



УДК 621.14.32

# ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА

С. ЛАССЕ (Компания Stresstech Oy, Финляндия)

*Показано, что по сравнению с другими технологиями автоматическая система контроля, основанная на анализе шумов Баркгаузена, обеспечивает наиболее эффективное отслеживание дефектов, вызванных шлифованием, а также является простой в использовании.*

*It is shown that compared to other processes and technologies, automatic system of Barkhausen Noise (BN) monitoring ensures the most efficient detection of defects due to grinding, as well as being easy-to-operate equipment.*

В процессе шлифования деталей из закаленной стали всегда существует вероятность повреждения стали, заключающаяся в возникновении остаточных напряжений или изменений в микроструктуре. Методам обнаружения дефектов подобного рода присущи такие недостатки, как высокая стоимость, длительность, сложность, субъективность либо использование опасных реагентов. Относительно новый метод, известный как анализ шумов Баркгаузена (ШБ), удовлетворяет всем требованиям при выявлении дефектов шлифованной стали и является надежным, нормированным и экономичным. Данная технология проста в применении и помогает практически полностью исключить выпуск бракованной продукции. Анализаторы ШБ используются на производстве как в ручных, так и в полностью автоматических системах контроля. В сочетании с проверкой размеров, испытанием на твердость и периодическим металлографическим анализом метод анализа ШБ обеспечивает полный контроль качества продукции. Анализ ШБ может быть сильным звеном в цепи, ведущей к длительной и надежной работе ответственных узлов и таких деталей, как зубчатые колеса, распределительные и коленчатые валы, подшипники и т. д.

**Техника измерения и оборудование.** В основе анализа ШБ лежит относительно простая технология, заключающаяся в особенностях поведения ферромагнитных материалов в магнитном поле.

При помещении ферромагнетика в магнитное поле происходит изменение результирующей намагниченности, которое является результатом микроскопических движений стенок магнитных доменов внутри материала. При движении доменных стенок возникает электрический импульс, регистрируемый катушкой индуктивности, расположенной рядом с материалом. Данные дискретные импульсы измеряют суммарно, что приводит к компиляции нескольких тысяч электрических импульсов, называемых ШБ [1–5]. Амплитуду данного сигнала иногда называют магнитоупругим параметром (МП). На амплитуду влияют любые явления, препятствующие движению доменных стенок. Это могут быть инородные включения, осадки, дислокации, границы зерен, а также остаточные напряжения. В отношении макрометаллургии данные факторы можно условно разделить на две категории: относящиеся к твердости и к остаточному напряжению. В общем случае ШБ возрастают при уменьшении твердости и увеличении напряжения растяжения, и, напротив, снижаются при увеличении твердости и увеличении напряжения сжатия. Этот принцип проиллюстрирован на рис. 1 и 2.

Принцип работы оборудования, предназначенного для регистрации ШБ, показан на рис. 3. С помощью электромагнита создается магнитное поле, в которое помещается ферромагнитный ма-

