

же области наблюдается наибольшее преимущество МИСПГ по сравнению с МИС, характеризующееся монотонным возрастанием функции rev .

3. При начальных добротностях контура $Q \approx 20$ использование режима наилучшей линейности позволяет уменьшить коэффициент гармоник в 4,5–3 раза по сравнению с режимом настройки контура в резонанс при $H \rightarrow \infty$ и при этом начальная расстройка контура значительна.

МВТУ имени Н. Э. Баумана

Поступила в редакцию
11 мая 1983 г;
в окончательном варианте —
7 декабря 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Карпов В. М. Измерительный мост. Авт. свид. № 585450. — Бюлл. изобр., 1977, № 47.
- Карпов В. М. Вихревоковой способ измерения параметров объекта. Авт. свид. № 551553. — Бюлл. изобр., 1975, № 11.

УДК 620.179.14

КОНТРОЛЬ ГЛУБИНЫ И ТВЕРДОСТИ ЗАКАЛЕННЫХ ПОСЛЕ НАГРЕВА ТВЧ СЛОЕВ НА ШЕЙКАХ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА АВТОМОБИЛЯ

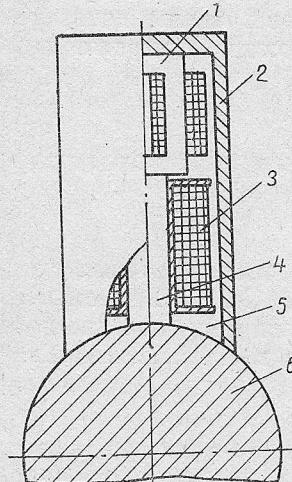
М. Н. Михеев, Г. В. Бида, В. Н. Костин,
А. А. Михайлова, Т. Н. Каюкова

Описан метод неразрушающего магнитного контроля глубины и твердости закаленных после нагрева ТВЧ слоев на коренных и шатунных шейках коленчатого вала автомобиля ЗИЛ-157. Коэрцитивную силу в поверхностном слое шеек измеряли коэрцитиметром КИФМ-1 с цилиндрическими преобразователями.

Коленчатые валы автомобиля ЗИЛ-157 изготавливают из стали 45. Вал имеет 13 шеек: 7 коренных и 6 шатунных диаметрами 66,7 и 63,8 мм. Длина коренных шеек разная — 70, 60, 40, 35 мм, длина шатунных 35 мм. Для закалки шейки нагреваются токами высокой частоты до 860°C и охлаждаются водой. Нагрев шейки производится двумя накладными индукторами; в местах стыка этих индукторов могут оставаться незакаленные участки шеек. Твердость закаленного слоя 52–62 HRC, глубина (толщина) — не менее 3,25 мм.

Для контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев на стальных изделиях используются коэрцитиметры КИФМ-1. Преобразователь серийного коэрцитиметра представляет собой П-образный приставной электромагнит с вмонтированным в его ярмо феррозондом рамочного типа [1]. Возможность применения коэрцитиметров для оценки толщины и твердости слоев на изделиях определяется двумя факторами: различием физических свойств (в первую очередь коэрцитивной силы) поверхностного слоя и сердцевины, а также зависимостью эффективной глубины проникновения намагничающего и размагничающего потоков от геометрических размеров полюсов электромагнита [2]. Вариация попечечных размеров полюсного наконечника электромагнита позволяет

Рис. 1. Схематическое изображение цилиндрического преобразователя.



производить измерение средней величины коэрцитивной силы в поверхностном слое изделия заданной глубины. В [2] даны рекомендации по выбору этих размеров.

Применение в рассматриваемом случае П-образного преобразователя оказалось затруднительным, поскольку любой из его габаритных размеров, обеспечивающих выполнение упомянутых рекомендаций, превосходит минимальное расстояние между галтелями коленчатого вала (35 мм), определяющее длину шейки. Поэтому использовали цилиндрический преобразователь [3], выполненный в виде цилиндрического электромагнита (рис. 1) с коаксиально расположенными полюсами [4]. Феррозонд 1 является продолжением внутреннего сердечника 4, на котором расположена намагничивающая (размагничивающая) катушка 3. Наружная часть 2 сердечника электромагнита выполняет еще роль корпуса и экрана. Пространство 5 заполняется эпоксидной смолой. Принцип работы этого преобразователя рассмотрен в работе [5].

