

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ
НА ФОРМИРОВАНИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ПОЛЯ
В ПРИБОРАХ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ**
*Evaluation of the testing details influence on the magnetizing field
formation in the pulsed magnetic testing devices*

Матюк В.Ф., Баранов Д.П., Бурак В.А.
Matyuk V.F., Baranov D.P., Burak V.A.

Дана оценка влияния контролируемых деталей из разных материалов на формирование намагничивающего поля в приборах импульсного магнитного контроля с различными типами преобразователей. Показано, что для приборов с накладными преобразователями влиянием контролируемых деталей можно пренебречь. Для приборов с проходными преобразователями это влияние незначительно, если длина намагничивающего соленоида превышает длину детали, а его внутренний радиус гораздо больше радиуса детали.

The evaluation of different materials testing details influence on the magnetizing field formation in the pulsed magnetic testing devices with different types of transducers is given. It is shown that for devices with overlaid transducers the testing details influence can be neglected. For devices with passing transducers this influence is negligible if the length of the magnetizing solenoid exceeds the length of a detail, and its inner radius is much larger than the detail radius.

Введение

В приборах импульсного магнитного контроля структурного состояния деталей из ферромагнитных материалов обязательной операцией является их намагничивание. Оно осуществляется одним или несколькими импульсами тока, формируемыми при разряде через соленоид или систему соленоидов батареи конденсаторов [1-6]. Основными параметрами формируемого при этом магнитного поля, от которых зависят результаты локального намагничивания, а, следовательно, и результаты контроля, являются амплитуда импульсов в заданной области, их форма и длительность.

Калибровка приборов импульсного магнитного контроля по амплитуде, форме и длительности намагничивающего импульса проводится без испытываемой детали. Это связано, во-первых, с небольшим влиянием детали на величину тока через соленоид как для наклад-

ных, так и для проходных преобразователей с малым отношением сечения изделия к внутреннему сечению соленоида и, во-вторых, с невозможностью метрологической аттестации средства неразрушающего контроля по величине создаваемого им магнитного поля в присутствии детали.

Амплитуда, форма и длительность формируемых импульсов магнитного поля зависят от параметров разрядной цепи: активного сопротивления и индуктивности соленоида и емкости батареи накопительных конденсаторов. Наличие испытуемой детали изменяет активное сопротивление цепи за счет возникновения в детали вихревых токов и величину индуктивности за счет намагничивания детали, что может повлиять на параметры формируемого импульса.

Строгий теоретический расчет разрядной цепи при наличии намагничиваемой детали весьма трудоемок и возможен лишь численными методами. Поэтому оценка влияния намагничиваемой детали на параметры намагничивающих импульсов проводится экспериментально [7].

ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ

В зависимости от назначения приборы импульсного магнитного контроля структурного состояния ферромагнитных сталей и изделий из них отличаются размерами используемого соленоида, а также амплитудой, формой и длительностью формируемого импульса магнитного поля [1–6].

Так, импульсные магнитные анализаторы типа ИМА-2, ИМА-2А, ИМА-3, ИМА-4, ИМА-4А и ИМА-4М [2], предназначенные для неразрушающего контроля качества термообработки, механических свойств и структуры изделий из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей толщиной от 0,15 до 4 мм после технологического отжига, имеют намагничивающий соленоид с внутренним диаметром 6 мм (для ИМА-4А и ИМА-4М – 8 мм), внешним диаметром 14 мм (для ИМА-4А и ИМА-4М – 18 мм) и длину 30 мм. Амплитуда импульса на торце соленоида может варьироваться от $1,3 \cdot 10^4$ до $1,3 \cdot 10^5$ А/м (ИМА-2, ИМА-2А, ИМА-3) и от $0,7 \cdot 10^5$ до $2,1 \cdot 10^5$ А/м (ИМА-4). В приборах ИМА-4А и ИМА-4М амплитуда импульсов не регулируется и составляет $2,1 \cdot 10^5$ А/м. Импульс у этого класса приборов имеет форму аперриодического разряда конденсатора, длительность составляет примерно 0,5 мс (по уровню 0,05), а число импульсов может устанавливаться в пределах 1–5 (ИМА-2), 1–10 (ИМА-2А, ИМА-3, ИМА-4 и ИМА-4А) и фиксировано 10 (ИМА-4М).

Импульсные локальные контроллеры типа ИЛК-2, ИЛК-2А и ИЛК-2Б, контролирующие качества отпуска изделий из конструкционных сталей, имеют аналогичный соленоид с увеличенным до 20–22 мм внешним радиусом, причем амплитуда намагничивающего импульса фиксирована и составляет $1 \cdot 10^6$ А/м, а размагничивающего – изменяется в пределах от 0 до $3 \cdot 10^5$ А/м [3].

