

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Л.М. ЛОБАНОВ (головний редактор),

А.Я. Недосека (заст. гол. ред.),

В.О. Троїцький (заст. гол. ред.),

Є.О. Давидов, С.А. Недосека,

Ю.М. Посипайко,

І.Ю. Романова (відповід. секретар)

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
м. Київ

К. Драган

Технологічний інститут повітряних сил,

Варшава, Польща

Я. Грум

Люблянський університет, Словенія

М.Л. Казакевич

Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського

НАН України, м. Київ

О.М. Карпаш, П.М. Райтер

Івано-Франківський нац. техн. університет нафти і газу

Л.І. Муравський, З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський,

В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН

України, м. Львів

А.Г. Протасов, С.К. Фомічов

НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

А. Савін

Національний інститут досліджень та розробок з

технічної фізики, Ясси, Румунія

В.О. Стороженко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Г.М. Сучков

Національний університет «Харківський політехнічний інститут»

В.О. Стрижало

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка

НАН України, м. Київ

М.Г. Чаусов

Національний університет біоресурсів і

природокористування України, м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

03150, Україна, м. Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: +38 (044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk

Свідцтво про державну реєстрацію

КВ4787 від 09.01.2001

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів за

спеціальностями 132, 151, 152.

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Передплата 2023

Передплатний індекс 74475.

4 випуски на рік (видається щоквартально).

Друкована версія: 1120 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 1120 грн. за річний комплект

(випуски журналу надсилаються електронною поштою

у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера

передплатника надається доступ до архіву журналу).

За зміст рекламних матеріалів

редакція журналу відповідальності не несе.

ЗМІСТ

Висока нагорода..... 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ЯВОРСЬКИЙ І.М., ЮЗЕФОВИЧ Р.М., ЛИЧАК О.В.,

СЛЕПКО Р.Т., ВАРИВОДА М.З., СЕМЕНОВ П.О.

Діагностика пошкоджень зубчастих пар методами біперіо-

дично корельованих випадкових процесів. Частина 1.

Теоретичні аспекти проблеми 4

МАХНЕНКО О.В., КАНДАЛА С.М. Вплив залишкових

технологічних напружень на опір крихкому руйнуванню

вигородки реактора ВВЕР-1000 в умовах аварійної ситуації 12

СТОРОЖИК Д.В., ПРОТАСОВ А.Г. Технології опрацю-

вання зображень на основі комплексування даних (Огляд)..... 17

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

СТОРОЖЕНКО В.О., МЯГКИЙ О.В., ОРЕЛ Р.П., МЕШКОВ

С.М. Зниження рівня завад при тепловому неруйнівному

контролі з урахуванням особливостей теплофізичних і

морфологічних характеристик об'єктів 27

ГОПКАЛО О.П., ГОПКАЛО О.Є., ЗЕМЦОВ М.П.,

КОВАЛЕНКО Є.В., БОДУНОВ В.Є. Експресна оцінка

якості виготовлення гусеничних траків за результатами

вимірювання коерцитивної сили 33

ЮХИМЕЦЬ П.С., ДМИТРИЄНКО Р.І., ПАЛІЄНКО О.Л.,

ЄГОРЕНКО В.М. Механічні властивості металу критично

потоншених ділянок теплопроводу та особливості

їх руйнування..... 41

W. SHARATCHANDRA SINGH, C.K. MUKHOPADHYAY

Дослідження деформаційної поведінки вуглецевої сталі

AISI 1025 з різною мікроструктурою з використанням

методів магнітної пам'яті металу та акустичної емісії..... 47

ІНФОРМАЦІЯ

Конференція «Зварювання та технічна діагностика для

відновлення економіки України» 57

Дати, події, факти з історії технічного контролю 61

Видання журналу підтримують:

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Технічний комітет стандартизації «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» ТК-78,
Асоціація «ОКО», ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади»

EDITORIAL BOARD

L.M. Lobanov (Editor-in-Chief),

A.Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),

V.O. Troitskiy (Deputy Editor-in-Chief),

Ie.O. Davydov, S.A. Nedoseka,

Yu.M. Posypaiko,

I.Yu. Romanova (execut. secretary)

