

L. Suominen

This article reviews the main benefits of a complex control of surface quality through analysis of Barkhausen noise, and the application of this method for control of various parts. The article compares and shows that in comparison to other methods and technologies, control method using analysis of Barkhausen noise provides the most effective tracking of defects caused by grinding, and is simple and can easily be automated.



ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА

Введение

В процессе шлифования деталей из закаленной стали всегда существует вероятность повреждения стали вследствие возникновения остаточных напряжений или изменений в микроструктуре. Методы обнаружения дефектов подобного рода всегда обладают одним или несколькими недостатками, такими как высокая стоимость, длительность, сложность, субъективность, использование опасных реагентов. Метод, основанный на анализе шумов Баркгаузена (ШБ), удовлетворяет всем требованиям при выявлении дефектов шлифованной стали и является надежным, нормированным и экономичным. Он прост 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 ана-

лиза ШБ обеспечивает полный контроль качества продукции. Анализ ШБ может быть сильным звеном в цепи, ведущей к длительной и надежной работе ответственных узлов и деталей, таких как зубчатые колеса, распределительные валы, коленчатые валы, подшипники и т. д.

Техника измерений и оборудование

Анализ ШБ имеет в своей основе относительно простую технологию, заключающуюся в особенностях поведения ферромагнитных материалов в магнитном поле. При помещении ферромагнетика в магнитное поле происходит изменение результирующей намагниченности. Это изменение является результатом микроскопических движений стенок магнитных доменов внутри материала. Во время дви-

жения доменных стенок в катушке, расположенной рядом с материалом, возникает электрический импульс. Совокупность дискретных сигналов образует шумоподобные электрические импульсы, называемые ШБ [3, 6, 7, 9, 10]. Их амплитуда иногда именуется 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 макро-металлургии данные факторы можно условно разделить на две категории: относящиеся к твердости и относящиеся к остаточному напряжению. В общем случае ШБ возрастают при уменьшении твердости и увеличении напряжения растяжения, и, напротив, ШБ 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 материал, который, как упоминалось, реагирует на появление магнитного поля 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 превраще-

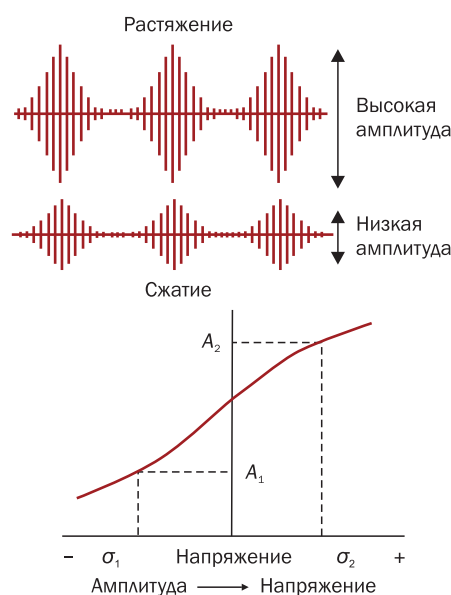


Рис. 1. Влияние напряжений на уровень ШБ



Суоинен Лассе

Президент Stresstech Oy (Финляндия), председатель оргкомитета Международной конференции по исследованию шумов Баркгаузена и микромагнетизма (ICBM), магистр наук (материаловедение)

ния тепловой энергии в теплоту, которая концентрируется в поверхностных слоях и может вызвать нежелательные эффекты. Можно упомянуть следующие факторы, вызывающие увеличение температуры в поверхностном слое: тип смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), ее концентрация, срок службы, расход, тип шлифовального диска, его скорость, степень износа, скорость подачи и обработка материала перед шлифованием, – другими словами, способ термообработки. Авторы работы [9] предполагают, что повреждение может начаться при частичной релаксации напряжения сжатия при температурах ниже 500 °С. При повышении температуры до 600 °С возникают прижоги В-класса, также называемые прижогом с повторным отпускком (re-tempering burn). 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 (re-hardening burn). Данный дефект охватывает области очень твердого и хрупкого материала, а также области, окружающие прижог В-класса – «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 [2, 9].