Вышеперечисленные приборы имеют примерно одинаковые размеры намагничивающего соленоида и примерно одинаковые параметры формируемого импульса. Поэтому оценку влияния испытуемых деталей на формирование импульсов в приборах данного типа достаточно провести, например, на приборе ИМА-4М.

Контроль изделий толщиной свыше 4 мм потребовал увеличения размеров намагничивающего соленоида, амплитуды и длительности намагничивающих импульсов. Так приборы ИМА-5, ИМА-5А и ИМА-5Б и контроллеры импульсные магнитные КИМ-1, КИМ-1М и КИМ-2 содержат соленоид с внутренним радиусом 5 мм, внешним радиусом 25 мм, длиной 30 мм и числом витков 265 [2, 4]. Максимальная амплитуда импульсов у этих приборов равна $2 \cdot 10^6$ А/м, импульс имеет форму апериодического разряда конденсатора, а его длительность составляет примерно 8 мс (по уровню 0,05), число импульсов может устанавливаться в пределах 1–10. Кроме того, в приборе ИМА-5Б для повышения достоверности контроля формируются серии размагничивающих импульсов с амплитудой первого импульса в серии $1,2 \cdot 10^6$ А/м, который по форме близок к полуволне синусоиды и имеет длительность 1,8 мс. Поэтому оценку влияния испытуемых деталей на формирование импульсов в приборах данного типа необходимо проводить на приборе ИМА-5Б.

В приборе ИМА-6 для повышения чувствительности к изменению температуры отпуска после закалки изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 %, особенно при контроле массивных изделий, длительность намагничивающего импульса увеличена до 25 мс при амплитуде $(0,2–2,4) \cdot 10^5$ А/м и сохранении апериодической формы разряда. Размеры намагничивающего соленоида аналогичны размерам соленоида прибора ИМА-5Б, а число витков увеличено до 865 [3].

При контроле листового проката сталей в технологическом потоке производства с помощью установок типа ИМПОК разных модификаций намагничивание листа осуществляется импульсным магнитным полем двух соосных последовательно-встречно включенных соленоидов, причем лист при движении может колебаться относительно центра симметрии намагничивающей системы. Для оценки влия-

ния ферромагнитного листа на форму импульса этих установок использовали намагничивающую систему установки ИМПОК-1Б, импульсы магнитного поля которой имеют форму апериодического разряда конденсатора, их амплитуда на торце каждого из соленоидов преобразователя составляет $3,2 \cdot 10^5$ А/м, а длительность – 25 мс [5].

Оценку влияния вихревых токов на формируемые приборами импульсы магнитного поля проводили на образцах из неферромагнитных материалов с разной величиной удельного электрического сопротивления ρ (медь – $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, алюминий – $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, дюралюмин марки Д-16Т – $\rho = 7,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, бронза марки Бр.Б2 – $\rho = 12,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и немагнитная нержавеющая сталь 08Х18Н10 – $\rho = 80 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). Все образцы из неферромагнитных материалов имели форму дисков диаметром 150 мм и толщиной 2 мм.

Вклад свойств намагничиваемого материала в изменение параметров импульса оценивали на образцах из стали 45 диаметром 59 мм и толщиной 9 мм (закалка от 820 °С без отпуска – $\rho = 27 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и отпуск после закалки при температуре 700 °С – $\rho = 20,4 \cdot 10^{-8}$ Ом·м).

Исследования изменений параметров импульса установки ИМПОК-1Б проводили на образцах из стали 08кп размером $1000 \times 1000 \times 1,2$ мм³, отожженных при температурах 100 °С и 600 °С. При этом в одном случае образец располагали посередине между намагничивающими соленоидами преобразователя, а во втором – у торца одного из соленоидов.

Для намагничивания деталей цилиндрической формы чаще всего используют проходные преобразователи [6]. При этом деталь помещается внутрь соленоида или системы соленоидов. В проведенных исследованиях использовался соленоид со следующими параметрами: внутренний диаметр 70 мм; внешний 114 мм; длина 20 мм; число витков 110; активное сопротивление 0,45 Ом; индуктивность 1,15 мГн.

