

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ МАГНИТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА



Сергей Сандомирский,
завлабораторией металлургии
в машиностроении Объединенного
института машиностроения
НАН Беларуси, доктор технических
наук, доцент

Появление современных народно-хозяйственных объектов – атомных электростанций, промышленных производственных комплексов, крупных авиалайнеров и автомобилей, химических комбинатов, буровых установок – вместе с экономическими выгодами привело и к негативным последствиям в случае выхода их из строя. Развитые страны ежегодно теряют до 10% своего национального дохода из-за низкого качества выпускаемой продукции. Человечество не может отказаться от таких сооруже-

ний, но оно может предотвратить катастрофы или уменьшить их последствия путем эффективного использования методов и средств неразрушающего контроля (НК) [1]. Усложняющиеся задачи повышения качества промышленной продукции и надежности объектов требуют совершенствования методов и средств НК. Необходимы количественная обработка данных, оптимальные алгоритмы интегральной оценки изделий.

В основе решения задач НК лежит выбор физического явления, дающего наиболее объективную информацию о контролируемом параметре. Любой процесс НК состоит из воздействия на объект каким-либо физическим полем, получения, преобразования и обработки информации с принятием соответствующего решения. Физическое поле определяет вид НК, а использование в нем разных преобразований информации – соответствующий метод [2]. Важнейшей задачей становится не только фиксация дефекта как уже возникшего отклонения

от нормируемого параметра, но и регистрация физических эффектов, предшествующих переходу структуры материала изделия в проблемное состояние. Возможности ее успешного решения расширяются благодаря достижению нового уровня интеллектуальных средств. Расскажем о достигнутых результатах в одном из важных разделов НК – магнитном структурном анализе.

На металлургических и машиностроительных предприятиях выпускаются массовые партии изделий из сталей и чугунов заданной структуры. Нарушение режимов их охлаждения и термообработки, отклонения в химическом составе материалов от заданных параметров приводят к недопустимым изменениям свойств. Прямые методы их определения являются разрушающими и не могут быть использованы для контроля изделий, предназначенных для эксплуатации. Современное развитие науки позволяет прогнозировать возможность применения магнитного метода для неразрушающего

контроля режимов термообработки, химического, структурного и фазового состава изделий из ферромагнитных материалов, а современная приборная его реализация дает возможность делать это в автоматическом режиме в цехах и заводских лабораториях.

Самый распространенный конструкционный материал – железо и многие сплавы на его основе обладают ферромагнитными свойствами. Их намагниченность M в магнитном поле H изменяется не линейным и не однозначным образом (рис. 1), а магнитная проницаемость μ может многократно превышать значение «1». Это стало одним из факторов, определивших технический прогресс. На использовании этого физического явления базируется наука электротехника и связанные с ней области промышленности.

Электротехнические исследования позволили установить основные магнитные параметры материалов, характеризующие их ферромагнитные свойства. Кроме μ это коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность M_r и намагниченность M_s технического насыщения (рис. 1).

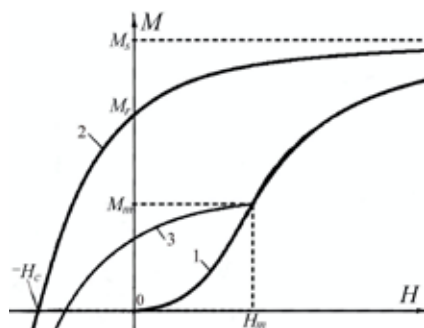


Рис. 1. Участок основной кривой намагничивания (1), нисходящей ветви предельной (2) и частной (3) петель гистерезиса ферромагнитного материала

Их определения приведены в [3], а методики измерения – в [4]. При соблюдении требований [4] относительная погрешность δ измерения H_c ферромагнитных материалов не превышает $\pm 2\%$, M_r и M_s – $\pm 3\%$, а δ отношения $K_H = M_r/M_s$ при определении M_r и M_s на одной и той же аппаратуре не превышает $\pm 1\%$ [5].

Не существует точной аналитической формы записи функции $M(H)$ с учетом процессов формирования, роста, переориентации элементарных объемов намагничивания – магнитных доменов. Наиболее точно намагничивание конструкционных ферромагнитных материалов по параметрам предельной петли гистерезиса описывают формулы, разработанные в [6, 7]. В соответствии с ними кривая намагничивания, предельная и частные петли гистерезиса (рис. 1) материалов могут быть рассчитаны с достаточной для практики точностью по H_c , M_s , M_r и H_m .