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv

Krzysztof Dragan

Air Force Institute of Technology, Warsaw, Poland

Janez Grum

University of Ljubljana, Slovenia

M.L. Kazakevich

L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry
of NAS of Ukraine, Kyiv

O.M. Karpash, P.M. Raizer

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

L.I. Muravsky, Z.Th. Nazarchuk, V.R. Skalskiy, V.M. Uchanin
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS
of Ukraine, Lviv

A.G. Protasov, S.K. Fomichov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute»

Adriana Savin

National Institute of R & D for Technical Physics,
Iasi, Romania

V.O. Storozhenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

H.M. Suchkov

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Ukraine

V.O. Stryzhalo

G.S. Pisarenko Institute for Problems
of Strength of NAS of Ukraine, Kyiv

M.G. Chausov

National University of Life and Environmental Sciences
of Ukraine, Kyiv

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine,
International Association «Welding» (Publisher)

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.
Tel./Fax: +38 (044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tdnk

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 132, 151, 152.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Certificate of state registration
of KB 4787 dated 09.01.2001

Subscription 2023

Subscription index 74475.

4 issues per year (issued quarterly), back issues available.

\$128, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$104, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

The editorial board is not responsible
for the content of the promotional material.

CONTENT

High award 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

**JAVORSKYJ I.M., YUZEFOVYCH R.M., LYCHAK O.V.,
SLYEPKO R.T., VARYVODA M.Z., SEMENOV P.O.** Diagnos-
tics of gear pair damage using the methods of bi-periodically
correlated random processes. Part 1. Theoretical aspects of
the problem..... 4

MAKHNENKO O.V., KANDALA S.M. Influence of residual
process stresses on brittle fracture resistance of WWER-1000
reactor baffle in case of an emergency 12

STOROZHYK D.V., PROTASOV A.G. Image processing
technologies based on complexing data (Review)..... 17

INDUSTRIAL

**STOROZHENKO V.O., MESHKOV S.M., OREL R.P.,
MIAHKYI O.V.** Reducing the level of interference at thermal
non-destructive testing considering the specific thermal phys-
ical and morphological characteristics of the object..... 27

**GOPKALO O.P., GOPKALO O.E., ZEMTSOV M.P.,
KOVALENKO E.V., BODUNOV V.E.** Express evaluation of
the quality of producing caterpillar tracks by the results of
coercive force measurement..... 33

**YUKHYMETS P.S., DMYTRIENKO R.I., PALIENKO O.L.,
YEHORENKO V.M.** Mechanical properties of metal of criti-
cally thinned sections of heat pipelines and features of their
destruction 41

W. SHARATCHANDRA SINGH, C.K. MUKHOPADHYAY
Study of deformation behavior of AISI 1025 carbon steel with
different microstructures using metal magnetic memory and
acoustic emission testing..... 47

INFORMATION

Conference «Welding and technical diagnostics for recovery
of the economy of Ukraine» 57

Dates, events, facts in the history of technical non-destruc-
tive testing 61

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic,
Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78,
Association «OKO», LLC «Diagnostic devices»

ВИСОКА НАГОРОДА



23 листопада 2022 р. на засіданні Президії НАН України було прийнято рішення про присудження Золотої медалі імені Б.Є. Патона Національній академії наук України. Нагорода була заснована у 2022 р. за видатні досягнення у створенні інноваційних науково-технічних розробок, які знайшли широке практичне використання, з метою увічнення пам'яті академіка Бориса Патона.

За результатами конкурсу 2022 р. нагороду було присуджено заступнику директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України академіку НАН України Леоніду Михайловичу Лобанову за створення технології бездеформаційного зварювання виробів ракетно-космічної техніки та розроблення й впровадження методів лазерної інтерферометрії оцінювання якості зварних з'єднань.

Слід зазначити, що Золота медаль імені Б.Є. Патона Національній академії наук України була присуджена вперше.

Щиро вітаємо Леоніда Михайловича з присудженням цієї високої нагороди та бажаємо міцного здоров'я, творчої наснаги і подальших успіхів на благо України!

