплава определяли путем обработки диаграмм деформирования по методике, предусмотренной стандартом [8]. Типичные кривые деформирования стали 40X и сплава В95 показаны на рис. 1, а значения характеристик их свойств по результатам испытаний 28 одинаковых образцов – в табл. 1. К сожалению, деформации рабочей части образца, соответствующие их разрушению, по техническим причинам зарегистрировать не удалось. Вызывает также некоторое сомнение адекватность данных, полученных по пределам текучести исследованных материалов в связи со значительным их рассеянием. Возможно, это обусловлено очень небольшим упрочнением алюминиевого сплава в зоне малых упругопластических деформаций.

Как видно из данных таблицы, полученные для каждого механического свойства значения соответствующих характеристик (E_i , μ_i , $\sigma_{0,2i}$, σ_{bi}) имеют рассеяния, что связано с естественной неоднородностью микроструктуры материала, наличием в нем исходных и приобретенных при деформировании различных дефектов (повреждений), а также с другими факторами, которые не зависят от особенностей структуры и, как было показано выше, по возможности исключаются при подготовке и проведении испытаний. Об этом свидетельствует, в частности, отсутствие в разных выборках систематических (повторяющихся) выбросов.

Т а б л и ц а 1

Характеристики механических свойств исследуемых материалов

№ образца	Сталь 40Х				Сплав В95			
	$E \times 10^{-1}$, МПа	μ	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	$E \times 10^{-1}$, МПа	μ	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа
1	21039	0,295	607	920	7450	0,323	438	562
2	21233	0,296	610	934	7495	0,333	438	562
3	21473	0,298	621	397	7511	0,333	439	565
4	21583	0,299	628	939	7514	0,333	440	568
5	21637	0,303	634	940	7530	0,339	440	568
6	21697	0,304	638	942	7556	0,340	441	571
7	21710	0,309	638	945	7561	0,342	442	571
8	21864	0,310	638	948	7565	0,346	443	572
9	21900	0,311	642	949	7573	0,347	443	574
10	21958	0,311	647	950	7574	0,352	443	574
11	21968	0,321	653	951	7607	0,354	443	575
12	21969	0,321	656	953	7625	0,356	444	575
13	22041	0,322	658	955	7625	0,358	444	575
14	22055	0,326	660	956	7625	0,359	444	576
15	22060	0,327	666	957	7626	0,359	444	577
16	22080	0,327	667	969	7641	0,360	444	577
17	22104	0,330	678	977	7647	0,363	444	577
18	22142	0,331	684	981	7685	0,367	445	578
19	22175	0,334	699	983	7698	0,369	445	578
20	22214	0,336	699	985	7732	0,370	445	578
21	22274	0,337	704	991	7736	0,372	445	578
22	22348	0,340	708	991	7743	0,373	446	579
23	22359	0,343	732	1001	7746	0,376	446	579
24	22588	0,344	734	1003	7825	0,379	447	581
25	22632	0,345	738	1004	7837	0,379	447	581
26	22637	0,346	746	1016	7841	0,383	447	581
27	22680	0,360	751	1023	7844	0,388	449	582
28	23179	0,367	782	1065	7870		451	583
<i>m</i>	53,21	18,57	16,17	32,98	71,76	22,46	158,55	110,73
$HV_{ср}$, МПа (исходный материал)			2708,96					1406,45
<i>m</i>			91,63					99,83

По приведенным в табл. 1 данным были определены параметры рассеяния характеристик основных механических свойств материалов (упругости – E , μ и прочности – $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{в}$) в оценке коэффициентом гомогенности, который определен для каждого свойства по формуле Гумбеля:

$$m_k = \frac{d(n)}{2,30259} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg k_i - \overline{\lg k}) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\lg k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg k_i$ – среднее значение логарифмов, полученных в n опытах характеристик k -го свойства.

