

Grinding Damage Detection in Gears and Bearing Balls Using Magnetic Barkhausen Emission Technique

B. A. Shaw,
V. Moorthy

The method of analysis of the magnetic Barkhausen noise (MBN) can detect various grinding defects without need for any special surface preparation. In this paper experimentally confirmed a significant increase of MBN at the grinding damaged region compared to undamaged region. The severity of grinding damage as indicated by the MBN analysis and the Nital etching are compared. It has been found that the MBN analysis have better sensitivity to detect less severe grinding damage than Nital etching due to the combined influence of both microstructural softening and increase in tensile residual stresses on the MBN signal level.



ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ШЛИФОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ШАРИКОВ ПОДШИПНИКОВ МЕТОДОМ АНАЛИЗА МАГНИТНЫХ ШУМОВ БАРКГАУЗЕНА

Введение

Выявление дефектов шлифования есть первичная задача контроля качества в производстве зубчатых колес и подшипников. В большинстве отраслей как метод контроля качества широко используется метод кислотного травления, который позволяет обнаружить дефекты шлифования только на поверхности компонентов. Травление не выявляет повреждения под поверхностью, а также не определяет степень тяжести повреждений, что необходимо для оценки пригодности заготовки для переточки с целью удаления поврежденного слоя. Необходимо также опытный специалист для обнаруже-

ния слабых или не очень серьезных повреждений. Кроме того, повсеместно растет озабоченность из-за экологических проблем, связанных с утилизацией большого количества химических веществ, используемых при проверке травлением. Следовательно, существует необходимость в альтернативном методе для определения дефектов шлифования. В настоящее время растет интерес к использованию метода анализа магнитных шумов Баркгаузена (МШБ) для обнаружения шлифовальных дефектов, поскольку он потенциально позволяет обнаружить шлифовальные дефекты различной степени тяжести и предоставляет возможность быстрой проверки без необходимости какой-либо специальной подготовки поверхности. Метод МШБ (при анализе низких частот) также способен обнаруживать дефекты под поверхностью на глубине до 300 мкм [1–3].

В статье приводятся результаты некоторых исследований, которые показывают возможность применения метода анализа МШБ высокой частоты для обнаружения дефектов шлифования зубьев реальных зубчатых колес и шариков подшипников.

Также показана важность оптимизации настройки устройств, измеряющих МШБ, для достижения наилучшей чувствительности выявления шлифовальных дефектов разной степени тяжести. Приводятся некоторые результаты измерений МШБ, проведенных на цилиндрических зубчатых колесах и шариках подшипников со шлифовальными повреждениями различной степени тяжести. В настоящей публикации рассматриваются преимущества метода МШБ над кислотным травлением, особо подчеркивается более высокая чувствительность метода МШБ в части обнаружения шлифовальных дефектов малой и средней степени тяжести.

Методика выполнения работы

В данном исследовании использовались прямозубые шестерни диаметром 160 мм с модулем, равным 8, закаленные токами высокой частоты и прошедшие лазерное упрочнение поверхности (LSP). Эти шестерни были отшлифованы для достижения эвольвентного профиля зубьев. В процессе шлифования шестерен возникли различные поврежде-

Сотрудники Конструкторского отдела Школы инженерного и системного проектирования (School of Mechanical and Systems Engineering) Университета Ньюкасла (Newcastle University), Великобритания:



Шай
Брайан А.

Начальник отдела, доктор наук.

Мурси
Вайдхианасасами

Научный сотрудник, доктор наук.



Рис. 1. Датчики МШБ производства Stresstech Oy, Финляндия для измерения: а – на боковой поверхности зуба шестерни; б – плоский датчик общего назначения

ния по неизвестным причинам. В исследовании также были использованы шарики подшипников диаметром 1 дюйм (2,54 см) и 2,86 см, которые были обработаны с использованием различных методов финишной обработки. Эти шарики предположительно имеют различные приповерхностные повреждения в виде изменения микроструктуры и остаточных напряжений.

