

УДК: 537.624.8: 539.388.1, 539.422.24

**В. М. Мацевитый**, д-р. техн. наук

**К. В. Вакуленко**, канд. техн. наук

**И. Б. Казак**, канд. техн. наук

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

## **О РАЗЛИЧИЯХ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ И МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ**

*Рассмотрены различия в механизмах накопления разрушений при малоцикловой и многоцикловой усталости с точки зрения эффективности метода коэрцитивной силы для диагностики степени дефектности металла в условиях циклического нагружения. Отмечено, что при циклическом нагружении с высокими амплитудами с большей вероятностью протекает разрушение по границам зерен, что вызывает наиболее грубые разрушения. При малых амплитудах нагружения наиболее вероятен механизм внутризеренного разрушения. Сделан вывод, что с этими различиями связана высокая чувствительность метода коэрцитивной силы к развитию малоцикловой усталости и значительно меньшая – к многоцикловой усталости.*

*Розглянуто відмінності у механізмах накопичення руйнувань при малоцикловій і багатоцикловій втоми з точки зору ефективності методу коерцитивної сили для діагностики ступеня дефектності металу в умовах циклічного навантаження. Відзначено, що за циклічного навантаження з високими амплітудами з більшою ймовірністю протікає руйнування межами зерен, що викликає найбільш грубі руйнування. За малих амплітуд навантаження найбільш вірогідний механізм внутрішньозеренного руйнування. Зроблено висновок, що з цими відмінностями пов'язана висока чутливість методу коерцитивної сили до розвитку малоциклової втоми і значно менша – до багатоциклової втоми.*

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость, многоцикловая усталость, межзеренное разрушение, внутризеренное разрушение, субмикротрещины, накопление разрушений, коэрцитивная сила

### **Введение**

Процесс пластической деформации металла – это, как известно, процесс относительного перемещения его элементарных объемов под воздействием нагрузки, при котором изменяется форма тела, но не появляются существенных нарушений его сплошности, приводящих к макроскопическому разрушению. На наш взгляд, если не принимать во внимание самых начальных стадий пластической деформации, можно говорить о диалектическом единстве пластической деформации и разрушения: пластической деформации не бывает без разрушения, а разрушения – без пластической деформации. Несплошности в металле (превышающие по размерам межатомные расстояния) появляются практически сразу же после начала пластической деформации и связаны прежде всего с её неоднородностью, которая на разных масштабных уровнях связана с дислокациями, дисклинациями, границами зерен и блоков, поверхностью металлов. Неоднородности пластической деформации вызывают перенапряжения, следствием которых является разрыв межатомных связей и образование несплошностей различных размеров.

Изменению структуры и физико-механических свойств металла при пластической деформации посвящено очень много работ. В частности, исследовано влияние циклического нагружения при разных амплитудах на прочность и пластичность, твердость и микротвер-

дость, критерии хрупкой прочности, электропроводность, внутреннее трение, модуль упругости, магнитные свойства [1].

Анализ этих работ показывает, что перечисленные свойства «реагируют» на циклическое нагружение, однако основные их изменения происходят на самой начальной стадии нагружения и далее уже непосредственно перед разрушением.

Значительные перспективы, на наш взгляд, имеют также такие неразрушающие методы, как метод электросопротивления, акустические методы и метод микроидентификации [2], который, по-видимому, можно было бы модифицировать применительно к задачам диагностики состояния материала дорогостоящих изделий.

Одним из немногих свойств, которые изменяются заметно в течение всего периода «жизни» металла, является коэрцитивная сила  $H_c$ . Именно это обстоятельство вызвало появление соответствующего направления диагностики структурного состояния деформированных ферромагнетиков. Обзор работ, посвященных физике влияния структуры ферромагнетика на его магнитные свойства, изложен в [3]. В частности, отмечается, что весьма важным фактором влияния на  $H_c$  является взаимодействие границ блоков с дефектами металла. Об этом также говорится в работе [4]. Очень важно, что дефекты типа несплошностей кристаллической решетки можно рассматривать как магнитные неоднородности, вследствие чего эти дефекты должны оказывать тормозящее влияние на стенки доменов при перемагничивании ферромагнетиков.