Для оценки влияния вихревых токов в образце на параметры формируемого через этот соленоид импульса магнитного поля использовали цилиндр из дюралюминия диаметром 20 мм, а влияния свойств намагничиваемого материала – стержни из стали 20 разного диаметра (12,5; 25,2 и 41,2 мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ

Результаты сравнения осциллограмм импульсов магнитного поля на торце преобразователей приборов ИМА-4М, ИМА-5Б, ИМА-6 и ИМПОК-1Б при установке преобразователя каждого прибора на обра-

зец металла и без него представлены на рис. 1–4. Величина магнитного поля определялась по величине тока через соленоид преобразователя соответствующего прибора.

Исследования показали, что изменения формы, амплитуды или длительности импульса магнитного поля на торце преобразователя прибора ИМА-4М из-за нахождения под ним как немагнитного, так и магнитного материала находятся в пределах ошибки измерений (рис. 1 а, б).

Это связано с малым потокосцеплением соленоида прибора ИМА-4М с полем вихревых токов в образце (из-за небольшого диаметра соленоида и сравнительно небольшой скорости нарастания – $23,3 \cdot 10^8$ А/(м·с) и спада – $5,12 \cdot 10^8$ А/(м·с) импульса), а также с полем локально намагничиваемого участка (для ферромагнитных образцов).

Значительное увеличение амплитуды первого из серии размагничивающих импульсов прибора ИМА-5Б (по сравнению с намагничивающими импульсами прибора ИМА-4М) при одновременном увеличении его длительности не увеличило, а даже несколько уменьшило скорость нарастания этого импульса – $15 \cdot 10^8$ А/(м·с) (рис. 1 в, г). Из-за изменения формы импульса скорости его нарастания и спада стали равными. Увеличилось также и потокосцепление соленоида прибора ИМА-5Б с полем вихревых токов в образце и с полем намагничиваемого участка из-за увеличения диаметра соленоида до 50 мм.

Однако наличие образца и в этом случае не оказывает заметного влияния на формирование импульса магнитного поля с вышеперечисленными параметрами и локализацией в пространстве (рис. 1 в, г). Так, изменения импульса во время его нарастания находятся в пределах ошибки измерений. Можно отметить лишь небольшое уменьшение амплитуды и времени спада импульса, при этом, чем меньше удельное сопротивление материала образца, тем это влияние больше. Но даже для меди оно не превышает 5-10 %. Из-за увеличения диаметра соленоида и размера намагниченного участка при намагничивании ферромагнитных образцов несколько уменьшается (примерно на 5 %) амплитуда импульса. Временные параметры импульса при этом не меняются.

Намагничивающий импульс прибора ИМА-5Б (рис. 2) отличается от размагничивающего тем, что в момент начала спада намагничивающего импульса подключается демпфирующий диод, и разряд из периодического переходит в аperiodический [2]. При максимальной амплитуде импульса, которая равна амплитуде первого импульса в серии размагничивающих импульсов, до $1,4 \cdot 10^8$ А/(м·с) снижается

скорость спада импульса. В результате проводящие свойства материала образца не сказываются на формировании импульса как при максимальной, так и при минимальной амплитуде (при минимальной амплитуде скорости нарастания и спада импульса в 6 раз меньше).

