

УДК 620.179.147

DOI 10.18698/0536-1044-2017-9-46-53

Высокопроизводительный вихретоковый контроль твердости труб с гладкостным покрытием

В.В. Ключев, А.Г. Ефимов, А.Е. Шубочкин, Е.В. Мартьянов,
П.Н. Мефодичев

ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР», 119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1

High Efficiency Eddy Current Testing of Tubes with Flow Coating

V.V. Klyuev, A.G. Efimov, A.E. Shubochkin, E.V. Martyanov,
P.N. Mefodichev

Scientific Research Institute of Introscopy, Multi-Industry Research and Production Association —
ZAO NIIN MNPO Spektr, 119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1



e-mail: efimov@nio12.ru, aeshubochkin@mail.ru



Рассмотрена проблема неразрушающего контроля качества металлопроката. Выполнено сравнение вихретокового метода неразрушающего контроля с традиционно используемыми при производстве металлопроката рентгеновским и ультразвуковым методами. В качестве объекта контроля выбраны трубы большого диаметра для подводных переходов. Отмечены причины образования на поверхности трубы зон локального упрочнения, проведено исследование возникающих в указанных зонах микротрещин. Дан обзор различных применяемых на производстве методов контроля поверхностной твердости. Представлены результаты экспериментальных исследований с использованием ручного вихретокового дефектоскопа на дефектной палетте, вырезанной из трубы большого диаметра. Приведены данные измерений для различных значений рабочего зазора. Описана разработанная для контроля автоматизированная линия, обеспечивающая высокоскоростной неразрушающий контроль внешней и внутренней стенок трубы через толстые изоляционные покрытия.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, вихретоковый контроль труб, вихретоковый дефектоскоп, зона локального упрочнения, контроль твердости



The problem of non-destructive testing of rolled metal quality is considered in this article. Eddy current non-destructive testing is compared with X-ray radiography and ultrasonic testing, traditionally used in rolled metal manufacturing. Underwater crossing tubes of a large diameter are chosen as quality control objects. The reasons for the formation of local hardening zones are identified; microcracks occurring in the specified zones are studied. An overview of various methods used in manufacturing to control surface hardness is provided. The results of experimental studies using a hand eddy current defectoscope are presented. The studies were performed on a defected palette cut from a real tube of a large diameter. Measurement data for various working allowances are presented. A description of an automated line developed for high-speed non-destructive testing of external and internal walls of a tube through thick insulation coating is given.

Keywords: non-destructive testing, eddy current testing of tubes, eddy current defectoscope, local hardening zone, hardness control

В процессе производства металлопроката широко применяют различные методы неразрушающего контроля (НК) [1]. Особое место среди них при контроле труб диаметром до 220 мм занимает вихретоковый метод, обладающий такими неоспоримыми достоинствами, как бесконтактность, высокая чувствительность, большая скорость контроля, способность контролировать изделия с высокой температурой поверхности и нежесткие требования к качеству подготовки поверхности [2].

В то же время вихретоковый метод позволяет выявлять только поверхностные и подповерхностные дефекты в изделиях из ферромагнитных материалов, с его помощью трудно определить геометрические параметры обнаруженных дефектов, и он оказывает значительное влияние на результаты контроля разброса электромагнитных свойств объекта контроля [3–5]. Последний недостаток можно устранить подмагничиванием объекта контроля до состояния насыщения [6].

В связи с этим при контроле труб большого диаметра (ТБД) на производстве чаще всего используют ультразвуковой и рентгеновский методы. Их основным преимуществом перед вихретоковым методом является возможность выявления внутренних дефектов. Для контроля торцов труб также нередко применяют магнитопорошковый метод, обладающий высокой чувствительностью и позволяющий легко визуализировать дефекты. Однако опыт последних лет показал, что существуют такие производственные дефекты металлургии, которые можно обнаружить только с помощью вихретокового метода [7]. При производстве сляба могут происходить нарушения технологического процесса, приводящие к образованию на его поверхности зон с повышенным содержанием

углерода. В дальнейшем, при раскатке сляба в лист (рис. 1), эти зоны превращаются в пятна локальной поверхностной неоднородности, имеющие большую твердость, чем основной металл листа.

