

К. В. Вакуленко, канд. техн. наук

И. В. Библик

И. Б. Казак, канд. техн. наук

Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины,
г. Харьков,
e-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua)

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, коерцитивна сила, стан поверхні, втомна довговічність.

УДК 539.422.24:004.94; 621.317.42

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Встановлено можливість застосування комплексного підходу, що ґрунтується на комп'ютерному моделюванні і коерцитивному контролі, для оцінки втомної довговічності зразків сталі 40Х в початковому стані і після поверхневого пластичного деформування. Показано, що характерною рисою спільного використання магнітного контролю за коерцитивною силою і комп'ютерного моделювання є можливість виявлення початкових стадій зародження дефектів і запобігання їх розвитку до критичних розмірів.

Введение

В большинстве машин и конструкций детали работают в условиях циклически изменяющихся нагрузок и с различным уровнем напряжений в циклах. При этом уровень напряжений на разных режимах может колебаться в широких пределах и приводит к возникновению в деталях как упругих, так и пластических деформаций. Это существенно затрудняет изучение сопротивления усталости, прогнозирование долговечности и определение остаточного ресурса, требует большого объема экспериментального материала и проведения натуральных испытаний. Необходимо использование таких методов, которые не сводились бы только к накоплению экспериментальных данных, а позволяли приблизиться к пониманию физических основ явлений усталости. В этой связи перспективно применение неразрушающих методов контроля, в частности, магнитных методов.

Известно [1, 2], что коэрцитивная сила является одной из наиболее структурно-чувствительных характеристик ферромагнитных материалов. Из всего набора параметров и методов контроля состояния металла коэрцитивная сила сегодня по своей физической сути представляется наиболее обобщающим интегральным параметром оценки именно совокупной поврежденности металла на микроуровне, т. е. диагностические возможности этого параметра существенно шире усталостного контроля.

Поэтому методы неразрушающего контроля, основанные на измерении коэрцитивной силы, нашли широкое применение. Их отличает высокая точность и достаточная простота, возможность проведения измерений на локальных участках контролируемых изделий, высокая чувствительность к фазовым превращениям, слабая зависимость от геометрических размеров объекта контроля.

Методика магнитной диагностики основывается на корреляционных зависимостях между физико-механическими свойствами ферромагнитных материалов и значением коэрцитивной силы, контролируемой при статических и усталостных испытаниях на всех стадиях нагружения, вплоть до разрушения. Теоретические исследования на основе энергетического подхода к анализу намагничивания металла, упруго-пластической деформации, накопления повреждений и роста коэрцитивной силы позволяют моделировать на образцах процесс разрушения металла при эксплуатации в условиях сложнопластического состояния [3].

Первичные значения коэрцитивной силы H_C^0 , так же, как и механические свойства, зависят от многих факторов: химического состава, величины зерна, наличия структурной неоднородности и т. д.

В то же время полученные после определенной наработки конструкции значения коэрцитивной силы H_C фактически не дают ответа на вопрос: на каком этапе жизненного цикла и за счёт каких факторов деградации металла элементы конструкции достигли напряжённо-деформированного состояния [4].

© К. В. Вакуленко, И. В. Библик, И. Б. Казак, 2017

Следовательно, прогнозирование остаточного ресурса конструкции по результатам коэрцитивного контроля без определения причин и понимания механизма развития деградационных процессов не может быть достоверным без проведения дополнительных исследований и применения комплексного подхода к решению этой проблемы.

Термин «деградация свойств» определяет постепенное понижение какого-либо качества, процесс изменения чего-либо в сторону ухудшения, утрату ранее накопленных свойств. В нашем случае деградация материала проявляется как процесс накопления повреждений в результате циклического нагружения.

Целью настоящей статьи является разработка комплексного подхода для оценки и анализа влияния состояния поверхностного слоя образцов стали 40X на их усталостную долговечность, объединяющего результаты коэрцитивного контроля с результатами имитационного компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование проводилось в рамках специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ), разработанного в ИПМаш НАН Украины, в основу которого положены представления о рассеянии (или статистическом разбросе) механических характеристик материалов и о статистической природе их разрушения [5, 6].