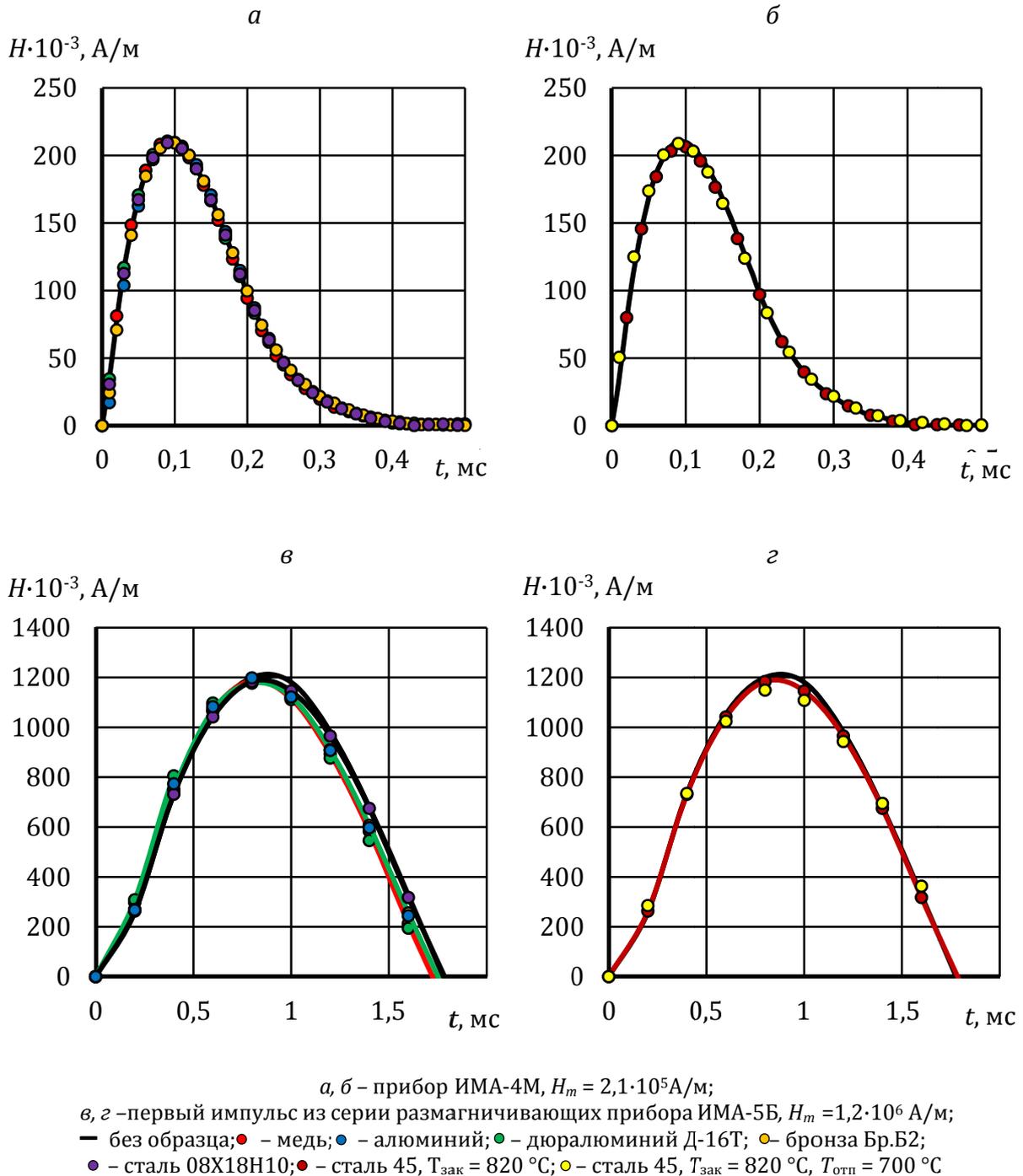


Рис. 1. Осциллограммы импульсов магнитного поля на торце преобразователя

При установке преобразователя прибора на ферромагнитные образцы наблюдается небольшое (3-4 %) уменьшение амплитуды импульса.