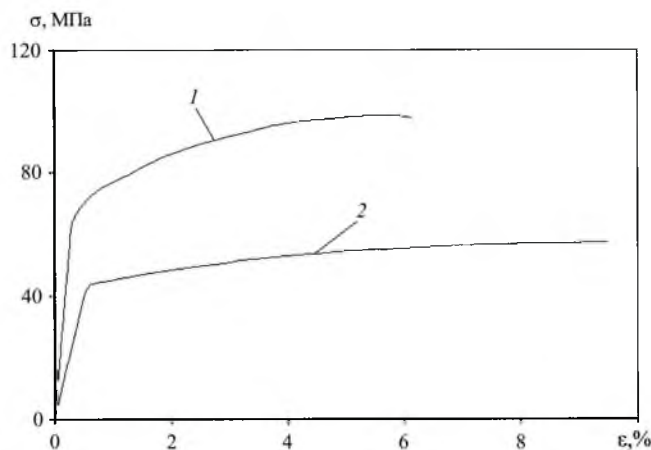


Рис. 1. Диаграммы деформирования стали 40X (1) и алюминиевого сплава В95 (2).

Анализ полученных данных и сопоставление их между собой и с результатами испытаний исходного материала методом ЛМ-твердости (табл. 1) показали, что между значениями параметров поврежденности, найденными по рассеянию характеристик разных механических свойств, нет ни количественной, ни качественной корреляции. Более того, отсутствует монотонность роста поврежденности по мере развития деформаций, а именно: при переходе от упругой стадии к пластической и далее к состоянию, предшествующему разрушению, при котором поврежденность обоих материалов ниже, чем в начале пластического течения. Это обусловлено, по-видимому, тем, что изменение отдельных свойств материала в связи с наработкой контролируется не всеми повреждениями в одинаковой степени, т.е. каждая группа повреждений контролирует в основном одно или в лучшем случае несколько свойств. Например, рассеяние значений предела текучести связано, главным образом, с повреждениями сдвиговой природы, а значений предела прочности – с повреждениями, возникающими вследствие отрыва и разрыхления материала.

Необходимо отметить, что обнаруженная стадийность процесса может быть одной из причин нелинейности законов суммирования повреждений, широко используемых при создании кинетических теорий разрушения.

Отдельный класс повреждений контролирует рассеяние значений характеристик упругости. Именно этим можно объяснить, что известные модели накопления повреждений, в том числе основанные на методе ЛМ-твердости и использующие в качестве критериев текущие значения модулей упругости

и коэффициентов поперечной деформации, дают коррелируемые значения поврежденности. К таким критериям относятся:

дефект модуля упругости в виде [5]

$$\varepsilon_p = \Delta E/E',$$

где E' – текущее значение модуля упругости;
деформационный критерий в виде [9]

$$\varepsilon_p = (1 - 2\mu)\varepsilon,$$

где μ – коэффициент поперечной деформации при деформации ε ;
критерий в виде коэффициента гомогенности по Гумбелю (1), рассчитанный по характеристикам упругости – коэффициенту поперечной деформации и модулю упругости,

$$\overline{\lg k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \mu_i; \quad \overline{\lg k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg E_i.$$

Результаты расчетов по перечисленным выше критериям для чугуна при разных деформациях (на рис. 2 прямая 1, светлые точки), стали 40Х и алюминиевого сплава (прямая 2, темная точка) являются достаточным экспериментальным подтверждением достоверности указанной корреляции.

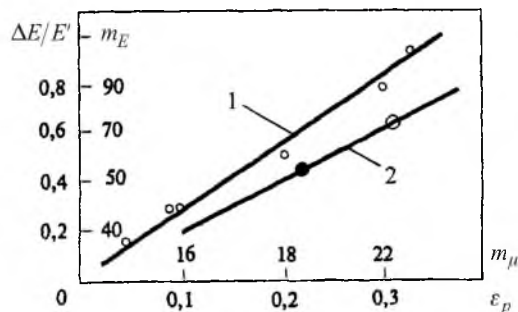


Рис. 2. Соотношения между параметрами поврежденности, определенными по дефекту модуля и коэффициенту поперечной деформации (1), а также по рассеянию значений модуля упругости и коэффициента Пуассона (2).