Использование ферромагнитных свойств материалов не ограничено электротехникой. Оказалось, что магнитные свойства (H_c , M_r) многих сталей связаны с их структурным состоянием и (M_s) фазовым составом. Это явилось физической основой другой области науки – магнитного структурно-фазового анализа [8, 9]. Было установлено, что механические и магнитные свойства сталей и чугунов чувствительны к структурным превращениям, происходящим при термических обработках, и тесно корреляционно связаны [10]. Изменения структурного состояния этих материалов приводят к закономерному изменению их магнитных и механических свойств.

Измерения магнитных свойств конструкционных материалов проводят на кольцевых или прямолинейных образцах на аппаратуре, удовлетворяющей требованиям [4]. Современные компьютеризированные комплексы «REMAGRAPH C-500» и «REMAGRAPH C-300» [11] обеспечивают построение полного статического гистерезисного цикла материалов за 70 сек. Установлены зависимости магнитных и механических свойств от структурного состояния, температуры нагрева при закалке и отпуске для большинства сталей и чугунов. Но существующая аппаратура не применима в производстве из-за высокой стоимости, низкой производительности и разрушения изделий для изготовления образцов.

Параметром, наиболее чувствительным к изменениям структуры магнитных материалов, является H_c . Она определяется величиной сил, задерживающих необратимое смещение границ между доменами при перемагничивании. Факторами, способствующими этому, могут быть неферромагнитные включения разной формы и дисперсности, напряжения и их градиенты, обусловленные дислокациями и другими причинами, границы фаз, зерен, другие неоднородности и дефекты кристаллического строения [12]. Характерные зависимости изменения магнитных параметров углеродистых сталей от температуры отпуска приведены на рис. 2, а чугунов с разной структурой – в таблице.

Закономерный характер установленных зависимостей позволил [13, 14] обобщить их и получить аналитические связи H_c с температурой закалки и отпус-

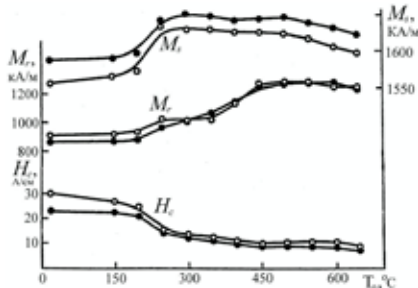


Рис. 2. Зависимости H_c , M_s и M_r закаленных сталей 30 (●) и 45 (○) от температуры T_0 отпуска

ска сталей с учетом содержания в них легирующих элементов. Это позволяет при известном химическом составе и температуре закалки рассчитать зависимости H_c разных марок сталей от температуры отпуска. Магнитный контроль качества термообработки и структуры стальных и чугуновых изделий во многих случаях может быть основан на различии их H_c .

Коэрцитиметрические методы магнитного структурного анализа

Наибольшее распространение получили методы, основанные на косвенном определении H_c по току размагничивания приставных магнитных устройств [15]. Отметим создание портативных автономных коэрцитиметров [16], использование постоянных магнитов для измерения H_c изделий [17] и дополнительных магнитных параметров при «неэлектрическом» их намагничивании [18].

Методы контроля изделий по полю от остаточной намагниченности после их намагничивания по методу «точечного полюса» [19] и по остаточному магнитному потоку Φ_d [20] используют особенности формирования остаточ-

ной намагниченности в разомкнутой магнитной цепи: малогабаритное изделие, намагниченное до насыщения, после снятия внешнего поля сохраняет остаточную намагниченность тела M_d , которая меньше остаточной намагниченности материала изделия M_r (рис. 3).

Во многих случаях можно считать $M_d = H_c/N$, где N – размагничивающий фактор тела. При постоянных размерах изделия ($N = const$) M_d определяется H_c и является структурно чувствительным параметром. На этом основан и метод «точечного полюса» [19], заключающийся в контакте одного из полюсов постоянного магнита (электромагнита, соленоида с током) с контролируемой поверхностью и последующем измерении составляющих поля остаточной намагниченности (или его градиентов) над намагниченным участком.

