

## К ВОПРОСУ О ТОЛЩИНЕ ИНФОРМАТИВНОГО СЛОЯ ПРИ МАГНИТОШУМОВОМ КОНТРОЛЕ

© 2019 г. В.В. Филинов<sup>1,\*</sup>, П.Г. Аракелов<sup>2,\*\*</sup>, Н.Т. Кунин<sup>1,\*\*\*</sup>, Д.А. Головченко<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский технологический университет (МИРЭА), Россия 119454 Москва, пр-т Вернадского, 78

<sup>2</sup>ООО «АКА-скан», Россия 107023 Москва, ул. Буженинова, 2

E-mail: \* mgupipr-4@mail.ru; \*\*wargod\_venom@mail.ru; \*\*\* kuninnt@gmail.com; \*\*\*\* dahadar14@gmail.com

Поступила в редакцию 13.03.2018; после доработки 04.09.2018;  
принята к публикации 07.09.2018

Вопрос о толщине информативного слоя при магнитошумовом контроле упрочненных слоев рассматривается в [1—7], в которых дается ее оценка до 800 мкм. В настоящей работе приведены экспериментальные исследования толщины информативного слоя на примерах реализации технологий процессов поверхностного деформирования и лазерного термоупрочнения. Показано, что в последнем случае толщина информативного слоя имеет большее значение. Приложенные механические напряжения практически не меняют толщину информативного слоя для сталей широкого класса.

*Ключевые слова:* магнитошумовой неразрушающий контроль, информативный слой, лазерное термоупрочнение, деформирование, механические напряжения.

DOI:10.1134/S01303082190100056

Известно, что магнитошумовой (МШ) метод неразрушающего контроля, основанный на использовании эффекта Баркгаузена, применяют при контроле физико-механических свойств поверхностных слоев ферромагнитных материалов [1, 2]. Вопрос о толщине информативного слоя при МШ контроле, то есть слоя, с которого поступает информация о свойствах материала, рассматривается в [3—7], в которых его толщина оценена в пределах от 40 до 300-800 мкм.

Основным механизмом затухания ЭДС магнитных шумов (ЭДС МШ) в ферромагнетиках является токовихревой. Однако, как показано в [1, 5], толщина информативного слоя в конструкционных сталях в 2-3 раза превышает значение глубины затухания электромагнитной волны из-за влияния других механизмов ослабления МШ (магнитомеханического, рассеивания магнитного потока и т.д.) и составляет величину порядка долей и единиц миллиметра.

Расчетная оценка толщины информативного слоя ( $\Delta$ ) при магнитошумовом контроле механических напряжений затруднена из-за сложности учета влияний электрических и магнитных характеристик ферромагнетика на механизм затухания ЭДС скачков Баркгаузена при изменении физико-механических свойств их поверхностных слоев и режимов перемагничивания, а также АЧХ измерительного тракта аппаратуры контроля [1—5].

Впервые вопрос о толщине информативного слоя  $\Delta$  был рассмотрен в [3], в которой экспериментально методом плакирования наносили биметаллические пластины с разной толщиной на поверхность ферромагнитной подложки. Строили зависимость интенсивности ЭДС МШ от толщины верхнего слоя и получали зависимость, близкую к обратной экспоненте. Аналогичные зависимости получены в [4], в которой верхний слой формировали пластинами из алюминия.

Известен экспериментальный способ оценки величины  $\Delta$ , предусматривающий создание четкой межслойной границы путем предварительной обработки поверхности исследуемого образца из стали У8 методом лазерной закалки, а затем последовательное удаление с помощью электролитической полировки поверхностных слоев малой толщины и измерения параметров МШ, по результатам которых вычисляют  $\Delta$  [6].

Толщина информативного слоя  $\Delta$  в [6] определена до 0,34 мм, что противоречит утверждению в этой же работе о возможности контроля глубины упрочненного слоя до 0,8 мм.

