

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ТОРЦОВ ТРУБ ПРИ РЕМОНТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Експериментально досліджено ефективність методів розмагнічування торців труб для виключення "магнітного дугтя" дуги при зварювальних ремонтних роботах на магістральних трубопроводах. Встановлено, що різнополярне статичне розмагнічування і динамічне розмагнічування зі зміщенням дозволяють забезпечити допустимий рівень магнітної індукції труб на торцях і стійкість їх магнітного стану, що дає можливість скоротити час ремонту за рахунок виконання розмагнічування паралельно з іншими технологічними операціями.

Експериментально досліджена ефективність методів розмагнічування торців труб для виключення "магнітного дугтя" дуги при зварювальних ремонтних роботах на магістральних трубопроводах. Встановлено, що різнополярне статичне розмагнічування і динамічне розмагнічування зі зміщенням дозволяють забезпечити допустимий рівень магнітної індукції труб на торцях і стійкість їх магнітного стану, що дає можливість скоротити час ремонту за рахунок виконання розмагнічування паралельно з іншими технологічними операціями.

ВВЕДЕНИЕ

Известные технологии демагнетизации труб при ремонтных работах на магистральных трубопроводах с применением электросварки на постоянном токе основаны либо на размагничивании сварочных стыков во время электросварки, либо на импульсном или динамическом размагничивании сварочных стыков перед электросваркой [7]. Эти технологии позволяют достичь положительного результата, заключающегося в повышении качества сварного шва вследствие исключения магнитного дугтя дуги, вызванного наличием магнитного поля в сварочном стыке. Однако практическая реализация известных технологий демагнетизации труб удлинняет срок выполнения ремонта, поскольку требуется дополнительное время, в том числе, на проведение подготовительных работ (монтаж, настройку и демонтаж размагничивающего оборудования) на состыкованных для сварки трубах.

Разработанная с участием автора технология комплексной демагнетизации труб [1] позволяет сократить длительность процесса демагнетизации труб перед сваркой с нескольких часов до 10-15 минут на каждом стыке. Технология, заключающаяся в последовательном использовании методов статического размагничивания и компенсации магнитного поля в сварочном стыке, внедрена в Филиале "Приднепровские магистральные нефтепроводы" ОАО "Укртранснефть". Однако актуальной остается задача разработки технологии демагнетизации труб, которая позволяла бы производить электросварочные работы без потери времени на демагнетизацию и, таким образом, исключить дополнительное время простоя трубопровода. Реализация такой технологии возможна, если демагнетизация осуществляется в промежутке времени от выемки дефектного участка трубы до начала установки нового, длительность которого превышает время, необходимое для демагнетизации, параллельно с другими технологическими операциями. При этом должны размагничиваться торцы труб, которые впоследствии будут состыкованы для электросварки. Однако для успешной реализации такой технологии демагнетизации требует решения задачи обеспечения эффективного и устойчивого размагничивания торцов труб, позволяющего длительно сохранить их намагниченное состояние вплоть до момента электросварки. Решению этой задачи посвящена настоящая статья.

ВЫБОР МЕТОДОВ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ

Как показано в [1], наиболее эффективными методами локальной демагнетизации состыкованных для сварки труб являются статическое и динамическое размагничивание при помощи накладываемой в зоне стыка электрической обмотки. В отличие от размагничивания труб, состыкованных для сварки, где положение обмотки относительно стыка не оказывает существенного влияния на эффективность демагнетизации, при размагничивании торцов труб оно может оказаться важным в связи с влиянием на магнитное сопротивление магнитной цепи размагничивающего фактора. Определение оптимального положения размагничивающей обмотки относительно торца трубы было одной из задач представленных исследований.

По результатам многочисленных измерений установлено, что фактический уровень магнитной индукции на торцах труб, прошедших магнитную дефектоскопию, составляет $15 \div 25$ мТл, а после стыковки под сварку индукция в сварочном зазоре увеличивается в $3 \div 5$ раз и достигает уровня $50 \div 120$ мТл [2]. Учитывая, что допустимая магнитная индукция в сварочном зазоре, при которой возможна качественная сварка, составляет $6 \div 8$ мТл, эффективность снижения намагниченности должна быть на уровне $15 \div 20$ раз, а индукция на торцах труб после размагничивания – не более $1,5 \div 2$ мТл. Как показывает практика демагнетизации трубопроводов, это достаточно высокая эффективность размагничивания и низкий уровень индукции на торце трубы.