Коэрцитиметрический эффект метода обусловлен большим N намагниченного участка. Анализ [19] теоретических и экспериментальных исследований метода «точечного полюса» позволил разработать прибор «Магнитный сортировщик МС» разных модификаций (рис. 4) [21].

К достижениям метода отнесем контроль твердости чугуновых отливок [22], анализ влияния размеров датчиков на их чувствительность к H_c материала изделия и анализ изменения чувствительности метода при измерении разных параметров поля на расстоянии от поверхности [23]. Установлено, что вблизи намагниченной поверхности чувствительность градиента поля остаточной намагниченности к H_c материала изделий выше, чем чувствительность к H_c поля остаточной намагниченности. С увеличением расстояния до поверхности и размеров измерительных преобразователей чувствительности этих параметров к H_c материала изделий резко уменьшаются. За счет измерения второго параметра – поля от изделия и при намагничивании – разработан способ снижения (на порядок) влияния непостоянства зазора между датчиком и изделием на результаты контроля свойств изделия при одностороннем доступе к поверхности (рис. 5) [24].

Повышение локальности метода «точечного полюса» обеспечит применение изобретения [25], в котором постоянный магнит помещен в скрепленный

Тип чугуна	Металлическая основа	H_c (А/см)	M_r (А/см)	M_d (кА/м)
Белый чугун		10,4–12,8	10 350	400–440
Серый чугун	Ферритная	2,0–4,0	14 330	240–440
	Перлитная	5,6–10,6	13 930	320–560
Высокопрочный чугун	Ферритная	1,2–2,0	15 130	240–480
	Перлитная	4,0–8,8	14 730	400–640
Ковкий чугун	Ферритная	1,2–2,0	14 330	440–560
	Перлитная	4,0–8,8	13 930	480–600

Таблица. Магнитные свойства чугунов с разной структурой

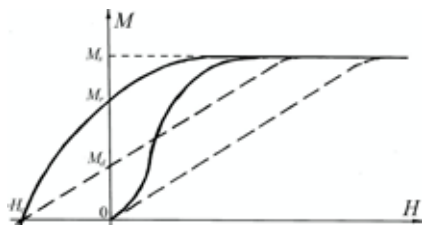


Рис. 3. Кривая намагничивания и часть нисходящей ветви предельной петли магнитного гистерезиса ферромагнитного материала и тела (пунктир)

с ним кожух рассчитанной толщины из магнитомягкого материала. Полученные результаты позволят совершенствовать прибор «Магнитный сортировщик МС» [21] для структурного анализа крупногабаритных отливок при наличии окалины на поверхности непосредственно в цехах промышленных предприятий.

Формулы для расчета размагничивающего фактора изделий

Сплошной и полый цилиндр, пластина и стержень произвольного сечения служат физической моделью многих промышленных объектов. Параметром, определяющим процессы их намагничивания и функционирования, является центральный коэффициент N размагничивания. На основе проведенных исследований и анализа

к использованию в практических расчетах N разработаны и рекомендованы формулы [26].

Расчет намагничивания ферромагнитного тела

Достижимые в средствах магнитного НК намагничивающие поля недостаточны для намагничивания изделий в разомкнутой магнитной цепи до насыщения [27]. На основании формул [6] для изменения намагниченности ферромагнитного материала в [28] разработана методика расчета M_d изделия в разомкнутой магнитной цепи по H_c , M_s и M_r материала, размагничивающему фактору N изделия и напряженности H_e внешнего намагничивающего поля. Установлены физические ограничения магнитного НК, обусловленные недостаточным намагничиванием изделий [28, 29]. Установлено, что для изделий с большим N из материалов (таблица, рис. 2), H_c которых с изменением контролируемого параметра (например, температуры отпуска) уменьшается, а M_r – возрастает, при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи до состояния, далекого от магнитного насыщения, наблюдается повышение чувствительности M_d к контролируемым свойствам по сравнению с намаг-

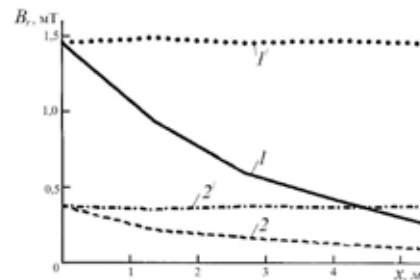


Рис. 5. Результаты применения способов [21] (1, 2) и [24] (1', 2') для контроля свойств листов из стали 65Г (1 и 1') и стали 3 (2 и 2') по остаточной индукции B_r при изменении зазора x между изделием и преобразователем

ничиванием до насыщения. Повышение чувствительности W параметра M_d после намагничивания отливок изделий «ниппель 1¼» (рис. 6А) в поле 46 кА/м к структуре отливок достигает 40% по сравнению с намагничиванием в замкнутой магнитной цепи (рис. 6Б) [30].