К недостаткам этих способов следует отнести их сложность, трудоемкость и, кроме того, невысокую точность, обусловленную тем, как термическая и механическая поверхностные обработки значительно изменяют электромагнитные свойства материала и существенно сказываются на результатах измерений. Нами проведен ряд экспериментов, направленных на уточнение определения толщины информативного слоя при МШ контроле.

**Пример 1.** Повышение достоверности результатов магнитошумового контроля требует оценки влияния приложенных напряжений на толщину информативного слоя, а также рассмотрения вопроса о целесообразности дополнительной подготовки поверхности образцов перед измерениями параметров МШ.

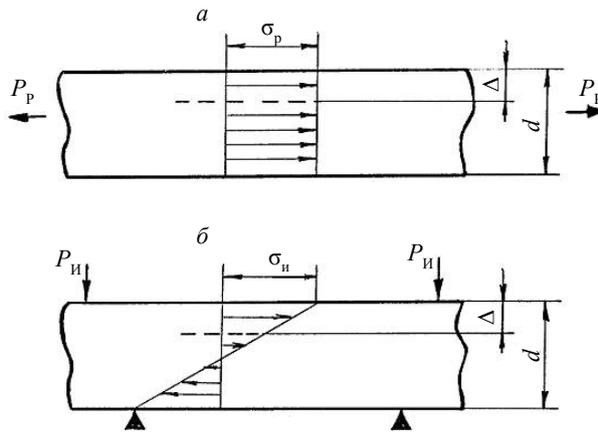


Рис. 1. Схемы нагружения и эпюры напряжений в плоских образцах:

$P_p$  — растягивающая нагрузка;  $P_и$  — изгибающая.

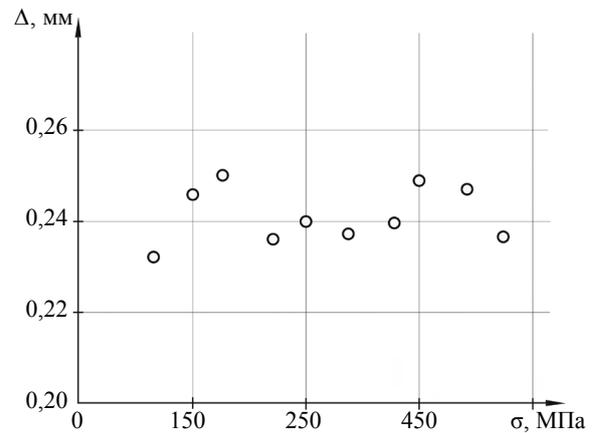


Рис. 2. Зависимость толщины информативного слоя  $\Delta$  от приложенных напряжений.

Для оценки толщины информативного слоя и влияния на него механических напряжений использована методика, основанная на сравнении величин ЭДС МШ при различных схемах упругого нагружения образцов. Выбранные схемы нагружения должны обеспечивать равенство напряжений на поверхности образца, при этом эпюры напряжений по его толщине должны быть различны.

В основе исследований использовалась линейная зависимость ЭДС МШ от уровня напряжений, приложенных в области упругих деформаций [2, 12, 13].

Наиболее полно этим требованиям соответствуют испытания плоских образцов на одноосное растяжение и четырехточечный изгиб. Эпюры напряжений, возникающих при этом в образце, приведены на рис. 1.

Полагая, что регистрируемые при нагружении значения ЭДС МШ пропорциональны площадям эпюр напряжений, ограниченным нижней границей информативного слоя, можно записать

$$E_p \sim \sigma_p \cdot \Delta; \quad E_{и} \sim \sigma_{и} \cdot \frac{(d - \Delta)\Delta}{d}. \quad (1)$$

Из выражений (1) при равенстве напряжений на поверхности образца величину  $\Delta$  можно определить из соотношения

$$\Delta = \frac{E_p - E_{и}}{E_p} \cdot d, \quad (2)$$

при получении равных значений ЭДС МШ — из соотношения

$$\Delta = \frac{\sigma_{и} - \sigma_p}{\sigma_{и}} \cdot d, \quad (3)$$

где  $\sigma_p$  и  $\sigma_{и}$  — напряжения на поверхности образца при растяжении и изгибе;  $E_p$  и  $E_{и}$  — величины МШ, регистрируемые при испытаниях на растяжение и изгиб;  $d$  — толщина образца.