Методика исследований

Результаты исследований изменения коэрцитивной силы в процессе циклического нагружения стали 40X подробно описаны в работе [7]. Настоящая работа является продолжением этих исследований и использует их результаты. Кратко остановимся на основных методических аспектах.

Исследования проводились на цилиндрических образцах из стали 40X в состоянии поставки (размеры рабочей части образцов – диаметр 8 мм, длина 100 мм) и после поверхностной пластической деформации.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине типа МУИ-30. Схема испытаний обеспечивала осевое приложение растягивающей нагрузки при знакопостоянном цикле нагружения. Коэффициент асимметрии цикла принимался равным 0,3. Испытания осуществляли в воздушной среде при комнатной температуре. Частота нагружения составляла 11,4 Гц.

На каждом образце для оценки степени деградации материала при накоплении в нем усталостных повреждений проводили измерения коэрцитивной силы с помощью магнитного структуроскопа (коэрцитиметра) модели КРМ-Ц-К2М с приставным преобразователем [8].

Усталостные испытания проводили на двух партиях образцов. Образцы из второй партии испытывали при тех же амплитудах напряжения, что и в первой партии, но сами испытания осуществляли в два этапа. После того как образец нагружали при определенной амплитуде напряжения количеством циклов, соответствующим 40%-й долговечности образца, его разгружали и измеряли коэрцитивную силу. Такой выбор количества циклов основывался на классификации стадий усталости [9], согласно которой при отработке ~ 40% ресурса происходит разрыхление материала, связанное с зарождением и развитием субмикротрещин (т. е. дефектов, которые еще могут быть залечены различными видами обработки). После поверхностной обработки образцы второй партии снова подвергались циклическому нагружению при соответствующих амплитудах с последующим измерением H_C по окончании испытаний.

Для получения диаграмм усталости исследованных образцов в исходном состоянии и после поверхностной обработки в рамках РЭМ создавалась традиционная модель материала и проводилось компьютерное «нагружение» образцов с соответствующим выбранной амплитуде напряжения (σ_A) шагом. Для каждой амплитуды напряжения в соответствии с моделью разрушения определялось количество шагов до разрушения.

Как и в традиционной модели прочностной надежности [10], в РЭМ также используются четыре частные модели: материала, нагружения, формы и разрушения.

Материал представляется в виде системы структурных элементов, каждый из которых обладает конкретными механическими свойствами, имеющими статистический разброс. Статистические распределения исходных данных, являющихся случайными величинами, характеризуются:

- шириной соответствующего интервала по задаваемой характеристике;
- средним значением задаваемой характеристики на соответствующем интервале.

Применение РЭМ для исследования процесса усталости, не предполагая детализации процессов, приводящих к образованию субмикро- и микротрещин, позволяет оценить степень поврежденности материала на определенном этапе циклического нагружения. Здесь под термином «поврежденность» подразумевается развитие определенных физических процессов, приводящих к постепенному образованию в материале микродефектов разного типа. Количественное определение поврежденности основывается на феноменологических моделях, дающих интегральную оценку состояния материала. Для определения относительной поврежденности материала может быть принято, например, отношение объемной доли дефектов к критической объемной доле, соответствующей моменту образования в данном объеме материала макроскопической трещины.

Для построения диаграммы усталости для образцов стали 40X после поверхностной обработки с помощью компьютерного моделирования был разработан следующий алгоритм:

- в рамках РЭМ создавалась традиционная модель материала;
- для каждой амплитуды циклического напряжения определялось количество шагов до разрушения;
- определялось число шагов, соответствующее первой ступени испытаний образцов (40%-й долговечности);
- запоминалась (сохранялась в памяти компьютера) модель материала, соответствующая 40%-й долговечности;
- влияние поверхностной обработки на модель материала в РЭМ проявлялось в том, что для каждой амплитуды циклического нагружения выбиралась толщина поверхностного слоя, в котором бы происходило «залечивание» микродефектов, образовавшихся на первом этапе циклического нагружения. При этом структурным элементам в этом поверхностном слое «возвращались» значения предельных деформаций из начального распределения для образцов в исходном состоянии. О залечивании элементов разрушения структуры материала, накопленных в результате циклического нагружения, может свидетельствовать и уменьшение величины коэцитивной силы после поверхностного пластического деформирования [7].