Эффективность такого режима намагничивания доказана [31, 32] при контроле структуры отливок изделий «ниппель 1¼».

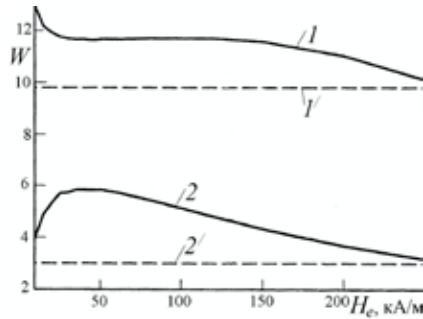
Влияние предварительной намагниченности изделий на их остаточную намагниченность после намагничивания в открытой магнитной цепи так же проанализировано [33] с использованием методики [28] расчета M_d изделия. Проведен анализ погрешности δ измерения M_d изделия после намагничивания в открытой магнитной цепи в поле H_e . Установлены границы применения магнитного НК свойств изделий при обработке в открытой магнитной цепи без предварительного размагничивания. Показано, что контроль с $\delta \approx 0$ при намагничивании изделий из материалов с $H_c \leq 1$ кА/м в поле $H_e = 40$ кА/м возможен при отношении длины к диаметру $\lambda \geq 8$, а при $H_e = 60$ кА/м – при $\lambda \geq 5$. Погреш-



Рис. 4. Модификации прибора «Магнитный сортировщик МС»



Рис. 6. Внешний вид отливки и готового изделия «ниппель 1¼» и зависимости отношения W остаточной намагниченности M_d отливок «ниппель 1¼» из белого чугуна к M_d этих отливок из ферритных ковкого (1) и серого (2) чугунов (магнитные параметры – средние значения из таблицы 1) от напряженности H_e намагничивающего поля. Расчет по методике [28]. 1', 2' – F после намагничивания отливок в поле $H_e = 1000$ кА/м



ность $\delta \approx 5\%$ при контроле в этих полях достигается при $\lambda \approx 6$ и 4. Для более коротких изделий применение магнитного метода рекомендовано для контроля не намагниченных (сразу после литья или термообработки) либо размагниченных изделий.

Современные средства контроля

Принципы магнитного НК структуры и механических свойств изделий из конструкционных материалов заключаются [20, 34] в использовании свободного падения контролируемых объектов с заданной высоты сквозь область с намагничивающим полем заданной напряженности, формировании на пути его движения локальной области с размагничивающим полем заданной напряженности и областей, где действие намагничивающего и размагничивающего полей скомпенсировано, измерении магнитного состояния изделия при движении в этих областях и обработке данных по разработанным алгоритмам. Показано, что, несмотря на действие на объект при намагничивании тор-

мозящей силы, многократно превосходящей силу тяжести, может быть выбрана высота падения изделий, обеспечивающая их пролет сквозь намагничивающее поле без зависания.

Создание за областью с намагничивающим полем H_o на пути движения изделия протяженной области с однородным магнитным полем основано на использовании эффектов одинаковой скорости уменьшения магнитного поля на оси катушек, имеющих разные внутренний и внешний диаметры, на разных расстояниях от их торцов, создания однородных поля и градиента поля катушками Гельмгольца и резкого уменьшения поля за пределами «без моментных» намагничивающих катушек и катушки с током, помещенной в экран рассчитанной толщины из магнитомягкого материала. Реализованные в приборах способы и устройства защищены более чем 20 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения.

Данные принципы обеспечили намагничивание изделий полем H_e до 50 кА/м и создание заданных распределений

(рис. 7) поля вдоль оси x движения изделий. Они реализованы в комплексе приборов «Магнитные анализаторы качества стальных изделий МАКСИ», автоматически сортирующих изделия на годные и брак с производительностью до 2 ед. в сек.