В процессе изготовления трубы (особенно толстостенной) лист подвергается значительным деформациям (рис. 2), и, как следствие, в зонах с повышенной твердостью образуются микротрещины, проникающие на всю глубину упрочненного слоя. Из практического опыта известно, что глубина этих трещин редко больше 0,2...0,3 мм, при этом площадь такой зоны может не превышать нескольких десятков миллиметров. Учитывая шероховатость и состояние поверхности трубы, такие трещины невозможно обнаружить рентгеновским или ультразвуковым методом. Магнитопорошkovому контролю подлежат только торцы труб, поэтому при проведении традиционного выходного контроля качества указанные зоны растрескивания и зоны локального упрочнения поверхностного слоя металла остаются невыявленными.

После нанесения на трубы изоляционных или защитных покрытий обнаружить эти дефекты любым методом кроме вихретокового не представляется возможным, в итоге к потребителю поступают дефектные изделия. В процессе эксплуатации происходит дальнейшее развитие микротрещин, что приводит к разрушению трубы намного раньше ее расчетного срока эксплуатации. Отсюда можно заключить, что контроль твердости необходимо проводить не только в отдельных точках нескольких образцов партии (как это делается в настоящее время), а всей поверхности листов или готовых труб.

На сегодняшний день применяют разные методы измерения и контроля твердости, среди



Рис. 1. Сляб на участке раскатки

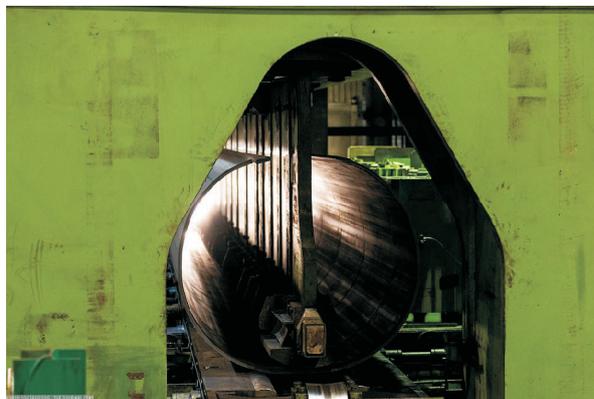


Рис. 2. Формовка ТБД

которых наибольшее распространение получили контактные. Выбор метода измерения твердости металлов обусловлен механическими свойствами и конструктивно-технологическими особенностями изделий. Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия наконечника. Твердость можно измерять вдавливанием индентора (способ вдавливания), ударом или же по отскоку наконечника — шарика. Твердость, определенная царапанием, характеризует сопротивление разрушению, по отскоку — упругие свойства, вдавливанием — сопротивление пластической деформации.

Перспективным и высокоточным является метод непрерывного вдавливания, предусматривающий запись диаграммы перемещения, возникающего при внедрении индентора, с одновременной регистрацией усилий. В зависимости от скорости приложения нагрузки на индентор различают статическую и динамическую твердость. В первом случае нагрузку прикладывают плавно, во втором — ударом.

При контактно-импедансном (ультразвуковом) методе контроля твердость определяется по изменению частоты колебаний индентора датчика при его внедрении в контролируемую поверхность. Для периодической поверки показаний твердомера в комплекте с ним могут поставляться контрольные образцы (эталонные меры твердости), изготовленные по определенным шкалам твердости (шкалам Роквелла, Бринелля, Виккерса).

Перечисленные методы не лишены целого ряда недостатков, ограничивающих их применение. Прежде всего, это высокая трудоемкость, не позволяющая контролировать всю поверхность объектов, а также невозможность использования таких методов для контроля металла с защитными или изоляционными покрытиями.

Цель работы — исследование возможности применения вихретокового метода для обнаружения зон локального упрочнения на теле ТБД (в том числе и через толстые изоляционные и защитные покрытия толщиной до 10 мм) и описание оборудования, разработанного для реализации такого метода.

Экспериментальные исследования. На первом этапе проводили испытания образца с естественными дефектами (рис. 3) — палетты, вырезанной из одношовной трубы, изготов-



Рис. 3. Палетта с зоной локального упрочнения

ленной из стали марки Х65 (API 5L), со следующими параметрами: диаметр — 813 мм, толщина стенки 39 мм, класс прочности — К60. Образец вырезали из трубы, успешно прошедшей линию контроля качества, дефекты были обнаружены визуально перед нанесением защитного покрытия.