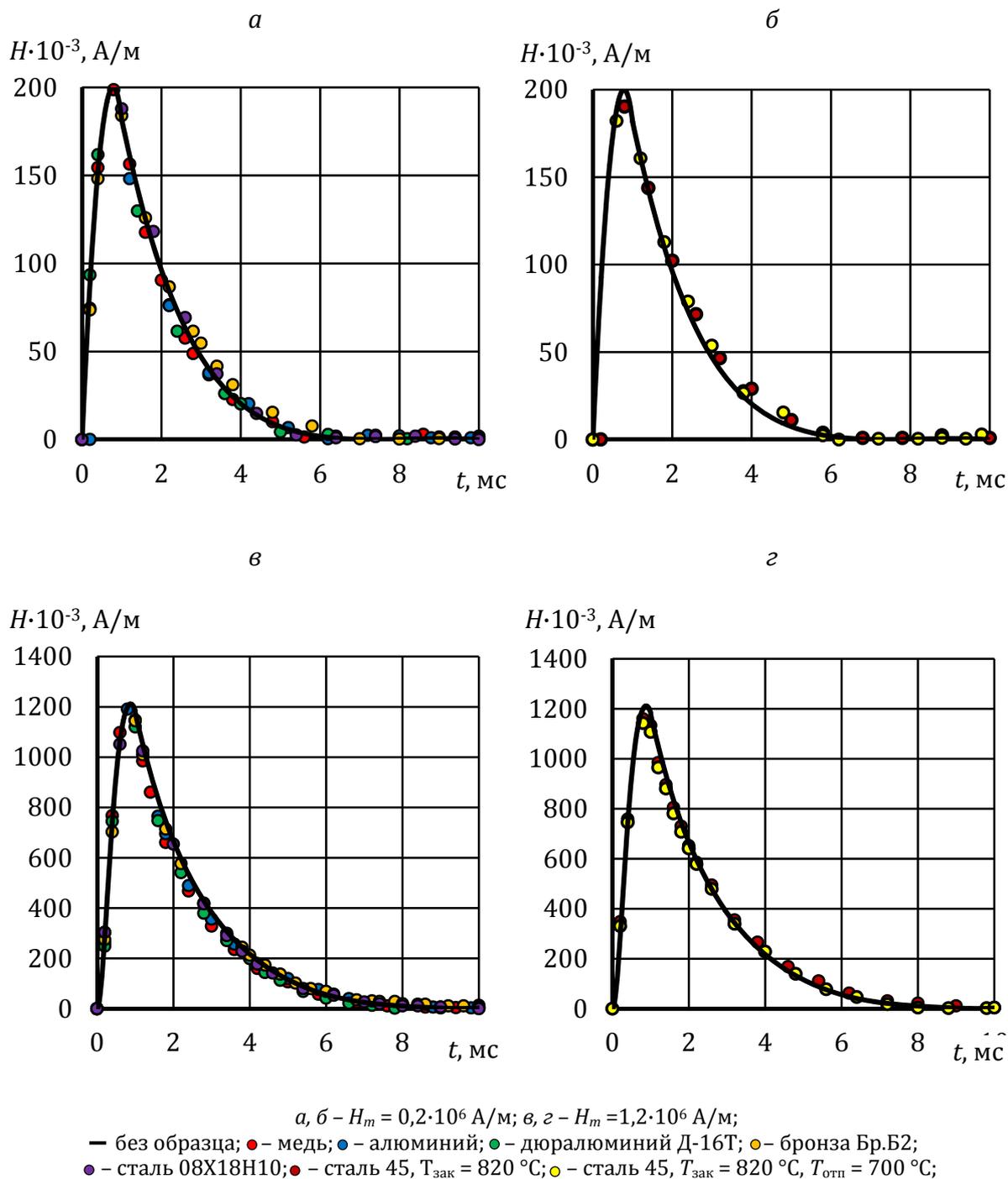


Рис. 2. Осциллограммы намагничивающих импульсов на торце преобразователя прибора ИМА-5Б

Увеличение длительности намагничивающего импульса в приборе ИМА-6 до 25 мс не выявило существенного влияния на его параметры как немагнитных, так и магнитных образцов (рис. 3). Небольшое уменьшение формируемого импульса в области максимума при минимальной амплитуде $0,2 \cdot 10^5$ А/м связано с влиянием помех при измерении импульсов тока малой величины (рис. 3 а, б).

По сравнению с приборами типа ИМА, потокосцепление любого из двух соленоидов преобразователя установки ИМПОК-1Б с образцом в случае, когда образец находится у торца одного из соленоидов, значительно выше (соленоид установки ИМПОК-1Б имеет диаметр 195 мм). Несмотря на это, влияние образца на формирование импульса во всех исследуемых случаях очень незначительно (уменьшается только амплитуда импульса на 2-3 %), что связано с невысокой скоростью нарастания и спада импульса – $1,6$ и $0,11 \cdot 10^8$ А/(м·с) соответственно – и большим зазором между феррозондом преобразователя и образцом (рис. 4).

Результаты исследований формирования импульсов магнитного поля в проходных преобразователях без образца и при его наличии при двух амплитудах намагничивающих импульсов в центре соленоида ($H_{m0} = 0,5 \cdot 10^5$ А/м и $5 \cdot 10^5$ А/м) для апериодического и периодического разрядов батареи конденсаторов представлены на рис. 5. Апериодический или близкий к нему разряд получался из периодического путем параллельного подключения к намагничивающему соленоиду демпфирующего диода с сопротивлением ($R_d = 1,8$ Ом). При этом формируемые импульсы отличались длительностью заднего фронта.

Из представленных осциллограмм видно, что наличие внутри соленоида дюралюминиевого стержня практически не сказывается на параметрах импульса как при периодическом, так и при апериодическом разрядах, как при малой, так и при большой амплитудах намагничивающих импульсов. Это говорит о том, что для используемых при импульсном магнитном контроле параметров намагничивающих систем влияние вихревых токов на изменение формы намагничивающих импульсов можно не учитывать.

В то же время, если образцы ферромагнитны, то их влияние на параметры формируемого в проходном преобразователе импульса может быть весьма существенным. При этом наибольшее изменение формы импульса наблюдается для образца большого диаметра. Так, при формировании импульсов малой амплитуды ($H_m = 0,5 \cdot 10^5$ А/м) амплитуда импульса при наличии внутри соленоида ферромагнитного образца диаметром 41,2 мм отличается от амплитуды импульса при

его отсутствии на 35 %, а изменение длительности заднего фронта импульса составляет 40 %. По мере уменьшения диаметра ферромагнитного образца его влияние на форму импульса снижается.