Анализ различных методов демагнетизации [9] показал, что наиболее приемлемым методом для торцов труб является доменное размагничивание (динамическое и статическое) с помощью сосредоточенной обмотки соленоидного типа. При этом положение обмотки может оказаться значимым в связи с его влиянием на магнитное сопротивление магнитной цепи размагничивания. Учитывая, что это сопротивление вблизи торца трубы больше, чем у трубы со сварочным зазором, намагничивающая сила обмотки для создания размагничивающего поля вблизи торца предположительно также должна быть больше.

Динамическое размагничивание принципиально представляет наиболее эффективный метод при усло-

вии отсутствия магнитного поля внешних источников. К сожалению, это условие в нашем случае не выполняется из-за действия в зоне размагничивания магнитного поля дальних участков намагниченной трубы, которые не могут быть размагничены сосредоточенной обмоткой, и в результате всегда остается некоторая неснижаемая намагниченность в направлении исходной. Чтобы получить обратную намагниченность, следует в зоне размагничивания создать постоянное магнитное поле смещения, противоположное исходному, такой величины, которая обеспечивает нулевую (или допустимую) индукцию на торце трубы. Это оптимальное магнитное поле смещения относительно легко может быть определено экспериментально, например, методом последовательных приближений или аналитически на планиметрической модели [4].

К недостаткам такого динамического размагничивания можно отнести необходимость создания дополнительного магнитного поля смещения, его регулировки, и довольно большую длительность процесса размагничивания с учетом определения оптимального смещения.

Статическое размагничивание обладает высокими потребительскими свойствами и нереализованными возможностями, что следует из предыдущих исследований и опыта эксплуатации размагничивающего устройства типа РУ, в котором статическое размагничивание является основным режимом [1, 2, 5, 6].

И статическое, и динамическое размагничивание предполагают, что по их завершении размагничивающая обмотка будет демонтирована. То есть до выполнения сварки пройдет определенное время, в течение которого размагниченное состояние практически не должно измениться, а значит, должна быть обеспечена его хорошая устойчивость. Известно, что магнитное состояние ферромагнетика в значительной мере изменяется под воздействием механических напряжений [8]. А трубы в процессе монтажа неизбежно подвергаются разного рода механическим воздействиям, что может нарушить их размагниченное состояние.

Таким образом, основными характеристиками техпроцесса размагничивания являются его эффективность и устойчивость размагниченного состояния.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность размагничивания принято определять как отношение максимального значения продольной компоненты магнитной индукции в зазоре или на торце трубы до (B_{ma}) и после (B_{mp}) размагничивания, то есть:

$$\mathcal{E} = B_{ma} / B_{mp} . \quad (1)$$

Устойчивость, или скорее неустойчивость размагниченного состояния может быть определена по методике, изложенной в [3], как отношение изменения размагниченного состояния ΔB_{σ} от действия периодических упругих напряжений к исходной магнитной индукции B_{ma} .

Там же показано, что с увеличением количества перемагничивающих разнополярных импульсов виброустойчивость размагниченного состояния изделия повышается.

Исследования проводились на лабораторном стенде, изображенном на рис. 1.

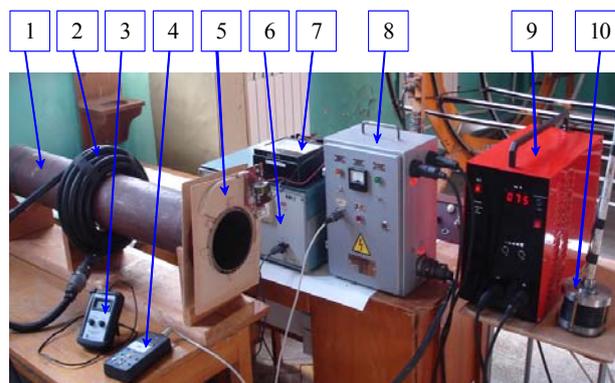


Рис. 1

Состав стенда:

- отрезок стальной трубы (1);
- размагничивающее устройство типа РУ-Э (8) с обмоткой размагничивания (2) и пультом дистанционного управления (4);
- обмотка смещения (5);
- источник постоянного тока Б5-21 (6);
- ампервольтметр М2018 (7);
- источник питания размагничивающего устройства АВС-315М (9);
- магнитометр DC Gaussmeter Model 1, AlphaLab Inc (3);
- внутритрубное намагничивающее устройство (10).