В качестве испытательного оборудования использовали дефектоскоп ВД-90НП с преобразователем Тип-2 (диаметр катушки 5 мм, частота возбуждения 70 кГц). Задачей экспериментальных исследований являлась оценка возможности выявления зоны повышенной твердости и определение ее границ. В процессе испытаний контроль проводили как непосредственно на поверхности образца, так и через максимально возможный рабочий зазор вихретокового преобразователя, обусловленный нанесением защитных покрытий.

На рис. 4. приведено графическое представление выходного сигнала дефектоскопа ВД-90НП. Зоны, обозначенные красным цветом, соответствуют изменению структуры металла в зоне термического влияния, образовавшейся при вырезке палетты газовой сваркой. Синий цвет соответствует основному металлу трубы (твердость 200...230 НВ), зеленый — зоне локального упрочнения (280...300 НВ). Полученные результаты подтверждены замерами с использованием динамического твердомера Элит-2Д.

На втором этапе исследовали влияние рабочего зазора на приращение сигнала вихретокового дефектоскопа, вызванное локальным увеличением твердости. Рабочий зазор изменялся в пределах 0...7 мм. Показания снимали в точке А (зоне локального упрочнения, в кото-

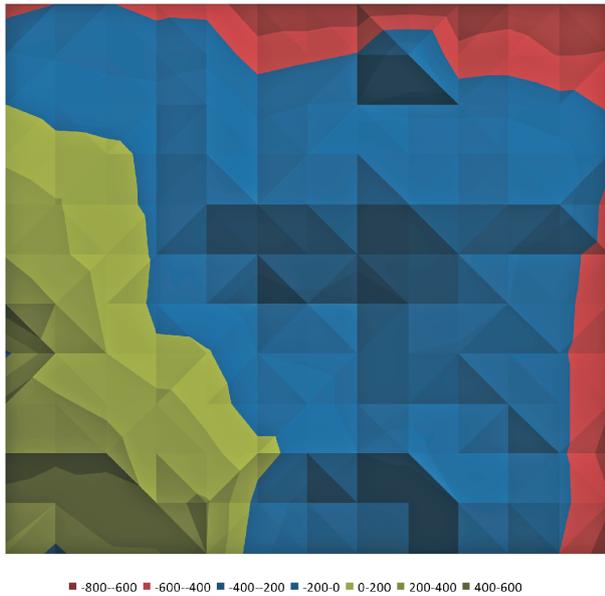


Рис. 4. Выходной сигнал дефектоскопа ВД-90НП, представленный в графическом виде

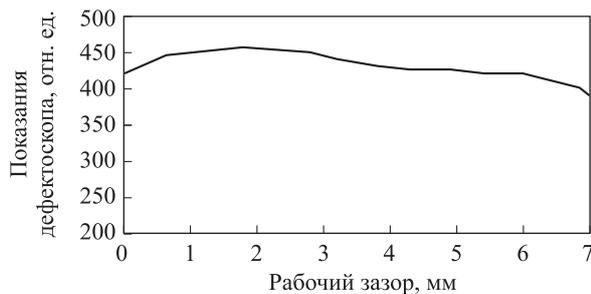


Рис. 5. Показания дефектоскопа ВД-90НП в зоне максимума локального упрочнения

рой сигнал дефектоскопа максимален) относительно точки *O* (зоны компенсации, соответствующей нулевому сигналу дефектоскопа). Полученные данные приведены на рис. 5.

На третьем этапе имитировали процесс контроля поверхности трубы в производственных условиях. Проводили сканирование поверхности образца по линии *АВ* (рис. 6), пересекающей зону локального упрочнения и существующий реальный дефект. На рис. 6 показана траектория сканирования (сигнал на экране дефектоскопа). В левом нижнем углу палетты видно растрескивание в зоне локального упрочнения.