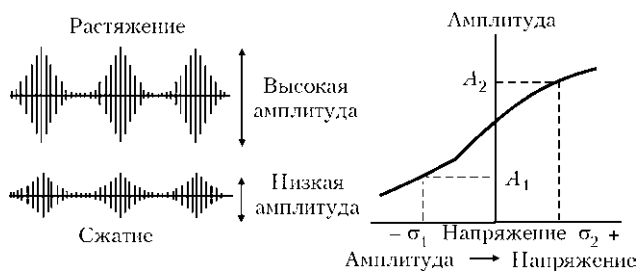


Рис. 1. Влияние напряжений на уровень ШБ

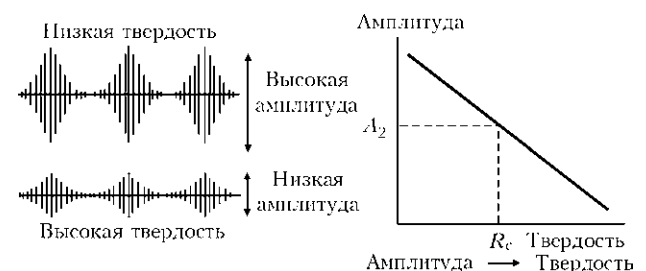


Рис. 2. Влияние твердости на уровень ШБ

© С. Лассе, 2012

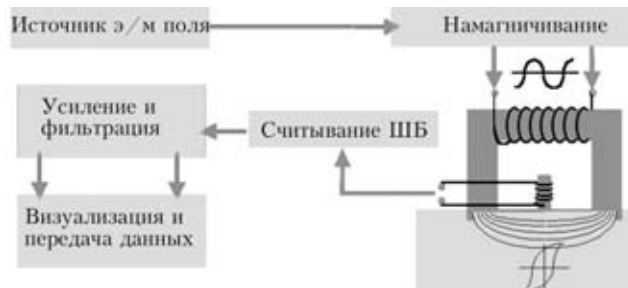


Рис. 3. Принцип работы оборудования для регистрации ШБ

териал. Данный материал реагирует на появление магнитного поля, как описано выше, испусканием пачки импульсов, регистрируемых детектором — катушкой индуктивности. Далее сигнал усиливается и фильтруется. Амплитуда рассчитывается с помощью метода наименьших квадратов, результаты переводятся в цифровую форму для отображения на компьютере.

**Природа дефектов материалов, вызванных шлифованием.** Повреждения при шлифовании представляют собой результат превращения тепловой энергии в теплоту, которая концентрируется в поверхностных слоях и может вызвать нежелательные эффекты. Факторами, вызывающими увеличение температуры в поверхностном слое, являются тип смазочно-охлаждающей жидкости, ее концентрация, срок службы, расход, тип шлифовального диска, его скорость, степень износа, скорость подачи и обработка материала перед шлифованием, т. е. способ термообработки [4]. Предполагают, что повреждение может начаться при частичной релаксации напряжения сжатия при температурах ниже 500 °С. При повышении температуры до 600 °С возникают прижоги класса В, также называемые прижогом с повторным отпуском. Результатом будет являться перегрев, приводящий к снижению твердости поверхности и возникновению напряжений растяжения. Дальнейшее повышение температуры до 720 °С приведет к возникновению прижогов D-класса, называемых подкаливанием. Данный дефект охватывает области очень твердого и хрупкого материала, а также области, окружающие прижог класса В, «мягкий» материал. Остаточные напряжения также будут сложными вследствие изменения уровня повреждения по всей поверхности. В некоторых областях будут наблюдаться сжимающие напряжения, в то время как другие будут чрезвычайно эластичными [4, 6].

Существующие методики обнаружения описанных выше повреждений включают визуальное обследование путем химического травления [7], исследование микротвердости, распределения остаточного напряжения рентгеновской дифракцией и анализом ШБ. Каждый из описанных выше дефектов можно детектировать с помощью анализа ШБ. Рентгеновская дифракция также может при-

меняться в каждом случае, однако этот метод является длительным, дорогостоящим и может быть разрушающим. Травлением растворами и исследованием на микротвердость можно выявить только прижоги В и D класса. Кроме того, исследование твердости является разрушающим способом, а травление — субъективным [4, 6].

Из рис. 1 и 2 видно, что сигнал ШБ возрастает при снижении прочности и напряжения растяжения. Это точный сценарий шлифовального прижога с повторным отпуском (рис. 4). Поскольку повреждения при шлифовании влияют на твердость и напряжение и, следовательно, приводят к увеличению сигнала ШБ, выявить прижоги шлифования анализом ШБ просто: если амплитуда возросла — присутствует прижог. Исключением из этого правила будут зоны повторно закаленные. В этом случае амплитуда сигнала может снижаться, однако, данные зоны всегда окружены чрезвычайно пластичными зонами (зонами отпуска), в области которых происходит сильное увеличение амплитуды ШБ (магнитоупругого параметра).