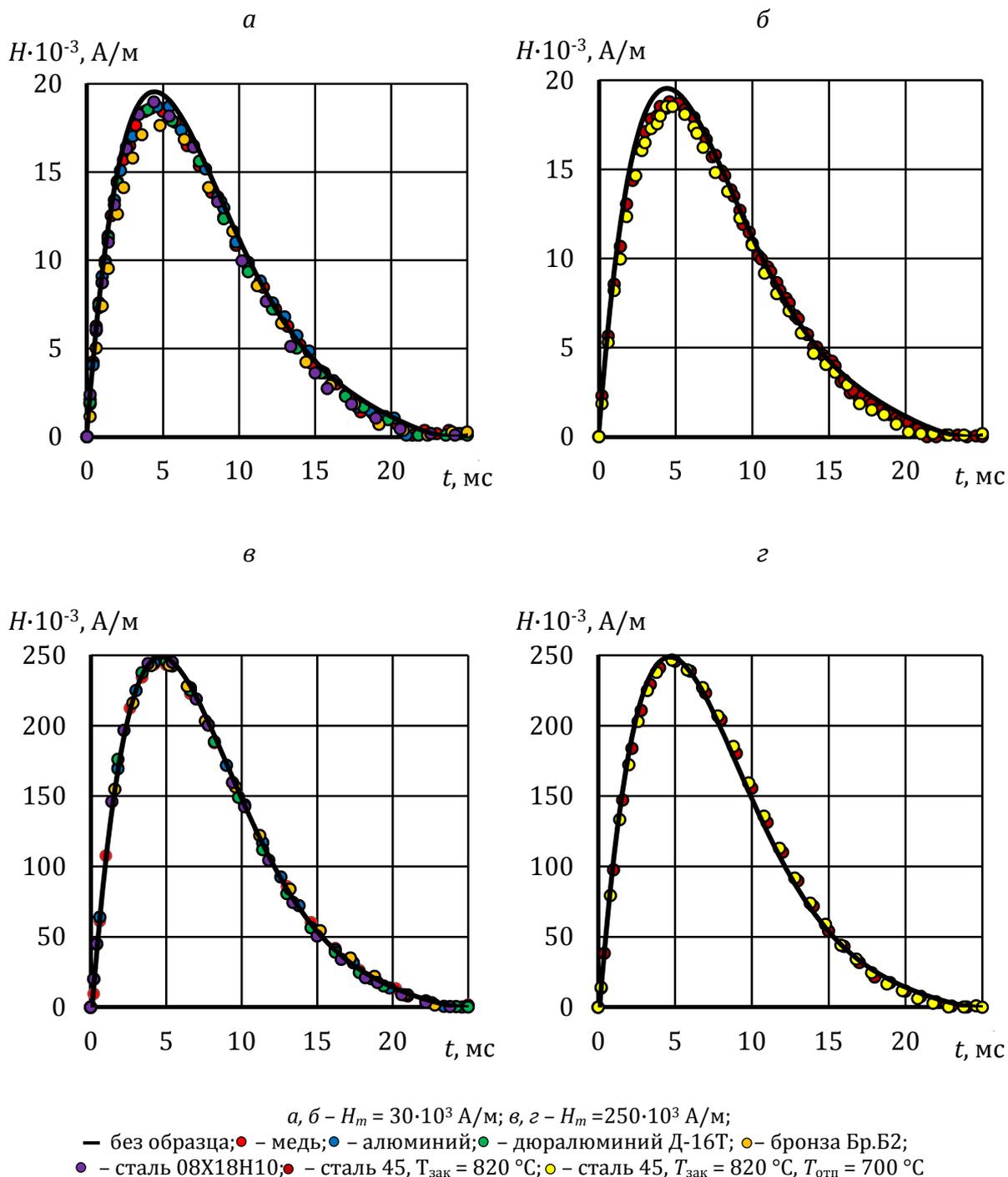


Рис. 3. Осциллограммы импульсов магнитного поля на торце преобразователя прибора ИМА-6