Не всегда при контроле П-образный преобразователь можно заменить цилиндрическим, хотя последний обладает бесспорными преимуществами. Контролируемый участок изделия здесь строго локализирован, его размеры не превосходят диаметр наружного полюса электромагнита. Боковое рассеяние полностью отсутствует [2], что позволяет с достаточной точностью оценить эффективную глубину проникновения в изделие магнитного потока [6]. Феррозонд, помещенный в его магнитную цепь, менее чувствителен к зазору между полюсами и испытуемым изделием. Это видно из полученного ранее [5, 7] выражения, связывающего показания I_{pc} коэрцитиметра с коэрцитивной силой H_{ci} изделия и параметрами магнитной цепи

$$I_{pc} = \frac{1}{W} \left(H_{ce} l_e + H_{ci} l_i \frac{R_F}{R_F + R_\delta + R_\alpha} \right), \quad (1)$$

где W — число витков катушки размагничивания; H_{ce} , H_{ci} , l_e , l_i — соответственно коэрцитивная сила и средние эффективные длины сердечника электромагнита и изделия; R_F , R_δ — магнитные сопротивления потоку рассеяния изделия и суммарного зазора между полюсами электромагнита и изделием; R_α — дифференциальное магнитное сопротивление изделия в поле, равном H_{ci} .

Из выражения (1) видно, что менее чувствителен к упоминаемому зазору тот преобразователь, для которого соотношение R_δ/R_F ниже. При одинаковой площади поперечных сечений сердечников для цилиндрического преобразователя R_F более чем на порядок выше, чем для П-образного. При этом немаловажным преимуществом являются большая технологичность и жесткость конструкции. Рабочую часть цилиндрического преобразователя также можно выполнить в соответствии с формой поверхности многих типов контролируемых изделий.

Было показано [6], что среднюю эффективную глубину z промагничивания изделия цилиндрическим электромагнитом с коаксиально расположенными полюсами можно оценить по формуле

$$z \approx \frac{B_e}{B_\alpha} \frac{D^2}{4(D+t)}, \quad (2)$$

где B_e — магнитная индукция во внутреннем полюсе электромагнита; D — диаметр этого полюса; t — расстояние между полюсами; B_α — магнитная индукция в изделии, соответствующая максимальной магнитной проницаемости материала. Выражение (2) можно использовать как для оценки глубины промагничивания изделия готовым электромагнитом, так и для определения D по заданной толщине поверхностного упрочненного слоя на изделии [6].

При постановке неразрушающего контроля глубины и твердости закаленных слоев на шейках коленчатого вала исходили из следующих соображений. Преобразователь будет пригодным для выявления слоев, толщиной ниже допустимой, если выполняется условие $z=d_{\text{доп}}$, где $d_{\text{доп}}$ — минимальная допустимая толщина слоя. Если требуется контролировать твердость, то основная часть магнитного потока в изделии должна протекать на глубине, меньшей чем $d_{\text{доп}}$, поэтому здесь принимают $z < d_{\text{доп}}$. Полагая в (2) $B_0=1,8$, $B_\perp=0,9$ Тл (сталь 45 в закаленном состоянии), $z=3,25$ мм, $t=10$ мм, получили диаметр внутреннего сердечника электромагнитов преобразователей одного типа (1), предназначенных для контроля глубины закаленного слоя на шейках коленчатого вала, равный 12 мм. Для преобразователей другого типа (2), предназначенных для оценки твердости слоев, $D=9$ мм; расчетная

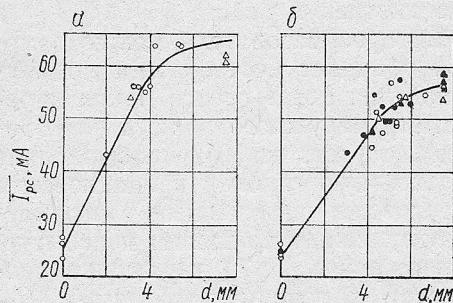


Рис. 2. Зависимости показаний коэрцитиметра с преобразователями 1 от глубины закаленного слоя на коренных больших (а), коренных малых и шатунных (б) шейках коленчатого вала:
 ○ ● — испытуемые шейки; △▲ — контрольные шейки; ○△ — коренные шейки; ●▲ — шатунные.

