

МАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ ИЗДЕЛИЙ.

Я. Г. Дорфман и К. В. Григоров, Ленинград.

При изготовлении стальных и железных изделий нередко является весьма важным знать степень однородности этих изделий и наличие в них разного рода пороков (трещин, раковин, включений и т. п.).

Для этого в последнее время начинает применяться так называемый магнитный анализ. Во многих случаях этот метод обладает несомненными преимуществами по сравнению с методами рентгенографическим и другими.

К таким преимуществам следует отнести его сравнительную быстроту, дешевизну, простоту.

Целью настоящей статьи является выяснение как сущности этого метода, так и возможности его практического применения.

Возможность магнитного контроля изделий основана на том, что между магнитными свойствами исследуемого образца и другими его физическими свойствами существует тесная и притом однозначная связь.

Образец может быть неоднородным по своему химическому составу, по своей геометрической форме или по степени сплошности материала; наконец различные части образца, будучи химически одинаковыми, могут обладать различными физическими свойствами в зависимости от местных упругих напряжений, реориентации кристалликов и т. п. Обнаружение этих неоднородностей возможно магнитным способом, если они себя проявляют в магнитных свойствах.

§ 1. Влияние неоднородности на магнитное поле образца.

Рассмотрим в самых грубых чертах¹⁾ искажение поля цилиндрического образца при наличии в нем неоднородности.

Пусть образец в форме очень длинного цилиндрического стержня AB (рис. 1) намагничивается равномерным магнитным полем силы H . Направление поля параллельно оси образца. Обозначим площадь поперечного сечения образца

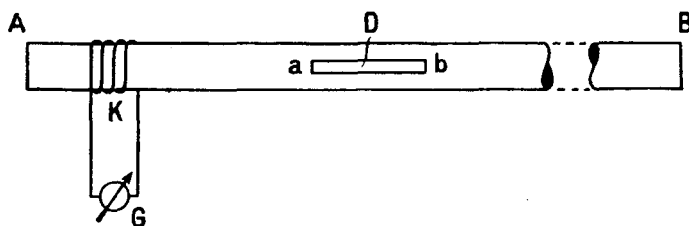


Рис. 1.

через S , а его проницаемость при данном значении поля через μ . В таком случае образец будет пронизываться магнитным потоком, равным:

$$\Phi = \mu HS. \quad (1)$$

Если образец по всей своей длине совершенно однороден, то и магнитный поток Φ также одинаков по всей длине образца (влиянием концов пренебрегаем).

Но допустим теперь, что внутри образца имеется достаточно резко ограниченная область D , отличная по своим магнитным свойствам от остальной массы образца.

Для простоты допустим, что это включение имеет также форму тонкого цилиндра, длина которого, однако, меньше длины образца. Ось этого цилиндра параллельна оси стержня AB .

Пусть площадь поперечного сечения этого включения будет S_1 , его проницаемость при том же значении поля H

¹⁾ Точное рассмотрение этого случая представляет значительные затруднения.

пусть будет μ_1 . Очевидно, $S_1 < S$. При этих условиях включение D будет пронизываться потоком Φ_1 , равным:

$$\Phi_1 = \mu_1 HS_1. \quad (2)$$

Общий же, результирующий поток в том месте образца, где находится включение D , будет равен:

$$\Phi' = \mu H(S - S_1) + \mu_1 HS_1 = \mu HS + (\mu_1 - \mu) HS_1$$

или иначе:

$$\Phi' = \Phi + \Delta_1 \Phi, \quad (3)$$

где

$$\Delta_1 \Phi = (\mu_1 - \mu) HS_1. \quad (4)$$

Таким образом к потоку Φ , пронизывающему образец в его однородной части, прибавляется новый магнитный поток $\Delta_1 \Phi$, обусловленный данным включением.

Линии потока $\Delta_1 \Phi$ могут замкнуться либо все внутри образца AB , либо частью внутри, частью вне его.

Замыкаясь внутри образца, этот силовой поток создает дополнительное намагничивающее поле. Вместе с этим изменяется и проницаемость образца AB . В результате всего этого магнитный поток в образце AB около включения D изменяется. Это новое, вторичное изменение магнитного потока по знаку обратно изменению $\Delta_1 \Phi$.

Если это вторичное изменение (назовем его $\Delta_2 \Phi$) равно $\Delta_1 \Phi$, то полный магнитный поток, пронизывающий весь образец AB , вместе с включением D , не изменится. Если же $\Delta_2 \Phi \neq \Delta_1 \Phi$, то магнитный поток Φ_D , пронизывающий образец AB в месте нахождения включения D , будет отличаться от потока Φ на некоторую величину, зависящую как от $\Delta_1 \Phi$, так и от намагничивающего поля H и от проницаемости образца μ . В том случае, когда $\Delta_1 \Phi > 0$, т. е. $\mu_1 > \mu$, поток Φ_D около включения больше потока Φ , если же $\mu_1 < \mu$ и $\Delta_1 \Phi < 0$, то $\Phi_D < \Phi$. Разность $\Phi - \Phi_D = \Delta \Phi$ может быть, таким образом, как положительной, так и отрицательной. В некоторых случаях она может быть равной нулю. Возможно, наконец, представить себе и такие случаи, когда эта разность как раз равна $\Delta_1 \Phi$.

Последнее возможно, например, когда образец AB намагничен до насыщения. В этом случае с увеличением намагничивающего поля намагничение в образце не изменяется, а следовательно поток Φ изменится как раз на величину $\Delta_1 \Phi$, ибо $\Delta_2 \Phi = 0$. Можно думать, что то же самое будет также и в других случаях, когда проницаемость слабо меняется с изменением поля H , например, когда μ равно максимуму.

Окончательное изменение потока, или разность

$$\Delta \Phi = \Phi - \Phi_D$$

локализуется около включения D .

Линии сил потока $\Delta \Phi$ суть линии, которые внутри образца не замыкаются, следовательно они могут замкнуться только вне его.

Таким образом, если $\Phi_D \neq \Phi$, то в пространстве, окружающем образец AB , около местонахождения неоднородности D появляются силовые линии потока $\Delta \Phi$. Магнитное поле, имеющее место в пространстве вне образца (в нашем случае очень длинного цилиндра это есть просто намагничивающее поле H) и однородное в тех местах, где однороден образец, перестает быть однородным в том месте, где образец имеет включение D . К полю H прибавляется поле $\Delta \Phi$.