**Обзор оборудования и операционной системы.** Обычная система контроля (рис. 5) состоит из устройства, передвигающего датчик, вращающегося центра, трехкулачкового патрона с программируемым вращением, анализатора ШБ, компьютера, а также системы сбора данных и программного обеспечения для анализа. Параметры вращения и перемещения датчика программируются компьютером, например, для каждого от-

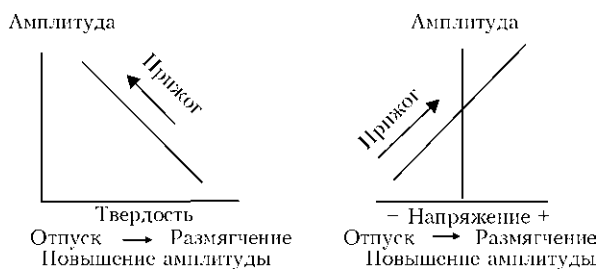


Рис. 4. Влияние шлифовальных прижогов на сигнал ШБ



Рис. 5. Автоматизированная система контроля зубчатых колес



дельного типа зубчатого колеса. Оператор устанавливает зубчатое колесо вручную, выбирает тип колеса из списка в программном обеспечении и запускает процесс. Все остальные операции выполняются автоматически. Датчик перемещается в точку расположения зуба колеса (рис. 6, 7), затем сканирует согласно запрограммированному положению вдоль оси зуба, вплоть до четырех радиальных положений на каждый зуб. Затем зубчатое колесо немного поворачивается, позволяя датчику переместиться к противоположной стороне зуба. Далее датчик отодвигается от зубчатого колеса, и оно снова поворачивается, позволяя датчику переместиться для исследования к следующему зубу. Описанная последовательность операций выполняется для введенного количества зубьев и результаты сканирования выводятся на монитор компьютера, также отображается статус — ПРИ-

НЯТО или ОТБРАКОВАНО (статус вычисляется исходя из запрограммированных условий отбраковки). Систему можно настроить на измерение одного или всех зубьев, также можно задать измерение одного зуба, затем пропустить пятый, измерить шестой и т. д. Как правило, стандартно системе задают выполнение двух сканов на каждую сторону и общее измерение четырех зубьев, расположенных примерно под углом 90°. Данная методика существенно сокращает время измерения по сравнению с измерением каждого зуба без снижения надежности. По завершении измерения результаты будут сохранены в файл или выведены на печать.

**Основы анализа ШБ.** Прежде чем приступить к анализу ШБ, необходимо установить корреляцию между сигналом ШБ и некоторой иной величиной, являющейся мерой серьезности (сложности) повреждения с помощью, например, химического травления. Исходя из выявленной зависимости, для анализатора ШБ можно установить критерий для отбраковки. Один простой метод контроля основан на том факте, что величина МП связана с результатами визуального изучения результатов химического травления. Выполняя множественные измерения деталей и сравнивая с результатами химического травления, можно выявить корреляцию, а также оценить степень прижога, используя магнитуду ШБ либо МП. Изучая зависимость, устанавливают критерии отбраковки, которые вводятся в программу для данного конкретного типа зубчатого колеса. После введения критерия отбраковки можно выполнять анализ ШБ производственных образцов.

Пример настроек, используемых для одного типа зубчатого колеса мотоциклетной коробки передач, приведен на рис. 8. Показана зависимость между МП и визуальным наличием прижога, определенного химическим травлением. На рис. 8, а представлена зависимость для величин Max МП, измеренных во всех сканах колеса, а на рис. 8, б — зависимость для разницы между Max и Min МП, измеренная во всех сканах детали. На каждом графике пересечение линий показывает критерий отбраковки. В каждом случае нижний левый квадрант означает принятые образцы, верхний правый