Таким образом, определение толщины информативного слоя  $\Delta$  при МШ контроле заключается в последовательном нагружении образца толщиной  $d$  одноосным растяжением и четырехосным изгибом до равных значений напряжений на поверхности образца, регистрации соответствующих величин средневыпрямленной ЭДС МШ —  $E_p$  и  $E_{и}$  и расчете  $\Delta$  по соотношению (2).

Экспериментальные исследования по определению  $\Delta$  проводились на плоских образцах из стали ОЗН17К10В10МТ толщиной 3 мм с использованием магнитошумовых приборов и методик, разработанных в Московском технологическом университете [2, 14]. Величину напряжений на поверхности образцов вычисляли с помощью тензорезисторов 2 ПКП-10 и универсального вольтметра В7-28.

Результаты определения  $\Delta$  при различных нагрузках, приведенные на рис. 2, показывают, что толщина информативного слоя практически не зависит от величины напряжений.

Результаты определения  $\Delta$  для сталей разных марок (по аналогичной методике) сведены в табл. 1 и совпадают с диапазонами глубины информативного слоя, определенными теоретически и экспериментально в [1, 5, 6].

Необходимо отметить, что при таких значениях  $\Delta$  существенное влияние на результаты измерений параметров МШ оказывает способ механической обработки поверхности образцов. В част-

Результаты определения  $\Delta$  для сталей разных марок

Марка стали	Ст20	Ст35	35ХЗНМ	30ХГСН2А	45Х1	ЭП-836	ШХ 15	ЧС-98
$\Delta$ , мм	0,22	0,21	0,20	0,21	0,18	0,24	0,24	0,23

ности, шлифование мягких материалов (образцов в высокоотпущенном состоянии или в состоянии поставки) влечет за собой наклеп поверхности и возникновение в слое ~50 мкм существенных растягивающих напряжений. Последнее следует учитывать в виде технологической наследственности при пооперационной обработке металлоизделий [1, 12, 13].

**Пример 2.** Широкое применение в промышленности находят методы лазерного термоупрочнения поверхности деталей [1, 9], которые весьма эффективны для повышения долговечности деталей, работающих в условиях интенсивного износа.

Так, при производстве тепловозных дизелей для повышения долговечности деталей цилиндропоршневой группы [10] применяется лазерная закалка внутренней поверхности гильз цилиндра, изготавливаемых из серого легированного чугуна.

Эффективность лазерной закалки поверхности в существенной мере зависит от характеристики фазового состава и параметров глубины, твердости, структурного состояния упрочненного лазерным облучением слоя. Поддержание оптимального соотношения между фазами закалки высокоуглеродистого гетерогенного сплава, каким является чугун, с соблюдением заданных техническими условиями характеристик упрочненного слоя, определяемых глубиной и твердостью, является сложной технологической проблемой, решение которой невозможно без применения неразрушающих физических методов контроля параметров упрочненного слоя.

В этой связи перспективным является использование метода МШ контроля, основанного на эффекте Баркгаузена и благодаря его высокой чувствительности к свойствам поверхностных слоев [1]. В [1, 7, 8] показана принципиальная возможность использования метода МШ для контроля геометрических параметров лазерно-упрочненных слоев (ЛУС) на некоторых инструментальных материалах. В частности, на плоских образцах из серого чугуна СЧ24-44 и СЧ18-36 показано, что изменение глубины закалки от 0,18 до 1,2 мм приводит к изменению сигнала магнитных шумов в 10 раз. Анализ профильной диаграммы свидетельствует о возможности ее применения для контроля ширины зоны лазерного упрочнения.

Нами получены результаты экспериментального исследования корреляционных зависимостей между характеристиками ЛУС чугуна и параметрами МШ.