Итак, в результате наличия в образце AB области с иной магнитной проницаемостью, чем проницаемость всего образца, вообще говоря, изменяется как поле внутри самого образца, так и вне его. Это изменение локализуется около того места, где находится и неоднородность.

Сложность зависимости μ и μ_1 от поля (в зависимости от материала образца и включения) не позволяет нам теоретически наперед вычислить связь между $\Delta \Phi$ и характером и размерами неоднородности.

Посмотрим, каким образом можно это изменение обнаружить. Начало неоднородной части внешнего поля обозначим через a (рис. 1), считая по длине образца от A к B , конец — через b . В остальных местах вдоль всего образца, т. е. от A до a и от b до B , внешнее поле и намагничение образца предположим совершенно однородными.

Поместим на образец тесно облегающую его катушку K , так, чтобы оси образца и катушки совпадали.

Будем теперь передвигать эту катушку вдоль образца от A к B с равномерной скоростью. Пока катушка движется по однородной части образца, между A и a , ее все время пронизывает один и тот же поток Φ . Но около a этот поток изменяется и делается равным Φ_D . Он остается таким на некоторой длине между a и b в зависимости от длины неоднородности D . Катушку пронизывает опять один и тот же поток Φ_D . Далее, когда эта катушка подходит к концу неоднородности, т. е. к точке b , магнитный поток снова изменяется и переходит обратно в Φ . Таким образом магнитный поток, пронизывающий катушку, изменяется по своей величине два раза, причем эти изменения обратны по знаку. Вследствие каждого из таких изменений в катушке индуцируется некоторая электродвижущая сила, причем количество электричества, проходящее через катушку и гальванометр:

$$Q = \frac{n \Delta \Phi}{R}, \quad (5)$$

где n — число витков катушки, R — сопротивление катушки и замыкающего ее гальванометра.

Переводя в практические единицы, имеем:

$$\Delta \Phi = \frac{R}{n} Q \cdot 10^8. \quad (6)$$

Посмотрим, насколько точно можно уловить изменение магнитного потока?

Пусть число витков катушки $n = 200$. Сопротивление контура $R = 500 \Omega$, чувствительность баллистического гальванометра — 10^{-8} С/мм. Подставляя в (6), имеем:

$$\Delta \Phi = \frac{500}{200} \alpha, \quad (7)$$

α — отклонение гальванометра в мм шкалы.

Таким образом при изменении Φ на несколько максвеллов наличие неоднородности может быть уловлено чувствительным гальванометром.

Такое количество электричества пройдет через гальванометр два раза: один раз когда катушка K проходит через a , другой раз в обратном направлении, когда катушка проходит через b . Пусть наше включение D представляет собой полость, проницаемость которой приблизительно равна единице.

Пусть, например, сечение образца 1 см^2 , индукция около 25000, $\Phi = 25000$, тогда мы можем заметить наличие полости, поперечное сечение которой около $0,1 \text{ мм}^2$.

Длина l такой полости или раковины, если отношение l к S_1 больше 50, не влияет на величину изменения потока. Это изменение (по абсолютной величине) зависит лишь от изменения поперечного сечения образца. Если образец не был намагничен до насыщения, то явление будет уже сложнее и рассчитать так просто изменение потока невозможно.

Далее, мы до сих пор предполагали, что наше включение имеет форму цилиндра, параллельного оси образца AB и направлению поля H . На самом деле, неоднородность может иметь любую форму. Для обнаружения неоднородности важно лишь, чтобы она вызывала изменение потока.

Выяснив, каким образом возможно обнаружить неоднородности в образцах, мы обратимся к рассмотрению некоторых экспериментальных исследований. Попутно выяснится и возможность практического применения метода магнитного анализа.

§ 2. Неоднородности в цилиндрических образцах.

Как мы уже упоминали выше, включения и пороки в образце могут различаться по своей природе.

Неоднородность в образце может быть как геометрического характера, т. е. может иметь место изменение поперечного сечения, так и физического — это может быть изменение в структуре образца, в его физических свойствах. Примером этого может служить рис. 2¹⁾. На этом рисунке приведены несколько кривых, представляющих собой харак-

¹⁾ Burrows. Sc. Pap. № 272, 1916.

теристики цилиндрических образцов, в которых имелись различного рода неоднородности. Диаметр образцов равнялся 12,7 мм. На чертежах по оси абсцисс отложена длина образцов, по оси ординат — изменение магнитного потока. Намагничивание образцов было близко к насыщению.

В первоначальном своем состоянии все образцы были вполне однородными. Характеристика их магнитных свойств

представляла собой прямую линию (рис. 2 кривая А).

Затем однородность образцов была нарушена. Отдельные образцы были подвергнуты действию различных факторов. Изменение однородности было местным. В результате этого величина магнитного потока изменялась в том месте, где сосредоточена та или иная неоднородность. В образце В, был сделан надпил глубиной в 3 мм. Здесь главным образом имело место уменьшение площади поперечного сечения,

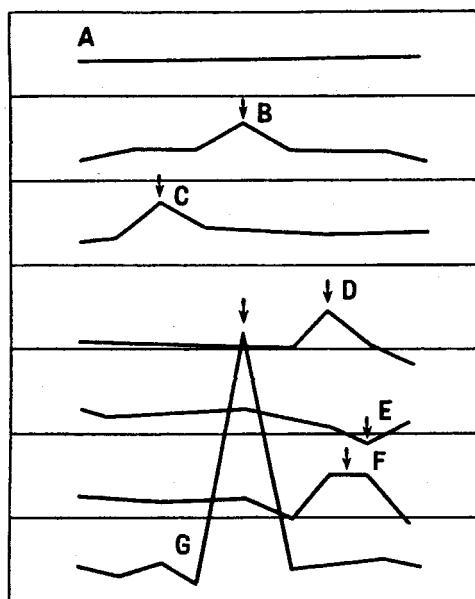


Рис. 2.

в результате чего на характеристике получился довольно резкий скачок, который свидетельствует об изменении магнитного потока в месте нахождения неоднородности.