Необходимо обратить внимание на то, что все результаты полезного практического использования метода коэрцитивной силы, как правило, касаются зон концентрации напряжений при статическом и циклическом нагружениях с большими амплитудами (малоцикловая усталость), а также использования сталей, имеющих в исходном состоянии значительную пластичность [5, 6]. Именно для этих условий величина коэрцитивной силы изменяется при нагружении металла в несколько раз, что и обеспечивает высокую разрешающую способность метода с возможностью надежного определения остаточного ресурса изделия. Важно при этом также заметить, что основные результаты получены на сталях, имеющих слабый эффект магнитострикции, что упрощает влияние развития дефектной структуры на коэрцитивную силу и облегчает интерпретацию результатов.

Результаты использования метода коэрцитивной силы для анализа степени дефектности структуры металла, находящегося под воздействием циклического нагружения с малыми амплитудами (многоцикловая усталость) свидетельствуют о том, что в этом случае прирост коэрцитивной силы меньше, чем при высоких амплитудах [7].

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является выяснение различий механизмов разрушения металлов при малоцикловой и многоцикловой усталости.

### **Механизмы накопления усталостного разрушения при изменении амплитуды напряжений**

Гипотетический механизм любого процесса не должен противоречить наиболее достоверным особенностям его проявления. Пожалуй, важнейшей особенностью накопления усталостного разрушения металлов является зависимость интенсивности разрушения от наличия кислорода в окружающей среде. Интенсивность усталостного разрушения существенно снижается по мере уменьшения содержания кислорода в среде, что свидетельствует о важной роли кислородных атомов в механизме накопления разрушений.

Второй важной особенностью проявления механизма накопления разрушений при усталости является существенное влияние на усталость состояния поверхности образцов, наличия концентраторов напряжений (это влияние при циклическом нагружении существенно более серьезное, чем при статическом). С учетом того что долговечность образца в условиях циклического нагружения можно увеличить во много раз путем многократного удаления (через определенные периоды времени) тонких поверхностных слоев образца, можно утверждать, что разрушение зарождается и накапливается прежде всего на поверхности образца (в опасном его сечении) и со временем распространяется по направлению к его

центру. Можно также утверждать, что зарождению разрушений способствуют поверхностные дефекты, выполняющие роль концентраторов напряжений.

Третьей важной особенностью проявления механизма накопления усталостного разрушения является поведение напряжений II рода, которые при усталости полностью или частично снимаются. К этому следует добавить упрочнение и разупрочнение металла при усталости, о чем можно судить по зависимости механических свойств при статических испытаниях металла от числа циклов предварительного нагружения: при увеличении числа циклов вслед за упрочнением металла следует его разупрочнение. Эти обстоятельства свидетельствуют о том, что при усталости серьезную роль играет конкуренция процессов упрочнения и разупрочнения, причем разупрочнение при усталости проявляется значительно сильнее, чем при статическом нагружении.

По-видимому, следует говорить о высокой интенсивности динамического отдыха металла при циклическом нагружении, чему может способствовать изменение направления деформации в каждом цикле и связанное с этим "обратное" движение дислокаций с частичной аннигиляцией дислокаций противоположного знака, облегчение поперечного скольжения и переползания в связи с локальным повышением температуры в деформированных объемах, увеличение концентрации точечных дефектов, вызванное как самой деформацией, так и повышением температуры металла в микрообъемах. Кроме того, разрушению может способствовать массовое образование зародышевых трещин (этот процесс некоторые исследователи считают основным релаксационным процессом, благодаря которому возможна последующая деформация).