Академік Національної академії наук України **ЛОБАНОВ Леонід Михайлович**



Академік НАН України Лобанов Леонід Михайлович – визначний вчений в галузі матеріалознавства, зварювання, міцності та діагностики матеріалів і зварних конструкцій.

Наукові праці Л.М. Лобанова присвячені дослідженню поведінки матеріалів при зварюванні, розвитку теорії зварювальних напруг та деформацій, розробці методів дослідження і регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань, створенню високоефективних зварних конструкцій нової техніки та розробці методів і засобів їх діагностики.

Завдяки працям Л.М. Лобанова та його учнів сформовано новий науковий напрямок – бездеформаційне зварювання конструкцій, який базується на регулюванні термодеоформаційних процесів під час зварювання

і створенні попередніх перед зварюванням напружено-деформованих станів, оптимізованих стосовно зварювальних напружень і деформацій. Для всіх типів зварних з'єднань розроблено способи визначення оптимальних параметрів попередніх напружено-деформованих станів, що дозволяють усунути залишкові зварювальні деформації. Розроблені методи і технічні засоби усунення зварювальних деформацій було використано при створенні комплексу «Енергія-Буран» та інших ракетно-космічних систем. Принципово новою є розроблена ним технологія бездеформаційного зварювання стрингерних панелей та оболонок, які використовуються для виготовлення корпусів ракет та в авіабудуванні. Проведені випробування дослідних зразків великогабаритних стрингерних панелей і оболонок з високоміцного алюмінієвого сплаву АМгбНН показали, що такі вироби відповідають вимогам щодо міцності і точності виготовлення та дають можливість підвищити в 3-4 рази коефіцієнт використання дороговартісного матеріалу. Рекомендації зі збирання та бездеформаційного зварювання тонкостінних панелей і оболонок з поздовжнім оребренням, а також технічна документація на обладнання для їх реалізації передані конструкторському бюро «Південне». Розроблена також технологія бездеформаційного зварювання стрингерних панелей із високоміцного титанового сплаву ВМ-20. Вона рекомендована для промислового виробництва авіаційних панелей. Нові можливості бездеформаційного зварювання листових конструкцій із алюмінієвих і титанових сплавів в авіакосмічній промисловості надає запропонована Л.М. Лобановим технологія електродинамічної обробки металу шва імпульсами струму високої щільності безпосередньо в процесі зварювання.

STUDY OF DEFORMATION BEHAVIOR OF AISI 1025 CARBON STEEL WITH DIFFERENT MICROSTRUCTURES USING METAL MAGNETIC MEMORY AND ACOUSTIC EMISSION TESTING

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ AISI 1025 З РІЗНОЮ МІКРОСТРУКТУРОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАГНІТНОЇ ПАМ'ЯТІ МЕТАЛУ ТА АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

by W. Sharatchandra Singh* and C.K. Mukhopadhyay†

* Non Destructive Evaluation Division (NDED), Indira Gandhi Centre for Atomic Research (IGCAR), Kalpakkam 603102, Tamil Nadu, India

† Formerly with NDED, IGCAR, Kalpakkam 603102, Tamil Nadu, India.
E-mail:ckm602003@gmail.com

Studies are carried out to investigate the tensile deformation behavior of AISI-type 1025 carbon steel with different microstructures using metal magnetic memory and acoustic emission testing (AE) techniques. Seven AISI 1025 carbon steel specimens were heat treated for different microstructures and then subjected to tensile deformation until fracture. AE was conducted during tensile deformation and the deformation-induced self-magnetic leakage fields (SMLFs) were measured using a giant magneto-resistive sensor after unloading. Results reveal that SMLF signal values are influenced by microstructure and residual stress aroused due to plastic deformation. Among different specimens, SMLF signal peak amplitude is highest in the brine-quenched specimen followed by the tempered specimen, while hardness is highest in the brine-quenched specimen. SMLF signal peak amplitude and hardness are the lowest in the annealed specimen. SMLF signal is higher in tempered specimens compared to the untempered specimens. From AE measurements, it is observed that martensitic steel emits higher acoustic emissions during deformation but decreases when tempered. The acoustic emissions generated in the martensitic steel are also of higher amplitude. The results are correlated with optical micrographs and hardness measurements.