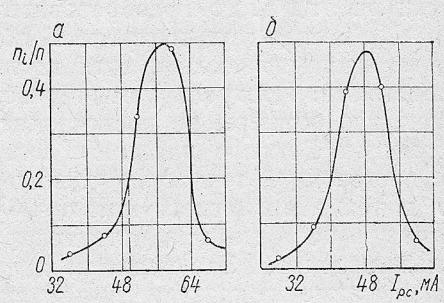


Рис. 3. Кривые распределения по показаниям коэрцитиметра с преобразователями 1 коренных больших (а), коренных малых и шатунных (б) шеек коленчатого вала.

глубина проникновения магнитного потока здесь равна 2 мм. Наружный диаметр преобразователей 34 мм. Рабочие поверхности полюсов подогнали по форме шеек (см. рис. 1).

Для испытания преобразователей и градуировки прибора была изготовлена партия коренных и шатунных шеек, прошедших закалку после нагрева ТВЧ при различных режимах работы нагревательных индукторов. С целью вариации толщины и твердости закаленного слоя изменили время нагрева и охлаждения шеек. В одном и том же режиме обрабатывали две однотипные шейки. На одной шейке (контрольной) измеряли твердость и глубину закаленного слоя. Последнюю определяли методом оптической микроскопии по структуре, причем толщина слоя отсчитывалась от поверхности до появления в структуре феррита. Вторая шейка (испытуемая) предназначалась для коэрцитиметрических измерений. При этом полагалось, что параметры слоев шеек идентичны.

Из данной партии были отобраны шейки, имеющие твердость не ниже 52 HRC и разную толщину слоя. Они предназначались для получения градуировочных зависимостей $I_{pc}(d)$ для преобразователей типа 1. Результаты измерений показали, что коренные шейки следовало разбить на две группы, разделив их по длине на большие (первая, четвертая, седьмая; их длина составляла соответственно 40, 70 и 60 мм) и малые (вторая, третья, пятая, шестая, длиной 35 мм). Шатунные шейки составляли третью группу, поскольку I_{pc} здесь измеряли с помощью другого преобразователя. Однако оказалось, что их можно объединить с малыми коренными шейками. Вероятно, этому способствовала

идентичность преобразователей типа 1 и сравнительно небольшая разность диаметров шеек. Градуировочные линии представлены на рис. 2 a , b . Видно, что в диапазоне глубин слоев от 0 до 4 мм усредненные по 5—6 измерениям показания коэрцитиметра \bar{I}_{pc} практически линейно увеличиваются с ростом d , дальше возрастание \bar{I}_{pc} замедляется. Рассеяние экспериментальных точек около градуировочных линий связано, в первую очередь, с некоторым варьированием твердости. По графикам предварительные браковочные пределы установили следующим образом: для больших коренных шеек $\bar{I}_{pc} = 50$ мА, для малых коренных и шатунных шеек — 40 мА.

В общем случае при решении задач неразрушающего контроля параметров закаленных с нагрева ТВЧ слоев, особенно на изделиях из легированных сталей, необходимо учитывать влияние исходной структуры (сердцевины) [8]. Однако в данном случае его не учитывали. Измерения I_{pc} на большом количестве термически необработанных коленчатых валов показали, что такой необходимости нет, так как при этом показания коэрцитиметра изменялись мало (см. рис. 2, при $d=0$). Не было обнаружено корреляции между I_{pc} нормально термообработанных шеек до закалки и после нее.

Для оценки возможности контроля твердости закаленных слоев с помощью преобразователей типа 2 была испытана группа коренных шеек, имеющих разную твердость закаленного слоя; при этом разной была и глубина слоя. Результаты испытаний приведены в табл. 1. Видно, что преобразователь типа 2 имеет хорошую чувствительность к изменению твердости закаленного слоя — величина I_{pc} для групп образцов с нормальной 54—61 HRC и пониженной 43—50 HRC твердостью отличаются в 1,5 раза. При этом величина размагничивающего тока практически не зависит от вариации глубины закаленного слоя в допустимых по ТУ пределах.