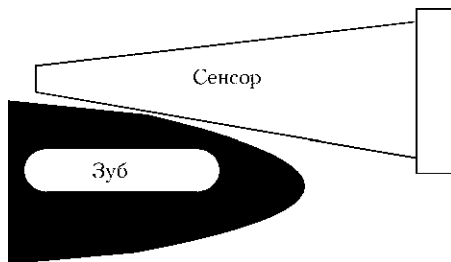


Рис. 6. Контакт сенсора с зубом зубчатой передачи



Рис. 7. Процесс контроля винтового зубчатого колеса

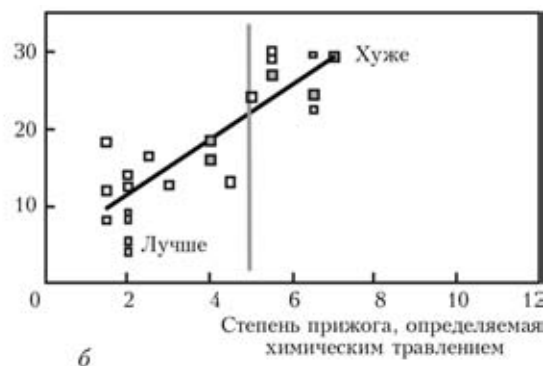
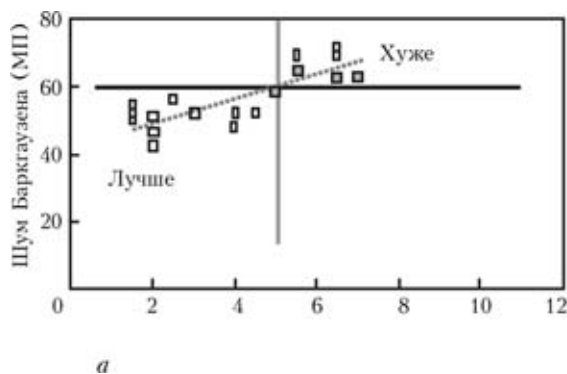


Рис. 8. Зависимость max (а) и Max-Min МП (б) от степени прижога, определенной методом травления



— отбракованные. Поэтому, устанавливая максимум предела отбраковки 60 МП и разницу пределов отбраковки 20 МП, все детали, отбракованные в результате химического травления, будут также отбракованы анализом ШБ. Показанный пример иллюстрирует лишь небольшой разброс данных, относящихся к относительно небольшой группе деталей. Анализируя данный пример, видим, что следует выбирать критерий отбраковки немного меньше обозначенного. Это будет несколько заниженное значение, однако пользователь будет уверен, что ни одна бракованная деталь не была пропущена. Для увеличения достоверности результатов следует выявить окончательную корреляцию на основе результатов для 60 групп образцов, полученных тремя различными пользователями. Такой способ увеличит надежность критерия отбраковки и предела, необходимого для дальнейшего анализа детали. Если результаты для данной части детали близки или выше критерия отбраковки, то обычной практикой является дополнительная проверка химическим травлением. Этот анализ является средством для повышения уровня надежности, особенно если критерий отбраковки был установлен с использованием небольшой группы деталей, тем не менее операторы в течение длительного времени будут уверены, что система анализа и заданный критерий отбраковки достоверны.

**Преимущества системы автоматического контроля ШБ.** Раннее обнаружение повреждений. Повреждения при шлифовании возникают в результате износа шлифовального диска, однако, также могут быть следствием неправильной скорости подачи, скорости вращения шлифовального диска либо других многочисленных критериев, упомянутых выше. Учитывая огромные ежедневные объемы производства, важно быстро обнаружить ошибку. Способ химического травления занимает несколько минут, кроме того, установка не всегда расположена близко к шлифовальному станку. Поэтому травление, как правило, выполняют один раз в час или реже, и, очевидно, обнаружение ошибок происходит не быстро. Подобная ситуация может привести к огромным потерям времени и денег в связи с производством бракованной продукции. Система контроля ШБ позволяет выявлять дефекты в течение нескольких минут, что позволяет сохранить тысячи долларов. Некоторые пользователи отмечают окупаемость вложения в течение всего трех месяцев.

**Регистрация результатов.** Амплитуда ШБ регистрируется для каждой отдельной детали, данные сохраняются. Травление не позволяет выполнять регистрацию результатов, за исключением ведения регистрационного журнала оператором, вследствие чего вероятность возникновения человеческой ошибки увеличивается.