Известно, что наблюдаемое экспериментально изменение физических свойств или структуры происходит за счет одновременного протекания целого ряда элементарных процессов залечивания различных дефектов. Поскольку исходное распределение всех дефектов, как правило, неизвестно, приходится воссоздавать истинную картину по косвенным признакам.

В связи с вышеизложенным с помощью РЭМ по сути решалась обратная задача: как по экспериментально полученным данным по усталостной долговечности образцов после поверхностной обработки и имеющимся результатам изменения коэцитивной силы с помощью компьютерного моделирования внести такие изменения в модель материала, которые бы показали хорошее совпадение с диаграммой усталости для поверхностно упрочненных образцов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены результаты сравнения диаграмм усталости, полученных экспериментально [7] для образцов стали 40X в исходном состоянии (линия 1) и после поверхностного упрочнения (линия 2), с результатами компьютерного моделирования (точки).

Из рис. 1 видно, что наблюдается хорошее совпадение с экспериментальными данными. Таким образом, на основании проведенного сравнения можно сделать вывод об адекватности созданных моделей материала и проведенных в рамках РЭМ расчетов.

Как отмечалось выше, при расчетах с помощью РЭМ для каждой амплитуды на-

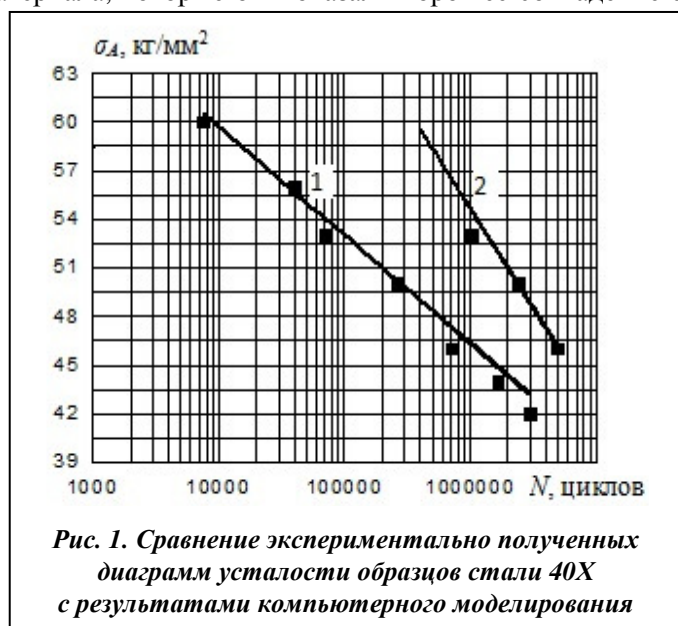


Рис. 1. Сравнение экспериментально полученных диаграмм усталости образцов стали 40X с результатами компьютерного моделирования

пряжения для поверхностно упрочненных образцов определялась толщина поверхностного слоя с измененными характеристиками составляющих его структурных элементов.

На рис. 2 приведена зависимость толщины поверхностного слоя (d) от амплитуды циклического напряжения, полученная в результате компьютерного моделирования, которая сравнивается с зависимостью изменения коэрцитивной силы в результате поверхностной обработки образцов. Кривая определяет зависимость изменения коэрцитивной силы в результате поверхностной обработки образцов от амплитуды напряжения цикла; точки определяют изменение толщины поверхностного слоя.

Известно [8], что величина коэрцитивной силы, определяемая в результате коэрцитиметрического контроля, является весьма структурно чувствительной характеристикой, отражающей деградацию материала по мере развития и накопления в нем усталостных дефектов.

Результаты испытаний образцов в исходном состоянии (нормализация) свидетельствуют о том, что у всех образцов после испытаний повышается значение коэрцитивной силы [7]. Увеличение коэрцитивной силы в исследованном диапазоне амплитуд нагружения (42–60 кг/мм²) составило от 60 до 110%.

Полученный в результате усталостных испытаний образцов рост значений коэрцитивной силы характеризует увеличение степени накопления усталостных повреждений в структуре материала, приводящих к разрушению материала. Анализ полученных результатов однозначно свидетельствует о высокой чувствительности коэрцитивной силы к изменениям структурного состояния материала в результате накопления усталостных повреждений.