Необходимо также отметить, что циклическое нагружение, особенно при больших частотах и амплитудах, можно рассматривать как динамическое, импульсное нагружение, в связи с чем, как следует из работ [8, 9], при циклическом нагружении можно ожидать значительного снижения модуля упругости (и это действительно наблюдается [9]), что является следствием уменьшения сил межатомного взаимодействия при импульсном нагружении. Чем выше растягивающее импульсное напряжение, тем существеннее уменьшение сил межатомной связи в соответствующем объеме твердого тела.

Это должно приводить к весьма кратковременному (связанному с малой продолжительностью импульса), но значительному облегчению разрыва межатомных связей и увеличению подвижности атомов.

Четвертой особенностью проявления механизма накопления усталостного разрушения можно считать вероятность межзеренного разрушения. При этом замечено, что вероятнее проявление межзеренного разрушения при больших амплитудах, причем в данном случае отрицательное влияние кислорода атмосферы на разрушение выше, чем при низких амплитудах. При малых амплитудах более вероятно внутризеренное разрушение.

Мы считаем, что можно говорить о быстрой деградации границ при больших амплитудах циклического нагружения, что следует понимать как быстрое накопление разорванных межатомных связей между атомами соприкасающихся поверхностей соседних зерен с постепенным ослаблением связи приповерхностных зерен друг с другом и зарождением на межзеренной границе субмикротрещины. Нужно заметить, что межзеренное разрушение характерно и для условий высокотемпературной ползучести, когда вдоль границ идет активная самодиффузия.

Пятой особенностью механизма накопления усталостного разрушения, по-видимому, можно считать параллельное протекание разрушения по границам зерен и по телу зерен при любой амплитуде напряжения, однако с разной вероятностью проявления этих видов разрушения (рис. 1).

Мы разделяем точку зрения Ивановой В. С., что свидетельством перехода от одного механизма накопления разрушения к другому при изменении амплитуды деформации может служить сама кривая Веллера, которую можно разделить на два прямолинейных участка, при этом каждому участку соответствует свой наклон и, по-видимому, своя энергия активации процесса.

Некоторые считают, что при низких амплитудах напряжений наряду с дислокационным механизмом развития внутризеренного разрушения определенную роль играет и вакансионный механизм, который заключается в конденсации на границах субзерен образующихся при усталости вакансий, а также в их объединении в микропоры или микротрещины.

При рассмотрении возможного механизма накопления усталостного разрушения, кроме перечисленных обстоятельств, нужно иметь в виду, что в соответствии с работами [10, 11] пластичность металла зависит от его способности залечивать образующиеся при деформации субмикротрещины.

Мы считаем, что основные положения механизма адгезии металлов друг к другу [12] полностью справедливы и для случая аутогезии, т.е. по существу для случая залечивания субмикротрещин в металле в процессе самой деформации.

Учитывая изложенное, мы видим процесс накопления разрушения при малоцикло-вой усталости следующим образом.

При циклическом нагружении с высокими амплитудами напряжений (например, при растяжении-сжатии) процесс упругой и пластической деформаций металла в опасном сечении приводит, прежде всего, к увеличению плотности дислокаций в плоскостях скольжения в пределах приповерхностных зерен образца, а также к относительному перемещению этих зерен относительно друг друга, в том числе и к некоторому их развороту, что, по-видимому, определяется избытком дислокаций одного знака. На этот процесс накладывается другой, заключающийся в стремлении внешней нагрузки оторвать одну часть образца от другой. Поскольку сильно разориентированные зерна имеют несколько разрыхленные границы (с чем, кстати говоря, связана более высокая скорость граничной диффузии по сравнению с объемной), то нагрузка, приходящаяся на участок границы двух связанных между собой зерен, расположенный перпендикулярно оси образца, распределяется на ограниченное число межатомных связей в пределах указанной поверхности (рис. 2). Это приводит к высоким удельным, приходящимся на одну связь напряжениям. Как уже отмечалось, при высоких растягивающих напряжениях, прилагаемых в импульсном режиме, межатомные связи ослабевают и могут даже разорваться. Повторяющиеся импульсные нагружения приводят в результате к постепенному, но весьма быстрому раскрытию границы и образованию на ее месте сначала субмикротрещины, а затем и микротрещины.