**Контрольная карта характеристик качества.** При необходимости результаты можно использовать для выполнения статистического анализа.

**Снижение случаев претензий по гарантии.** Благодаря высокой надежности определения прижогов, анализ ШБ позволяет полностью исключить или существенно снизить претензии по гарантии. Не прибегая к травлению и используя тщательный анализ ШБ, можно существенно снизить или полностью исключить выпуск бракованной продукции.

**Отсутствие расходных материалов, низкие эксплуатационные затраты.** При анализе ШБ не используются химические реагенты или другие расходные материалы, в то время как кислотное травление требует тщательного контроля, кроме того, необходимо учитывать современные высокие требования по защите окружающей среды.

**Настройка процесса шлифования с помощью автоматизированной системы контроля ШБ.** В случае применения для контроля зубчатого колеса коробки передач, как правило, используется одна и та же шлифовальная установка для разных типов колес. Для производства сотен различных типов одинаковых деталей используется одна и та же установка, поэтому важно выполнять быструю настройку шлифовального станка и смену типа детали.

Как отмечалось, химическое травление занимает несколько минут, кроме того, оборудование для травления может находиться на расстоянии сотен метров от шлифовального станка. Оператору необходимо настроить шлифовальный станок для конкретного номера детали и выполнить тестовое измерение образца. Далее деталь подвергают травлению и, исходя из полученных результатов, вносят изменения в настройки шлифовального станка. Этот процесс повторяется до тех пор, пока оператор не получит удовлетворительных результатов травления. Перечисленная последовательность операций может продолжаться от нескольких минут до часа или дольше в зависимости от опыта оператора. Настройка шлифовального станка с использованием анализа ШБ основана на том же принципе, однако, оборудование, как правило, расположено в непосредственном доступе от шлифовального станка и загрузка детали происходит незамедлительно. Внесение изменений в настройки шлифовального станка занимает минуту или две во время шлифования тестового образца и общее время повторяющегося процесса настройки заметно снижается. Кроме того, данные представлены в количественном виде, что позволяет оператору сделать некоторые предварительные выводы о необходимых изменениях не основываясь на догадках, а исходя из результатов травления. Видно, что использование анализа ШБ позволяет существенно упростить настройку шлифо-



вального процесса и сэкономить время и средства.

**Мониторинг процесса шлифования с использованием автоматической системы контроля ШБ.** После первоначальной наладки шлифовального станка целесообразно периодически отслеживать процесс путем тестирования образцов производства через определенные интервалы времени либо выполнять 100%-й контроль. Такой анализ легко и быстро выполнять с помощью автоматической системы контроля ШБ. Подобная проверка необходимого количества деталей, используется для гарантирования качества деталей, а также предварительного поиска возможных проблем, таких как износ круга до того, как это станет приносить существенный материальный ущерб.

Обычная система анализа ШБ может являться отдельным инструментом для мониторинга операций финишного шлифования во время производства, независимо от объемов выпуска — двух в час или 200. Это быстрая, простая и неразрушающая методика определения правильности работы шлифовального станка.

**Интерпретация результатов.** Интерпретация результатов, полученных системой анализа, основана на основной теории ШБ и некоторых определяющих параметрах, оказывающих влияние на сигнал.

Во-первых, нами доказано, что ШБ возрастают при уменьшении твердости и уменьшении напряжения сжатия. В целом, ШБ возрастает в зависимости от количества повреждений, возникших в процессе шлифования. На рис. 9 показаны выходные данные специального программного обеспечения ViewScan. Он представляет измерения, выполненные для каждой боковой поверхности зуба с настройкой 1 скан в общем для 14 зубцов. Представленные данные скана получены для одной боковой поверхности зуба от одного конца до другого. Каждая боковая поверхность зуба представ-

лена отдельным графиком. На графике также показан максимальный предел отбраковки, который в данном случае составляет 35. Все зависимости, расположенные выше 35, отображаются линией красного цвета. На экране также отображаются другие параметры, полученные из скана, такие как Мин (Min), Среднее (Avg) и Макс/Средн. (Max/Avg). Эти параметры также характеризуются своими собственными пределами отбраковки и являются выбираемыми. Далее, возвращаясь к типу повреждений и основываясь на графиках, для данного зубчатого колеса очевидно, что более высокие значения МП являются индикацией прижога. В целом, если наблюдается точное отклонение от обычного графика, то это указывает на наличие прижога или другого дефекта, например, мягкого участка.