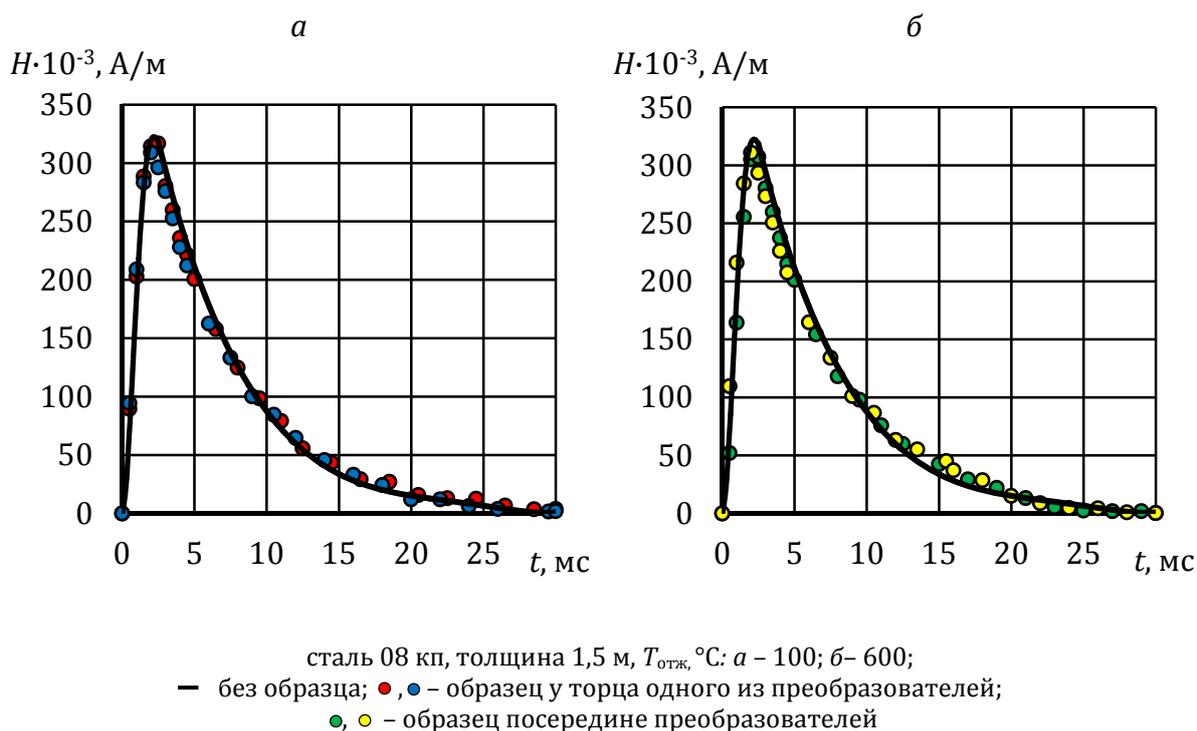
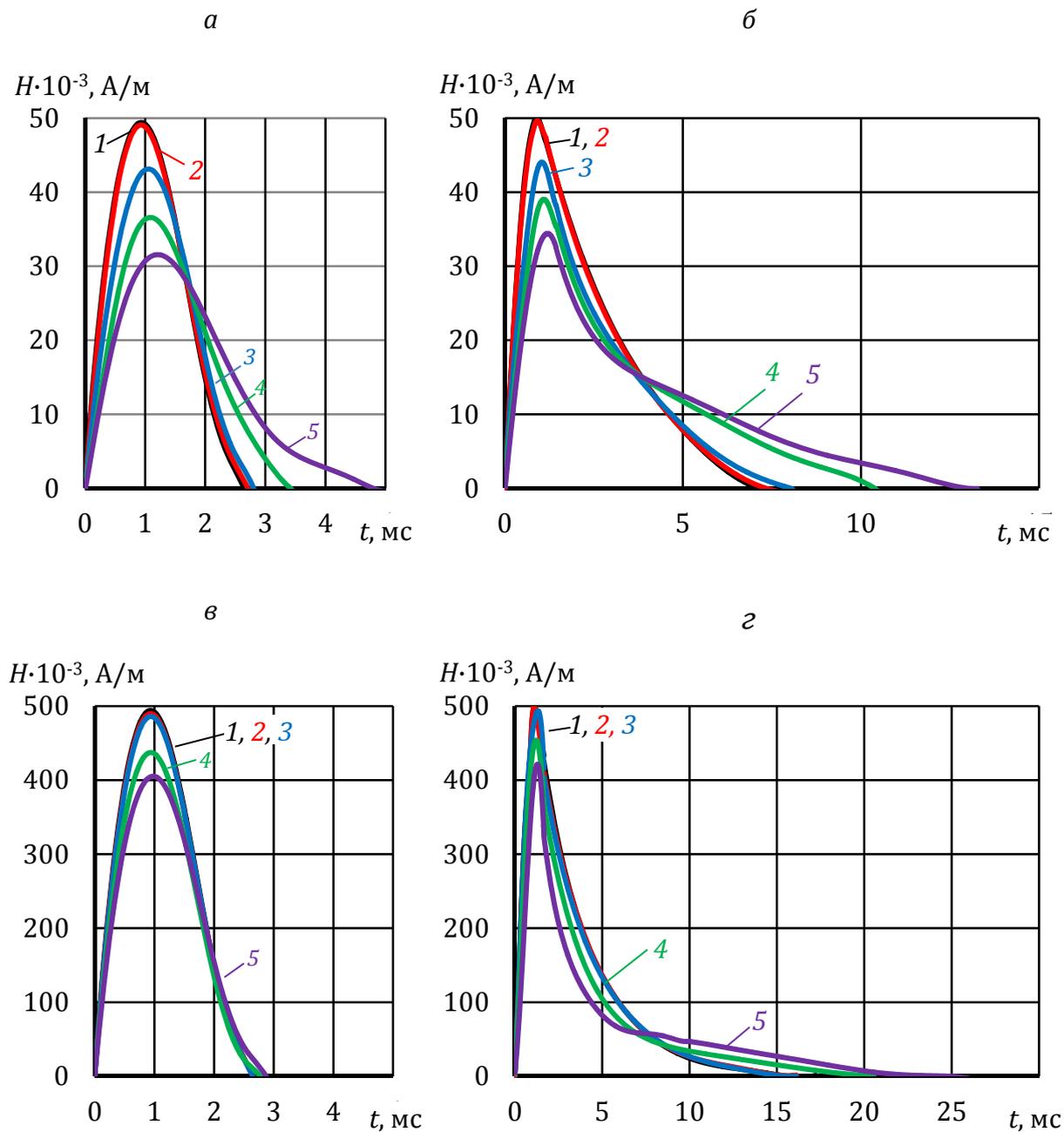