Измерения МШБ высокой частоты были использованы для понимания влияния микроструктурных изменений и остаточного напряженного состояния, вызванных шлифованием/процессами финишной обработки, на поверхность материала. Измерения МШБ высокой частоты выполнялись при частоте возбуждения 125 Гц, а сигналы МШБ в диапазоне частот 70–200 кГц был считаны и проанализированы с помощью системы Microscan/Rollscan производства компании Stresstech Oy, Финляндия. Датчик МШБ для контроля поверхности зуба состоит из специально изогнутых ферритовых полюсных наконечников, которые соприкасаются с боковой поверхностью зуба по линии (рис. 1а). Этот датчик обеспечивает довольно неплохую повторяемость сигнала МШБ на большинстве боковых поверхностей зубьев с различными размерами и геометрией. Тем не менее, мы считаем, что геометрия полюсных наконечников может быть дополнительно оптимизирована для точного соответствия профилю зуба для повышения проникновения магнитного поля. Но это будет специальный сенсор для конкретного типа шестерен, в отличие от сенсора общего назначения, использованного в работе.

Оптимизация электромагнита для поверхности шарика

В ходе исследования авторы пришли к выводу, что оптимизация геометрии

электромагнитных полюсных контактов очень важна для повышения чувствительности метода МШБ, что было доказано при контроле шариков подшипников. Сначала измерения МШБ на некоторых шариках были сделаны с помощью плоского датчика МШБ общего назначения (рис. 1б). Но было обнаружено, что ответный сигнал МШБ был недостаточно хорош. Профиль сигнала МШБ (рис. 2а) показывает наличие острых пиков из-за неэффективного проникновения магнитного поля и помех от утечки магнитного поля. Это связано с влиянием плохого контакта между рабочей поверхностью ферритных полюсных контактов и поверхностью шарика.

На этом основании был сделан вывод о необходимости совершенствования конструкции датчика и практики измерений. Для обеспечения наилучшего контакта с поверхностью шарика рабочая поверхность ферритных полюсных контактов была выполнена с соответствующей кривизной. Кроме того, было разработано и изготовлено специальное приспособление для позиционирования датчика и шарика таким образом, чтобы измерения МШБ могли быть выполнены при вращении шарика во все стороны. Было установлено, что доработка ферритных полюсных контактов и использование специального приспособления для позиционирования значительно улучшили ответный сигнал МШБ, а также его повторяемость (рис. 2б). При сравнении рис. 2а и 2б видно, что пиков можно избежать, а уровень сигнала повысить благодаря лучшему позиционированию датчика с искривленной рабочей поверхностью относительно поверхности шарика и использованию специального приспособления.

Для анализа были использованы такие параметры МШБ, как значения эф-

фективного напряжения, умноженные на 200 (отображается в системе Rollscan), и средний профиль всплесков сигналов. Средний сигнал МШБ рассчитывался путем выпрямления и усреднения 12 всплесков сигнала, профиль МШБ рассчитывался путем скользящего осреднения со сглаживанием по 20 точкам. Поскольку профили МШБ должны быть более или менее симметричны по обе стороны гистерезиса должным образом размагниченного образца, для удобства сравнения уместно использовать один профиль МШБ, соответствующий половине цикла намагничивания.

Несмотря на то, что измерения МШБ высокой частоты, как известно, очень чувствительны к изменениям приповерхностных свойств материала и принимая во внимание необходимость быстрой проверки в реальных условиях производства, мы использовали МШБ высокой частоты в данном исследовании для обнаружения повреждения поверхности. Тем не менее, для обнаружения повреждений, находящихся глубоко под поверхностью, может потребоваться использовать МШБ низкой частоты. Мы также работаем над этим вопросом [3].

Результаты и комментарии

Контроль рабочей поверхности зуба

Измерения МШБ высокой частоты проводились на различных зубчатых колесах со шлифованными зубьями, закаленных токами высокой частоты (ТВЧ). В табл. 1 приведены минимальные и максимальные значения уровня МШБ (эффективное напряжение, умноженное на 200) для различных зубчатых колес и номера зубьев, подозрительных с точки зрения наличия дефектов, в зависимости от уровня МШБ и на основе наблюдения результатов кислотного травления каждого зубчатого колеса. Видно, что есть большие различия

