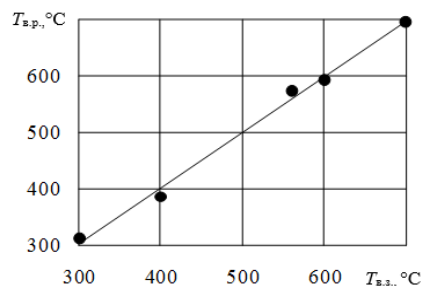


выкарыстоўваць максімальную магнітную пранікальнасць μ_{max} (крывая 3, малюнак 1), якая адназначна ўзрастае з павышэннем тэмпературы нагрэву пры водпуску і мае дастаткова добрую адчувальнасць, не ніжэй за 14% на 100 °С ва ўсім дыяпазоне змянення тэмператур, у тым ліку каля 5% на 100 °С на ўчастку тэмператур водпуску, рэкамендаваных стандартам. Для каарцытыўнай сілы H_c (крывая 2, малюнак 1), што таксама адназначна змяняецца з ростам тэмпературы водпуску, на ўчастку рэкамендаванай для атрымання патрабаванага стану тэмпературы водпуску, якая складае 560 °С, адчувальнасць у два разы меншая, чым для максімальнай магнітнай пранікальнасці. Неразбуральны імпульсны магнітны кантроль якасці водпуску свёрдзелаў са сталі Р9 па велічыні астаткавай магнітнай індукцыі B_r (крывая 1, малюнак 1) мае цяжкасці з прычыны неадназначнай залежнасці гэтага стандартнага магнітнага параметра ад тэмпературы даследуемай тэрмаапрацоўкі і яго малой адчувальнасці.

Распрацоўка шматпараметровых рэгрэсійных мадэляў з'яўляецца адным з найбольш простых спосабаў павышэння дакладнасці, стабільнасці і адчувальнасці неразбурваючага кантролю. Выкарыстанне такога падыходу да кантролю якасці водпуску свёрдзелаў з хуткарэзнай сталі Р9 прывяло да добрых вынікаў. На малюнку 2 прадстаўлена залежнасць велічынь тэмператур водпуску, разлічаных па лінейнай рэгрэсійнай мадэлі, у якой выкарыстоўваюцца разгледжаныя стандартныя магнітныя характарыстыкі, ад зададзеных падчас тэрмаапрацоўкі, якія забяспечваюць неабходны для надзейнай эксплуатацыі структурны стан свёрдзелаў.

Атрыманая для разліку тэмпературы водпуску свёрдзелаў са сталі Р9 шматпараметровая рэгрэсійная мадэль па стандартных магнітных параметрах, якая звязвае памераныя пры імпульсным намагнічванні і перамагнічванні ў прахадным датчыку ў разамкнёным магнітным ланцугу каарцытыўную сілу H_c , астаткавую магнітную індукцыю B_r і максімальную магнітную пранікальнасць μ_{max} , мае добрую дакладнасць – каэфіцыент карэляцыі R роўны 0,997, а таксама малы роскід значэнняў –

сярэднеквадратнае адхіленне $\sigma = 0,038$ °С. Аналагічныя велічыні для залежнасці максімальнай магнітнай пранікальнасці ад тэмпературы нагрэву пры водпуску складаюць $R = 0,985$ і $\sigma = 0,085$ °С.



Милунак 2 – Залежнасць разлічанай па рэгрэсійнай мадэлі тэмпературы водпуску ад зададзенай тэмпературы водпуску свёрдзелаў са сталі Р9

Разгледжаныя стандартныя магнітныя характарыстыкі, памераныя ў прахадным датчыку ў разамкнёным магнітным ланцугу, з'яўляюцца магчымым варыянтам як аднапараметровага (пры выкарыстанні ў якасці інфарматыўнага параметра максімальнай магнітнай пранікальнасці μ_{max}), так і шматпараметровага імпульснага магнітнага кантролю якасці водпуску свёрдзел з хуткарэзнай сталі Р9.

Літаратура

1. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1968. – 568 с.
2. Бурак, В.А. Контроль качества термообработки быстрорежущей стали Р9 импульсным магнитным методом / Бурак В.А., Короткевич З.М., Баранов Д.П. // Приборостроение–2012: материалы Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2012 г.; редкол.: О.К. Гусев (председ.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 138–140.
3. Короткевич, З.М. Особенности контроля качества термообработки изделий из стали У8А при двухполярном несимметричном импульсном намагничивании / В.А. Бурак, З.М. Короткевич // Весті НАН Беларусі. Сер.фіз.-тэхн. Навук. – 2019. – № 4. – С. 398–405.
4. Купалова, И.К. Магнитный контроль качества заковки и отпуска быстрорежущих сталей. – Физика металлов и металловедение, 1964, т.18, вып. 1.– С. 39–46.