Существующие методики обнаружения упомянутых повреждений включают визуальное обследование путем химического травления [4], исследование микротвердости, распределения остаточного напряжения методом рентгеновской дифрак-

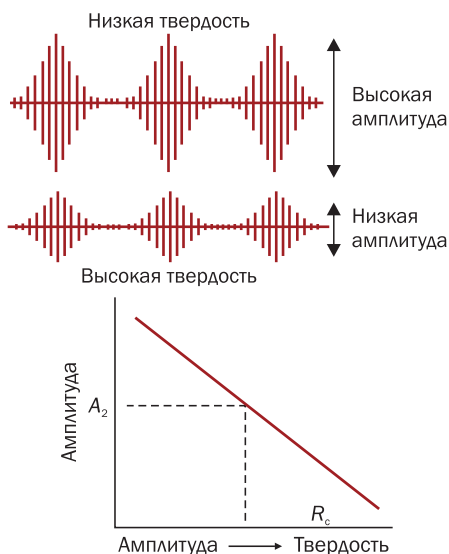


Рис. 2. Влияние твердости на уровень ШБ

ции и анализом ШБ. Каждый из описанных выше дефектов можно детектировать путем анализа ШБ абсолютно неразрушающим образом. Рентгеновская дифракция также может применяться в каждом случае, однако этот метод является длительным, дорогостоящим и может быть разрушающим. Травление растворами и исследование микротвердости являются быстрыми и простыми, однако с их помощью можно выявить только прижоги В и D класса. Кроме того, исследование твердости является разрушающим способом, а травление связано с субъективными факторами. В табл. 1 показаны некоторые особенности анализа ШБ по сравнению с наиболее широко распространенным способом определения прижогов шлифования посредством химического травления [2, 9].

Из рис. 1 и 2 видно, что сигнал ШБ возрастает при снижении прочности и напряжения растяжения. Это точный сценарий шлифовального прижога с повторным отпускком, как видно из рис. 4. Поскольку повреждение при шлифовании влияет на твердость и напряжение и, следовательно, приводят к увеличению сигнала ШБ, выя-

вить прижоги шлифования анализом ШБ очень просто. Если амплитуда возросла – присутствует прижог. Исключение из этого правила составляют повторно закаленные зоны. В случае зон повторной закалки сигнал может снижаться, однако эти 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, показанная, например, на рис. 5, состоит из устройства, передвигающего датчик, такого как робот, или установки плоского линейно-координатного перемещения датчика, вращающегося центра, трехлуччатого 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 отдельного типа зубчатого колеса. Оператор устанавливает зубча-

Табл. 1. Сравнение различных методов обнаружения шлифовальных прижогов

Метод	Метод ШБ	Химическое травление	Исследование микротвердости
Неразрушающий	ДА	НЕТ	НЕТ
Используются химикаты	НЕТ	ДА	НЕТ
Автоматизируемый	ДА	НЕТ	НЕТ
Надежный	ДА	НЕТ	НЕТ
Допускает оценку через покрытия	ДА	НЕТ	НЕТ
Опасность водородного охрупчивания	НЕТ	ДА	НЕТ
Оценка влияния напряжений и микроструктуры одновременно	ДА	НЕТ	НЕТ

