

но, что при этом происходит разрушение базальной ткани в результате расплавления материала под действием концентрированного потока лазерного излучения.

#### Литература

1. Татарский, В.Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод / В.Б. Татарский. – М. : Недра, 1965. – 306 с.

2. Червяков, А.Н. Металлографическое определение включений в стали / А.Н.Червяков, С.А. Киселева, А.Г. Рьльникова. – М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – 248 с.

3. Анисович, А.Г. Оптические эффекты при микроскопии металлов и неметаллических материалов. Литье и металлургия, 4(89) 2017. – С. 119–125.

УДК 620.179.14

### ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОЧНОСТЬ МНОГОПАРАМЕТРОВОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛИ 40X Бурак В.А.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

Использование многопараметровых моделей, построенных на основе статистических подходов к обработке данных, в неразрушающем контроле позволяет расширить область применения и повысить точность и надежность применяемых методов и средств контроля. Импульсный магнитный метод, заключающийся в намагничивании контролируемого изделия одним или сериями импульсов и измерении величины поля остаточной намагниченности, при наличии достаточного числа данных, позволяет не только устанавливать корреляционные связи между измеренными магнитными параметрами и структурным состоянием или температурой термообработки ферромагнитных изделий и материалов, но и получать регрессионные модели [1].

В импульсном магнитном анализаторе ИМА-6 [2] реализована следующая схема намагничивания: контролируемое изделие с целью уменьшения влияния магнитной предыстории намагничивается парой импульсов магнитного поля противоположного направления, амплитуда которых составляет 250 кА/м, что обеспечивает намагничивание практически до технического насыщения конструкционные марки сталей, а затем дважды перемагничивается импульсами магнитного поля с заданной оператором амплитудой, но не большей 250 кА/м. Программное обеспечение прибора ИМА-6 позволяет фиксировать значение градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после воздействия пары импульсов максимальной для прибора амплитуды магнитного поля и после каждого из перемагничивающих импульсов, формируя для каждого контролируемого изделия массив из трех величин, которые могут быть использованы при построении многопараметровых моделей.

Для исследований влияния величины амплитуды импульсов магнитного поля, формируемых прибором ИМА-6 на точность многопараметровой модели оценки качества термообработки, был взят комплект образцов стали 40X, имею-

щих форму дисков диаметром 63 мм и толщиной 9 мм, закаленных от 810 °С и отпущенных при разных температурах.

Использование при перемагничивании импульсов малой амплитуды незначительно меняет вид кривой зависимости градиента напряженности поля остаточной намагниченности, полученной после намагничивания двумя импульсами максимальной амплитуды и разного направления, от температуры отпуска, но несколько снижает величины градиентов поля остаточной намагниченности. Выбор амплитуды, сравнимой по величине с максимальной амплитудой в серии импульсов, используемых для получения измеренных данных при многопараметровом магнитном контроле, также не вносит значительных изменений в вид кривой зависимости после намагничивания первыми двумя импульсами в серии, меняя только её положение на противоположное относительно линии нулевой намагниченности.

Особый интерес для многопараметрового контроля качества термообработки стали 40X представляют такие амплитуды перемагничивающих импульсов, при которых величина измеренного градиента напряженности остаточного магнитного поля лежит в области, близкой к нулевому его значению в какой-либо из рассматриваемых температур термообработки. Известно [3-4], что при использовании для контроля температуры отпуска среднеуглеродистых конструкционных сталей двух градиентов напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных после намагничивания до технического насыщения и дальнейшего частичного перемагничивания импульсом меньшей амплитуды, чем требуется для технического насыщения, хороший результат дает выбор такой амплитуды второго намагничивающего импульса, при которой градиент напряженности поля остаточной намагниченности после импульсного намагничивания близок к нулю на образце или изделии, отпущенном при самой низкой или самой высо-

кой из рассматриваемых температур, то есть на самом мягком или самом твердом образцах.

Одним из возможных для многопараметрового импульсного контроля сочетаний величин амплитуд перемагничивающего поля является выбор первой из двух изменяющихся перемагничивающих амплитуд такой, чтобы образец, отпущенный при минимальной температуре, после воздействия импульсом магнитного поля имел градиент остаточной намагниченности, близкий к нулю, а вторую амплитуду выбрать такую, чтобы величина градиента остаточной намагниченности была близкой к нулю для образца, отпущенного при максимальной из рассматриваемых температур отпуска. Для стали 40X величины таких амплитуд импульсов магнитного поля составляют 100 кА/м и 25 кА/м, вид кривой зависимости градиента напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отпуска представлен на рисунке 1. Применение такой схемы намагничивания позволяет получить коэффициент корреляции 0,974 при среднеквадратичном отклонении 40 °С.