В приборе «МАКСИ (АНБ-692)» [20] с использованием индукционных безмоментных измерительных преобразователей определяют в изделии максимальный магнитный поток Φ_m при намагничивании и остаточный магнитный поток Φ_d в области, где намагничивающее поле скомпенсировано (зависимость 1 на рис. 7). В приборе «МАКСИ-2» [20] изделия перед измерением Φ_d частично размагничивают (зависимость 2 на рис. 7). Приборы [35] «МАКСИ-У (универсальный)» (рис. 8а, зависимость 3 на рис. 5) и «МАКСИ-Д (дизельный)» (зависимость 4 на рис. 7) обеспечивают создание заданных распределений магнитного поля на пути движения изделий и измерение их магнитных параметров. При этом снижено влияние изменений размеров изделий на результаты контроля.

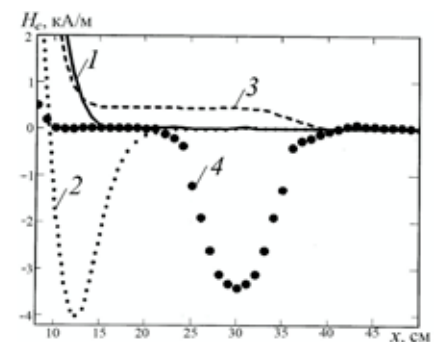


Рис. 7. Распределение $H_e(x)$ магнитного поля вдоль оси x движения изделий в преобразователях приборов: 1 – «МАКСИ (АНБ-692)» и «МАКСИ-Р»; 2 – «МАКСИ-2»; 3 – «МАКСИ-У»; 4 – «МАКСИ-Д»

В приборе «МАКСИ-П (портативный)» (рис. 8б) [20, 30–32] намагничивание изделия осуществляют бесконтактно ортогонально направлению его движения в стационарном поле 46 кА/м двухполюсной магнитной системы. Прибор измеряет Φ_d в изделии. «МАКСИ-Р» (рис. 8в) [50] также измеряет только Φ_d и применяется для контроля поверхностной закалки протяженных изделий.

Технические характеристики приборов «МАКСИ», надежность контроля и сортировки, удобство включения в действующие циклы производства подтверждены результатами метрологической аттестации, внедрением на заводах Беларуси и России. Приборы «МАКСИ-У» и «МАКСИ-Д», предназначенные для коэрцитивметрического контроля физико-механических свойств и сортировки деталей машиностроения, при производительности контроля до 2 изделий в сек. для продольных размеров изделий от 10 до 160 мм, поперечных – от 3 до 40 мм, аттестованы Госстандартом Республики Беларусь в диапазоне измерения с основной приведенной погрешностью не более $\pm 1,5\%$, а их намагничивающий ток – с погрешностью $\pm 0,5\%$. Это удовлетворяет и требованиям [4] к измерительной аппаратуре. Прибор «МАКСИ-П» аттестован с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$ (реальная погрешность измерения не превышала $\pm 1\%$).

Особенности контроля качества изделий из легированных сталей

Коэрцитивная сила H_c оказалась не пригодна для контроля качества средне- и высокотемпе-



Рис. 8. Базовые модели приборов магнитного неразрушающего контроля структуры изделий массового производства: «МАКСИ-У» (А), «МАКСИ-П» (Б), «МАКСИ-Р» (В)

ратурного отпуска закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3% из-за слабой или неоднозначной зависимости от температуры отпуска в области 400–600 °С (рис. 1). Между тем большинство изделий из конструкционных сталей подвергают отпуску в этом интервале температур. Разработка достоверного неразрушающего метода контроля качества термической обработки изделий из таких материалов стала одной из главных задач магнитного структурного анализа.