Отметим, что разрушение на указанных площадках границ зерен осуществляется предположительно не по дислокационному механизму, а синхронным разрывом атомных связей на некоторой площади межзеренной поверхности. На участках границ зерен, расположенных параллельно приложенной нагрузке (либо под малым углом к этому направлению) должно происходить проскальзывание, что может осуществляться по дислокационному механизму пластического среза соответствующих мостиков адгезионного зернограничного шва. Ситуация при разрушении обостряется еще и тем, что в образовавшуюся полость (щель между зернами, которая выходит на поверхность образца) проникают атомы кислорода, которые окисляют свободную поверхность полости и делают невозможным её залечивание при снижении растягивающих напряжений и даже при приложении сжимающих напря-

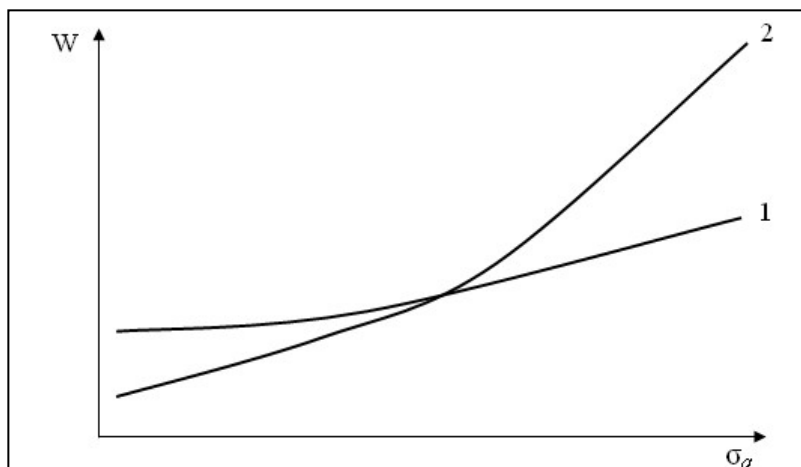
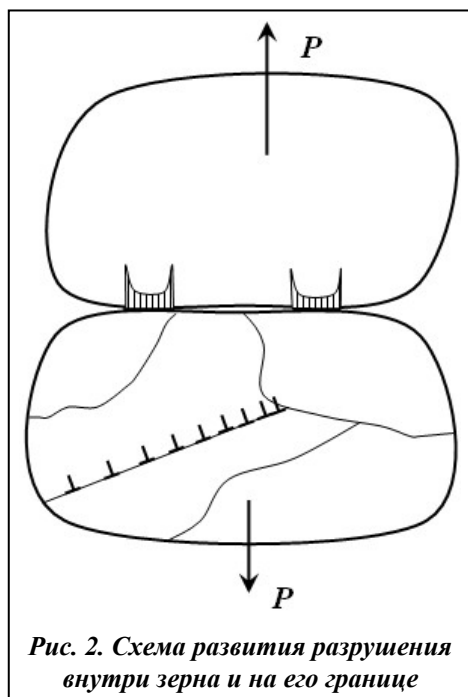


Рис. 1. Схема зависимости вероятности разрушения по зерну (1) и по границам зерен (2) от амплитуды циклического нагружения