Приведенные в табл. 1 результаты можно проанализировать по параметрам функций распределения, построенных по имеющимся экспериментальным данным 28 испытаний.

При ограниченном количестве испытаний более универсальным в отношении режима нагружения и свойств материала (пластичные, малоупругие) является логарифмически нормальное распределение, в котором функция распределения $f(y)$ и плотность вероятности $\varphi(y)$ определяются не по значениям случайных величин x (нормальное распределение), а по логарифмам $y = \lg x$:

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} e^{-(y-a_y)^2/2\sigma_y^2}, \quad (2)$$

где σ_y^2 , a_y – дисперсия и математическое ожидание случайной величины $y = \lg x$.

Соответствующие логарифмически нормальному закону частотные кривые, адекватные кривым плотности (вероятности) события, построены по результатам измерения характеристик упругости, пределов текучести и прочности сплава и стали (рис. 3). Видно, что параметры кривых, относящиеся к рассеянию характеристик разных механических свойств одного и того же материала, существенно отличаются. Не подтверждается также их вполне логичное упорядоченное изменение в процессе деформирования.

Для сравнения на рис. 3 штриховыми линиями показаны экспериментальные кривые распределения Вейбулла, которое обычно используют для описания результатов испытаний малопластичных материалов в условиях длительного статического или циклического нагружений. Тем не менее для пластичного алюминиевого сплава В95, обладающего небольшим деформационным упрочнением, кривые распределения Вейбулла и кривые, построенные по логарифмически нормальному закону, практически совпадают (рис. 3, δ -з), в то время как для менее пластичного материала – стали 40Х такое совпадение отсутствует (рис. 3, a -з). Обращает на себя внимание тот факт, что для обоих материалов в пределах неизбежного разброса максимальные значения кривых рассеяния характеристик каждого свойства одинаковые, хотя распределение Вейбулла для стали 40Х имеет заметную левостороннюю асимметрию с разными для каждого свойства модами и медианами.

Анализ полученных результатов позволил обнаружить устойчивую не только качественную, но и количественную корреляцию между коэффициентом гомогенности m (1) и максимальными значениями плотности вероятности $\varphi_{\max}(y)$ (2) – табл. 2, причем коэффициент корреляции $\alpha_{\text{ср}}$ практически одинаковый для всех характеристик механических свойств обоих материалов. Это раскрывает новые возможности оценки рассеяния значений характеристик исследуемых свойств по параметрам кривых плотности распределения.

Установленная корреляция, естественно, может быть распространена и на метод ЛМ-твердости, который физически более обоснован и объективен, так как объемы материала в зоне внедрения индентора претерпевают все стадии накопления повреждений в процессе испытания. Это обеспечивает возможность получения методом ЛМ-твердости результатов, интегрально отражающих накопленные в материале повреждения разной природы, т.е. его реальную поврежденность на исследуемой стадии наработки. К факторам, подтверждающим широкие возможности метода, можно отнести теоретически и экспериментально доказанную корреляцию между твердостью и энтропией [10], характеризующей, как известно, меру неупорядоченности любой системы, в том числе и материала, возрастание степени дисперсности которого сопровождается увеличением энтропии.