Параметры трубы, на которой проводились исследования, следующие: наружный диаметр $D = 160$ мм; толщина стенки $\Delta = 7$ мм; длина $L = 1000$ мм.

Обмотка размагничивания (ОР) представляет собой соленоид из 11 витков кабеля типа КНР $10 \times 2,5$ мм² и выполнена в виде катушки длиной $L_p = 80$ мм. Жилы в кабеле соединены последовательно, общее число витков $W_p = 110$. ОР подключается к размагничивающему устройству типа РУ-Э, которое питается от регулируемого источника постоянного тока (модернизированный инверторный сварочный выпрямитель типа АВС-315М). Максимальный ток $I_p = 75$ А ($IW = 8,25$ кА), регулировка тока производится в диапазоне $0 \div I_p$ с дискретностью 1 А.

Обмотка смещения (ОС) представляет собой катушку длиной 40 мм из провода типа ПЭВ-2 сечением $1,27$ мм², общим количеством витков $W_{cm} = 300$. Питание ОС осуществляется от источника постоянного тока типа Б5-21.

Перед каждым экспериментом труба намагничивалась с помощью внутритрубного намагничивающего устройства (НУ), представляющего собой соленоид постоянного тока с намагничивающей силой 16 кА на ферромагнитном каркасе. Такая конструкция НУ выбрана для имитации магнитного поля дефектоскопического прибора, который применяется для диагностики технического состояния трубопроводов. Результаты намагничивания носят стабильный характер, то есть исходное поле трубы во всех экспериментах было одинаковое. Снимались распределения продольной компоненты магнитной индукции по окружности торца трубы в 8-ми точках, расположенных через 45° [5], до (B_a) и после (B_p) размагничивания.

Исходное распределение магнитной индукции приведено в табл. 1. Из таблицы выбрано максимальное значение $B_{ma} = 5,6$ мТл для определения эффективности по (1) и точка №3 со средним значением B_a , которая использовалась в качестве контрольной при последующих исследованиях.

Таблица 1

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
B_a , мТл	5,3	5,6	5,25	5,3	5,05	5,1	5,25	5,2

Динамическое размагничивание производилось в магнитном поле смещения, создаваемом обмоткой ОС. Длительность импульсов тока в ОР и пауз между ними задавалась порядка 3с для гарантированного перемагничивания материала трубы, декремент затухания $1,1 \div 1,2$.

Программа исследований предусматривала определение оптимальной намагничивающей силы ОС $IW_{см}^{opt}$ и оптимального положения ОР x_p^{opt} , обеспечивающих максимальную эффективность размагничивания.

Зависимости $B_p = f(IW_{см})$ снимались при размещении ОС у торца трубы (рис. 2) и различных расстояниях до ОР ($x_p = 40 \div 240$ мм).

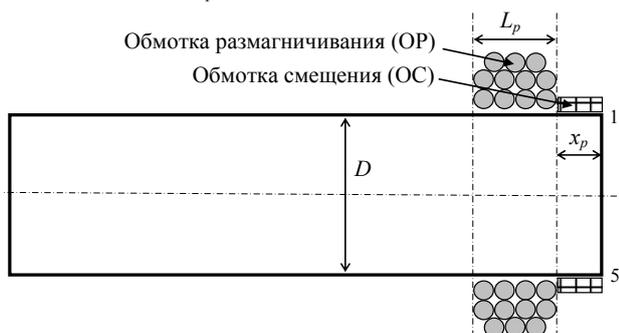


Рис. 2

После намагничивания трубы в ОС подавался постоянный ток $I_{0см}$ такой величины и направления, при котором достигалась компенсация остаточного магнитного поля в контрольной точке. Динамическое размагничивание производилось при намагничивающей силе ОС $IW_{см} = (I_0W)_{см}, 2(I_0W)_{см}, 3(I_0W)_{см} \dots$, последовательно до изменения знака остаточной индукции в контрольной точке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Полученные в результате эксперимента зависимости остаточной индукции в контрольной точке от намагничивающей силы ОС приведены на рис. 3 для значений x_p : 1) $x_p = 40$ мм ($0,25D$); 2) $x_p = 160$ мм ($1D$); 3) $x_p = 240$ мм ($1,5D$). Зависимости практически линейны, поэтому при определенном опыте, можно существенно сократить количество промежуточных размагничиваний для определения $IW_{см}^{opt}$.