Проведено дослідження з вивчення деформації розтягу вуглецевої сталі AISI типу 1025 з різною мікроструктурою з використанням методів магнітної пам'яті металу та акустичної емісії (АЕ). Сім зразків з вуглецевої сталі AISI 1025 було термічно оброблено для отримання різних мікроструктур, а потім піддано деформації розтягу до руйнування. АЕ проводили під час деформації розтягу, а викликані деформацією власні магнітні поля витoku (SMLF) вимірювали за допомогою датчика на основі гігантської магніторезистивної технології (GMR) після розвантаження. Результати показують, що на значення сигналу SMLF впливають мікроструктура та залишкове напруження, що виникає внаслідок пластичної деформації. Серед різних зразків пік амплітуди сигналу SMLF є найвищим у зразку, що загартований в соляному розчині, наступним за яким є зразок з відпуском, тоді як твердість є найвищою у зразку, загартованому в соляному розчині. Пікова амплітуда сигналу SMLF і твердість є найнижчими у відпаленому зразку. Вимірювання АЕ показали, що мартенситна сталь випромінює більшу акустичну емісію під час деформації, але зменшується під час відпуску. Акустична емісія, що виникає в мартенситній сталі, також має вищу амплітуду. Результати корелюють з оптичними мікрофотографіями та вимірюваннями твердості.

Keywords: metal magnetic memory, acoustic emission, microstructure, carbon steel, tensile deformation

Ключові слова: магнітна пам'ять металу, акустична емісія, мікроструктура, вуглецева сталь, деформація розтягу

Introduction

Ferromagnetic materials are widely used in metallic structures such as boilers, pipelines, and railway tracks. Among ferromagnetic materials, carbon steel is commonly used in view of its low cost and good mechanical properties (Vivekananda and Venkataraman 2006; Tang et al. 2019). These structures are constantly subjected to mechanical actions during service that can induce stress, leading to the development of cracks or even fractures that cause severe damage (Bao et al. 2015). Therefore, ongoing nondestructive evaluation (NDE) of the mechanical properties of these structures is of great importance for

evaluating the state of structures in service before catastrophic failure.

Various NDE methods and techniques, such as ultrasonic testing, acoustic emission testing (AE), magnetic Barkhausen noise, and metal magnetic memory (MMM), have been used to evaluate the mechanical properties of ferromagnetic materials (Byeon and Kwun 2003; Song-ling et al. 2004). Among these, the MMM technique has gained considerable interest among nondestructive testing (NDT) researchers, because of its potential for the evaluation of early damage, micro-defects, and the stress state in ferromagnetic materials (Leng et al. 2013; Min et al. 2014; Xing et

al. 2006). This technique is found to be used in various NDT applications for diagnosing oil and gas pipelines, rails, turbine wheels, pressure vessels, and the like (Wang et al. 2012; Doubov 2001). The MMM technique relies on the measurement of the self-magnetic leakage field (SMLF) of ferromagnetic materials under the combined operation of external load and ambient geomagnetic field. In this technique, the distribution of SMLF induced at the stress-concentration zone (SCZ) during mechanical loading is measured using magnetic field sensors (Doubov 2001).