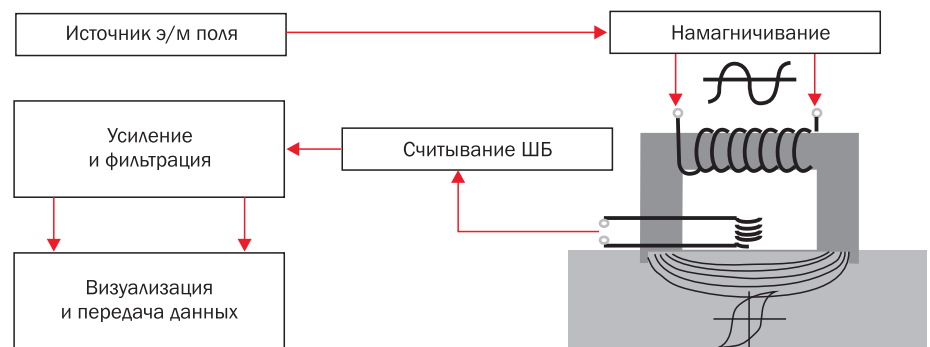


Рис. 3. Принцип работы оборудования для регистрации ШБ

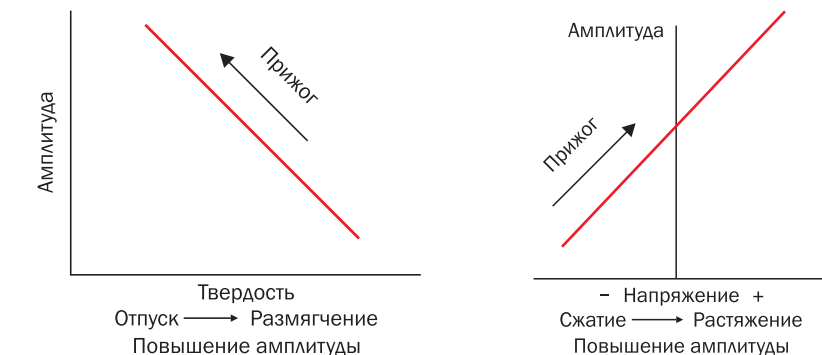


Рис. 4. Влияние шлифовальных прижогов на сигнал ШБ

тое 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 4 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 для каждого сканирования выводятся на монитор компьютера; также отображается статус «ПРИНЯТО» или «ОТБРАКОВАНО», который вычисляется, исходя из заданных условий отбраковки. Систему можно настроить на измерение одного или всех зубьев, также можно задать измерение первого зуба, затем пропустить пять, 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° друг к другу. Такая методика существенно сокращает время измерений по сравнению с измерением каждого зуба без снижения надежности. По завершении измерений 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 степени повреж-

дения, 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 напрямую связана с результатами визуального изучения результатов химического травления. Выполняя измерения многочисленных производимых 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. Далее критерий отбраковки вводится 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.

На рисунке продемонстрирована зависимость между МП и визуальным наличием прижога, определенного химическим травлением. На рис. 8а представлена зависимость для величин Максимум МП, измеренных во всех сканах колеса, в то время как на рис. 8б представлена зависимость для разницы между Максимумом и Минимумом МП, измеренной во всех сканах детали. На каждом графике пересечение линий показывает критерий отбраковки. В каждом случае нижний левый квадрант означает принятые образцы, в то время как верхний правый – отбракованные. Поэтому при установке Максимум предела отбраковки МП 60 единиц и разницы пределов отбраковки 20 все детали, отбракованные в результате химического травления, будут также отбракованы анализом ШБ. Приведенный пример иллюстрирует лишь небольшой разброс данных, относящихся к относительно небольшой группе деталей. Понятно, что следует выбирать критерий отбраковки немного меньше обозначенного. Это бу-



Рис. 5. Система контроля RoboScan

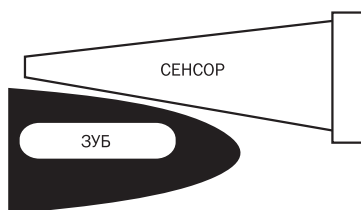


Рис. 6. Контакт сенсора с зубом зубчатой передачи



Рис. 7. Фотография процесса контроля винтового зубчатого колеса (фотография предоставлена Stresstech Oy, Finland)

дет несколько заниженное значение, однако, пользователь будет на 100 % уверен, что ни одна бракованная деталь не была пропущена. Для увеличения достоверности результатов следует выявить окончательную корреляцию на основе результатов, например, 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 находятся рядом или выше критерия отбраковки, обычной практикой является дополнительная проверка данной части химическим травлением. Подобный тип «дополнительного» анализа является отличным средством для повышения уровня надежности, особенно, если критерий отбраковки был установлен с использованием очень небольшой группы деталей; тем не менее, операторы в течение длительного времени будут уверены, что система анализа и заданный критерий отбраковки являются надежными и достоверными.

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 уже упомянутых причин. Учитывая огромные ежедневные объемы производства, очень важным является быстрое обнаружение ошибок. Способ химического травления занимает несколько минут, кроме того, установка не всегда удобно расположена в доступной близости от шлифовального станка. Поэтому травление, как правило, выполняют один раз в час или реже, и, очевидно, обнаружение оши-

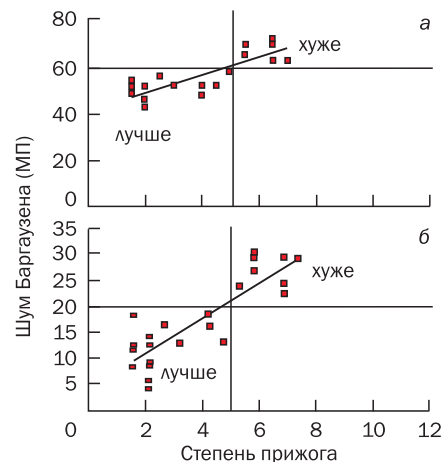


Рис. 8. Зависимость Максимум (а) и Макс – Мин (б) МП от степени прижога, определенной методом травления