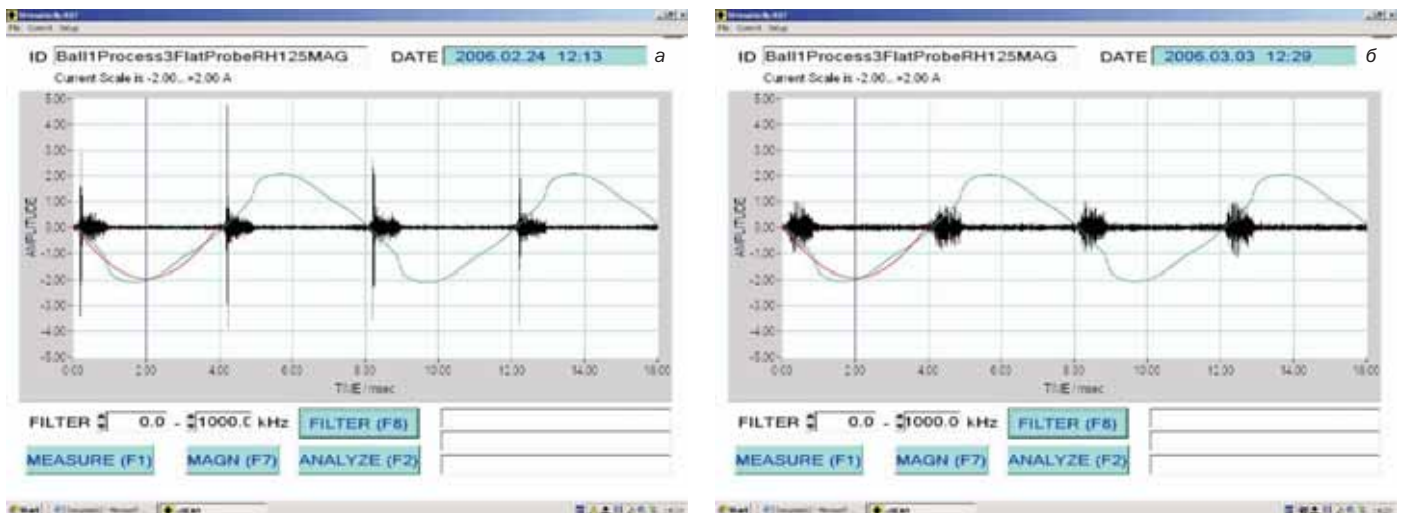


Рис. 2. Сигнал МШБ от шарика подшипника с датчиком с плоскими (а) и изогнутыми ферритовыми полюсами (б)

в уровне МШБ даже в пределах одного зубчатого колеса, что является указанием на наличие повреждений различной степени тяжести в разных зубьях. Обнаружены шлифовальные повреждения на левой боковой поверхности зубьев всех шестерен (кроме ИН2), в то время как правая боковая поверхность большинства шестерен (за исключением ИН6 и ИН49) представляется нормальной. В нормальных, неповрежденных зубьях шестерен, уровень МШБ колеблется в пределах 30–50 единиц. Эта разница обусловлена в первую очередь небольшими изменениями поверхностных остаточных напряжений, вызванных шлифованием.

Было отмечено, что если МШБ превышают уровень в 60 единиц, то это может рассматриваться как указание на присутствие дефекта шлифования. Увеличение уровня МШБ более 80 единиц указывает на наличие серьезного

шлифовального прижога, приведшего к локальному отпуску и изменению остаточных напряжений. Кроме того, когда уровень МШБ больше 80, на присутствие локального отпуска металла, вызванного шлифовальным прижогом, во всех случаях указывают результаты кислотного травления. Однако в случае, когда уровень МШБ находится в диапазоне 60–80, последовательная корреляция между МШБ и результатами кислотного травления отсутствует.

Другой тип прижога отпуска, выявленный кислотным травлением в этих шестернях, показан на рис. 3а–г. В большинстве случаев прижог отпуска обозначен темной областью после травления; он либо локализован, либо расположен по всей ширине рабочей поверхности зуба. Подобного рода локальные пятна или полосы потемнения после травления легко идентифицировать. Тем не менее,

в некоторых случаях на поверхности не будет никаких локализованных повреждений, вместо этого вся область рабочей поверхности зуба окажется в результате травления несколько темнее, чем неповрежденные, как показано на рис. 4а, б. Определить наличие такого нелокализованного дефекта трудно, особенно когда результаты травления имеют слабый контраст – в этом случае требуется большой опыт. В одной из шестерен (ИН6) правая рабочая поверхность одного зуба (Т2) в результате травления показала такое слабое потемнение поверхности по сравнению с другими зубьями, что выглядело подозрительно, но не так очевидно, как в случае локального повреждения. Но на этой рабочей поверхности зуба уровень МШБ показал значение 120 (табл. 1), что значительно выше, чем на других рабочих поверхностях (МШБ в диапазоне 29–45). Этот шестерня была подвергнута испы-