Компьютерное моделирование усталостного поведения конструкционных материалов также дает возможность определять усталостную повреждаемость в виде количества разрушенных структурных элементов в модели материала на каждом этапе циклического нагружения.

Эволюция модели материала в РЭМ осуществляется дискретными шагами, в каждом из которых происходят три случайных процесса: образование одиночных элементарных повреждений, их развитие и последующее объединение. Учитывая, что зародившиеся дефекты равновероятны в любом из структурных элементов, можно предположить, что дефекты будут зарождаться как в удалении друг от друга, так и в соседних структурных элементах. Предполагается, что если дефекты зарождаются в соседних структурных элементах, то эти дефекты сливаются в один.

Каждый шаг завершается заменой массива структурных элементов (модели материала), сформировавшегося на предыдущем шаге, новым массивом с автоматическим обновлением всех составляющих его структурных элементов. В результате выполнения каждого шага получаем число разрушенных структурных элементов в модели материала, характеризующее процесс накопления повреждений в процессе нагружения.

На рис. 3 проведено сравнение зависимостей, полученных двумя методами (коэрцитиметрическим и компьютерным моделированием), которые определяют скорость накопления усталостных повреждений в исследованных образцах (черный цвет – образцы стали 40X в исходном состоянии; серый цвет – образцы после поверхностной обработки).

Точки определяют изменение коэрцитивной силы в процессе циклического нагружения (ΔH_c), отнесенное к логарифму числа циклов до разрушения (N), от амплитуды напряжения цикла, а линии определяют зависимость между числом разрушенных структурных элементов (m), отнесенным к логарифму числа шагов до разрушения (N^*), полученную с помощью РЭМ. Необходимо заметить, что

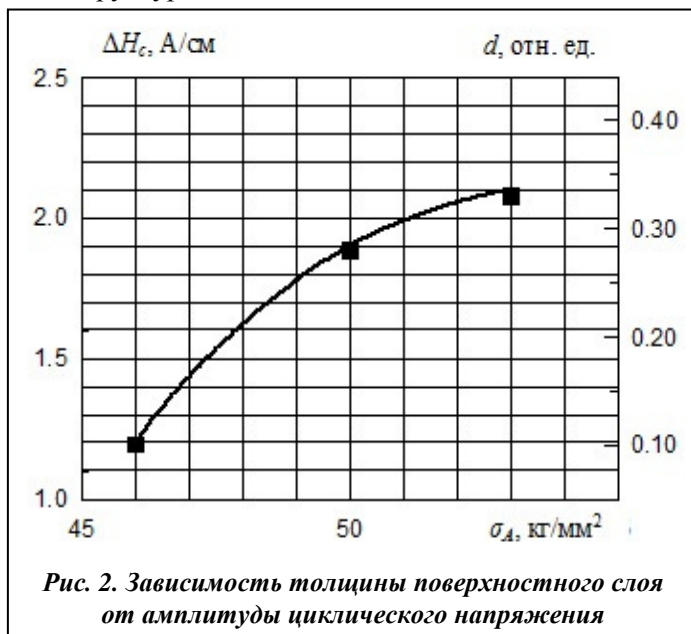


Рис. 2. Зависимость толщины поверхностного слоя от амплитуды циклического напряжения

практически полное совпадение зависимостей наблюдается как для образцов в исходном состоянии, так и для поверхностно упрочненных образцов. Абсолютные значения скорости накопления повреждений выше для неупрочненных образцов.

Сравнение результатов, приведенных на рис. 3, оправданно, поскольку характер изменения коэрцитивной силы в процессе многоциклового нагружения [11] аналогичен характеру зависимости числа разрушенных структурных элементов при компьютерном моделировании многоциклового усталости.

Скорость изменения как коэрцитивной силы, так и скорость накопления повреждений могут быть определены на любом участке этой зависимости и проведено соответствующее сравнение результатов.

Однако, учитывая, что в нашем случае имелось только начальное и конечное значения коэрцитивной силы как для образцов в исходном состоянии, так и для поверхностно упрочненных образцов, сравнение проводилось только по промежуточной (соответствующей ~ 40% долговечности) и конечной поврежденности, полученной с помощью компьютерного моделирования (рис. 4).