бок происходит не быстро. Подобная ситуация может привести к огромным временным и финансовым потерям в связи с производством бракованной продукции. Система контроля ШБ позволяет выявлять дефекты в течение нескольких секунд и сохранять тысячи долларов. Некоторые пользователи отмечают окупаемость вложений в течение всего 3 месяцев.

Регистрация результатов. Амплитуда ШБ регистрируется для каждой отдельной детали, данные можно сохранить и, при необходимости, открыть для просмотра. Травление не позволяет выполнять регистрацию результатов иначе как 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. Анализ ШБ не подразумевает использования химических реагентов или каких-либо расходных материалов, 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 таких применений, как шестерни коробки передач, как правило, используется одна и та же шлифовальная установка для разных типов шестерен. Это актуально и в других случаях, особенно если для производства сотен различных типов одинаковых деталей используется одна и та же установка. В таких случаях важно выполнять быструю настройку шлифовального станка и смену типа детали. Как отмечалось ранее, химическое травление занимает несколько минут, кроме того, оборудование для травления может находиться на расстоянии сотен метров от шлифовального станка. Оператору будет необходимо настроить шлифовальный станок для конкретного номера детали и далее 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 даже дольше, в зависимости от опыта оператора. Последовательность операций настройки шлифовального станка с использованием анализа ШБ аналогична, 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 представляются в количественном виде, что позволяет оператору сделать некоторые предварительные выводы о необходимых изменениях, не основываясь на догадках на основе результатов травления. Несложно увидеть, что использование анализа ШБ позволяет существенно упростить настройку шлифовального процесса и сэкономить огромное количество времени и средств.

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 стопроцентный контроль. Такой анализ легко и быстро выполнять с помощью автоматической системы контроля ШБ. Подобная проверка необходимого количества делателей, исходя из объемов производства, используется для гарантирования качества производимых 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 окончательного шлифования во время производства независимо от объемов выпуска – 2 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, мы знаем, что ШБ возрастают при уменьшении твердости и уменьшении напряжения сжатия.

В целом, ШБ возрастают в зависимости от количества повреждений, возникших в процессе шлифования. На рис. 9 показаны выходные данные специального программного обеспечения ViewScan для случая измерений, выполненных для каждой боковой поверхности зуба с настройкой 1 скан в общем для 14 зубцов. Представленные данные сканирования получены для одной боковой поверхности зуба от одного конца до другого. Каждая боковая поверхность зуба представлена отдельным графиком. На графике также показан максимальный предел отбраковки, который в данном случае составляет 35. Все графики, 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). Все 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, это указывает на наличие прижога или другого дефекта, например, мягкого участка.

Теперь обратимся к другому заключению, которое можно сделать, исходя из результатов измерения, приведенных на рис. 9, – данные, полученные от стороны к стороне и от зубца к зубцу, являются очень схожими. Это свидетельствует о том, что сигнал ШБ не меняется при переходе к следующему зубцу или противоположной грани. Это заключение является очень важным при определении причины возникновения повреждения. Например, если изменение сигнала происходит от грани до другой грани, и в результате отбраковывается одна грань из двух, это свидетельствует о плохом центрировании шлифовального круга между зубцами. По этой причине с одного зубца было снято больше материала, чем с другого. 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 значения 40 – 50 до 70 – 80. Подобное изменение уровня сигнала может не являться результатом наличия дефекта шлифо-