Характеристики *C* и *D* относятся к двум другим образцам. Здесь мы видим такие же скачки, как и в случае кривой *B*. Но причина их другая. Именно, образец *C* был согнут под углом в 10° и затем снова выпрямлен. Образец *D* был в одном месте сжат в небольших тисках.

В результате этого в обоих образцах *C* и *D* появились остаточные напряжения, может быть незначительные по

своей величине, но которые, однако, сказываются на магнитных свойствах. И, что наиболее интересно, изменение в магнитных свойствах, насколько можно видеть из этих кривых, по величине своей такое же, как и в случае образца *B*, где изменение площади поперечного сечения было довольно значительным. Таким образом мы уже видим, что незначительные механические деформации могут дать такой же эффект, как и значительное изменение геометрических размеров образца.

Далее, кривые *E* и *F* относятся к образцам, однородности которых была нарушена термически. Именно: образец *E* был нагрет на небольшом пламени и затем нагретое место медленно охлаждено в воздухе, так что в этом месте материал был отожжен. Образец *F* был на небольшой длине нагрет и быстрым охлаждением закален.

И в этих случаях, как можно видеть из представленных кривых, изменения магнитного потока по своей величине примерно те же, что и в остальных образцах. Только в образце *E* (отожженном) изменение имеет обратный знак, чем во всех прочих.

Наконец, кривая *G* относится к образцу, который был разрезан надвое, затем поверхности разреза хорошо отшлифованы и крепко прижаты друг к другу. В месте соединения частей образца, вследствие появившегося воздушного зазора, хотя и ничтожного, проницаемость образца резко изменилась. В результате этого на характеристике получился очень резкий скачок.

Итак, из этого сопоставления мы видим, что неоднородности, различные по своей природе, могут совершенно одинаково отразиться на магнитных свойствах образца.

Не только величина, но даже и характер изменения может быть одинаковым, как это видно из кривых *B*, *C* и *D*. Это обстоятельство вносит, разумеется, серьезные затруднения при интерпретации результатов анализа. В дальнейшем мы увидим, каким путем это затруднение может быть обойдено.

Теперь же остановимся на исследовании влияния размеров и формы неоднородности на магнитные свойства. Такое

исследование было произведено Сэнфордом¹⁾ над образцами стальных ружейных стволов.

Метод исследования в общих чертах был набросан в предыдущем параграфе. Образец длиной около 200 см укреплялся вертикально так, что нижний и верхний концы его зажимались железными зажимами. Эти последние были соединены между собой тремя вертикальными железными же колонками. Таким образом магнитная цепь образца оказывалась замкнутой. Намагничивание образца производилось соленоидом около 40 см длиной.

Соленоид, надетый на образец, мог, посредством мотора, передвигаться вверх и вниз вдоль образца, намагничивая его последовательно по всей длине.

Внутри соленоида помещалась система индикаторных катушек, которые и передвигались вместе с ним. Система эта состояла из трех катушек. Они были совершенно одинаковыми между собою, как в геометрическом отношении, так и по числу витков. Длина каждой из этих катушек была порядка нескольких сантиметров. На каждой из них было намотано по 500 витков тонкой проволоки. Две из этих индикаторных катушек были соединены между собой навстречу. Таким образом изменения магнитного поля, вызванные случайными колебаниями намагничивающего тока, не отзывались на гальванометре. Эти две катушки находились на расстоянии 10 см одна от другой и помещались в середине соленоида. Посмотрим теперь, что происходит при наличии в образце неоднородности. Пока обе катушки двигались вдоль однородной части образца, в них никакой электродвижущей силы не индуцировалось. При приближении к тому месту образца, где имеется та или иная неоднородность, магнитное поле меняется. Первой чувствует это изменение передняя катушка, ибо, когда, она подходит к неоднородности, задняя еще находится в однородной части образца.

Таким образом электродвижущая сила индуцируется сначала только в передней катушке. Гальванометр показы-

¹⁾ F. Sanford. Sc. Pap. № 343, 1919.

вает некоторое отклонение, затем когда передняя катушка пройдет неоднородную часть и начинает уходить от нее, в ней индуцируется электродвижущая сила противоположного направления. Затем к неоднородной части образца подходит задняя катушка. Теперь она дает отклонение в гальванометре, но другого знака, чем первое отклонение, вызванное передней катушкой. При уходе задней катушки с места, где сосредоточена неоднородность, получится новый толчок в гальванометре, противоположный предыдущему.

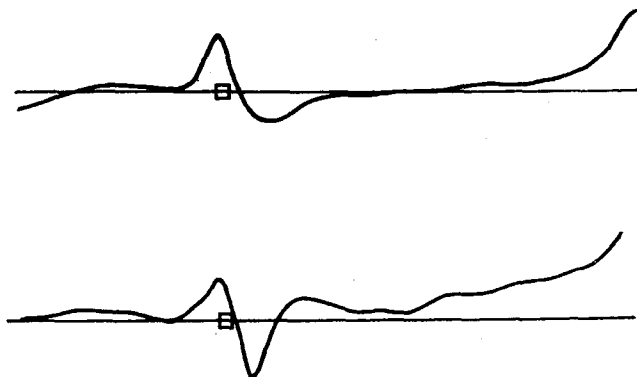


Рис. 3.

Между этими двумя катушками находилась третья, служившая лишь для контроля. В месте неоднородности она вызывала два последовательных отклонения, противоположные по знаку.

Характеристика каждого образца снималась два раза. Один раз простой катушкой — верхние кривые на приведенных чертежах, второй раз астатической системой — нижние кривые на тех же чертежах.

Намагничение образцов было таким, что индукция составляла около 15 000 гаусс. Отклонения гальванометра фиксировались фотографически.

Для создания неоднородности в образцах применялись тонкие полоски трансформаторного железа. Эти полоски накладывались вдоль образца и прижимались к нему. Результаты исследований представлены на рис. 3—6. Расположение и форма железных полосок показаны на тех же

рисунках, соответственно тому, как они были помещены на образцах. Длины этих полосок были таковы: в случае рис. 3 — 25 мм; рис. 4 — 600 мм; рис. 5 — 300 мм и рис. 6 — опять 600 мм.