Рис. 4. Осциллограммы импульсов магнитного поля на торце преобразователя установки ИМПОК-1Б

Увеличение амплитуды формируемого импульса ослабляет влияние на его форму наличие ферромагнетика внутри соленоида для обоих видов разряда.

Внесение в соленоид полого цилиндра оказывает на формирование намагничивающего импульса значительно меньшее влияние, чем внесение сплошного цилиндра такого же диаметра.

При использовании для намагничивания ферромагнитных изделий цилиндрической формы системы из двух последовательно включенных соленоидов изменение формы импульса зависит от того, включены эти соленоиды согласно или встречно. По сравнению с преобразователем, состоящим из одного соленоида, встречное включение двух соленоидов ослабляет это влияние, а при согласном – усиливает. Так, для образца диаметром 41,2 мм и приведенных выше параметров каждого из соленоидов (расстояние между торцами 50 мм) при встречном включении уменьшение амплитуды импульса составляет 13 %, а при согласном – 50 %. При этом периодический разряд переходит в аperiodический.



соленоид: внутренний диаметр 70 мм, внешний диаметр 114 мм, длина 20 мм,
 число витков 110;
 демпфирующий диод: а, в – отключен; б, г – подключен
 1 – без образца; 2 – дюралюминий, диаметр 20 мм; 3 – сталь 20, диаметр 12,5 мм;
 4 – сталь 20, диаметр 25,2 мм; 5 – сталь 20, диаметр 41,2 мм

Рис. 5. Осциллограммы импульсов магнитного поля в центре соленоида для намагничивания изделий цилиндрической формы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании накладных преобразователей для импульсного намагничивания испытуемой детали ее влиянием на параметры импульса можно пренебречь.

В случае импульсного намагничивания изделий цилиндрической формы в проходных преобразователях следует принимать во внимание то, что внутреннее сечение соленоида должно быть гораздо большим, чем сечение образца, стремиться доводить образец до магнитного насыщения и учитывать взаимоиндукцию соленоидов при двухэлементных намагничивающих системах.

Литература

1. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
2. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 2, с. 29–64.
3. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального импульсного двухполярного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 4, с. 20–45.
4. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального циклического импульсного перемагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2013, № 1, с. 3–27.
5. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии листового проката сталей в технологическом потоке производства. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2013, № 2, с. 3–28.
6. Короткевич З.М., Матюк В.Ф., Цукерман В.Л., Осипов А.А. Прибор для измерения магнитной индукции ферромагнитных стержней в процессе импульсного намагничивания-перемагничивания. – В кн.: Приборостроение–2013. Материалы 6-й международной научно-технич. конф. Минск, 20–22 ноября 2013 г. – Минск: БНТУ, 2013, с. 70–72.
7. Матюк В.Ф., Стрелюхин А.В. Оценка влияния контролируемого изделия на формирование намагничивающих импульсов в системах импульсного магнитного контроля. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1997, № 3, с. 51–55.

Статья поступила в редакцию 13.06.14