Таблица 1

Зависимость показаний коэрцитиметра с преобразователями № 2
от глубины и твердости закаленного слоя

Вид шеек	Глубина закаленного слоя, мм	\bar{I}_{pc} , мА	Твердость закаленного слоя, HRC
Большие коренные	4,6	39	43—50
	7,7	31	
	3,0	54	54—61
Малые коренные	5,7	45	
	Не опр.	55 55	60—63
	3,0	20	43—50
	4,6	47	54—61
	Не опр.	41	60—63

Коэрцитиметры с описанными преобразователями были испытаны в производственных условиях. Измерения провели на 192 больших и 640 малых коренных и шатунных шейках коленчатых валов. Кривые распределения этих групп шеек по показаниям коэрцитиметра с преобразователем типа 1 приведены соответственно на рис. 3 a , b . Оси ординат представляют отношения количества шеек n_i , соответствующих i -му интервалу показаний коэрцитиметра, к общему числу n шеек данной группы. Проверка методом вероятностных сеток показала, что по-

лученные распределения близки к нормальному. Из рис. 3 видно, что установленные ранее нижние браковочные границы \bar{I}_{pc} , равные 50 и 40 мА, соответствуют доверительной вероятности $P \approx 0,80$.

Техническими условиями предусмотрена предельно допустимая ширина δ незакаленной зоны шеек (рис. 4): для больших коренных шеек 8 мм, для шатунных и малых коренных 6 мм. В связи с этим была исследована возможность выявления шеек с завышенной шириной δ .

Предварительно испытали П-образный преобразователь с различной формой полюсов наконечников. Однако он оказался слабо чувствительным к ширине незакаленной зоны, поскольку не обеспечил надежной локализации контролируемого участка шейки и на результат контроля влияли глубина и твердость закаленного слоя.

Удовлетворительные результаты получены для преобразователей (рис. 5), выполненных по типу описанного выше (см. рис. 1) цилиндри-

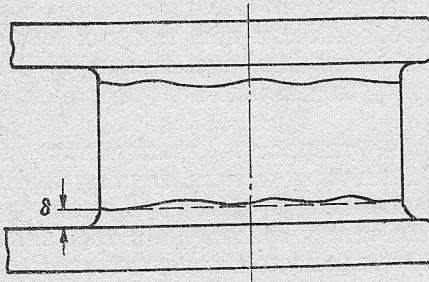


Рис. 4. Схематическое изображение незакаленной зоны на шатунной шейке коленчатого вала.

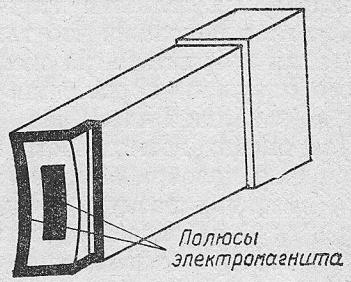


Рис. 5. Схематическое изображение рабочей части преобразователя 3.

ческого, но с прямоугольным профилем рабочей части (преобразователь 3). Размеры внутреннего полюса 6×16 мм, расстояние между полюсами 6 мм. Чтобы уменьшить влияние закаленного слоя на показания коэрцитиметра, участок наружного полюса электромагнита, находящийся над закаленной частью шейки, был срезан, в результате чего образовался с ее поверхностью зазор. Преобразователи были испытаны в производственном потоке.