Лазерную закалку деталей проводили на автоматизированном технологическом комплексе с программным управлением с помощью лазера непрерывного действия Латур 31 мощностью 1,5 кВт. Образцы гильз цилиндров с внутренним диаметром 207 мм и длиной 150-200 мм, изготовленных из чугуна СЧХНМД4, упрочняли по внутренней поверхности при их вращении так, что скорость перемещения лазерного луча составляла 4 мм/с и обеспечивался режим термолазерного упрочнения с оплавлением поверхностного слоя. Перед лазерной закалкой образцы обжигали при температуре 620 °С и фосфатировали. Ширина зоны  $x$  лазерного упрочнения на поверхности образцов составляла 8 мм, расстояние между дорожками — 4 мм. Режимы лазерного упрочнения варьировали путем изменения тока разряда в интервале 10—14,5 А при постоянном напряжении 1400 В. Структуру, фазовый состав, твердость и глубину слоя лазерной закалки исследовали металлографически с помощью оптического микроскопа на поперечных шлифах. Поверхностную твердость измеряли с помощью ультразвукового резонансного твердомера. Характеристики параметров МШ исследовали с помощью прибора ПИОН-01 по величине средневыпрямленного значения ЭДС МШ за половину периода перемагничивания [2, 12, 14].

Измерение характеристик магнитных шумов проводили с помощью преобразователя цилиндрического типа с применением специальной насадки, обеспечивающей постоянство зазора и положения преобразователя относительно контролируемой поверхности, путем поточечного сканирования в направлении, перпендикулярном лазерной «дорожке» упрочнения с шагом 0,5 мм. Направление перемагничивания совпадало с ориентацией лазерной «дорожки».

Лазерное упрочнение в существенной мере изменяет структурно-фазовый состав чугуна в поверхностном слое. Лазерная закалка при токах разряда 12,0-14,5 А приводит к характерному оплавлению поверхности чугуна на глубину 10—55 мкм соответственно. В результате слой термолазерного упрочнения состоит из двух зон: оплавления и закалки. При токах разряда 10-11,5 А слой упрочнения состоит только из зоны закалки.

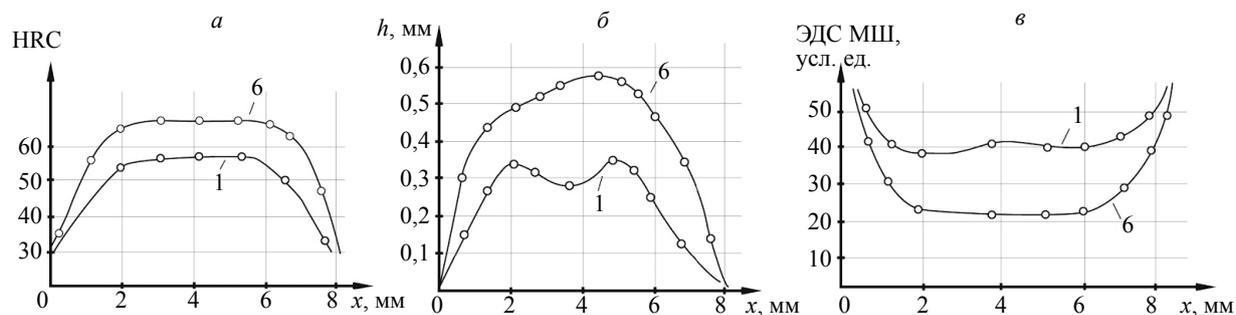


Рис. 3. Профильные диаграммы ЛУС для режимов 1 и 6 (см. табл. 2):

*a* — изменение твердости HRC; *b* — изменение глубины *h* лазерно-упрочненного слоя; *v* — изменение ЭДС МШ.

Результаты металлографических исследований подтверждают выводы [8—10] о структурно-фазовом составе ЛУС.

Поверхностная твердость термолазерно-упрочненных зон для оплавленной поверхности со структурой ледебурита изменяется в пределах от 64-65 до 56-61 HRC закаленной зоны с мартенситной структурой. Распределение поверхностной твердости в зоне лазерного упрочнения показано на рис. 3а. В табл. 2 приведены результаты измерения глубины слоя упрочнения и показаний прибора ПИОН-01 в зависимости от режимов лазерного упрочнения.