Табл. 1: Сравнение результатов методов МШБ и кислотного травления для различных шестерен после индукционной закалки

| Шестерня № | Тип | Левая боковая поверхность (LF) | | | | | Правая боковая поверхность (RF) | | | | |
|------------|-------------------|--------------------------------|-----|----------------------|----------------------|---|---------------------------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| | | МШБ | | | Кислотное травление | | МШБ | | | Кислотное травление | |
| | | Min | Max | Подозрительные зубья | Подозрительные зубья | Тяжесть | Min | Max | Подозрительные зубья | Подозрительные зубья | Тяжесть |
| ИН2 | Перешлифовка | 45 | 68 | T9, T10, T11 | Нет | Нет потемнения/области прижога отпуска | 33 | 41 | Нет | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН6 | Перешлифовка | 47 | 162 | T1, T2, T3, T9-T12 | T9-T12 | Потемнение/прижог отпуска | 29 | 120 | T2 | T2 | Вся поверхность слегка потемнела |
| ИН7 | Перешлифовка | 44 | 118 | T1-T3, T7-T20 | T1-T3, T7-T20 | Потемнение/область прижога отпуска | 29 | 40 | Нет | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН12 | Перешлифовка | 37 | 96 | T12, T14, T15 | T11-T15 | Местный прижог отпуска | 31 | 48 | Нет | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН9 | LSP+ Перешлифовка | 59 | 133 | Все | T2-T20 | Потемнения различной степени | 29 | 42 | Нет | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН10 | LSP+ Перешлифовка | 50 | 102 | T1-T3, T9-T11 | T1-T4 | Легкое повреждение по высоте ножки зуба | 41 | 61 | T2, T3, T9 | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН11 | LSP+ Перешлифовка | 36 | 104 | T1, T2, T4 | T1-T3, T19, T20 | Средний дефект по ширине зуба | 24 | 40 | Нет | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН14 | LSP+ Перешлифовка | 42 | 103 | T2 – T9 | T1-T11 | Легкое повреждение по высоте ножки зуба ближе к краям | 35 | 54 | Нет | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН15 | LSP+ Перешлифовка | 59 | 80 | Все | Не ясно | Все зубья слегка потемнели, но локальных прижогов нет | 36 | 51 | Нет | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН42 | LSP+ Перешлифовка | 38 | 79 | T1, T2, T19, T20 | Нет | Очевидных прижогов нет | 31 | 56 | Нет | Нет | явный дефект отсутствует |
| ИН49 | LSP+ Перешлифовка | 61 | 126 | Все | Все | Потемнение – шлф. Прижог по всей ширине зуба | 33 | 64 | T14 - T17 | T14-T17 | Потемнение – прижог отпуска |

таниям на контактную усталость с крутящим моментом в 3000 Нм (пиковое контактное напряжение 1750 МПа) при 2675 об/мин в смазке типа OEP-80 при температуре масла 50 °С. Шестерня вышла из строя после 54000 циклов по причине развивающегося выкрашивания и образования раковин на подозрительном зубе (Т2), как показано на рис. 5. Преждевременные контактные усталостные разрушения возникли вследствие серьезного дефекта шлифования на этой рабочей поверхности зуба. Это испытание на усталостное разрушение подтверждает более высокую чувствительность и простоту метода МШБ для обнаружения дефектов шлифования с высокой степенью надежности. Планируется также проверить другие шестерни с повреждениями различной степени для того, чтобы понять влияние шлифовальных прижогов на контактную усталость.

Было установлено, что при уровне МШБ больше 80 есть сильная корреляция между уровнями МШБ и результатами кислотного травления в определении дефектов шлифования. Когда

уровень МШБ меньше 80, то несоответствие между результатами анализа МШБ и кислотного травления связано, как правило, с тем, что повреждения незначительны или они средней степени тяжести. Некоторые из незначительных повреждений, выявленных кислотным травлением и МШБ, показаны на рис. 6а–е. Можно легко заметить, что даже при уровне МШБ > 70 кислотное травление во всех случаях не отображает отчетливо прижоги отпуска. Это несоответствие можно объяснить раз-



Рис. 5. Контактные усталостные повреждения с образованием раковин на правой поверхности зуба № 2 шестерни IN6 после 54000 циклов при пиковой контактной нагрузке 1750 МПа.