Таблица 2

Уравнения связи ширины незакаленной зоны на шейках коленвала
с показаниями коэрцитиметра и параметры корреляции

Тип шейки	Уравнение связи	r	S_n , мм	\bar{I}_{pc} , мА	$\sigma_{I_{pc}}$, мА	$\bar{\delta}$, мм	σ_δ , мм
Коренная	$\delta = 22 - 0,58 I_{pc}$	-0,66	1,27	33,3	2,1	4,2	2,85
Шатунная	$\delta = 19 - 0,50 I_{pc}$	-0,60	1,03	32,6	1,9	2,9	1,53

В табл. 2 приведены уравнения связи ширины незакаленной зоны δ и показаний коэрцитиметра I_{pc} , коэффициенты парной корреляции r , средние квадратические отклонения S_n ширины зоны от значений, получаемых из уравнения, средние значения показаний коэрцитиметра \bar{I}_{pc} и ширины слоя δ и их средние квадратические отклонения. С учетом этих данных были установлены нижние доверительные границы показаний коэрцитиметра \bar{I}_{pc} , выше которых с надежностью 0,95 коренные и шатунные шейки удовлетворяют техническим требованиям. Для больших коренных шеек $\bar{I}_{pc} = 29$ мА, для малых коренных $\bar{I}_{pc} = 32$ мА, для шатунных $\bar{I}_{pc} = 30$ мА.

Проверка уравнений табл. 2 по отдельной партии коленчатых валов показала, что между неразрушающим и прямым (травлением) методами контроля ширины незакаленной зоны нет статистически значимого различия. Для удобства осуществления процесса контроля к прибору КИФМ-1 придается переходный блок, который позволяет оперативно подключать к измерительному блоку один из шести преобразователей (по два преобразователя 1, 2 и 3).

Таким образом, приведенные результаты испытаний преобразователей подтвердили возможность их успешного применения для неразрушающего контроля глубины и твердости закаленных после нагрева ТВЧ поверхностных слоев, а также ширины незакаленных участков на шейках коленчатых валов автомобиля ЗИЛ-157. В настоящее время коэрцитиметр КИФМ-1 с упомянутыми преобразователями успешно применяется на ПО «ЗИЛ».

Институт физики металлов
УНЦ АН СССР

Поступила в редакцию
19 июня 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев М. Н., Морозова В. М., Неизвестнов Б. М., Сурин Г. В. Коэрцитиметры с приставными электромагнитами. — Дефектоскопия, 1969, № 2, с. 131—133.
2. Михеев М. Н. О выборе оптимальных геометрических размеров приставных электромагнитов коэрцитиметра, предназначенного для контроля качества термической и химико-термической обработки стальных и чугунных изделий. — ФММ, 1957, 5, вып. 1, с. 44—52.
3. Бида Г. В., Михеев М. Н. Ферропондовый коэрцитиметр. Авт. свид. № 469107. — Бюлл. изобр., 1975, № 16.
4. Бида Г. В., Михеев М. Н. Коэрцитиметр с переносной индикаторной системой. — Дефектоскопия, 1976, № 5, с. 121—123.
5. Бида Г. В., Михеев М. Н. Расчет коэрцитиметра с цилиндрическим приставным электромагнитом. — Дефектоскопия, 1977, № 3, с. 97—101.
6. Бида Г. В., Михеев М. Н., Костин В. Н. К определению размеров приставного электромагнита, предназначенного для неразрушающего контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев. — Дефектоскопия, 1984, № 8, с. 10—16.
7. Фридман Л. А., Францевич В. М., Табачник В. П. К работе ферродатчика в приставном коэрцитиметре. — Дефектоскопия, 1967, № 1, с. 71—77.
8. Михеев М. Н., Бида Г. В., Ригмант М. Б. и др. Магнитный контроль качества поверхностной закалки зубьев крупногабаритных шестерен. — Дефектоскопия, 1982, № 2, с. 16—19.

УДК 620.179.14

МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПО ПАРАМЕТРАМ МАГНИТНОГО ШУМА

П. Г. Кузнецов, Р. П. Петров

Рассматривается возможность применения методов распознавания образов для неразрушающего контроля поверхностных свойств изделий из ферромагнитных материалов по огибающей магнитного шума. Показано, что в результате их использования может быть получена высокая надежность распознавания степени наклена и режимов термообработки.

Метод магнитных шумов, основанный на эффекте Баркгаузена, в настоящее время находит все большее применение для решения задач неразрушающего контроля структуры и физико-механических свойств ферромагнитных материалов и изделий из них [1—5]. Традиционная методика использования метода магнитных шумов для неразрушающего контроля заключается в отыскании попарных одномерных корреляционных связей между контролируемыми параметрами и