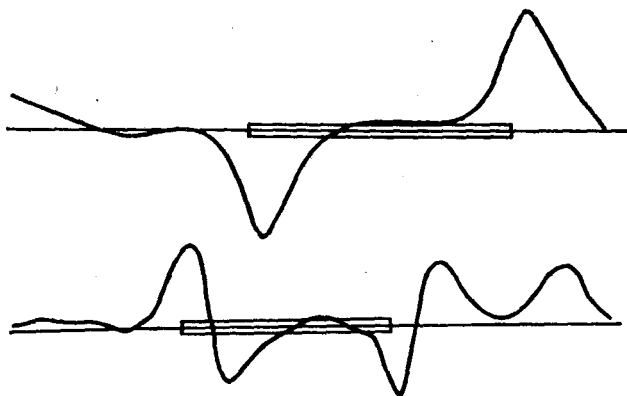


Рис. 4.

Ширина (в образцах рис. 5 и 6 ширина по середине полоски) всех полосок была 19 мм.

В этих опытах, помимо изменения геометрических размеров образца — увеличения площади поперечного сечения,

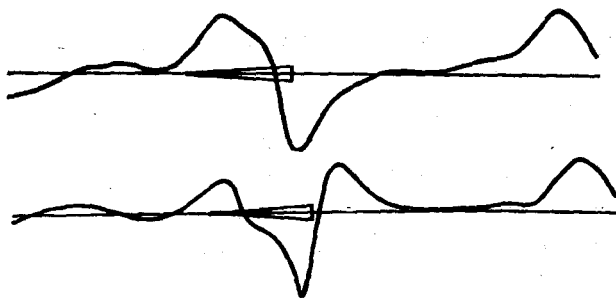


Рис. 5.

мы имеем еще и изменение проницаемости, так как полоски трансформаторного железа обладают иной проницаемостью, чем стальные образцы.

Из приведенных чертежей прежде всего видно, что локализация неоднородности определяется довольно точно как простой катушкой, так и двойной.

Даже в тех случаях (рис. 5 и 6), когда однородности образца меняются не скачком, а постепенно, это изменение легко обнаруживается. Далее, из сравнения верхних и нижних кривых, т. е. характеристик, относящихся к одному и тому же виду неоднородности, но полученных различными методами, видно, что простая, одиночная катушка оказывается более чувствительной. Это особенно ясно видно из сравнения верхней и нижней характеристик рис. 6.

Различие в характеристиках простой и астатических катушек особенно заметно на рис. 4, где внизу ясно видны четыре отклонения, совершенно отделенных друг от друга. То же самое, но только менее резко, видно и на рис. 6.

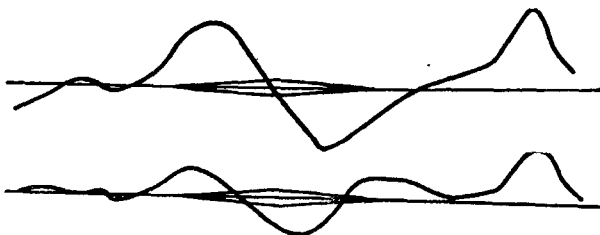


Рис. 6.

В обоих этих случаях неоднородность по длине была гораздо больше, чем размеры индикаторных катушек (в астатической системе) и расстояние между ними. В том случае когда длина неоднородности мала, разница в характеристиках, полученных обоими методами, меньше, как это видно из рис. 5, и она уже совсем мала в случае очень малой неоднородности, представленной на рис. 3.

Отклонение характеристики от прямолинейности в конце ее или в начале обусловлено влиянием концов образца. Можно еще добавить, что обнаружение местных неоднородностей становится принципиально возможным лишь когда эти неоднородности расположены сравнительно далеко друг от друга, иначе эффекты накладываются и запутывают картину.

Сэнфорд¹⁾ исследовал стальные тросы и проволоки. Методика исследования по существу не отличалась от той,

¹⁾ Sanford. El. World. V. 86, p. 309, 1925.

которая применялась для изучения ружейных стволов. Разница была только в том, что в этом исследовании магнитная цепь образца не была замкнутой и проволока просто протягивалась сквозь систему из намагничивающей и помещенной внутри ее индикаторной катушек.

Исследуемые образцы до этого находились уже некоторое время в работе, и в отношении механических свойств в них не было обнаружено никаких дефектов.

Здесь, однако, уже совершенно не приходится говорить о какой-либо прямолинейности характеристики. Очевидно, что образец был настолько неоднородным, что его магнит-

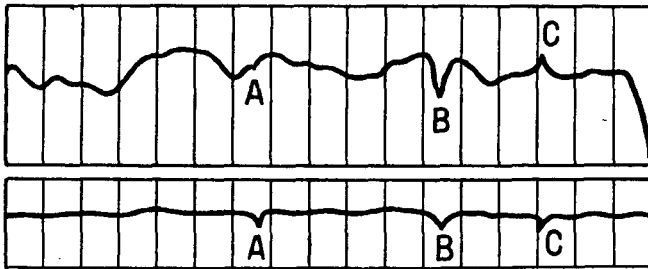


Рис. 7.

ные свойства менялись от точки к точке. Эти изменения могли быть обусловлены не только внутренней, но и чисто поверхностной неоднородностью образца. Ожидать, что проволока, побывавшая к тому же в работе, имеет гладкую, чистую поверхность, очевидно, не приходится. Затем, вполне вероятно, что в такой проволоке могли быть различные остаточные напряжения, деформации и т. д. Все это сказалось на магнитной характеристике.

На рис. 7 приведены две характеристики, полученные с одного и того же образца, но при различных значениях намагничивающего поля. Именно: верхняя кривая была получена при намагничивающем поле в 20 гаусс, нижняя — при намагничивающем поле в 100 гаусс. Свойства образца были заранее изменены в нескольких точках. Именно: в точке, соответствующей *A* на чертеже, проволока была слегка надпилена; в точке *B* она была согнута под углом

в 90° и снова затем выпрямлена, и, наконец, в точке *C* проволока была нагрета пламенем горячей спички. Таким образом мы имеем на одном и том же образце три вида неоднородности, которые нам заранее известны. На верхней кривой рис. 7 заметить присутствие этих искусственных неоднородностей почти невозможно.

На нижней кривой, снятой при большем намагничивающем поле, первоначальные неоднородности незаметны, и тогда отчетливо выступают неоднородности, вызванные искусственно в точках *A*, *B*, *C*. Рассмотрим теперь эти кривые более внимательно. Мы заметим, что на нижней кривой все три фактора, столь различные по своей природе, на характеристике сказались совершенно одинаково.