личиями в чувствительности кислотного травления и метода МШБ. Известно, что МШБ находится под сильным влиянием как микроструктурного размягчения, так и растягивающих остаточных напряжений, вызванных шлифовальным прижогом отпуска. Но кислотное травление может быть чувствительно только к микроструктурному размягчению. Совместное влияние микроструктурного размягчения и растягивающих остаточных напряжений может привести к повышению чувствительности сигнала МШБ и, следовательно, лучшему обнаружению шлифовальных прижогов отпуска по сравнению с кислотным травлением.

Необходимо отметить, что, когда нормальный диапазон МШБ составляет $\approx 30-50$ для неповрежденной рабочей поверхности зуба, любая поверхность зуба, показывающая сигнал МШБ с уровнем > 60, может рассматриваться как имеющая некоторые шлифовальные прижоги отпуска. Дальнейшие испытания этих шестерен на контактную усталость могут послужить доказательством этого аргумента.

Несмотря на лучшую чувствительность метода МШБ, преимуществом кислотного травления является возможность обнаружения повреждения по краям. Размер электромагнитных полюсных контактов ограничивает применение метода МШБ при измерениях близко к краям. Однако при индукционной закалке шестерен края зубьев показывают потемнения по результатам травления (рис. 3) из-за теплового эффекта, вызванного начальным и конечным положением индуктора. Кроме того, последние достижения в области конструирования зубчатых колес с оптимизацией микрогеометрии обеспечивают возможность избежать контакта по краям в целях предотвращения преждевременного повреждения шестерни, берущего начало от краев. С этой точки зрения, ограничение возможности контроля края не влияет на возможность применения технологии МШБ для проверки шестерен.

Контроль шариков подшипников

Измерения МШБ высокой частоты были выполнены в разных местах по всей поверхности шарика. Во время такого сканирования поверхности шара, если обнаруживалась любая область с более высоким уровнем МШБ, измерения повторялись по всей области. Профили сигналов МШБ зон, подозрительных на наличие дефектов, сравнивались с профилями других случайно выбранных зон. Области, имеющие значительно более высокий уровень МШБ, можно считать дефектными. Это могут быть области с более низ-