**Рис. 2. Схема развития разрушения внутри зерна и на его границе**

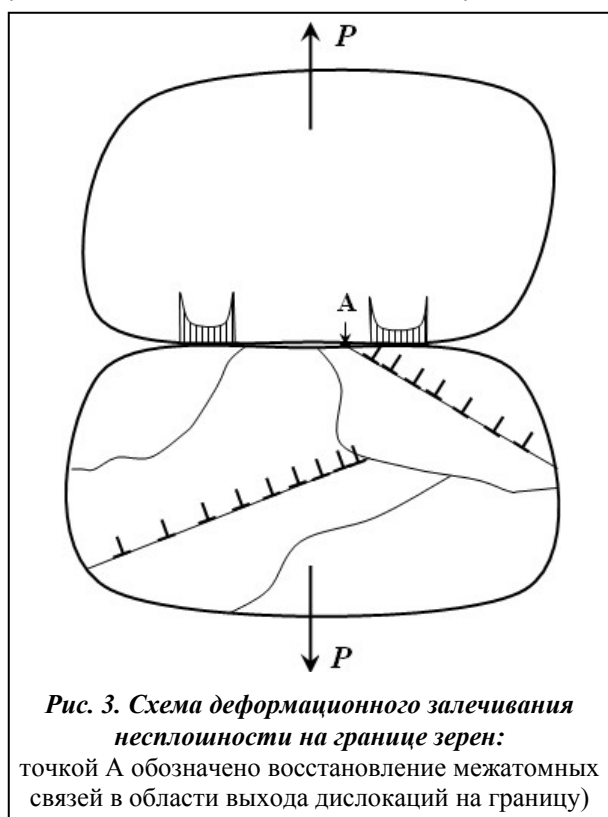
жений<sup>\*)</sup>. Все это, безусловно, ускоряет процесс разрушения. Разрушение по границам протекает существенно быстрее, чем процесс образования дислокационных скоплений внутри зерна, который мог бы привести к внутризеренному разрушению. Если внутризеренное разрушение при больших амплитудах и происходит в каком-то объеме материала, то оно не становится определяющим: процесс межзеренного разрушения его опережает (см. рис. 1).

В связи с изложенным уместно привести следующий пример: долговечность свинца при циклических нагрузках в условиях вакуума не только увеличивается, но при этом происходит и переход от межзеренного разрушения в условиях воздуха атмосферы к внутреннему разрушению в вакууме [13].

При малых амплитудах нагружения межзеренное разрушение замедляется, поскольку приложенного уровня напряжений не хватает для существенного ослабления межатомных связей между соприкасающимися зернами. Что касается внутризеренного разрушения, то оно, безусловно, происходит, правда, с мень-

шей скоростью, чем при высоких напряжениях.

Известно, что предварительное малоамплитудное нагружение упрочняет границы зерен и делает невозможным межзеренное разрушение при последующем циклировании в условиях действия больших амплитуд. Мы связываем это упрочнение границ зерен с увели-



**Рис. 3. Схема деформационного заживления несплошности на границе зерен: точкой А обозначено восстановление межатомных связей в области выхода дислокаций на границу)**

чением плотности межатомных связей между атомами поверхностей сопряженных зерен, что является результатом образования новых адгезионных связей между зернами. Этот процесс инициируется выходом на рассматриваемую границу внутризеренных дислокаций (рис. 3).

Быстрое накопление разрушений на границах зерен при больших амплитудах определяет процесс дальнейшего разрушения: разрыв между двумя соседними зернами – это по существу появление микротрещины. Соединение нескольких микротрещин существенно ослабляет сечение образца, что приводит к увеличению фактических циклических напряжений и обеспечивает ускорение дальнейшего разрушения и появления в результате уже такой макротрещины, которая может распространяться самостоятельно, причем не обязательно по границам зерен.

При циклическом нагружении с малыми амплитудами дислокации скапливаются в плоскостях скольжения перед эле-

<sup>\*)</sup> Появление атомарного кислорода в полости трещины связано с тем, что молекулы кислорода, попадая на активированную разрушением поверхность, диссоциируют.