Влияние местных неоднородностей на верхней кривой совершенно иное. Здесь влияние надпила в *A* совсем незаметно. Наоборот влияние остаточных напряжений, созданных изгибом проволоки, в точке *B* гораздо больше, чем на нижней характеристике.

Это можно понять на основании того, что для стали, употребляемой при изготовлении таких троссов, влияние механических напряжений на магнитные свойства гораздо больше при низких намагничивающих полях, чем при высоких. Вероятно с этой точки зрения можно понимать и то, что нижняя характеристика более прямолинейна, чем верхняя: при сильном поле неоднородности, вызванные упругими напряжениями, не отразились на магнитных свойствах и магнитный анализ их заметить не мог. Наконец, скачок характеристики в точке *C* на верхней характеристике направлен в другую сторону, чем на нижней кривой.

Это объясняется тем, что при слабом поле изменение проницаемости, вызванное местным отжигом, имеет другой знак, чем при сильном поле. Таким образом из сравнения этих двух кривых можно видеть, что влияние неоднородности образца на магнитную характеристику зависит в сильнейшей мере от величины намагничивающего поля. Это означает, что и вообще результаты магнитного контроля могут очень сильно зависеть от величины намагничивающего поля. С другой стороны, исследуя образец при раз-

личных полях, мы можем выяснить природу имеющихся в образце неоднородностей. Впрочем, для этого нам необходимо всесторонне знать магнитные свойства данного материала, изменение их при наклепе, при отжиге и т. п. Результаты исследования троссов указывают нам также, в каком направлении следует вести изучение образца, если желательно выяснить присутствие неоднородностей одного какого-либо типа. К этому вопросу мы еще вернемся.

Можно привести еще несколько примеров применения метода с передвигающейся вдоль образца катушкой. Именно, таким же точно методом, как и описанный выше, Бёрроуз¹⁾ пытался исследовать железнодорожные рельсы. Опять намагничивающая катушка передвигалась автоматически вдоль образца. Внутри намагничивающего соленоида помещалась индикаторная катушка. Катушке была придана такая форма, что она плотно обхватывала рельс. Магнитный поток замыкался другим, вспомогательным рельсом. Этот второй рельс помещался параллельно первому и соединялся с ним при помощи толстых стальных полос, которые прижимались к концам рельсов.

При исследовании рельсы намагничивались примерно до насыщения. До исследования рельсы уже находились продолжительное время в эксплуатации. При исследовании в рельсах искусственно создавались неоднородности. На рис. 8 приведены некоторые результаты исследований.

На верхней половине чертежа, в точках, обозначенных буквами A с разными индексами, можно видеть влияние дефектов геометрического характера. Именно: в стенке рельсов были высверлены дыры различного диаметра. Отверстие, соответствующее A_1 , имело 12,7 мм в диаметре, соответствующее A_2 — 6,3 мм в диаметре. Из чертежа сразу видно, что влияние дефекта A_2 на характеристику крайне ничтожно и, по сравнению с колебаниями кривой от других, неопределенных причин, совершенно незаметно. Влияние отверстия в A_1 уже более резко выражено, но и оно того же порядка, что колебания кривой от других, неизвестных

¹⁾ Burrows. Sc. Pap. № 272, 1916.

причин. Далее, на той же кривой, к которой относится и A_1 , мы видим резкий скачок в точке B .

Этот скачок обусловлен тоже искусственным дефектом. Именно: рельс в соответствующем месте был надрезан поперек. Ширина надреза равнялась 1 мм. Глубина была такова, что в месте надреза площадь поперечного сечения рельса уменьшалась на 10%. Этот разрез был затем плотно заполнен трансформаторным железом, обладающим большой магнитной проницаемостью. Здесь мы имеем, с одной сто-

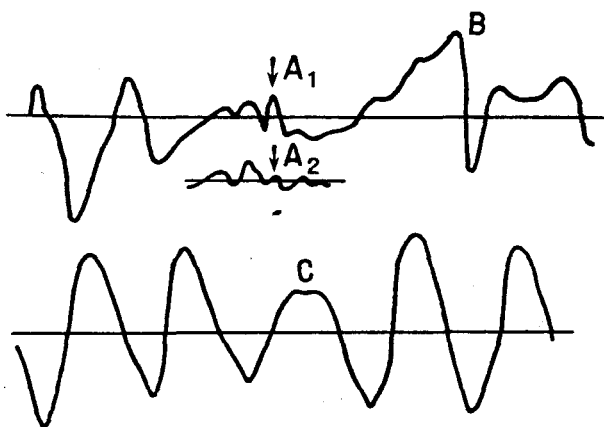


Рис. 8.

роны, увеличение магнитного сопротивления вследствие появившегося между рельсом и железной прокладкой воздушного зазора, ибо до некоторой степени здесь зазор остается, несмотря на заполнение щели железом, как бы плотно прокладка ни входила в разрез. С другой стороны, имеет место уменьшение сопротивления, обусловленное самим материалом прокладки. Разделить эти два фактора в данном случае невозможно. Трудно поэтому сказать, чем обусловлен, собственно, скачок характеристики. Далее, в самом начале характеристики, слева, видим резкий скачок, причина которого осталась невыясненной. Вообще, вся эта характеристика здесь чрезвычайно запутана. Можно предполагать, что либо внутренняя структура рельса была неоднородной, либо эти постоянные отклонения характери-

стики обусловлены влиянием неровностей поверхности. Однако здесь могут иметь место и иные причины. Так, на том же рис. 8 внизу приведена характеристика рельса, который очень долгое время находился в эксплуатации. Сразу бросается в глаза периодический характер кривой. По мнению автора исследования, эта периодичность обусловлена влиянием креплений рельса в шпалах. Величина периода кривой как раз соответствует расстоянию между шпалами, на которых рельс был уложен. Пики на характеристике соответствуют тем частям рельса, которые находились между шпалами. Впадины — частям, находившимся над шпалами.

Между прочим, как видно, вершина пика *C* на некоторой высоте срезана. Рельс в месте, соответствующем данной вершине, был тщательно исследован, и оказалось, что этот эффект, по всей видимости, был обусловлен включением мелко раздробленных кусков стали. Эти включения имели гораздо большую механическую твердость, чем самый материал рельса.