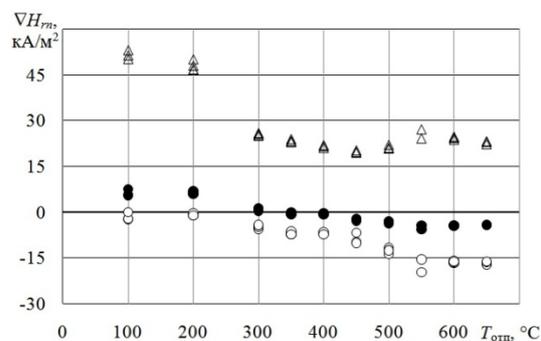


Рисунок 1 – Зависимость от температуры отпуска величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после намагничивания парой импульсов амплитудой 250 кА/м ( $\Delta$ ) и перемагничивания импульсами амплитудой 100 кА/м ( $\circ$ ) и 25 кА/м ( $\bullet$ )

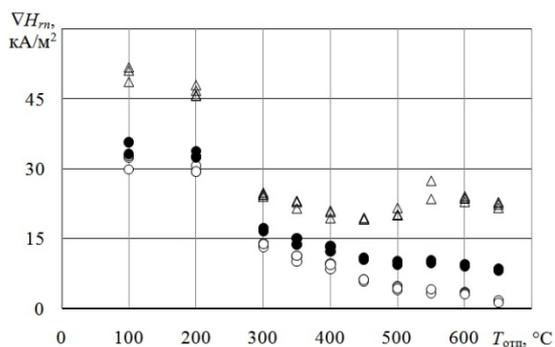


Рисунок 2 – Зависимость от температуры отпуска величин градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после намагничивания парой импульсов амплитудой 250 кА/м ( $\Delta$ ) и перемагничивания импульсами амплитудой 40 кА/м ( $\circ$ ) и 20 кА/м ( $\bullet$ )

Также была рассмотрена схема намагничивания образцов стали 40X, отпущенных при разной температуре, когда первая из задаваемых ампли-

туд выбиралась из условия близости к нулю величины градиента напряженности поля остаточной намагниченности на образце, отпущенном при максимальной температуре, а вторая была вдвое меньшей, то есть составляли 40 кА/м и 20 кА/м соответственно. Зависимость измеренных градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности от температуры отпуска стали 40X представлена на рисунке 2.

Многопараметровая модель оценки качества термообработки стали 40X, построенная с использованием величин градиентов напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных после намагничивания парой импульсов противоположного направления амплитудой 250 кА/м, а затем перемагничивания импульсами магнитного поля с амплитудой 40 кА/м и 20 кА/м, дает коэффициент корреляции между измеренными и расчетными значениями температур, равный 0,983, и среднеквадратичное отклонение 32 °С.

По результатам исследования можно сделать вывод о возможности построения достаточно точной многопараметровой модели оценки качества термообработки стали 40X по трем градиентам напряженности поля остаточной намагниченности, измеренных на приборе ИМА-6 после пары импульсов максимальной амплитуды противоположного направления, после перемагничивающего импульса, величина амплитуды которого выбрана на образце, отпущенном при максимальной температуре, и после намагничивания импульсом с амплитудой, вдвое меньшей предыдущей.

### Литература

1. Мельгуй, М.А. Многопараметровые методы магнитной структуроскопии и приборы для их реализации (обзор). Ч. II. Импульсный магнитный многопараметровый метод и прибор ИМА-М для его реализации // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 11–20.
2. Импульсный магнитный анализатор ИМА-6 / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак, А.А. Осипов, Д.А. Пинчуков // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 62–74.
3. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из улучшаемой ферромагнитной стали после его окончания: пат. 11395 Респ. Беларусь, МПК G 01N 27/80 / В.Ф. Матюк, В.Б. Кратиров, В.А. Бурак; заявитель Ин-т прикладной физики НАН Беларуси – № а20061277; заявл. 14.12.2006; опубл. 30.12.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 6. – С. 137–138.
4. Способ импульсного магнитного контроля температуры отпуска изделия из среднеуглеродистой стали: пат. 12477 Респ. Беларусь, МПК G 01N 27/72 / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак,

М.Н. Делендик; заявитель Ин-т прикладной физики НАН Беларуси. – № а20080198; заявл. 21.02.2008; опубл. 30.10.2009 // Афіцыйны

бул. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 123.