ментами структуры, которые служат барьерами для их дальнейшего продвижения. Внутренние напряжения в микрообъемах металла вблизи этих дислокационных скоплений создают условия, благоприятные для постепенного растрескивания (превращения указанных скоплений в субмикротрещины). Это происходит благодаря термофлуктуационному (медленному!) накоплению элементарных разрывов атомных связей, что поддерживается растягивающими суммарными напряжениями (суммой внутренних напряжений и напряжений, возникающих в каждом цикле от внешней нагрузки). Такие напряжения являются своеобразным вентилем, обеспечивающим «целое направление» разрушающей работы термических флуктуаций.

Следует отметить, что термические флуктуации способствуют и восстановлению разорванных связей до тех пор, пока расстояние между берегами субмикротрещины могут преодолеваются валентными электронами поверхностных атомов (атомов на противоположных берегах субмикротрещины). Проникновение атомов кислорода в эти зоны затруднено по сравнению с границами зерен. В результате кислород в меньшей степени влияет на внутризеренное разрушение. Данные факторы замедляют процесс разрушения. Но это происходит до момента, когда перекрытие валентных орбиталей даже при воздействии термических флуктуаций становится невозможным. После этого рост субмикротрещины ускоряется, и она быстро выходит на уровень микротрещины – необратимого элемента разрушения. Дальнейшее разрушение происходит в результате развития микротрещин и объединения их в магистральную макротрещину, распространение которой приводит к полному разрушению образца. Скорость этого процесса должна во многом определяться как напряженным состоянием твердого тела, так и его структурой. Сильно упрочненная структура металла, насыщенная дислокациями, будет требовать малой работы внешних сил для развития микротрещин, и процесс разрушения будет идти быстро (хрупкое разрушение). И, наоборот, при слабом упрочнении развитие микротрещины потребует значительной работы внешних сил (вязкое разрушение).

Механизм внутризеренного разрушения в целом, по-видимому, соответствует схеме усталостного разрушения Ивановой В. С. [1], которая привязывает эволюцию дефектной структуры металла к четырем стадиям усталости.

В соответствии с этой схемой на первой стадии происходит рост плотности дислокаций и концентрации других дефектов кристаллического строения, что сопровождается упрочнением металла.

На второй стадии скорость упрочнения металла существенно уменьшается, и появляются субмикротрещины. Это трещины, которые по своему размеру таковы, что не могут служить концентраторами напряжений. Субмикротрещины являются обратимыми дефектами, которые могут быть «залечены» существенным нагревом металла (при рекристаллизационном отжиге, например, или путем сильной деформации в условиях высоких сжимающих напряжений). На протяжении второй стадии количество субмикротрещин увеличивается, и они взаимодействуют друг с другом, что приводит к образованию микротрещины, т.е. дефекта, который уже является необратимым (этим заканчивается вторая и начинается третья стадия).

На третьей стадии идет взаимодействие и подрастание микротрещин, их слияние, что приводит к образованию макротрещины. Это конец третьей и начало четвертой последней стадии – стадии окончательного разрушения, в течение которой макротрещина подрастает до критического размера и далее быстро распространяется в металле (хрупкая фаза разрушения), после чего следует фаза долома, когда металл доламывается вязко.

Важным обстоятельством является то, что уверенно регистрировать появление очагов разрушения металла с помощью методов дефектоскопии можно лишь тогда, когда в теле появилась макротрещина, т.е. на четвертой стадии усталости, и весьма ненадежно – на третьей стадии, когда в теле уже есть микротрещины, но найти их очень трудно. Получается, что надежно определять наличие элементов разрушения можно лишь в самом конце «жизни» металла. Такая ситуация, конечно, затрудняет оценку остаточного ресурса металла конкретных изделий, работающих в условиях многоциклового нагружения, при этом не всегда

удается вовремя прекратить эксплуатацию изделия, не доводя его до разрушения, что, как правило, является причиной несчастных случаев и больших экономических потерь.