На основании всего этого автор делает весьма правдоподобное заключение, что в местах скреплений рельса на шпалах рельс имел большую жесткость и поэтому его проницаемость в этих местах была меньше. Этим уменьшением проницаемости и обусловлено спадание характеристик в тех частях рельса, которые находились над шпалами.

Помимо Бёрроуза, исследованием рельсов занимались Дэдлей¹⁾ в Америке и Сузуки²⁾ в Японии. Результаты исследований Дэдлея если и заслуживают интереса, то разве только с точки зрения ненадежности и неудовлетворительности. Приводимая им в своей заметке характеристика рельса представляет собой сплошной ряд колебаний и скачков, на основании которых судить что-либо об объекте исследования совершенно невозможно.

Метод Сузуки несколько отличается от методов Сэнфорда и других, о которых говорилось выше. В этом

¹⁾ Dudley. The Iron Age. V. 104, p. 43, 1919.

²⁾ Suzuki. Bulletin de Congrès des Shm. de Fer. V. VIII, № 3, 1926.

методе рельс замыкал магнитную цепь большого магнита. Электромагнит на небольших роликах вертикально устанавливался на рельс таким образом, что его полюса упирались в головку рельса. Между полюсами и поверхностью головки рельса был зазор в 0,5 мм.

Благодаря роликам электромагнит мог свободно перемещаться вдоль рельса. Между полюсами электромагнита помещалась индикаторная катушка, которая охватывала только головку рельса. Форма индикаторной катушки изображена на рис. 9. Таким образом можно было исследовать рельсы, уложенные на полотне железной дороги. Для этого электромагнит с индикаторной катушкой прикреплялся к особой тележке так, что поток его замыкался самим рельсом и вместе с тележкой перемещался по рельсу. На тележке же устанавливались регистрирующий прибор и питающая электромагнит батарея аккумуляторов.

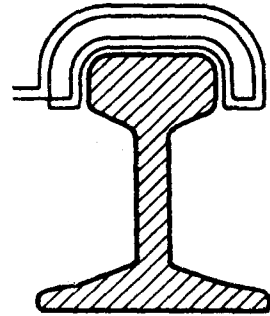


Рис. 9.

Собственно говоря, главный интерес этой работы и заключается в описанном видоизменении установки. Нанесение характеристик производилось весьма примитивно. Они вычерчивались от руки при помощи особого приспособления на бумажной ленте, навитой на вращающийся барабан, отмечались же только наиболее сильные отклонения регистрирующего прибора.

Таким способом только крупные неоднородности, которые по площади распространялись на все (или почти все) сечение головки рельса, или даже всего рельса, могли быть отмечены.

Сузуки считает, что его метод позволяет отмечать повреждения рельс на полотне. Нам кажется это утверждение весьма сомнительным, поскольку здесь неоднородности различной природы (которые, следовательно, оказывали различное влияние на прочность рельса) приблизительно одинаково отмечались на характеристиках. Многие из них могли быть совершенно безвредными для рельса и, наоборот,

весьма возможно, что вредные дефекты остались незамеченными.

Перейдем теперь к рассмотрению нескольких иных способов магнитного анализа.

Во всех рассмотренных методах индикаторные катушки устраивались так, что плоскости витков их были перпендикулярны к оси образца. Индикаторные катушки эти учитывали только ту составляющую магнитного поля, которая была параллельна оси образца. Но ведь, в случае наличия в образце неоднородности, изменяется и та составляющая поля, которая направлена перпендикулярно к его

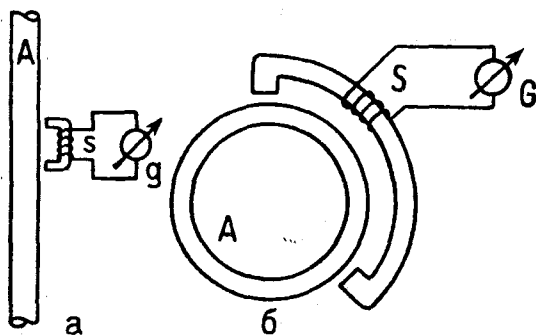


Рис. 10.

оси. Точнее сказать, если в случае очень длинного, однородного по всей длине и равномерно намагниченного параллельно длине образца нормальная составляющая индукции и внешнего поля равна нулю, то при наличии неоднородности эта нормальная составляющая поля нулю уже не равна. Таким образом по изменению этой нормальной составляющей внешнего поля образца можно судить о наличии в образце неоднородности.

На рис. 10 схематически даны предложенные Фоггом¹⁾ две установки а и б. Здесь А — исследуемый образец в виде либо: а) прямого цилиндра, либо — б) кольца с круглым сечением. S — индикаторная катушка, намотанная на железный сердечник. Эта катушка представляет собой не что иное, как магнитный потенциометр.

¹⁾ Voigt. См.: Auwers Phys. Zeitschr. № 24, S. 871, 1927.

До тех пор пока образец однороден, напряжение (радиальная составляющая его) магнитного поля у обоих концов потенциометра одинаково (равно нулю). В случае же наличия неоднородности дело будет обстоять примерно так же, как и в случае астатической системы катушек — между концами потенциометра появится разность напряжений магнитного поля. При движении потенциометра вдоль образца эта разность напряжений изменяется в месте неоднородности, и в потенциометре индуцируется электрический

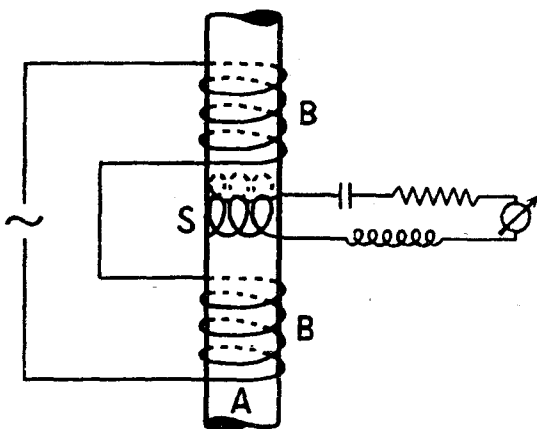


Рис. 11.