УДК 621

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕЩИН

Счастный А.С., Осипов А.А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Неразрушающий контроль толщины упрочненного слоя является важным условием, которое обеспечивает долговечность и надежность выпускаемой продукции [1].

Возможность контроля и его надежность существенным образом зависят от различия между магнитными свойствами упрочненного поверхностного слоя и внутреннего незакаленного слоя [2].

Мешающим фактором, влияющим на точность определения толщины упрочненного слоя, является наличие внутри изделия трещин, расслоений или тех или иных неоднородностей структуры, возникающих в процессе производства и/или эксплуатации.

Упрочненный слой и основа моделировались с использованием набора пакета пластин магнитомягкого (сталь В2Ф, ГОСТ 5950-73, $H_c \cong 3400$ А/м) и магнитомягкого (сталь 08Ю, ГОСТ 9045-70, $H_c \cong 320$ А/м) материалов также, как это выполнялось в работе [3].

Наличие зазоров между поверхностями ферромагнитных пластин, составляющих используемый при измерениях набор, является мешающим фактором, который может приводить к существенным ошибкам в измерениях и дальнейшем анализе полученных экспериментальных данных в задачах по неразрушающему контролю структуры изделий импульсным магнитным методом.

Наличие пластин разной толщины, а также различие их механических и магнитных свойств, обеспечивает возможность изучения влияния на результаты контроля толщины упрочненного слоя таких мешающих факторов, как глубина залегания неоднородностей, размеры трещины и т.д.

Толщина магнитомягкого слоя составляла 3 мм, а общая толщина пакета была 7,5 мм. Ширина пакета образцов составляла 20 мм, а длина 180 мм.

Эксперимент выполнялся следующим образом. Сначала осуществлялось размагничивание и намагничивание прибором ИМА-5Б [4] с использованием двух прямоугольных катушек, которые были включены последовательно по полю в образце и имели размеры 100×35 мм², расстояние между центрами катушек составляло 100 мм. Затем намагничивание и измерение последовательно выполнялось датчиком стандартного прибора ИМА-4М [5], расположенным над центром исследуемых образцов (рисунок 1).

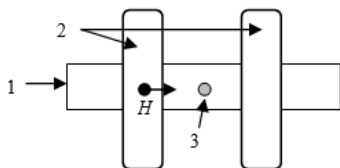


Рисунок 1 – Схема расположения намагничивающих катушек и датчика прибора ИМА-4М:
1 – пакет образцов; 2 – прямоугольные намагничивающие катушки;
3 – датчик прибора ИМА-4М

Для имитации трещин между ферромагнитными слоями пакета применялись немагнитные прокладки трех различных толщин h : 100, 35 и 8 мкм.

На рисунке 2 представлены результаты измерения величины градиента нормальной состав-

ляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r локально намагниченного участка пакета для этих трех толщин h немагнитных прокладок в зависимости от глубины их залегания t .

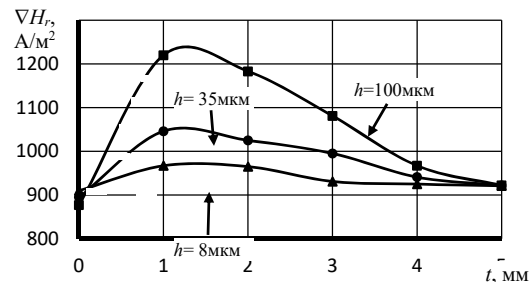


Рисунок 2 – Зависимость градиента напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r от глубины залегания трещины t с различной толщиной h

Из рисунка 2 видно, что максимальная погрешность измерения величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r может достигать десятков процентов для толщины прокладки 100 мкм и не превышать десяти процентов при минимальном значении толщины h , то есть результаты измерений различаются в несколько раз по величине. Для всех рассмотренных случаев толщины прокладок h только при глубине залегания t приблизительно равной и превышающей 4 мм погрешность измерения величины остаточной намагниченности ∇H_r не превышает десяти процентов.

Зависимости на рисунке 2 имеют однотипные максимумы, что не позволяет на практике их использовать для однозначного определения глубины залегания трещин. Поэтому при использовании импульсного магнитного метода для контроля толщины упрочненного слоя изделий в производственных условиях рекомендуется предварительно проводить контроль не только поверхностных, но и внутренних трещин и неоднородностей. Влияние поверхностных трещин существенно ниже и соизмеримо с чувствительностью импульсного магнитного метода к зазору между его датчиком и поверхностью контролируемого ферромагнетика.