Таблица 2

**Зависимость параметра магнитных шумов от толщины слоя лазерного упрочнения приповерхностного слоя чугуна при различных режимах ЛУС**

№	Ток разряда, А	Значения толщины упрочненного слоя, мм	Значения ЭДС МШ в зоне упрочнения, усл. ед.
1	10,0	0,29-0,32	40-45
2	11,5	0,34-0,37	34-36
3	12,0	0,37-0,40	35-37
4	12,5	0,38-0,40	33-35
5	13,0	0,45-0,49	23-24
6	13,5	0,48-0,51	22-24

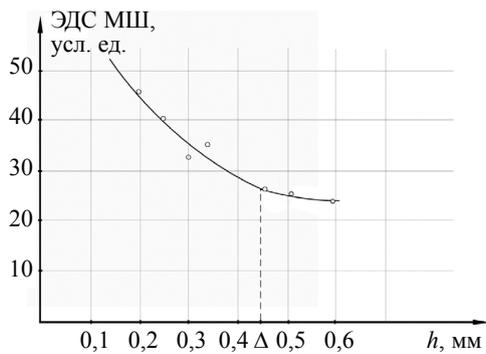
Как следует из приведенных данных, глубина слоя упрочнения с ростом мощности лазерного облучения монотонно увеличивается, а величина ЭДС МШ снижается.

Наличие двух зон при лазерной закалке приводит к изменению их магнитных свойств [1]. Так, в зоне оплавления характерны измельчение исходной текстуры магнитных доменов и существенное уменьшение среднего размера скачков Баркгаузена. В более глубокой зоне закалки доменная текстура намного менее дисперсна, что приводит к более значимым по величине ЭДС МШ. Последнее в совокупности с уменьшением магнитной проницаемости и снижением электропроводности закаленных слоев позволяет надеяться на возможность контролировать информативные слои с больших глубин.

На рис. 3б приведены кривые распределения глубины зоны *h* термического влияния лазерного воздействия в направлении, перпендикулярном лазерному лучу.

Как видно, неравномерность глубины слоя упрочнения увеличивается с уменьшением мощности лазерного облучателя (тока разряда) до 10-11,5 А (на рис. 3б (1) отчетливо видны два пика). При токах разряда 12,0-14,5 А (рис. 3б (6)) достигается наиболее равномерное распределение глубины слоя закалки. Надо полагать, что с уменьшением тока разряда увеличивается неравномерность распределения мощности по сечению луча, что и приводит к неравномерной закалке приповерхностного слоя.

На рис. 3в приведены графики изменения ЭДС магнитных шумов в зависимости от режимов лазерного облучения чугуна. Анализ результатов исследований показал: ЭДС МШ прибора ПИОН-01 существенно зависит от тока разряда лазерного облучения и связанных с этим изменениями структурного состояния лазерно-упрочненной зоны. Характер кривых изменения сигнала магнитных шумов коррелирует с кривыми изменения твердости и глубины слоя: амплитуда монотонно изменяется от максимальных значений на границе зоны упрочнения до минимальных значений в середине зоны. В области внутри зоны упрочнения минимальное значение амплитуды сигнала достигается также

Рис. 4. Зависимость ЭДС МШ от глубины  $h$  слоя лазерного упрочнения.

примерно в середине области, где величина ЭДС МШ практически не изменяется, — появляется «полочка». Наличие «полочки» так же отмечалось в [6, 7].

Лазерное облучение при токах разряда 12,0-14,5 приводит к появлению площадки шириной 4 мм посередине зоны лазерного воздействия, где глубина слоя упрочнения и показания прибора ПИОН-01 практически постоянны (рис. 3в (6)). При токах разряда 10,5-11,5 характерно распределение глубины слоя с одним максимумом в центре (рис. 3в (1)).

На рис. 4 приведен график зависимости величины ЭДС МШ от средней глубины слоя лазерной закалки. Наблюдается монотонное уменьшение ЭДС МШ при повышении глубины слоя от 0,2 до 0,45 мм. В интервале глубины от 0,45 до 0,6 мм МШ достигают насыщения и практически не изменяются.