ток, который отмечается регистрирующим прибором. Можно, разумеется, держать потенциометр неподвижным и передвигать образец вдоль его оси. Очевидно также, что потенциометр может и не иметь железного сердечника, но тогда он менее чувствителен. Важно только, чтобы основания потенциометра были перпендикулярны к нормальной составляющей магнитного поля.

Во всех перечисленных до сих пор установках образец намагничивается постоянным полем. Но можно также пользоваться и переменным, тогда индикаторные катушки или потенциометр будут работать как вторичная обмотка трансформатора. Необходимо лишь, чтобы однородный образец не вызывал тока в этой обмотке. Было предложено несколько схем, позволяющих исследовать посредством переменного поля.

Один из таких аппаратов был сконструирован Нейфельдом и Кунке¹⁾ и схематически изображен на рис. 11. Здесь *A* — исследуемый образец, который намагничивается переменным током, проходящим по обмотке *B*. Витки индикаторной катушки *S* облегают образец кругом. Поверхности витков индикаторной катушки параллельны поверхности образца и плотно прилегают к последнему.

§ 3. ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО МЕТОДА К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИСКОВ.

В настоящем параграфе мы ознакомимся с методом применения магнитного анализа, когда объектом исследования являлись стальные турбинные диски равномерной толщины. Исследованием таких дисков занимался Капп²⁾.

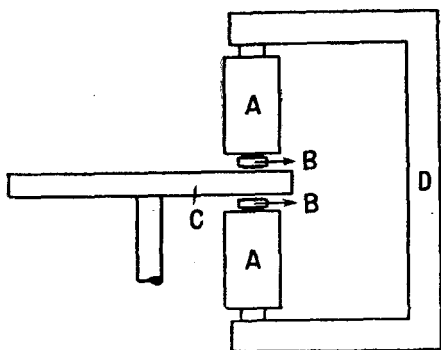


Рис. 12.

Исследуемый диск вращался вокруг вертикальной оси так, что часть его проходила между полюсами электромагнита и таким образом замыкала магнитную цепь.

Схема установки представлена на рис. 12. Здесь обозначено: *A* — обмотка полюсов электромагнита; *B* — индикаторные катушки, *C* — исследуемый диск, *D* — ярмо электромагнита.

Магнитная цепь состояла, таким образом, из полюсов, ярма, воздушных зазоров между полюсами и диском и, наконец, той части диска, которая находилась между полюсами. Электромагнит устанавливался на особой станине таким образом, что мог перемещаться вдоль радиуса диска от обода к центру и обратно. При этом последовательно получались отдельные кольцевые участки диска. Диски были с поверх-

¹⁾ Kuhnke. См. Auwers: loc. cit

²⁾ Capp. Proc. Amer. Soc. for Test. Mat. V. 27, p. 268, 1927.

ности тщательно обработаны. До тех пор, пока проницаемость кольца, проходившего между полюсами, оставалась постоянной (при вращении диска), общий магнитный поток в контуре не изменялся. Когда в пространство между полюсами попадала зона диска, содержащая неоднородность, сопротивление магнитного контура изменялось, а потому изменялся и магнитный поток, пронизывающий контур. В помещенных на концах полюсов индикаторных катушках B индуктировалась некоторая электродвижущая сила, которая и отмечалась соединенным с катушками гальванометром. То же самое происходило и при выходе неоднородности из пространства между полюсами (только с обратным знаком).

Так гальванометр отмечал прохождение между полюсами того или иного включения более или менее резким отклонением. Исследуемый диск представляет собою проводящее тело, вращающееся в магнитном поле, поэтому в диске индуктируются токи Фуко. Для

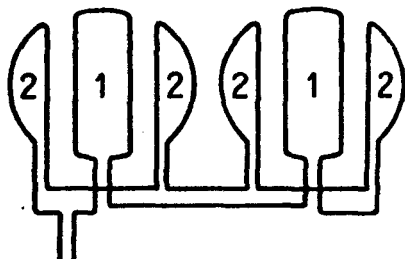


Рис. 13.

того чтобы устранить действия этих токов на гальванометр, индикаторные катушки были сделаны в виде астатической системы.

Форма катушек и их соединения схематически даны на рис. 13. Площадь средней катушки (1) в точности равна сумме площадей двух крайних катушек (2). Число витков во всех трех катушках одинаково.

Направление витков средней катушки противоположно направлению витков крайних двух катушек. Эта система катушек надевалась на полюса, в которых были сделаны соответствующие прорезы. Именно: основание цилиндрического полюса (ближайшее к диску) было разделено на три части двумя параллельными секущими так, что площадь средней части, была равна сумме площадей двух внешних сегментов. Катушки одевались на полюса так, что катушка (1) охватывала среднюю часть оснований полю-

сов, а внешние катушки (2) охватывали внешние сегменты полюсов.

Действие токов Фуко на регистрирующий гальванометр сводится поэтому к нулю. Этих гальванометров в установке Каппа было два. Один из них служил для визуального наблюдения резких отклонений. Другой гальванометр имел фотографическую регистрацию. Кривые характеристики записывались в виде кругов, радиус которых в соответствующем масштабе равнялся радиусу исследуемого кольца диска. Регист

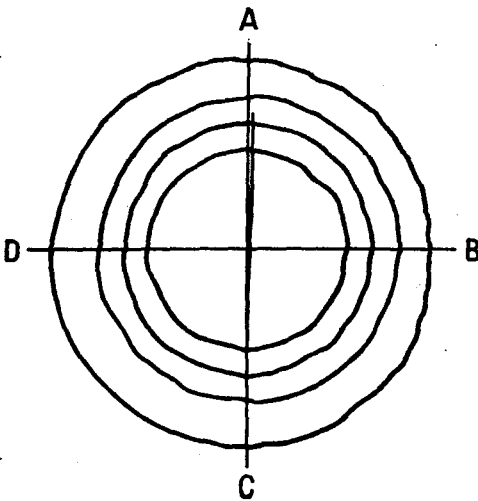


Рис. 14.