На рис. 7 представлен сигнал вихретокового дефектоскопа, который был получен на линии *АВ* и передан на персональный компьютер (ПК). На рисунке видно изменение показаний в зоне локального упрочнения и характерный сигнал, вызванный уже существующим трещиноподобным дефектом в этой зоне.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет заключить следующее:

- вихретоковый дефектоскоп ВД-90НП со стандартным преобразователем уверенно отличает зону повышенной твердости от зоны основного материала объекта контроля вплоть до рабочего зазора 7 мм;
- доработка программного обеспечения дефектоскопа способна уменьшить влияние изменения рабочего зазора на выходной сигнал;
- скорость контроля можно увеличить применением многоканальной системы вихретокового контроля и частичной или полной механизации и автоматизации такой системы.

Практическая реализация результатов исследования. На основании анализа экспериментальных данных сделан вывод о применимости вихретокового метода для обнаружения дефектов типа трещины и зон локального упрочнения, в том числе и через толстые изоляционные и защитные покрытия. Специалисты ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР» и ЗАО «УЛЬТРАКРАФТ» разработали систему вихретокового НК ТБД. Основой системы является многоканальный вихретоковый дефектоскоп ВД-91НМ, осуществляющий 32-канальный амплитудно-фазовый контроль внутренней и внешней поверхностей трубы через изоляционные покрытия переменной толщины (до 10 мм).

Испытания показали, что дробеструйной обработки поверхности, выполняемой в про-



Рис. 6. Показания дефектоскопа ВД-90НП по линии *АВ*



Рис. 7. Показания дефектоскопа ВД-90НП по линии АБ, переданные в ПК:
1 — зона упрочненного металла; 2 — зона нормального металла; 3 — трещина

цессе производства труб, достаточно для получения «квазиоднородного» состояния поверхности, при котором дефектоскоп ВД-91НМ способен выявлять дефекты глубиной от 0,3 мм и зоны локального упрочнения, где твердость на 20 % больше, чем у основного металла. Время контроля трубы длиной 12 м и диаметром 813 мм не превышает 5 мин. В итоговый протокол заносится развертка трубы с цветовым кодированием уровня сигнала и таблица выявленных дефектов.

Используемые в дефектоскопе ВД-91НМ программные и аппаратные решения позволяют отстроиться в широких пределах от такого основного мешающего параметра, как рабочий зазор преобразователя. На сегодняшний день дефектоскоп ВД-91НМ — единственная вихретоковая система в мире, обеспечивающая работу с переменным зазором до 10 мм без потери чувствительности к трещиноподобным дефектам и локальным упрочнениям. Благодаря указанным характеристикам можно проводить контроль труб, в том числе и в зоне сварного шва. Большой диапазон рабочего зазора также делает возможным проведение контроля труб, предназначенных для морских подводных переходов, толщина изоляции ко-

торых достигает 8 мм [8]. Указанная система обеспечивает высокопроизводительный неразрушающий контроль внешней и внутренней поверхности ТБД, при этом опорные ролики не повреждают гладкостное покрытие внутренней стенки трубы.

На рис. 8 показана каретка с преобразователями во время контроля наружной стенки ТБД через изоляционное защитное покрытие толщиной 8 мм, а на рис. 9 — внешний вид экрана оператора в режиме развертки трубы. На него вынесены органы управления дефектоскопом



Рис. 8. Система автоматизированного вихретокового контроля ТБД на базе дефектоскопа ВД-91НМ