Исследовалось влияние на измерение величины градиента остаточной намагниченности ∇H_r расположения немагнитной прокладки по длине образца от середины к его краю. Глубина залегания прокладки была выбрана равной 1 мм. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что влияние трещины размерами 20×20 мм² и толщиной 35 мкм на величину остаточной намагниченности ∇H_r не превышает нескольких процентов при смещении прокладки от центра образца приблизительно на

50 мм и более ($x \geq 50$ %). Наличие прокладки под датчиком прибора ИМА-4М приводит к погрешности измерения градиента ∇H_r , приблизительно равной 20 %. Исходя из этого возможно использование импульсного магнитного метода для обнаружения трещин в упрочненных слоях, например, если выполнять их сканирование.

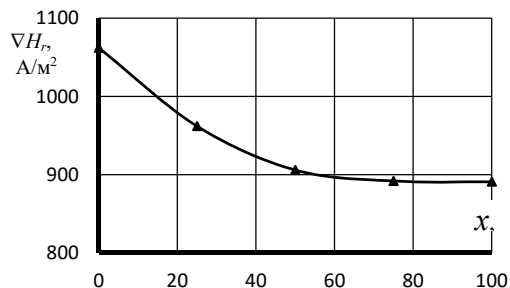


Рисунок 3 – Зависимость градиента напряженности поля остаточной намагниченности ∇H_r от относительного расположения x прокладки (толщиной 35 мкм, шириной и длиной 20 мм) от центра образца к его краю

Очевидно, что проведенный эксперимент не в полной мере учитывает влияние реальной трещины на величину градиента ∇H_r , поскольку трещина возникает в структуре ферромагнетика, а прокладка фактически является дополнительной неферромагнитной структурой, которая изменяет размеры набора пластин и т.д. Однако, в качестве некоторой оценки влияния трещин на результаты контроля толщины упрочненного слоя импульсным магнитным методом такой подход вполне обоснован.

Необходимо также отметить, что влияние реальных трещин на контроль толщины упрочненного слоя импульсным магнитным методом будет существенно ниже, поскольку трещины, которые обычно встречаются на практике, имеют значительно меньшие размеры. Для большей объективности в определении влияния трещин на результаты неразрушающего контроля упрочненного слоя в каждом конкретном случае необходимы дополнительные многосторонние и мно-

гофакторные исследования (с учетом размеров, формы, свойств и т.д. образцов).

По результатам исследований была установлена возможность определения толщины упрочненного слоя по величине градиента напряженности поля остаточной намагниченности [6], но для увеличения надежности и достоверности контроля необходимо проведение предварительной проверки изделий на наличие внутренних трещин и особенно в зоне намагничивания и измерения остаточной намагниченности импульсным магнитным методом. Возможно также применение данного подхода в многопараметровых задачах для увеличения надежности выпускаемой продукции.

Таким образом, проведена оценка влияния неоднородностей структуры на возможность неразрушающего контроля толщины упрочненного слоя при использовании импульсного магнитного метода контроля.

Литература

1. Горкунов, Э.С. Электромагнитные методы и средства контроля качества поверхностного упрочнения стальных изделий / Э.С. Горкунов, Б.М. Лапидус. – Препринт. – Свердловск: УНЦ АН СССР. – 1986. – 48 с.
2. Михеев, М.Н. магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – Москва: Наука. – 1993. – 252 с.
3. Матюк, В.Ф. Определение толщины упрочненного слоя по изменениям формы петли гистерезиса / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов, В.Б. Кратиров // Дефектоскопия. – 1997. – № 9. – С. 32–41.
4. Мельгуй, М.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б / М.А. Мельгуй [и др.] // Научно технические достижения. – 1990. – № 4. – С. 41–44.
5. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М / В.Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2003. – № 3. – С. 47–53.
6. Счастный, А.С. Оценка возможности контроля толщины упрочненных слоев импульсным магнитным методом / А.С. Счастный, А.А. Осипов // Приборостроение-2019: материалы 12-ой Международной научно-технич. конф. – Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Минск, БНТУ, 2019. – С. 316–318.

УДК 666.3/7 (075.8)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ

Дятлова Е.М.¹, Сергиевич О.А.¹, Колонтаева Т.В.², Бука А.В.¹

¹Белорусский государственный технологический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Введение. Износостойкость – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. Износостойкость

зависит от состава и структуры обрабатываемого материала, исходной твердости, шероховатости и технологии обработки детали, состояния ответной детали. Также существуют методы повышения износостойкости деталей благодаря нанесению