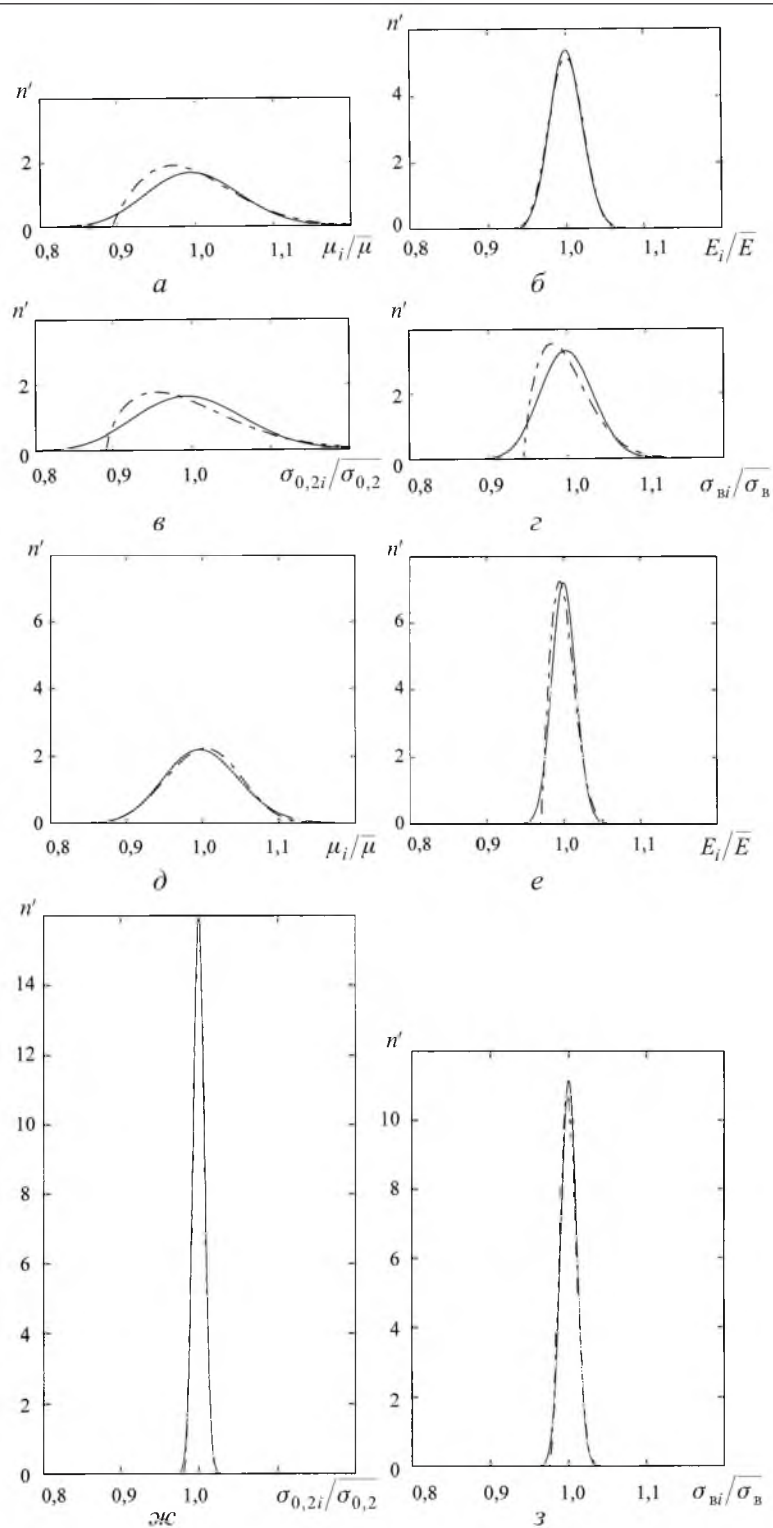


Рис. 3. Кривые распределения коэффициентов Пуассона (а, д), модулей упругости (б, е), пределов текучести (в, ж) и прочности (г, з) стали 40X (а-г) и алюминиевого сплава В95 (д-з).