На рис. 4 черный цвет определяет зависимость относительной поврежденности (числа разрушенных структурных элементов) от числа циклов при амплитуде напряжения 53 кг/мм^2 для образца в исходном состоянии (черный цвет) и для образца после поверхностной обработки (серый цвет); точки соответствуют значениям коэрцитивной силы (H_c).

В работе [7] было установлено, что наблюдаемое уменьшение величины коэрцитивной силы после поверхностного пластического деформирования (точки 1 и 2 на рис. 4 соответственно) свидетельствует об уменьшении степени деградации материала в результате залечивания накопленных усталостных дефектов. Проведенная промежуточная поверхностная обработка исследуемых образцов позволила повысить их долговечность в 2,8 – 3,4 раза. В связи с этим появляется реальная возможность использовать различного рода поверхностные обработки для залечивания дефектов изделий, бывших в эксплуатации и нуждающихся в снижении уровня деградации металла с целью продления их ресурса.

Из этого заключения, а также из рис. 4 следует, что, даже имея ограниченное количество значений коэрцитивной силы материала в процессе его циклического нагружения, можно, используя смоделированную кривую накопления усталостных повреждений, прогнозировать степень дальнейшей деградации материала.

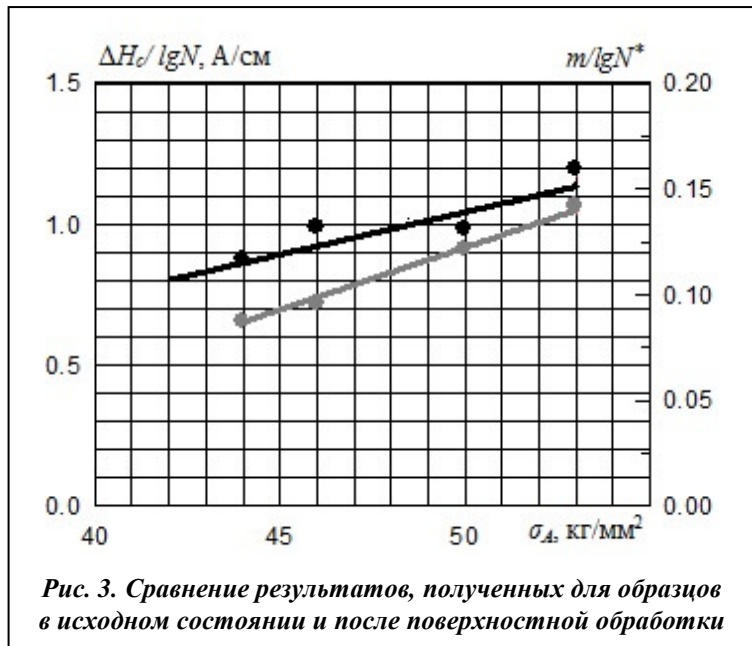


Рис. 3. Сравнение результатов, полученных для образцов в исходном состоянии и после поверхностной обработки

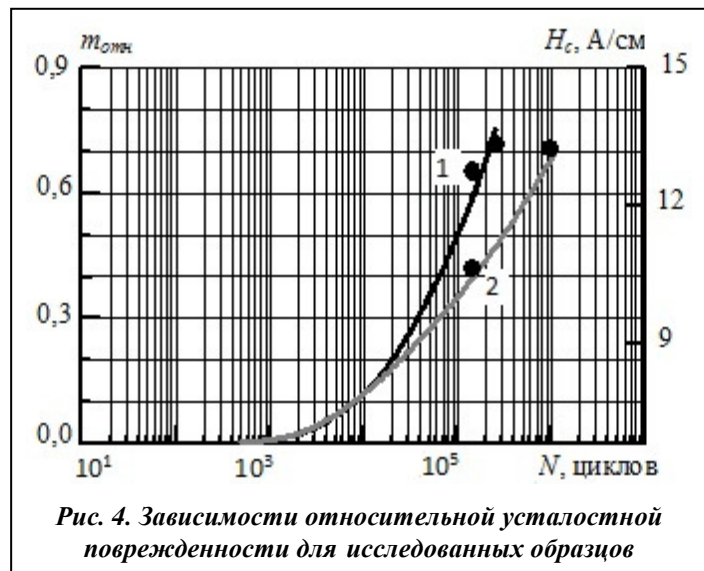


Рис. 4. Зависимости относительной усталостной поврежденности для исследованных образцов

Выводы

Установлено, что комплексный подход, сочетающий коэрцитиметрический контроль с компьютерным моделированием процесса накопления усталостной поврежденности в исследованных образцах, может быть использован не только для прогнозирования их усталостной долговечности, но и для оценки эффективности способов поверхностной обработки.