Во-вторых, исходя из результатов измерений, приведенных на рис. 9 — данные, полученные от стороны к стороне и от зубца к зубцу, очень схожие. Это свидетельствует о том, что сигнал ШБ не меняется при переходе к следующему зубцу или противоположной грани. Данное заключение является очень важным при определении причины возникновения повреждения. Например, если изменение сигнала происходит от одной грани до другой, и в результате отбраковывается одна грань из двух, то это свидетельствует о плохом центрировании шлифовального круга между зубцами значит — с одного зубца было снято больше материала. Подобные выводы и анализ полученных результатов являются очень ценным инструментом, помогающим сэкономить время и исключить возникновение неисправностей.

Следующий вывод, который можно сделать во время измерения — увеличение общего уровня сигнала для данной детали, при этом разница между максимальными и минимальными величинами остается небольшой, однако уровень может возрасти от нормального 40...50 до 70...80. Подобное изменение уровня сигнала может не являться результатом наличия дефекта шлифования. Например, подобные изменения могут возникнуть в результате предварительной обработки. Можно изменить некоторые параметры, однако наиболее часто изменяют режим тепловой обработки, влияющей на твердость либо на количество остаточного аустенита — сигнал ШБ, полученный после шлифования, будет иным. Если подобный тип изменений часто наблюдается, то разница между максимальным и минимальным критериями отбраковки становится лучшим инструментом обнаружения повреждений шлифования, однако, при использовании максимального критерия отбраковки подобные разновидности изменений будут отмечены. Использование подобного способа отбраковки предпочтительнее, поскольку позволяет отслеживать другие потенциально опасные изменения в процессе обработки.

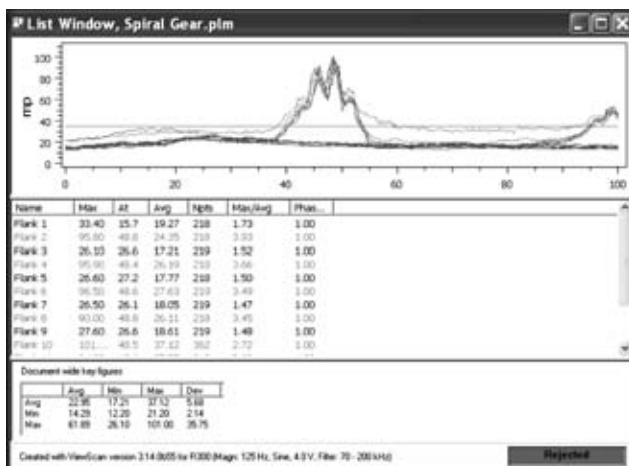


Рис. 9. Пример выходных данных специального программного обеспечения ViewScan8



При выявлении потенциальной проблемы технолог, проанализировав графики, исправит вероятную причину. Например, при тестировании зубчатого колеса получили высокие значения. Оператор информирует технолога, который направляет зубчатое колесо на дополнительный анализ травлением. На колесе травлением не выявлено видимых признаков прижога. Технолог, исходя из графиков, находит максимальные величины, превышающие критерий отбраковки, однако условия отбраковки Мах-Мин находятся в допустимых пределах. Далее технолог решает выполнить тест на твердость. Тест на твердость указывает на значение твердости чуть ниже обычного. Это может быть причиной увеличения сигнала. Технолог принимает решение проверить уровень остаточного аустенита и разрезать образец для определения глубины твердого слоя. Результаты показывают на пониженный уровень остаточного аустенита по сравнению с нормальным и глубину твердого слоя, близкую к нормальной. Технолог заключает, что зубчатое колесо может проходить контроль качества, однако следует проверить печь и контролировать уровень остаточного аустенита.