Можно предположить, что глубина поверхности слоя порядка  $\Delta = 0,45$  мм является максимальной толщиной информативного слоя при ЛУС в нашем исследовании.

Следует отметить, что аналогичные рис. 3 профилограммы получены в [6—8] для сталей С120, СТ45, 30ХРА, У10, Х12М и чугуна СЧ25, СЧ18-36, СЧ15-3, СЧ24-44, в которых глубина информативного слоя определяется в пределах 0,2-0,6 мм. В [6, 7] толщина информативного слоя определена в пределах 0,8-1,0 мм, что, по-видимому, связано с более чувствительной методикой и режимами регистрации МШ.

**Пример 3.** Методы поверхностного пластического деформирования (ППД) широко применяются для повышения усталостной прочности и долговечности стальных изделий. Перспективность применения метода МШ для контроля качества этого типа упрочнения поверхностных слоев деталей показана в [1, 2, 11—13].

Главной целью при проведении статического (алмазного выглаживания, обработки роликом) и динамического (пескоструйного, дробеструйного обработок) поверхностного пластического деформирования является создание в поверхностном слое благоприятного распределения напряжений сжатия  $\sigma$ , которые будут в процессе эксплуатации изделий препятствовать раскрытию трещин и увеличивать усталостную прочность металла.

Наиболее часто в качестве характеристик упрочненного слоя используют глубину упрочненного слоя  $h$ , которая определяется областью существования напряжений сжатия или точкой перехода через нуль кривой  $\sigma(h)$  [1].

При реализации процессов поверхностного пластического деформирования материалов и изделий с гомогенной структурой на поверхности формируются упрочненные слои с неравномерным распределением механических напряжений по глубине. Для материала с заданным составом и твердостью предполагается, что ЭДС скачков Баркгаузена будет зависеть только от величины и распределения механических напряжений.

Упрочнению дробью подверглись цилиндрические образцы ( $d = 12$  мм,  $l = 140$  мм) из стали 30ХГСН2А структуры сорбит. При исследовании процесса дробеструйной обработки рассматривались следующие факторы: диаметр дробин  $D$ , давление воздуха в упрочняющем устройстве  $P$ , продолжительность обработки  $\tau$  и число загружаемых в приспособление шариков  $n$ . Измерение магнитных шумов и режимов их регистрации осуществлялось с использованием магнитно-шумовых приборов АФС и ПИОН, описанных в [2, 11, 14].

Остаточные напряжения в образцах определялись рентгеноструктурным анализом и методом сравнения. Рентгенограммы записывались на дифрактометре ДРОН-2 с использованием дифракционных линий (200) основного материала и (300) эталонного вольфрама. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя определялось путем последовательного удаления напряженных слоев электролитическим травлением с помощью прибора ПИОН-3. Электролитом служил раствор серной и ортофосфорной кислот. При определении параметров поверхностных слоев изделий использованы данные параллельных испытаний не менее трех образцов.

На рис. 5 представлены типичные эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из стали 30ХГСН2А микроструктуры сорбит после обработки дробью при различных режимах ППД.

Глубина упрочненного слоя  $\Delta h$  оценивалась областью существования напряжений сжатия или точкой перехода через нуль эпюры  $\sigma(h)$ . Для режимов ППД (рис. 5) ее можно определить как  $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$ .