УДК 66.088

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КРЕМНИЕВЫМИ ПЛАСТИНАМИ НА СКОРОСТЬ СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК

Бельский Д.В., Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Тихон О.И., Лушакова М.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

СВЧ газоразрядное оборудование технологического назначения широко используется на операциях неprecизионной обработки материалов микроэлектроники, предусматривающих индивидуальную обработку полупроводниковых пластин диаметром 300 и 200 мм и групповую обработку пластин с меньшим диаметром. Анализ литературных источников показывает, что в конструкциях таких СВЧ плазмотронов в качестве систем для возбуждения и поддержания СВЧ разряда используются резонаторы прямоугольной формы. В резонаторных СВЧ плазмотронах для получения разряда используется энергия «стоячих волн» [1]. Полученные результаты измерений структуры распределения СВЧ поля в зоне газового разряда в резонаторе прямоугольной формы указывают на существование устойчивой формы неравномерности распределения плотности мощности в объеме разрядной зоны [2]. Это свидетельствует о наличии существенной пространственной неоднородности в параметрах СВЧ разряда применительно к цилиндрическим разрядным камерам туннельного типа, что в свою очередь предполагает разброс скоростей гомогенных и гетерогенных процессов по сечению и длине разрядной камеры.

Для эффективного проведения плазменных процессов обрабатываемые материалы необходимо размещать в областях СВЧ разряда, где его химическая активность максимальна [1]. При групповой обработке полупроводниковых пластин одним из факторов, влияющих на скорость удаления фоторезиста, является расстояния между подложками, что может быть связано с изменением плотности травящих фоторезист частиц, ухудшением отвода отработанных продуктов реакции, увеличением сопротивления движению газового потока.

Экспериментальные исследования влияния расстояния между подложками на скорость удаления с их поверхности фоторезиста в области локального максимума и минимума СВЧ энергии проводились на базе лабораторной СВЧ плазменной установки резонаторного типа [3], используемой на операциях очистки полупроводниковых подложек, удаления фоторезистивных покрытий, лаков и мастик, плазменного

осаждения пленок, модификации поверхности материалов, деталей и узлов сложной формы [1].

Внутри кварцевого туннельного реактора объемом около 9000 см<sup>3</sup> на подложкодержателе из кварцевого стекла размещались пластины из монокристаллического кремния диаметром 100 мм с нанесенным на его поверхность фоторезистом марки *S 1813 G 2 SP 15* толщиной 1,5 мкм. Пластины располагались вдоль оси напуска газа. Регистрация момента окончания процесса удаления фоторезиста проводилась при помощи спектрометра *SL 40-2-2048 ISA* по интенсивности спектральной линии кислорода  $\lambda = 777,46$  нм. В качестве рабочего газа использовался воздух. Процесс плазмохимического удаления проводился при давлении 130 Па.

Результаты исследования влияния расстояния между обрабатываемыми кремниевыми пластинами на скорость СВЧ плазмохимического удаления с их поверхности фоторезистивных пленок представлены на рисунке 1.

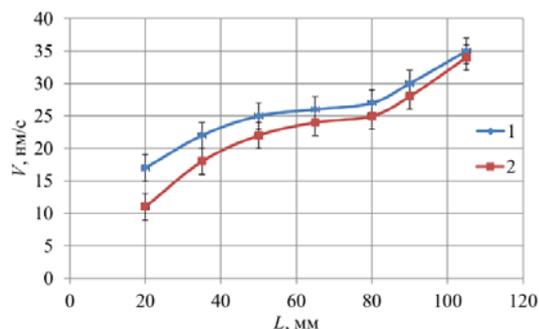


Рисунок 1 – Зависимость скорости СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин от расстояния между ними:

1 – в области локального максимума СВЧ мощности;  
2 – в области локального минимума СВЧ мощности

Исследование процесса СВЧ плазмохимического удаления фоторезистивных покрытий с полупроводниковых пластин при расположении в характерных местах максимумов и минимумов СВЧ мощности в плазменном объеме при вращающемся диссекторе показало, что в случае обработки одиночных пластин или партий пластин с расстоянием между ними соизме-