Частичное размагничивание изделий и последующее измерение Φ_d в них позволяет устранить неоднозначность связи H_c с механическими свойствами и температурой отпуска. Но чувствительность остаточного магнитного потока к изменениям механических свойств не достаточна для достоверного контроля. Для НК термообработки изделий из легированных сталей предложено [34, 36]: намагничивать их в процессе движения, измерить Φ_{d1} после выхода из области с намагничивающим полем, создать на пути движения локальную область с постоянным размагничивающим полем, измерить второе значение остаточного магнитного потока Φ_{d2} после выхода изделия из области с размагничивающим полем и о свойствах изделия судить по отношению F результата этого измерения к разности результатов первого и второго измерений. Установлено, что наилучшую достоверность контроля обеспечивает размагничивающее поле 2 кА/м. Информационный параметр F демонстрирует (рис. 9) высокую чувствительность к механическим свойствам изделий из среднеуглеродистых легиро-

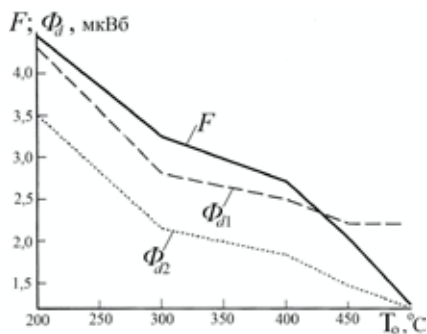


Рис. 9. Изменения информационных параметров приборов от температуры отпуска $T_{от}$ болтов из стали 40ХН: Φ_{d1} – «МАКСИ (АНБ-692)» и «МАКСИ-У»; Φ_{d2} – «МАКСИ-2» и «МАКСИ-Д»; F – «МАКСИ-У» с преобразователем «МАКСИ-Д»

ванных сталей и независимость результатов контроля механических свойств изделий от изменений их размеров в пределах технологических допусков.

Методика реализована прибором «МАКСИ-У» с модернизированным преобразователем прибора «МАКСИ-Д» (рис. 10). Ее применение обеспечило высокий коэффициент корреляции $R=0,85$ в линейном уравнении регрессии между пределом прочности болтов крепления противовеса из стали 40ХН и показаниями прибора, гарантировало заданные механические свойства болтов, позволило вернуть в производство тысячи дорогостоящих ответственных болтов дизельных двигателей (рис. 10) [34].

Контроль чугунных отливок массового производства по остаточному магнитному потоку Φ_d в отливке после намагничивания в разомкнутой магнитной цепи был реализован на Минском заводе отопительного оборудования и ряде российских металлургических заводов на базе прибора «МАКСИ-П». Намагничивающее поле ортогонально направлению движе-

ния намагниченного изделия. При этом объект индуцирует в измерительном преобразователе специальной конструкции сигнал, вольт-секундная площадь полуволны которого измеряется и индицируется на двухразрядном цифровом табло прибора. Результат Φ_d сравнивается с установленными пределами годности изделия по измеряемому параметру [37]. Фактический экономический эффект от эксплуатации автоматизированной линии контроля и разбраковки по обрабатываемости не обточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна КЧ 30–6 на базе приборов «МАКСИ-П» на Минском заводе отопительного оборудования в 2007 г. превысил в эквиваленте 400 тыс. долл. [37].

Одной из важных технологических операций придания заданных свойств ответственным деталям двигателей является поверхностная закалка их локальных участков. Наиболее массовой деталью дизельных двигателей производства Минского моторного завода, подвергаемой данной закалке, является регулировочный винт из стали 45 (рис. 11А). Деталь используется во всех модификациях двигателей (8–12 шт. на один). Поверхностной ТВЧ-закалке подвергают сферическую

поверхность ее торца. Требуемый диапазон твердости – от 45 до 63 единиц HRC. Существовавший выборочный контроль твердости головки винта (3 детали из партии в 500 штук с разрушением контролируемых деталей) не гарантировал необходимых показателей всех выпускаемых изделий (до 80 тыс. шт. в месяц). Отклонение от требуемой нормы хотя бы одного регулировочного винта приводило к его расплющиванию при эксплуатации двигателя, разрушению клапана и выходу из строя всей поршневой группы с последующим дорогостоящим ремонтом.