Т а б л и ц а 2

Коэффициент гомогенности и максимальная плотность вероятности, рассчитанные для значений характеристик разных механических свойств сплава В95 и стали 40Х

Характеристики рассеяния механических свойств		Сплав В95				Сталь 40Х			
		E	μ	$\sigma_{0,2}$	σ_B	E	μ	$\sigma_{0,2}$	σ_B
m		71,46	22,46	158,55	110,73	53,21	18,57	16,17	33,00
$\varphi_{\max}(y)$	$\varphi_{\max}^{\text{логнорм}}(y)$	25,70	8,16	48,94	41,47	19,14	6,70	5,82	11,91
	$\varphi_{\max}^{\text{Вейбулл}}(y)$	27,73	8,02	55,24	43,09	18,78	6,81	5,67	12,89
$\alpha = \frac{m}{\varphi_{\max}}$	$\alpha^{\text{логнорм}}$	2,77	2,75	2,78	2,67	2,78	2,77	2,78	2,77
	$\alpha^{\text{Вейбулл}}$	2,89	2,80	2,87	2,57	2,88	2,91	2,85	2,56
Среднее значение соотношений	$\alpha_{\text{ср}}^{\text{логнорм}}$	2,743				2,775			
	$\alpha_{\text{ср}}^{\text{Вейбулл}}$	2,782				2,800			

Выводы

1. Установлен более высокий уровень рассеяния характеристик механических свойств на начальных стадиях деформирования, чем при больших деформациях, предшествующих разрушению, что свидетельствует о стадийности процесса накопления повреждений, которые на каждой стадии могут иметь разные природу, механизмы зарождения и скорость развития.

2. Более объективные данные о реальной поврежденности материала можно получить путем испытаний методом LM-твёрдости, чувствительным к повреждениям разной природы и, следовательно, интегрально отражающим степень деградации материала на исследуемой стадии наработки.

3. Для пластичного алюминиевого сплава В95 кривые распределения Вейбулла и кривые, построенные по логарифмически нормальному закону, практически совпадают, для менее пластичного материала – стали 40Х они качественно отличаются в связи с левосторонней асимметрией распределения Вейбулла.

4. Устойчивая корреляция имеет место между коэффициентом гомогенности и максимальными значениями плотности вероятности, причем коэффициент корреляции практически одинаковый для всех исследуемых свойств обоих материалов. Это свидетельствует о возможности использования параметров кривых плотности распределения характеристики исследуемого свойства для оценки степени поврежденности материала.

Резюме

Визначено параметри розсіяння характеристик пружності і міцності алюмінієвого сплаву та вуглецевої сталі при масових випробуваннях в ідентичних умовах статичного деформування. Підтверджено стадійність деградації матеріалу, що пов'язано з особливостями природи й якістю структурних пошкоджень, які накопичуються на різних стадіях деформування, що призводить до нелінійності закону їх накопичення. Установлено добру

кореляцію між коефіцієнтом гомогенності Вейбулла та максимальним значенням щільності імовірності на кривих логарифмічно нормального розподілу і розподілу Вейбулла. Показано переваги методу LM-твердості щодо отримання даних про інтегральну картину деградації матеріалу у процесі напруження.

1. РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продления срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – М.: Изд-во РАО “ЕЭС России”, 1996. – 93 с.
2. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.
3. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Новый метод оценки деградации материала в процессе наработки // Залізничний транспорт України. – 2003. – № 5. – С. 30 – 33.
4. Патент України № 52107А, МКИ 7 G01N3/00, G01N3/40. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напруження, “LM-метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 15.01.03. Бюл. № 1.
5. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Ламашевский В. П., Волчек Н. Л. Развитие повреждений в сером чугуна при статическом деформировании // Пробл. прочности. – 2003. – № 6. – С. 39 – 46.
6. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. и др. Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты // Там же. – № 2. – С. 29 – 36.
7. Серенсен С. В., Степнов М. Н., Когаев В. П., Гуацинтов Е. В. Устойчивость функций распределения долговечности при испытании на усталость алюминиевых сплавов // Вопр. сопротивления материалов: Труды МАТИ. – 1959. – Вып. 37. – С. 69 – 84.
8. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.86.
9. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Богинич И. О. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом нагружении // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31 – 40.
10. Комаровский А. А. Физическая природа твердости // Диагностика. – 2003. – № 1. – С. 41 – 43.

Поступила 19. 07. 2005