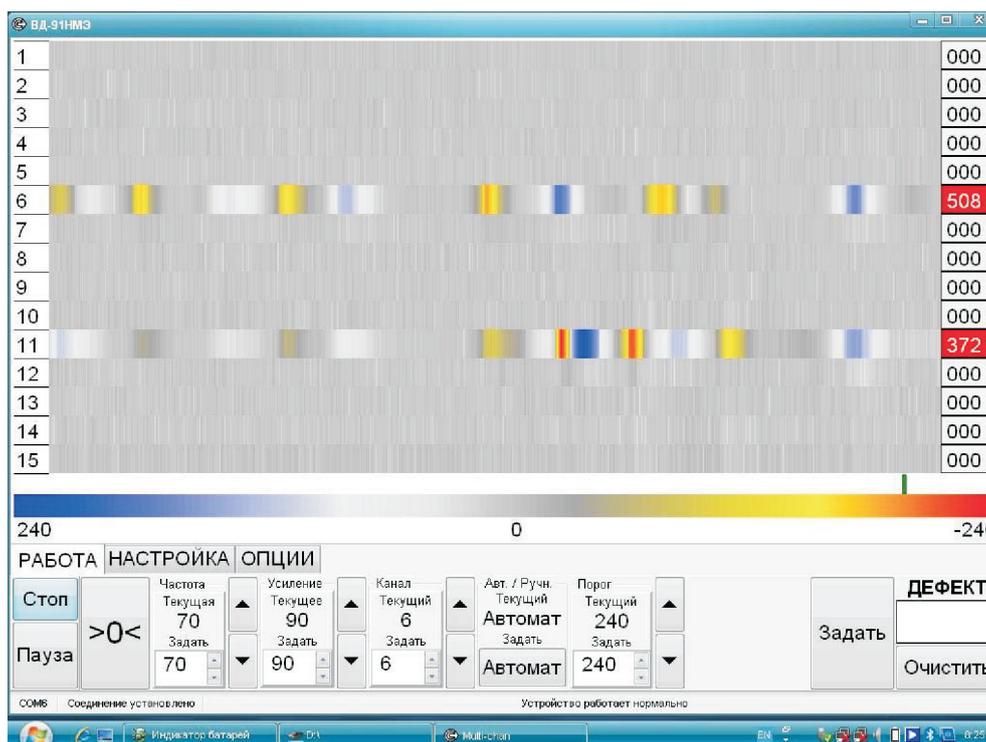


Рис. 9. Экран оператора в режиме развертки трубы

ВД-91НМ и параметры его настройки при контроле внешней стенки ТБД.

Выводы

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что из всех методов НК вихретоковый является единственным, позволяющим выявлять локальные пятна твердости через защитные и изоляционные покрытия.

2. Вихретоковый метод, обладающий высокой чувствительностью и большой скоростью контроля, следует применять при выходном контроле качества изделий трубной промышленности.

3. Поскольку другие методы не позволяют находить указанный тип дефектов, отсутствие вихретокового контроля при производстве ТБД значительно снижает достоверность результатов НК.

Литература

- [1] *Nondestructive testing. Handbook. In 8 vol. Vol. 1. Magnetic testing Eddy-current testing.* Ed. Klyuev V.V. Moscow, LLC ID SPEKTR, 2010. 1008 p.
- [2] Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. *Вихретоковый контроль.* Москва, Спектр, 2011. 224 с.
- [3] Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф., Ефимов А.Г., Загидулин Т.Р., Шубочкин А.Е. Исследование влияния продуктов коррозии магистрального нефтепродуктопровода на сигнал вихретокового дефектоскопа ВД-12НФП. *Контроль. Диагностика*, 2007, № 9, с. 42–46.
- [4] Ефимов А.Г. К влиянию продуктов коррозии металла и отложений на выявляемость дефектов сплошности при электромагнитном контроле стальных изделий. Часть 1. *Контроль. Диагностика*, 2012, № 1, с. 26–33.
- [5] Ефимов А.Г. К влиянию продуктов коррозии металла и отложений на выявляемость дефектов сплошности при электромагнитном контроле стальных изделий. Часть 2. *Контроль. Диагностика*, 2012, № 2, с. 25–33.

- [6] Ефимов А.Г. Распределение сигнала накладного вихретокового преобразователя над стальным изделием с внутренним дефектом сплошности в приложенном магнитном поле. *Контроль. Диагностика*, 2012, № 3, с. 17–24.
- [7] Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е. Современные тенденции развития вихретоковой дефектоскопии и дефектометрии. *Контроль. Диагностика*, 2014, № 3, с. 68–73.
- [8] Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е., Мартыанов Е.В. Современные вихретоковые системы неразрушающего контроля металлопроката. *Контроль. Диагностика*, 2014, № 12, с. 19–21.