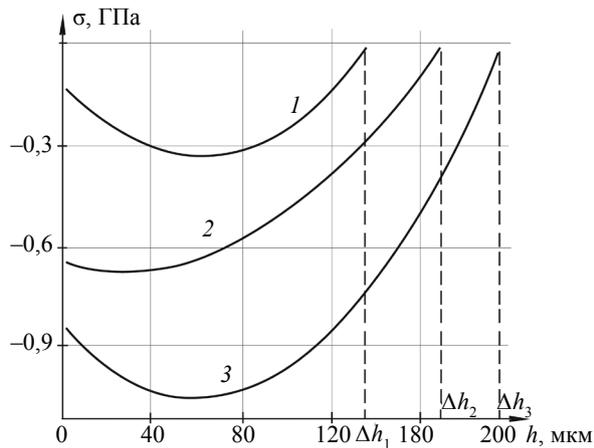


Рис. 5. Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое  $h$  после ППД дробью в режимах:  
 1 —  $D = 3$  мм,  $P = 0,1$  МПа,  $\tau = 0,5$  мин,  $n = 400$ ; 2 —  $D = 3$  мм,  $P = 0,1$  МПа,  $\tau = 1,5$  мин,  $n = 400$ ; 3 —  $D = 3$  мм,  $P = 0,4$  МПа,  $\tau = 1$  мин,  $n = 400$ .

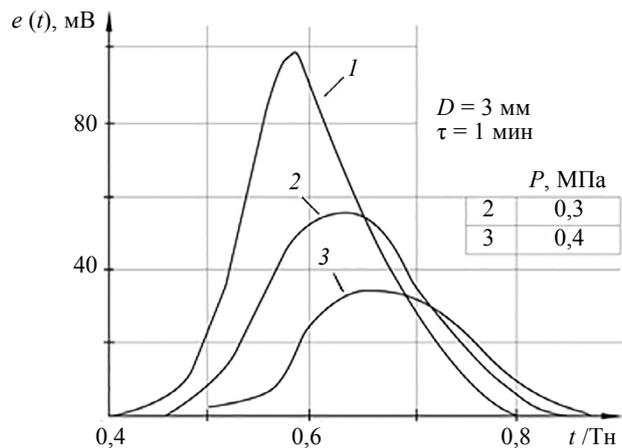


Рис. 6. Огибающие МШ при различных режимах после ППД дробью:  
 1 — неупрочненный; 2, 3 — упрочненный при различном давлении  $P$  воздуха в упрочняющем механизме.

В поверхностных слоях, подвергнутых пластическому деформированию, изменяется объемно-напряженное состояние, происходит увеличение плотности дислокаций, что приводит к уменьшению амплитуд импульсов ЭДС и числа скачков Баркгаузена, а значит, ЭДС МШ [1, 2, 11]. На рис. 6 приведены изменения огибающих ЭДС МШ в зависимости от режимов обработки стали 30ХГСН2А, подтверждающих этот вывод.

На рис. 7 приведена зависимость средневыпрямленного значения ЭДС МШ от глубины упрочняющего слоя  $h$  для режима 3, характеристики которого указаны на рис. 5. Эта зависимость совпадает с характером изменения кривых для ЛУС на рис. 4, где отмечается наличие точки, после которой ЭДС МШ практически не зависит от глубины упрочнения, которая принята за толщину информативного слоя  $\Delta$ . Аналогично можно величину  $h = \Delta$  принять за толщину информативного слоя при магнитошумовом контроле ППД. В нашей зависимости на рис. 7 можно оценить  $\Delta \approx 0,2$  мм.

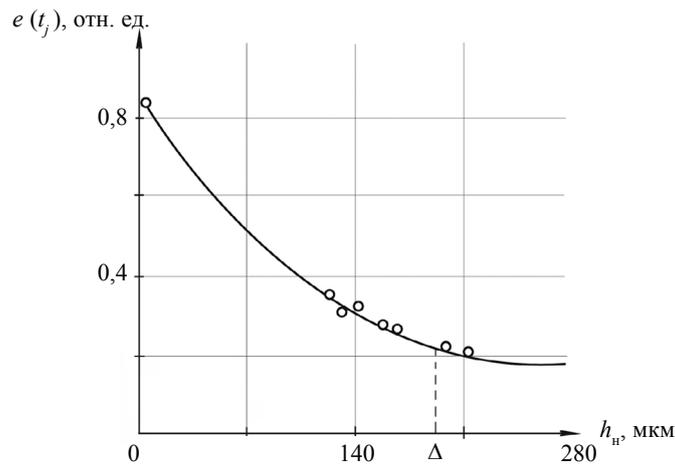


Рис. 7. Зависимость ЭДС МШ от глубины упрочненного слоя для режима ППД-3 (см. рис. 5).