There are many factors affecting the strength of the SMLF signal such as the environmental magnetic field, stress distribution, and nature of material (Hu et al. 2010; Moonesan and Kashefi 2018; Bao and Zhang 2015; Sonntag et al. 2014; Singh et al. 2016). Moonesan and Kashefi (2018) studied the effect of sample initial magnetic field on SMLF signals and reported that SMLF signals exhibit a drop at the SCZ when the sample has a high level of initial residual magnetic field. Bao and Zhang (2015) analyzed the effect of loading speed on SMLF signals of C45 and Q235 ferromagnetic steels subjected to tensile stress. They observed that the variations of SMLF signals due to different loading speeds change systematically as the applied load increases. Sonntag et al. (2014) studied the change in the surface topography of a notched structural steel (S235JR) specimen due to tensile deformation using an optical 3D surface interferometer and its deformation-induced SMLFs using giant magneto-resistive (GMR) sensors. They reported that the measured SMLF is the result of the combined effect of stress and topography changes due to plastic deformation, and their separation is difficult to perform experimentally. Singh et al. (2016) studied the effect of geometry changes on SMLF signals in notched steel specimens during tensile deformation using finite element modeling. Their results indicated that the stress-induced geometry has a great influence on SMLF signals of about 20%, especially in the plastic deformation stage. Other studies (Liu et al. 2019; Long et al. 2014) also reported on the influence of microstructure on SMLF signals. Liu et al. (2019) discussed the grain size effect on SMLF signals for stress damage evaluation of low-carbon steel and concluded that the slope of the SMLF gradient decreases slightly as the grain size increases. Long et al. (2014) showed the potential of the MMM technique for revealing the tempering effect due to tensile deformation in C45 steel. However, information on the influence of microstructure on SMLF signals for heat-treated carbon steel is scarce in the literature.

On the other hand, acoustic emission is defined as the class of phenomenon whereby transient elastic waves are generated by the rapid release of ener-

gy from localized sources in a material (ASNT 2005). Wadley and Scruby (1991) investigated the acoustic emissions generated during tensile deformation of low-alloy steels with carbon content varying between 0.06 and 0.49 wt% and as a function of cooling rate. It was reported that specimens with (a) slowly cooled microstructures (with $\geq 10 \mu\text{m}$ ferrite dimension), (b) low initial dislocation density, and (c) very widely spaced precipitates, generate the highest acoustic emission activity. This was attributed to higher glide distance and higher velocity of dislocations in the ferrite phase (Wadley and Scruby 1991). Carpenter and Pfleiderer (1994) reported that the magnitude of root mean square (RMS) peak voltage at the yield stress region increases with increasing yield strength in AISI 4340 steel, tempered at different conditions. This was attributed to the increase in difficulty in initiating and propagating Lüders bands with increasing strength level (Carpenter and Pfleiderer 1994). Khamedi et al. (2010) studied the effect of the volume fraction of martensite on AE behavior of dual-phase steel (DPS) under tensile loading. AE dominant frequency was used to find different failure modes such as ferrite–martensite interface decohesion or martensite phase fracture. Haneef et al. (2010) studied the effect of heat treatment on Lüders band formation in medium carbon steel using AE. The decrease in acoustic emission activity in tempered specimens compared to water-quenched specimens was observed due to the decrease in dislocation activity. Monitoring of the deformation and fracture process of ferritic–martensitic DPS by employing AE was carried out by Fallahi et al. (2012). The DPS had different volume fractions of martensite (12%–73%) and various morphologies like equiaxed or fibrous martensite phase produced from low-carbon steel (0.1% C). The results show the usefulness of AE to detect failure micromechanisms consisting of ferrite–martensite interface decohesion and/or martensite phase fracture, and identifying the correlation of failure mechanisms to microstructure in DPS (Fallahi et al. 2012).

This paper presents studies carried out to investigate the tensile deformation behavior of AISI-type 1025 carbon steel with different microstructures using MMM and AE techniques. The effect of tempering on SMLF signals was studied. AE measurements were carried out during tensile deformation, while SMLF was measured after unloading the specimens. The results are correlated with optical micrographs and hardness measurements.

The next section of this paper presents the details of the material and tensile specimen including different heat treatment and corresponding microstructures. Next, the experimental setup of MMM and AE testing is described. The experimental results of tensile, MMM, and AE for different heat-treated specimens are presented

and discussed in the results and discussion section. Lastly, the conclusions drawn from the study are given.

Material and Heat Treatment

The material used in this study is an AISI-type 1025 carbon steel whose chemical composition (wt%) is given in Table 1. The tensile specimens (length of 200 mm, width of 20 mm, and thickness of 4 mm) were fabricated from the sheet material according to the specification given in the ASTM standard (2009). The dimensions of the specimens are shown in Figure 1.