вания. Например, подобные изменения могут возникнуть в результате предварительной обработки. Можно изменить некоторые параметры, однако наиболее частым изменением является изменение в тепловой обработке. При изменении режима тепловой обработки, влияющей на твердость либо на количество остаточного аустенита, сигнал ШБ, полученный после шлифования, будет иным. Если подобный тип изменений наблюдается часто, разница между максимальным и минимальным критериями отбраковки становится лучшим инструментом обнаружения повреждений шлифования, однако и при использовании максимального критерия отбраковки подобные разновидности изменений будут отмечены. Использование подобного способа отбраковки является предпочтительным, поскольку позволяет отслеживать другие потенциально опасные изменения в процессе обработки. При выявлении потенциальной проблемы технолог, проанализировав графики, исправит вероятную причину. Например, при тестировании зубчатого колеса получены высокие значения. Оператор информирует технолога, который направляет зубчатое колесо на дополнительный анализ травлением. На колесе травлением не выявляются видимые признаки прижога. Тогда технолог, исходя из графиков, находит максимальные величины, превышающие критерий отбраковки, но условия отбраковки максимум – минимум 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. Далее технолог принимает решение проверить уровень остаточного аустенита и разрезать образец для определения глубины твер-

дого слоя. Результаты показывают 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.

Как можно увидеть из приведенного примера, подобная система может предоставить гораздо больше возможностей, а не быть просто системой выявления прижогов. Данное высказывание можно полностью отнести к системе анализа ШБ.

Другие успешные применения системы анализа ШБ

Анализ ШБ успешно применяется во многих областях, среди которых контроль шлифования является наиболее распространенным. Другие применения включают выявление дефектов тепловой обработки, дефектов токарной обработки закаленных деталей, измерение эффективности дробеструйной очистки, измерение остаточных напряжений, а также оценку долговечности подшипников. Также можно отметить выявление дефектов шлифования кулачков распределительных валов, шеек колеччатых валов, реечно-шестеренчатых подъемников, подшипников, амортизационных стоек самолетных шасси (даже через хромированный слой), повышение долговечности подшипников, оценку эффективности дробеструйной очистки сварных швов, а также оценку влияния правки на распределительные и колеччатые валы.

Заключение

Анализ ШБ представляет собой очень полезный инструмент для выявления повреждений шлифованных стальных деталей. Были рассмотрены основные принципы измерений, а также ис-

пользование для контроля различных деталей, доказывающие возможность применения метода не только для выявления повреждений шлифования, но также в качестве инструмента поиска дефектов в процессе контроля качества. Метод анализа ШБ является гораздо более быстрым по сравнению с методом химического травления, характеризуется превосходной чувствительностью и достоверностью результатов. Методика измерений и программное обеспечение просты и понятны пользователю. Система помогает сохранить время и деньги 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. В целом было 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 3 месяца.

Литература

1. Fix R. M. Applications of Barkhausen Noise Analysis (BNA), a Review of Three Cases Having Industrial Significance. – In: First Internat. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. – Hanover (Germany), Sept. 1–2, 1998.
2. Griffiths C. A. Closing the Loop on Product Integrity on Bearings with 'Engineering Source Approval'. – Split Ballbearing, Division of MPB Corp., 1989.
3. Karpuschewski B. Introduction to Micromagnetic Techniques. – In: First Internat. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. – Hanover (Germany), Sept. 1–2, 1998.
4. ANSI/AGMA 2007-B92. Surface Temper Etch Inspection After Grinding, 1992.
5. Pro R. J. Grinding Burn Detection During Production Using Magnetic Barkhausen Noise Measurements. – Materials Evaluation. 1987. V. 45. No. 6. P. 610–612.
6. Seppi F. Findings of Barkhausen Noise Tests to Detect Grinding Burns and Residual Stress in High Strength Steel. – Hill Air Force Base: Headquarters Ogden Air Logistics Center (AFLC), 1986.
7. Shaw B. A., Hyde T. R., Evans J. T. Detection of Grinding Damage in Hardened Gear Steels Using Barkhausen Noise Analysis. – In: First Internat. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. – Hanover (Germany), Sept. 1–2, 1998.
8. Suominen L., Tiitto K., Ehrman R. Effects of Retained Austenite on the Evaluation of Grinding Damage by Barkhausen Noise in Carburized Steels. – In: Thirteenth Annual Conf. on Properties and Appl. of Magnetic Materials, May 17–19, 1994.
9. Wojtas A. S., Suominen L., Shaw B. A., Evans J. T. Detection of Thermal Damage in Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method. – In: First Internat. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. – Hanover (Germany), Sept. 1–2, 1998.
10. Ceurter J. S., Smith C., Ott R. The Barkhausen Noise Inspection Method for Detecting Grinding Damage in Gears. – Adv. Materials & Processes. Apr 2002.



Рис. 9. Пример выходных данных специального программного обеспечения ViewScan

Статья получена 20 мая 2011 г.