References

- [1] *Nondestructive testing. Handbook. In 8 vol. Vol. 1. Magnetic testing Eddy-current testing.* Ed. Klyuev V.V. Moscow, LLC ID SPEKTR publ., 2010. 1008 p.
- [2] Fedosenko Iu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. *Vikhretokovyi kontrol'* [Eddy current testing]. Moscow, LLC ID SPEKTR publ., 2011. 224 p.
- [3] Zagidulin R.V., Muzhitskii V.F., Efimov A.G., Zagidulin T.R., Shubochkin A.E. Issledovanie vliianiia produktov korrozii magistral'nogo nefteproduktoprovoda na signal vikhretokovogo defektoskopa VD-12NFP [Arterial Pipeline Corrosion Oil Products Effects Analysis on Vortex-current Defectoscope Signal of VD-12NFP]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2007, no. 9, pp. 42–46.
- [4] Efimov A.G. K vlianiiu produktov korrozii metalla i otlozhenii na vyivliaemost' defektov splshnosti pri elektromagnitnom kontrole stal'nykh izdelii. Chast' 1 [By the Influence of Corrosion Products and Metal Deposits on the Detection of Defects in the Continuity of the Electromagnetic Control of Steel Products. Part 1]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2012, no. 1, pp. 26–33.
- [5] Efimov A.G. K vlianiiu produktov korrozii metalla i otlozhenii na vyivliaemost' defektov splshnosti pri elektromagnitnom kontrole stal'nykh izdelii. Chast' 2 [By the Influence of Corrosion Products and Metal Deposits on the Detection of Defects in the Continuity of the Electromagnetic Control of Steel Products. Part 2]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2012, no. 2, pp. 25–33.
- [6] Efimov A.G. Raspredelenie signala nakladnogo vikhretokovogo preobrazovatel'ia nad stal'nym izdeliem s vnutrennim defektom splshnosti v prilozhennom magnitnom pole [Eddy Current Probe Signal Distribution over Steel Products with an Internal Flaw in the Applied Magnetic Field]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2012, no. 3, pp. 17–24.
- [7] Efimov A.G., Shubochkin A.E. Sovremennye tendentsii razvitiia vikhretokovoi defektoskopii i defektometrii [Modern Trends of Eddy Current Flaw Detection and Defectometry]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2014, no. 3, pp. 68–73.
- [8] Efimov A.G., Shubochkin A.E., Mart'ianov E.V. Sovremennye vikhretokovye sistemy nerazrushaiushchego kontrolia metalloprokata [Modern Eddy Current Flaw Detection System for Rolled Steel]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2014, no. 12, pp. 19–21.

Статья поступила в редакцию 24.04.2017

Информация об авторах

КЛЮЕВ Владимир Владимирович (Москва) — доктор технических наук, профессор, академик РАН. Президент ассоциации «СПЕКТР-ГРУПП». Директор ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1).

ЕФИМОВ Алексей Геннадьевич (Москва) — доктор технических наук, заведующий НИО-12. ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1, e-mail: efimov@nio12.ru).

ШУБОЧКИН Андрей Евгеньевич (Москва) — доктор технических наук, заведующий сектором НИО-12. ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1, e-mail: aeshubochkin@mail.ru).

МАРТЬЯНОВ Евгений Владимирович (Москва) — аспирант, младший научный сотрудник НИО-12. ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1).

МЕФОДИЧЕВ Павел Николаевич (Москва) — инженер НИО-12. ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР» (119048, Москва, Российская Федерация, Усачева ул., д. 35, стр. 1).

Information about the authors

KLYUEV Vladimir Vladimirovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences. President, Spektr-Group Association. Director, Scientific Research Institute of Introscopy, Multi-Industry Research and Production Association — ZAO NIIN MNPO Spektr (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1).

EFIMOV Aleksey Gennadievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Head of Department NIO-12. Scientific Research Institute of Introscopy, Multi-Industry Research and Production Association — ZAO NIIN MNPO Spektr (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1, e-mail: efimov@nio12.ru).

SHUBOCHKIN Andrey Evgenievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Head of Section, Department NIO-12. Scientific Research Institute of Introscopy, Multi-Industry Research and Production Association — ZAO NIIN MNPO Spektr (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1, e-mail: aeshubochkin@mail.ru).

MARTYANOV Evgeniy Vladimirovich (Moscow) — Post-graduate, Junior Researcher, Department NIO-12. Scientific Research Institute of Introscopy, Multi-Industry Research and Production Association — ZAO NIIN MNPO Spektr (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1).

MEFODICHEV Pavel Nikolaevich (Moscow) — Engineer, Department NIO-12. Scientific Research Institute of Introscopy, Multi-Industry Research and Production Association — ZAO NIIN MNPO Spektr (119048, Moscow, Russian Federation, Usachev St., Bldg. 35, Block 1).