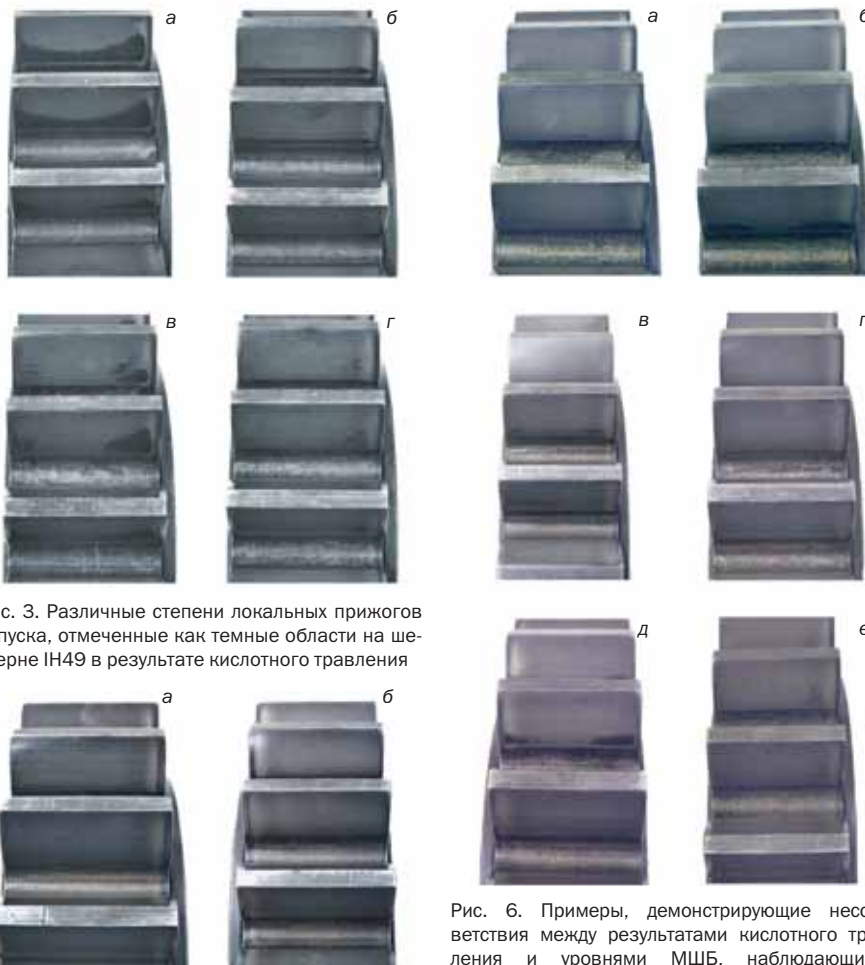


Рис. 3. Различные степени локальных прижогов отпуска, отмеченные как темные области на шестерне IN49 в результате кислотного травления

Рис. 4. Нелокализованный дефект, по результатам травления шестерни IN15 имеется только небольшая разница по всей поверхности зубьев

Рис. 6. Примеры, демонстрирующие несоответствия между результатами кислотного травления и уровнями МШБ, наблюдающиеся в двух разных зубьях одной и той же шестерни: а – IN-T1 МШБ 75; б – IN9-T7 МШБ 74; в – IN11-T20 МШБ 65; г – IN11-T4 МШБ 70; д – IN49-T17-RF МШБ 64; е – IN49-T17-LF МШБ 76

кими сжимающими остаточными напряжениями и /или с меньшей твердостью. Кроме того, в этом предварительном исследовании при сканировании шариков не было обеспечено стопроцентное покрытие поверхности. Важно понимать, что у этих шариков могут быть области поверхности с более серьезными повреждениями. Однако правильное полное сканирование поверхности требует надлежащего поворотного кондуктора.

Типичные профили МШБ, измеренные в нормальных местах по всей поверхности шарика и предполагаемые поврежденные места показаны на рис. 7 и 8 для шариков разных диаметров. Сравнение графиков (рис. 7а и б) показывает, что налицо значительная разница между этими двумя областями. Для подтверждения этих результатов были измерены остаточные напряжения методом рентгеновской дифракции. Величина поверхностных остаточных напряжений в неповрежденном (нормальном) месте составила –893 МПа, а в предположительно поврежденной области –707 МПа. Снижение остаточных напряжений сжатия обусловило повышение уровня МШБ в дефектной области. Однако для подтверждения это-

го должны быть проведены дальнейшие исследования твердости материала и микроструктурный анализ.

Как можно видеть на рис. 8, даже у шарика диаметром 2,86 см имеются области с повышенными уровнями МШБ. На основании результатов, приведенных на рис. 7 и 8, дефектные области шарика могут быть четко выделены по отношению к нормальным областям. Сравнивая рис. 7а и 8а, можно увидеть, что в целом уровни МШБ значительно выше в шарике диаметром 2,86 см, чем в шарике диаметром 2,54 см. Это можно рассматривать как указание на более общие шлифовальные повреждения в первом в противоположность локальным повреждениям, как можно наблюдать на рис. 8б. Это может быть вызвано разницей в финишной обработке поверхностей этих двух шариков.

Выводы

1. Метод анализа МШБ высокой частоты показывает лучшую чувствительность, чем кислотное травление для выявления дефектов шлифования зубьев зубчатых колес.
2. Настоящее техническое исследование ясно показывает, что метод ана-

лиза МШБ высокой частоты может быть использован для надежного обнаружения путем сканирования поврежденных областей поверхности шариков шарико-подшипников.

3. Измерения МШБ высокой частоты позволяют обнаружить повреждение только на и вблизи поверхности. Необходимо дальнейшее продолжение исследований, чтобы оптимизировать параметры измерения МШБ для повышения возможностей обнаружения повреждений в глубине материала и их количественной оценки.

Литература

1. Moorthy V., Shaw B. A., Brimble K. Testing of Case Depth in Case Carburized Gear Steels Using Magnetic Barkhausen Emission Technique. – Materials Evaluation. 2004. V. 62. No. 5. P. 523-527.
2. Moorthy V., Shaw B. A., Mountford P., Hopkins P. Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburized En36 steel. – Acta Materialia. 2005. V. 53. P. 4997-5006.
3. Moorthy V., Shaw B. A. Magnetic Barkhausen emission measurements for evaluation of depth of grinding damage. – In: Proc. 7th Int. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing (ICBM7). – Aachen (Germany): Published by Stresstech Oy, Finland, July 2009.