Показано, что, используя текущие значения коэрцитивной силы и результаты компьютерного моделирования для определения уровня накопленной усталостной поврежденности металла в процессе циклического нагружения, можно провести оценку отработанного ресурса и выполнить прогноз остаточного ресурса по предельно допустимой величине усталостной поврежденности.

Отличительной особенностью совместного использования магнитного контроля по коэрцитивной силе и компьютерного моделирования в рамках РЭМ является возможность выявления начальных стадий зарождения дефектов и предупреждения их развития до критических размеров. Такой подход может быть актуальным в связи с переходом от эксплуатации оборудования «на отказ» к работе его с заданным уровнем надежности и безопасности, т. е. с «прогнозируемым ресурсом».

Литература

1. Матюк, В. Ф. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / В. Ф. Матюк, В. Н. Кулагин // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2010. – № 3. – С. 4–14.
2. *Магнитные* методы оценки упругой и пластической деформации при циклическом нагружении сталей / Э. С. Горкунов, Р. А. Саврай, А. В. Макаров, С. М. Задворкин // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – № 2. – С. 6–15.
3. *Обзорная* оценка состояния и детальная экспертиза усталости металла больших размеров объектов и конструкций неразрушающим коэрцитиметрическим методом / Г. Я. Безлюдько, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко, А. Ю. Марченко, Р. Н. Соломаха // *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*. – 2012. – № 3. – С. 57–65.
4. Руднев, А. М. Проблемы мониторинга напряженно-деформированного состояния металлоконструкций подъемных сооружений / А. М. Руднев, В. А. Попов, В. А. Гудошник // *Вісн. СевНТУ: зб. наук. пр.* – 2013. – Вип. 137/2013. – С. 214–220.
5. Милешкин, М. Б. Применение специального расчетно-экспериментального метода для оценки остаточного ресурса элементов конструкций по фактическому состоянию материала / М. Б. Милешкин, И. В. Библик // *Надежность и долговечность машин и сооружений: Междунар. научно-технический сборник*. – Киев: ИПП НАНУ, 2006. – Вып. 27. – С. 304–310.
6. Милешкин, М. Б. Новый подход к применению метода компьютерного моделирования для оценки влияния состояния поверхностного слоя на циклическую долговечность / М. Б. Милешкин, И. В. Библик // *Авиац.-косм. техника и технология*. – 2010. – № 10/77. – С. 127–131.
7. *Изменение* коэрцитивной силы при усталостных испытаниях образцов из стали 40X / К. В. Вакуленко, И. Б. Казак, Г. Я. Безлюдько, В. Г. Ярещенко, Е. И. Елкина // *Пробл. машиностроения*. – 2015. – Т. 18, № 2 – С. 66–71.
8. Безлюдько, Г. Я. Оценка усталостного и напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и оборудования, включая прогноз остаточного ресурса, по измерениям магнитной характеристики – коэрцитивной силы / Г. Я. Безлюдько, Б. Е. Попов, Р. Н. Соломаха // *Техн. диагностика и неразрушающий контроль*. – 2014. – № 1. – С. 55–58.
9. Иванова, В. С. Усталостное разрушение металлов / В. С. Иванова – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1963. – 272 с.
10. Биргер, И. А. Сопrotивление материалов / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
11. *Practical* evaluation of fatigue and stress state, and residual life of metal by non-destructive method for measuring magnetic characteristic “The coercive force” – A case study / R. Solomakha, R. D. Pittala, G. Bezlyudko, V. V. Baskaran // *Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT)*, Mumbai, India, November 18–22, 2013. – P. 1–9.

Поступила в редакцию 21.03.17