Оптимальные величины намагничивающей силы ОС $IW_{см}^{opt}$, которые соответствуют значениям в точках пересечения кривых с осью абсцисс, составляют соответственно 550 А, 575 А, 640 А. При этих значе-

ниях производилось окончательное размагничивание. Распределения магнитной индукции на торце трубы после размагничивания приведены на рис. 4 (кривые 1, 2, 3 соответствуют рис. 3).



Рис. 3

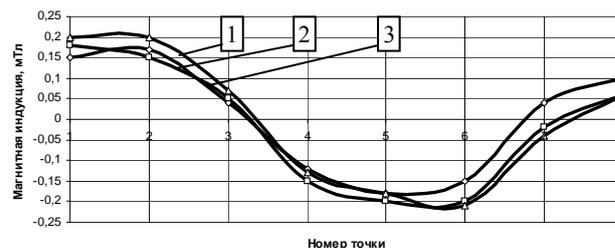


Рис. 4

Как видно, при размещении ОС у торца трубы результат размагничивания мало зависит от положения ОР в пределах $(0,25 \div 1,5)D$. С увеличением x_p лишь незначительно увеличивается величина оптимальной намагничивающей силы ОС. Для определения оптимального положения ОР производилось размагничивание при совместном перемещении по трубе ОР и ОС по методике, изложенной выше.

Зависимость оптимальной намагничивающей силы ОС от расстояния x_p представлена на рис. 5. Из рисунка следует, что наименьшая намагничивающая сила ОС требуется при расположении ОР на расстоянии $x_p = 1,5D$ от края трубы, которое в данном случае можно считать оптимальным. Распределение магнитной индукции на торце трубы после размагничивания с таким расположением обмоток практически совпадают с кривой 3 на рис. 4, однако при этом потребовалась почти вдвое меньшая намагничивающая сила ОС. Таким образом, лучшим вариантом расположения обмоток при динамическом размагничивании можно считать такой, при котором ОС размещается вплотную к ОР или поверх нее.



Рис. 5

Оптимальное расстояние до обмоток на реальных объектах может отличаться от полученного в эксперименте. Оно будет зависеть от ряда факторов, главные из которых – материал и геометрические параметры труб, технические характеристики размагни-

чивающего устройства. Но следует иметь в виду, что чем меньше коэрцитивная сила материала, тем больший участок нужно перемагничивать для создания необходимой встречной намагниченности. Кроме того, перемагничивание большего участка позволяет получить более устойчивое размагниченное состояние трубы. При ремонтах подземных трубопроводов величина x_p часто ограничена длиной участков, освобожденных от грунта, и обычно не превышает $1,5D$. Поэтому, исходя из результатов эксперимента, оптимальным расстоянием от торца трубы до ОР можно считать значения в диапазоне $(0,5 \div 1,5)D$.

Статическое размагничивание (2-шаговое и 3-шаговое) заключается в воздействии опрокидывающим импульсом (первый шаг), который перемагничивает участок трубы в направлении, противоположном исходному, разрушая его магнитную предысторию, а затем импульсом противоположной полярности такой величины, которая при 2-шаговом размагничивании обеспечивает нулевое значение магнитной индукции в выбранной точке на торце трубы, а при 3-шаговом размагничивании – переход через нулевое значение, с тем, чтобы затем стабилизирующим импульсом противоположной полярности привести магнитную индукцию на торце к нулевому значению.

При статическом размагничивании также нужно определить оптимальное расстояние x_p^{omn} до обмотки размагничивания, а именно такое, при котором после опрокидывающего импульса остаточная индукция с обратным знаком на торце трубы будет наибольшей. Этим обеспечивается лучшая стабилизация неравномерности намагниченности трубы и большая зона перемагничивания при заданной намагничивающей силе обмотки.

Для определения x_p^{omn} была подобрана величина опрокидывающего импульса ($IW_0 = 4620$ А), соответствующая релаксационной коэрцитивной силе (одношаговое размагничивание) при положении ОР у торца трубы ($x_p = 0$). Затем труба снова намагничивалась до исходного состояния (табл. 1), и при последовательном перемещении ОР от торца с шагом $x_p = 0,5D$ снималась зависимость $B_p = f(x_p)$ после подачи импульса IW_0 . Эта зависимость приведена на рис. 6 (в контрольной точке №3).