В случае малоциклового усталости (в отличие от многоциклового) накопление разрушений достаточно уверенно регистрируется практически в течение всей жизни металла методом коэрцитивной силы. Причем высокая чувствительность коэрцитивной силы к накоплению разрушения в случае малоциклового усталости, на наш взгляд, связана с различием в структурных проявлениях процесса накопления разрушений при больших и малых амплитудах, о чем речь шла выше. В частности, межзеренное разрушение может способствовать большему пластическому деформированию металла в результате межзеренного проскальзывания и поворотных мод макроскопической деформации вблизи границ зерен. Высокая чувствительность коэрцитивной силы к значительной пластической деформации имеет место также при статическом растяжении металлов.

### Заключение

Предполагаемое нами различие в механизмах усталостного разрушения при больших и малых амплитудах напряжений должно приводить к тому, что при больших амплитудах идет накопление более грубых (по сравнению с малыми амплитудами) элементов разрушения, которые обеспечивают большую магнитную неоднородность металла и, как следствие, большие энергетические затраты на передвижение границ доменов при перемагничивании. Поскольку коэрцитивная сила является одной из важнейших характеристик петли гистерезиса, площадь которой отражает энергетические затраты на перемагничивание материала, можно ожидать, что более грубые неоднородности магнитной структуры, возникающие при малоциклового усталости, обеспечивают и большие изменения коэрцитивной силы. Мы считаем, что именно с этим связана высокая «чувствительность» коэрцитивной силы к развитию малоциклового усталости и значительно меньшая – к многоциклового усталости.

### Литература

1. *Иванова, В. С.* Усталостное разрушение металлов / В. С. Иванова. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по чёрной и цветной металлургии, 1963. – 272 с.
2. *Мильман, Ю. В.* Новые методики микромеханических испытаний материалов методом локального нагружения жестким индентором / Ю. В. Мильман. // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. – Киев: Наук. думка, 1998. – С. 637–656.
3. *Михеев, М. Н.* Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества – физическая основа магнитного структурного анализа: обзор / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов // Дефектоскопия. – 1981. – № 8. – С. 5–22.
4. *Физическое металловедение.* Вып. 1. Атомное строение металлов и сплавов / Под ред. Р. Кана. – М.: Мир, 1967. – 334 с.
5. *Безлюдько, Г. Я.* Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом / Г. Я. Безлюдько // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 2. – С. 20–26.
6. *Обзорная оценка состояния и детальная экспертиза усталости металла большиеразмерных объектов и конструкций неразрушающим магнитным методом / Г. Я. Безлюдько, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко и др. // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 3. – С. 57–65.*
7. *Способность к перемагничиванию стали 14X17H2 после термообработки,ковки и циклического нагружения / В. М. Мацевитый, Г. Я. Безлюдько, Е. В. Белоус и др. // Пробл. машиностроения. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 79–85.*
8. *Lazan, B.* Damping, elasticity and fatigue properties of unnotched and notched N-155 alloy at room and elevated temperatures / B. Lazan, L. Demer // Proc. ASTM. – 1951. – Vol. 51. – P. 611–617.
9. *Lazan, B.* Damping fatigue and dynamic stress-strain properties of mild steel / B. Lazan, T. Wu // Proc. ASTM. – 1951. – Vol. 51. – P. 649–655.
10. *Лариков, Л. Н.* Залечивание дефектов в металлах / Л. Н. Лариков – Киев: Наук. думка, 1980. – 280 с.
11. *К физическому механизму разрушения металлов / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко и др. // Пробл. машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 5–6. – С. 87–96.*
12. *Вакуленко, К. В.* Обобщенная концепция адгезии твердых тел / К. В. Вакуленко, И. Б. Казак, В. М. Мацевитый // Восточ.-Европ. журн. передовых технологий. – 2008. – № 4. – С. 13–23.

13. *Snowden, K. U.* Surface deformation differences between lead fatigued in air and in partial vacuum /  
K. U. Snowden, J. N. Greenwood // *Trans. Metallurgical Soc. AIME.* – 1958. – P. 626–630.

Поступила в редакцию  
07.02.14