Система анализа ШБ может предоставить гораздо больше возможностей, а не быть просто системой выявления прижогов.

**Другие успешные применения системы анализа ШБ.** Анализ ШБ успешно применяется во многих областях, среди которых контроль шлифования является наиболее широко распространенным. Другие применения включают выявление дефектов токарной обработки закаленных деталей и тепловой обработки, измерение эффективности дробеструйной очистки, измерение остаточных напряжений, а также оценку долговечности подшипников. Также можно отметить выявление дефектов шлифования кулачков кулачковых валов, шеек коленчатых валов, реечношестеренчатых подъемников, подшипников, зубчатых колес самолетных шасси (даже через хромированный слой), повышение долговечности подшипников, оценку эффективности дробеструйной очистки сварных швов, а также оценку влияния правки на распределительные и коленчатые валы.

## Выводы

Анализ ШБ представляет собой надежный инструмент для выявления повреждений шлифованных стальных деталей. Рассмотрены основные принципы измерения и применения для контроля различных деталей, доказывающие возможность

использования не только для выявления повреждений шлифования, но также в качестве инструмента поиска дефектов в процессе контроля качества. Анализ ШБ является гораздо более быстрым по сравнению с существующим методом химического травления, а также характеризуется превосходной чувствительностью и достоверностью результатов. Техника выполнения измерения и программное обеспечение просты и понятны пользователю. Система помогает сохранить время и финансы во время настройки и мониторинга, а также при выявлении дефектов. При полном внедрении системы анализа ШБ травление используется лишь в редких случаях в металлургической лаборатории. Показано, что по сравнению с другими способами и технологиями, автоматическая система контроля ШБ обеспечивает наиболее эффективное отслеживание дефектов, вызванных шлифованием, а также является простым в использовании оборудованием, которое может окупиться всего за три месяца.

1. *Fix Robert M.* Applications of Barkhausen Noise Analysis (BNA), a Review of Three Cases Having Industrial Significance // First Intern. conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Sept. 1-2, 1998. — Hanover, Germany.
1. *Karpuschewski B.* Introduction to Micromagnetic Techniques // First Intern. conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Sept. 1-2, 1998, Hanover, Germany.
2. *Seppi Fred.* Findings of Barkhausen Noise Tests to Detect Grinding Burns and Residual stress in High Strength Steel // Headquarters Ogden Air Logistics Center (AFLC), Hill Air Force Base, 01 Oct. 1986.
3. *Shaw B. A., Hyde T. R., Evans J. T.* Detection of Grinding Damage in Hardened Gear Steels Using Barkhausen Noise Analysis // First Intern. conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Sept. 1-2, 1998, Hanover, Germany.
4. *Detection of Thermal Damage in Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method / A. S. Wojtas, L. Suominen, B. A. Shaw, J. T. Evans* // First Intern. conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Sept. 1-2, 1998, Hanover, Germany.
5. *Pro Richard J.* Grinding Burn Detection During Production Using Magnetic Barkhausen Noise Measurements // Materials Evaluation. — 2006. — 45, № 6. — P. 610–612.
5. *Ceurter J. S., Smith C., Ott R.* The Barkhausen Noise Inspection Method for Detecting Grinding Damage in gears // Advanced Materials & Processes, Apr. 2002
6. *Griffiths C. A.* Closing the Loop on Product Integrity on Bearings with Engineering Source Approval // Published by Split Ballbearing, Division of MPB Corp., July, 1989.
7. *ANSI/AGMA 2007-B92.* Surface Temper Etch Inspection After Grinding, February, 1992.
8. *Suominen L., Tiitto K., Ehrman R.* Effects of Retained Austenite on the Evaluation of Grinding Damage by Barkhausen Noise in Carburized steels // Thirteenth Annual conf. on Properties and Applications of Magnetic Materials, May 17–19, 1994.

Поступила в редакцию  
02.03.2012