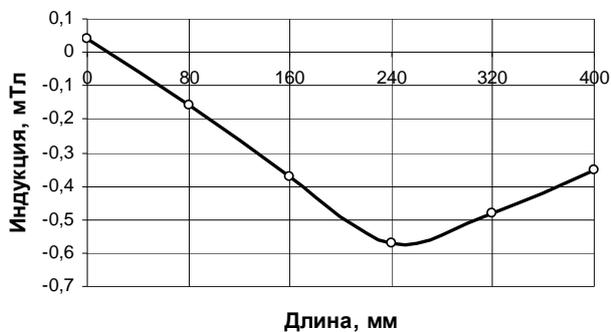


Рис. 6

Как видно, с удалением ОР от торца трубы его намагниченность, противоположная исходной, сначала растет, достигая максимума при расстоянии $x_p = 240$ мм, что составляет $1,5D$, которое можно считать оп-

тимальным. При этом положении ОР производилось 2-шаговое и 3-шаговое размагничивание. Распределения магнитной индукции на торце трубы после размагничивания приведены на рис. 7, на котором обозначено: 1 – после опрокидывающего импульса; 2 – после 2-импульсного размагничивания; 3, 4 – после размагничивающего и стабилизирующего импульсов при 3-импульсном размагничивании.

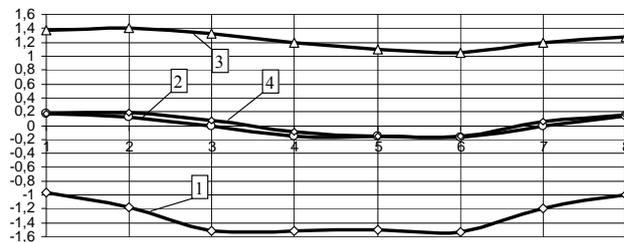


Рис. 7

Величина остаточной индукции после 2- и 3-импульсного размагничивания в эксперименте практически не отличается. Это закономерно, особенно с учетом невысокого уровня исходной намагниченности.

Достоинством разнополярного статического размагничивания является уменьшение влияния на его результат неоднородности исходной намагниченности и существенно меньшая по сравнению с динамическим размагничиванием длительность процесса. Основной недостаток заключается в необходимости расчета значения каждого последующего импульса с учетом величины остаточного магнитного поля, сформированного предшествующим импульсом. Устойчивость статически размагниченного состояния повышается с увеличением количества перемагничивающих импульсов. Следует отметить, что оптимальное положение ОР, определенное для статического размагничивания совпадает с полученным при динамическом размагничивании, что соответствует ожиданиям.

Распределения магнитной индукции по окружности торца трубы после динамического размагничивания (ДР), 2-шагового и 3-шагового статического размагничивания (СР2, СР3), при оптимальном расстоянии x_p^{omn} приведено в табл. 2. Из таблицы выбираем максимальные значения B_{mp} для определения эффективности размагничивания: $B_{mp} = 0,18$ мТл после ДР; $B_{mp} = 0,17$ мТл после С. Таким образом, эффективность размагничивания торцов труб по (1) каждым из рассмотренных методов составляет порядка 30.

Таблица 2

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
B_p , мТл после ДР	0,15	0,17	0,04	-0,12	-0,18	-0,15	0,04	0,1
B_p , мТл после СР2	0,17	0,12	0	-0,16	-0,15	-0,17	0	0,13
B_p , мТл после СР3	0,17	0,17	0,07	-0,09	-0,15	-0,16	0,06	0,16

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждена возможность создания технологии демагнетизации труб магистральных трубопроводов, которая обеспечит эффек-

тивное и устойчивое во времени размагничивание торцов труб до их стыковки под электросварку.

2. Обосновано, что для реализации технологии могут быть использованы методы разнополярного статического размагничивания, либо динамического размагничивания со смещением, позволяющие получить допустимый для качественной сварки и стабильный во времени уровень магнитной индукции в сварочном зазоре.

3. Показано, что динамическое размагничивание со смещением сложнее в реализации и требует большего времени, однако полученное магнитное состояние трубы наиболее устойчиво к механическим воздействиям. Статическое размагничивание проще в реализации, устойчивость размагниченного состояния повышается с увеличением количества разнополярных перемагничивающих импульсов.