стрирующая система была устроена так, что отклонения гальванометра, который служил для визуального отсчета, были в 15—20 раз больше, чем отклонения гальванометра, служащего для фотографической записи. Чувствительность метода была такова, что, по словам автора, небольшие царапины на поверхности диска могли быть отмечены на диаграмме. Маленькие, поч

ти не различимые глазом трещинки, которые появляются иногда по краям диска в результате его закалки, также могли быть отмечены непосредственно по отклонению гальванометра. Если диск был обработан не достаточно чисто, то неровности поверхности или изменения толщины, даже очень незначительные, сказывались на диаграмме.

При отливке дисков в них иногда возникают раковины, шлаковые включения, которые затем при проковывании диска могут превратиться в узкую полость, толщиной в несколько десятых или даже сотых долей миллиметра. Такие полости давали при непосредственном наблюдении

отброс гальванометра порядка 10—15 см, в то время как постоянные колебания того же гальванометра вследствие недостаточно тщательной обработки диска, например неравномерности в толщине, были порядка 3—4 см.

Шлаковые включения в дисках, состоящие из очень мелких зернышек, линейные размеры которых порядка десятых и сотых долей миллиметра, часто концентрируются в ограниченном пространстве внутри диска с довольно равномерной плотностью в своеобразные колонии. Такие колонии также могут быть отмечены фотографически на диаграмме диска.

Они обнаруживаются тем, что характеристичные кривые диска, которые в случае вполне однородного образца представляют собой ряд concentрических ровных кругов (см. рис. 14), в соответствующих местах приобретают волнистый характер и этим резко отличаются от кривых, характеризующих чистый образец. На рис. 15 дана характеристика диска, содержащего такие шлаковые включения.

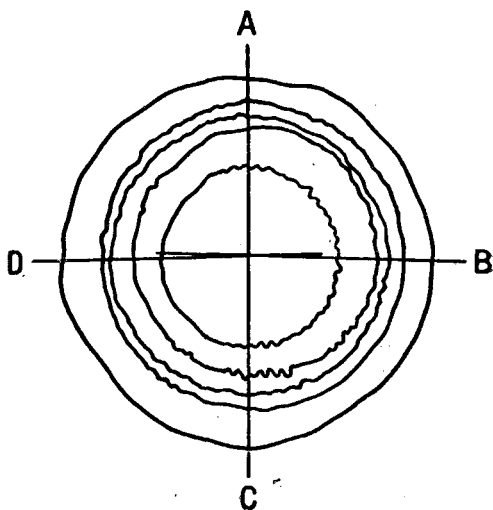


Рис. 15.

Поле электромагнита было достаточно велико, так что область диска доходила почти до насыщения. Благодаря этому, повидимому, неоднородности, вызванные местными упругими напряжениями, оставались незамеченными. Было исследовано несколько сот дисков. Производственный контроль дисков производился не фотографически, а визуально. При этом небольшие колебания гальванометра, порядка 3—4 см по шкале, в расчет не принимались. И только те образцы, при контроле которых на шкале получались отклонения около 10 см и более, считались негодными. Эти диски затем изучались более

подробно, причем не было ни одного случая, чтобы дефект, которым было обусловлено отклонение гальванометра, оказался мнимым.

§ 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

На основании изложенного материала можно видеть, что чувствительность метода может быть доведена до очень высокой степени и самые незначительные дефекты образца могут быть определены достаточно точно. Это свойство метода является как его положительным качеством, так и его недостатком, ибо, будучи чувствительным к очень незначительным порокам, он вместе с тем в такой же мере чувствителен и к незначительным дефектам самой поверхности, колебаниям в толщине образца и т. п., которые во многих случаях не имеют существенного значения с точки зрения годности предмета исследования. Кроме того, незначительные колебания воздушного зазора между образцом и индикатором, особенно в методах с магнитным потенциометром, при исследовании дисков могут давать значительный эффект в индикаторной системе. Отсюда следует, что во многих случаях следует заранее ограничивать порог чувствительности, либо учитывать только отклонения выше некоторой определенной величины. Эта предельная величина в каждом отдельном случае различна, в зависимости от объекта исследования и тех требований, которые к исследованию предъявляются. В соответствии с чувствительностью метода, локализация неоднородности определяется также довольно точно.

Далее, одним из существенных затруднений, с которыми приходится сталкиваться при применении магнитного метода, является анализ полученных результатов исследования. Уже в самом начале § 2 мы встретились с тем фактом, что неоднородности, различные по своей природе, совершенно одинаково сказываются на характеристике образца. На основании одной только такой характеристики сделать какие-либо заключения о природе той или иной неоднородности очень часто (если не всегда) просто невозможно. А между тем такие неоднородности в зависимости от своей природы могут иметь совершенно различное влияние на каче-

ство того или иного образца. Одна неоднородность может сделать образец совершенно негодным, другая же может не иметь существенного влияния на качество изделия. В таких случаях, когда не достаточно определить только наличие неоднородности, но требуется еще знать более или менее точно ее природу, необходимо производить дополнительные исследования другими методами, что значительно может усложнить всю работу и свести на-нет все удобства магнитного анализа. Здесь кстати не лишним будет еще раз обратить внимание на следующее обстоятельство: как упоминалось в § 1 и как это можно было видеть на рис. 7, неоднородности, различные по своей природе, ведут себя различно, в зависимости от силы намагничивающего поля. Возможно, что одним из способов, который даст возможность получить ответ на вопрос о природе неоднородности, и является именно способ повторного исследования образца при различных значениях намагничивающего поля. Но помимо того, что самый вопрос о связи между природой включений и величиной намагничивающего поля совершенно не разработан, совершенно очевидно, что такое повторное исследование может значительно усложнить самую методику.

Но если не говорить пока о таком усложнении, то следует признать, что магнитный метод контроля изделий, по сравнению со многими другими методами, прост, исследование может быть про изведено гораздо быстрее, и, кроме того, он сравнительно дешев.

Однако необходимо иметь в виду, что магнитный анализ еще крайне слабо разработан. Вопрос о связи между магнитными свойствами и теми местными изменениями, которые возможны в образцах и которые могут играть существенную роль в отборе изделий, еще далеко не выяснен. Каждый сорт изделий требует специального изучения.

Вследствие этого, нам кажется преждевременным и говорить о применимости этого метода для промышленности. Несмотря на крайне многочисленные статьи о нем в специальной и популярной литературе, применение магнитного анализа до сих пор на Западе встречается, повидимому, еще крайне редко.