Максимальная чувствительность к качеству поверхностной закалки головки винтов оказалась у третьей гармонической составляющей сигнала накладного преобразователя, состоящего из возбуждающей и измерительной обмоток. Последняя выполнена в виде двух одинаковых половин, расположенных соосно симметрично относительно обмотки возбуждения и включенных между собой встречно (рис. 11Б). Исползованная геометрия контроля (рис. 11Б) обеспечила локальное действие поля преобразователя лишь на головку регулировочного винта. Установлено, что сигнал от головки «сырого»



Рис. 10. Прибор «МАКСИ-У» с преобразователем прибора «МАКСИ-Д» в ЦЗЛ филиала ММЗ в г. Столбцы и ответственные болты, возвращенные в производство после неразрушающего контроля

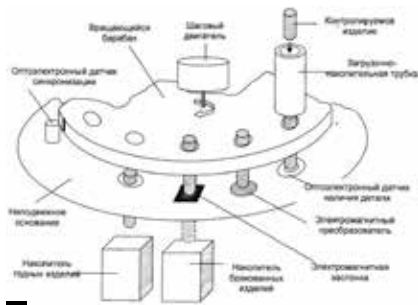


Рис. 11. Прибор «АС-1» в автоматном цехе филиала ММЗ в г. Столбцы (А) и кинематическая схема прибора (Б)

изделия в 4,5 раза превосходит сигнал от изделия, головка которого подвергнута поверхностной ТВЧ-закалке по технологическому режиму. Учитывая достигнутый уровень чувствительности, такой принцип электромагнитного воздействия на деталь и получения информации об ее свойствах использован в разработанном приборе «Автоматизированный сортировщик АС-1» (рис. 11) [38].

Необходимость совмещения принципа локального воздействия на закаленную головку детали с обеспечением высокой производительности контроля и автоматической сортировки по его результатам обусловила использование роторно-конвейерной кинематической схемы прибора (рис. 11б). При этом на таком конвейере одновременно выполняется измерение электромагнитного параметра детали, загрузка следующей в роторный транспортный механизм и сбрасывание предыдущих деталей в соответствующие накопители. Все измерительные и сортировочные процессы синхронизированы с шаговым вращением транспортного механизма. Такое построение прибора позволило измерить магнитный параметр изделия в статике (в моменты остановки шагового двигателя), обеспечи-

вая при этом высокую производительность контроля и автоматической сортировки изделий на годные и бракованные.

Эксплуатация прибора «АС-1» на филиале Минского моторного завода в г. Столбцы показала, что он обеспечивает 100%-ную гарантию допуска в эксплуатацию регулировочных винтов, соответствующих заданному диапазону твердости, а производительность прибора достаточна для автоматизированной сортировки всех выпускаемых заводом изделий.

Проведенный анализ современного состояния теорети-

ческих и экспериментальных исследований и приборной реализации магнитного контроля структуры изделий из ферромагнитных сталей и чугунов показал, что приборы созданы на основе обоснованного выбора метода контроля и измеряемого магнитного параметра, оптимизации магнитного воздействия на объект контроля, методов получения информации об измеряемом свойстве на фоне влияния мешающих факторов, с учетом особенностей намагничивания ферромагнитного материала и тела, необходимости автоматизации контроля, формирования и обоснования алгоритмов математической обработки сигналов с учетом корреляционного характера связей между измеряемыми магнитными параметрами и контролируемыми механическими свойствами изделий. Поэтому многие задачи контроля оказались возможным решить непосредственно в заводских цехах и лабораториях. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Клюев [и др.]; под ред. В.В. Клюева. – М., 1995.
2. Щербинин В.Е. Магнитный контроль качества металлов / В.Е. Щербинин, Э.С. Горкунов. – Екатеринбург, 1996.
3. ГОСТ 19693–74. Материалы магнитные. Термины и определения. – М., 1974.
4. ГОСТ 8.377–80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. – М., 1986.
5. Магнитные измерения / Е.Т. Чернышев [и др.]. – М., 1969.
6. С.Г. Сандомирский. Расчет изменения намагниченности на частных петлях гистерезиса сталей по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса / С.Г. Сандомирский // Электричество. 2016. №12. С. 39–43.
7. Клюев В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский. – М., 2017.
8. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М., 1993.
9. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн.1. Магнитные методы контроля / В.В. Клюев [и др.]. – М., 2006.
10. Сандомирский С.Г. Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей и чугунов. – Минск, 2021.
11. Steingroever E. Magnetic Measuring Techniques. Booklet / E. Steingroever, G. Ross // www.magnet-physik.de.

Полный список использованных источников размещен

SEE http://innosfera.by/2022/03/automatic_devices