Таким образом, экспериментально показана перспективность использования метода МШ для контроля параметров поверхностных слоев деталей в технологиях ППД и лазерной закалки. Толщину информативного слоя  $\Delta$  при контроле методом МШ можно определить экспериментально по зависимости ЭДС МШ от глубины упрочненного слоя, которая соответствует значению  $\Delta = h$ , где эта зависимость практически не изменяется (см. рис. 4 и 7). Информативный слой при магнитошумовом контроле лежит в пределах 0,2-0,3 мм (примеры 1, 3). Для технологий, связанных со значительным изменением электродинамических свойств поверхностных слоев (магнитной про-

нищаемости, электропроводности), при ЛУС информативный слой превышает 0,45 мм (пример 2) и может достигать значений 0,8-1,0 мм при оптимизации режимов и аппаратуры контроля МШ, как это показано в [1, 6, 7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М.А. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов (обзор V) // Дефектоскопия. 2000. № 6. С. 3—38.
2. Филинов В.В. Методы и приборы контроля механических напряжений на основе использования магнитно-акустических шумов. М.: Машиностроение, 2000. 154 с.
3. Titto S., Säynäjäkangas S. Spectral Damping in Barkhausen Noise // IEEE Trans. Magn. 1975. V. 11. № 6. P. 1666 — 1672.
4. Филинов В.В., Мерзляков Ю.М. К вопросу контроля параметров проводящих покрытий с использованием эффекта Баркгаузена. Эффект Баркгаузена и аналогичные физические явления / Под ред. Г.В. Ломаева. Ижевск: ИжГТУ, 1995. С. 165—171.
5. Венгринович В.Л. Определение толщины информативного слоя при магнитно-шумовой структуроскопии // Дефектоскопия. 1982. № 9. С. 83—87.
6. Венгринович В.Л., Якунин В.П., Леготин С.Д., Бусько В.Н. К вопросу о толщине информативного слоя при магнитно-шумовой структуроскопии // Дефектоскопия. 1986. № 2. С. 89—93.
7. Венгринович В.Л., Якунин В.П., Леготин С.Д., Бусько В.Н. Контроль параметров лазерно-упрочненных слоев ферромагнитных материалов методом эффекта Баркгаузена // Дефектоскопия. 1986. № 2. С. 87—89.
8. Малышев В.С., Машкович С.Б., Ломаев Г.В., Горючкин А.И., Кутанов Ю.И. Контроль импульсного лазерного упрочнения стали 30ХРА методом эффекта Баркгаузена // Дефектоскопия. 1986. № 12. С. 70—74.
9. Кокора А.Н., Жуков А.А., Эпштейн Л.З. Поверхностное упрочнение деталей из серого чугуна излучением лазера непрерывного действия // Физика и химия обработки материалов. 1977. № 3. С. 28—34.
10. Седунов В.К., Андрияхин В.Н., Чеканова Н.Т., Белов В.Н. Изменение структуры и свойств гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания после лазерной обработки // МИТОМ. 1980. № 9. С. 8—13.
11. Филинов В.В., Соколик А.И., Шатерников В.Е. Влияние поверхностного пластического деформирования стальных изделий на параметры эффекта Баркгаузена // Дефектоскопия. 1986. № 6. С. 37—40.
12. Филинов В.В., Резников Ю.А., Вагин А.В., Кузнецов Н.С. Опыт применения метода эффекта Баркгаузена для контроля напряженного состояния деталей из высокопрочной стали // Дефектоскопия. 1992. № 5. С. 17—20.
13. Филинов В.В., Шатерников В.Е., Аракелов П.Г. Контроль технологических напряжений методом магнитных шумов // Дефектоскопия. № 12. 2014. С. 58—71.
14. Филинов В.В., Микаева С.А., Родюков М.С., Филинова А.В. Разработка средств неразрушающего контроля изделий из ферромагнитных сталей на основе использования магнитных шумов // Рос. технол. журн. 2017. Т 5. № 3. С. 114—124.