4. Реализация предложенной технологии демагнетизации труб магистральных трубопроводов позволит исключить дополнительную потерю времени на размагничивание перед электросварочными работами за счет его выполнения параллельно с другими технологическими операциями и обеспечить этим сокращение общего времени ремонта трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Мамин Г.И. Комплексная демагнетизация труб при электродуговой сварке // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – №4. – С. 19-24.
2. Волохов С.А. Электромагнитная обработка труб на магистральных трубопроводах для высококачественной сварки // *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2002. – Ч.2. – С. 92-95.
3. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Деркач В.В. Устойчивость статически размагниченных состояний ферромагнитной конструкции // *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч.2. – С. 9-12.
4. Волохов С.А. Оценка магнитного состояния ферромагнитной конструкции методом фазовых диаграмм // *Технічна електродинаміка*. – 2005. – №2. – С. 12-17.
5. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Безлюдько Г.Я., Власюк Ф.С., Мамин Г.И. Технология размагничивания труб большого диаметра магистральных трубопроводов // *Сварщик*. – 1998. – №2. – С. 5-6.
6. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Мамин Г.И. Опыт размагничивания труб на магистральных трубопроводах с использованием новейшей технологии // *Сварщик*. – 2000. – №5. – С. 12-14.
7. Корольков П.М. Методы размагничивания стыков труб для сварки при ремонте и монтаже магистральных трубопроводов // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2005. – №12. – С. 45-49.
8. Рейнбот Г. Магнитные материалы и их применение. – Л.: Энергия, 1974.
9. Розов В.Ю., Пилогина О.Ю., Лупиков В.С., Добродеев П.Н., Гетьман А.В., Волохов С.А. Введение в демагнетизацию технических объектов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – №4. – С. 55-59.

REFERENCES: 1. Volokhov S.A., Dobrodeyev P.N., Mamin G.I. Integrated demagnetization of pipes at arc welding. *Technical electrodyamics*, 2012, no.4, pp. 19-24. 2. Volokhov S.A. Electromagnetic processing of pipes on the main pipelines for high quality welding. *Technical electrodyamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2002, Part 2, pp. 92-95. 3. Volokhov S.A., Dobrodeyev P.N., Derkach V.V. Stability of statically demagnetized states of the ferromagnetic structure. *Technical electrodyamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2010, Part 2, pp. 9-12. 4. Volokhov S.A. Evaluation of the magnetic state of ferromagnetic structure using the phase diagrams method. *Technical electrodyamics*, 2005, no.2, pp. 12-17. 5. Volokhov S.A., Dobrodeyev P.N., Bezlyudko G.Y., Vlasjuk F.S., Mamin G.I. Technology of demagnetization of large diameter pipes on main pipelines. *Svarshchik*, 1998, no.2, pp. 5-6. 6. Volokhov S.A., Dobrodeyev P.N., Mamin G.I. Experience of demagnetization of pipes on main pipelines using the newest technology. *Svarshchik*, 2000, no.5. pp. 12-14. 7. Korolkov P.M. Methods of demagnetization of pipe joints for welding in the repair and installation of pipelines. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*, 2005, no.12, pp. 45-49. 8. Reinboth H. *Magnetic materials and their use*. Leningrad, Energiya Publ., 1974. 9. Rozov V.Y., Pyliugina O.Y., Lupikov V.S., Dobrodeyev P.N., Getman A.V., Volokhov S.A. Introduction to demagnetization of technical objects. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.4, pp. 55-59.

Поступила (received) 14.11.2013

Добродеев Павел Николаевич, к.т.н.,

Государственное учреждение "Институт технических проблем магнетизма НАН Украины"

61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, а/я 72,

тел./phone +38 0572 992162, e-mail: office.ntcmto@nas.gov.ua

P.N. Dobrodeyev

State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine"

19, Industrialna Str., PO box 72, Kharkiv, 61106, Ukraine

Research into methods of pipe end demagnetization under main pipeline repair.

Efficiency of pipe end demagnetization methods is experimentally investigated to avoid arc magnetism at repair welding jobs on main pipelines. It is found that multi-polar biased static and dynamic demagnetization provides an acceptable level of magnetic flux density on pipe ends and stability of their magnetic state, which allows shortening repair time by means of executing demagnetization in parallel with other operation procedures.

Key words – main pipelines, arc welding, demagnetization, efficiency, stability.