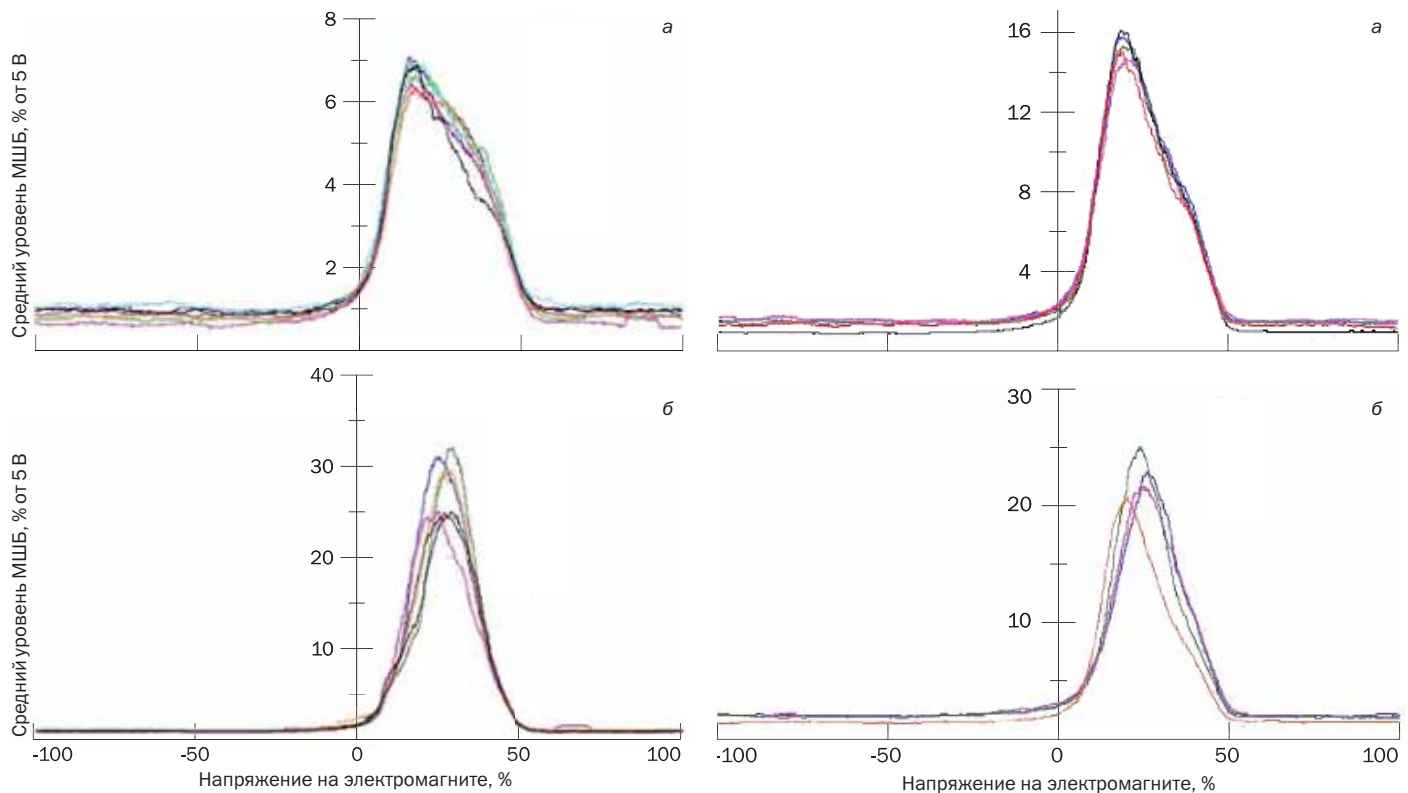


Рис. 7. Профили МШБ, измеренные на шарике диаметром 2,54 см: а – в различных местах по всей поверхности (7 областей); б – повторные измерения в подозрительных на наличие дефекта областях (6 измерений)

Рис. 8. Профили МШБ, измеренные на шарике диаметром 2,86 см: а – в различных местах по всей поверхности (5 областей); б – повторные измерения в подозрительных на наличие дефекта областях (4 измерения)

Статья получена 12 июля 2011 г.