The specimens were given different heat treatments (as per Table 2) to modify the microstructure and, hence, tensile properties. The microstructure of different specimens is shown in Figure 2, with a 500× microscope amplification. The microstructure of the untreated specimen contains medium-size grains of ferrite (white region) as a major constituent and a small amount of pearlite (black region in Figure 2a). The microstructure of the normalized specimen contains ferrite, pearlite, and a small amount of martensite (Figure 2b). The microstructure of the annealed specimen shows coarse grains of ferrite as a major constituent and a small amount of pearlite (Figure 2c). During annealing, the specimen undergoes a slow cooling, resulting in coarse grains. The microstructure of the brine-quenched specimen is mostly martensitic and some retained austenite (Figure 2d). The brine-quenched and tempered specimen

has a more refined and homogeneous microstructure with martensite as a major constituent (Figure 2e). The microstructure of the oil-quenched specimen shows martensite as a major constituent and a small amount of retained austenite (Figure 2f). The microstructure of the oil-quenched and tempered specimen has a more refined and homogeneous microstructure with martensite as a major constituent and a small amount of retained austenite (Figure 2g).

After the heat treatment, the specimens were ground and polished to remove any rust or dirt left on the surface. Tensile tests of all the specimens were carried out using a standard tensile testing machine with a crosshead speed of 1 mm/min at ambient temperature. The specimens were subjected to tensile deformation until fracture. A photograph of the fractured specimens is shown in Figure 3a. AE measurements were carried out during tensile deformation while the deformation-induced SMLFs were measured using a GMR sensor along the dotted line AB (shown in Figure 3b) after unloading and dismantling the specimens from the tensile testing machine.

Experimental Setup

In this section, the experimental setup of MMM and AE testing is described.

MMM Testing Setup

The experimental setup for MMM testing is shown in Figure 4. It consists of an in-house developed servo motor-based XY scanning system, GMR sensor tensile specimen, and computer. The scanning system consists of a servo motor and encoders to ensure smooth scanning with the position and speed feedback. The specimens were scanned with a GMR sensor along their centerline for detection of the tangential component of the SMLF from the fractured specimens. The scan step size and scanning speed were set to 10 μm and 20 mm/s, respectively. To avoid physical damage to the sensor, a liftoff

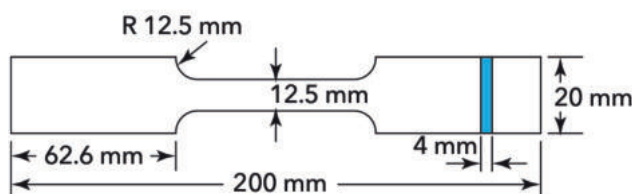


Figure 1. Dimensions of the tensile test specimen
Рис. 1. Розміри зразка для випробувань на розтяг

Table 1. Chemical composition (wt%) of AISI 1025 carbon steel used in study

Таблиця 1. Хімічний склад (мас.%) вуглецевої сталі AISI 1025, використаної в дослідженні

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Fe
wt%	0.208	0.159	0.77	0.007	0.015	0.06	0.01	0.038	0.003	0.013	<0.003	0.002	<0.002	0.050	Bal.

Table 2. Details of heat treatment of AISI 1025 carbon steel tensile specimen

Таблиця 2. Дані термічної обробки зразка на розтяг з вуглецевої сталі AISI 1025

Specimen number	Heat treatment	Temperature (°C)	Hold time (min)	Quenching medium	Microstructure	Ranges of peak amplitude (dB)
S1	Untreated	–	–	–	Ferrite + pearlite	40–62
S2	Normalized	910	60	Air cooling	Ferrite + pearlite + martensite	40–68
S3	Annealed	910	60	Furnace cooling	Ferrite + pearlite	40–74
S4	Brine quenched	910	60	25% brine solution	Martensite + austenite	40–82
S5	Brine quenched and tempered	910 400	60 120	25% brine solution, furnace cooling	Martensite + austenite	40–82
S6	Oil quenched	910	60	Engine oil	Martensite + austenite	40–76
S7	Oil quenched and tempered	910 400	60 120	Engine oil, furnace cooling	Martensite + austenite	40–72

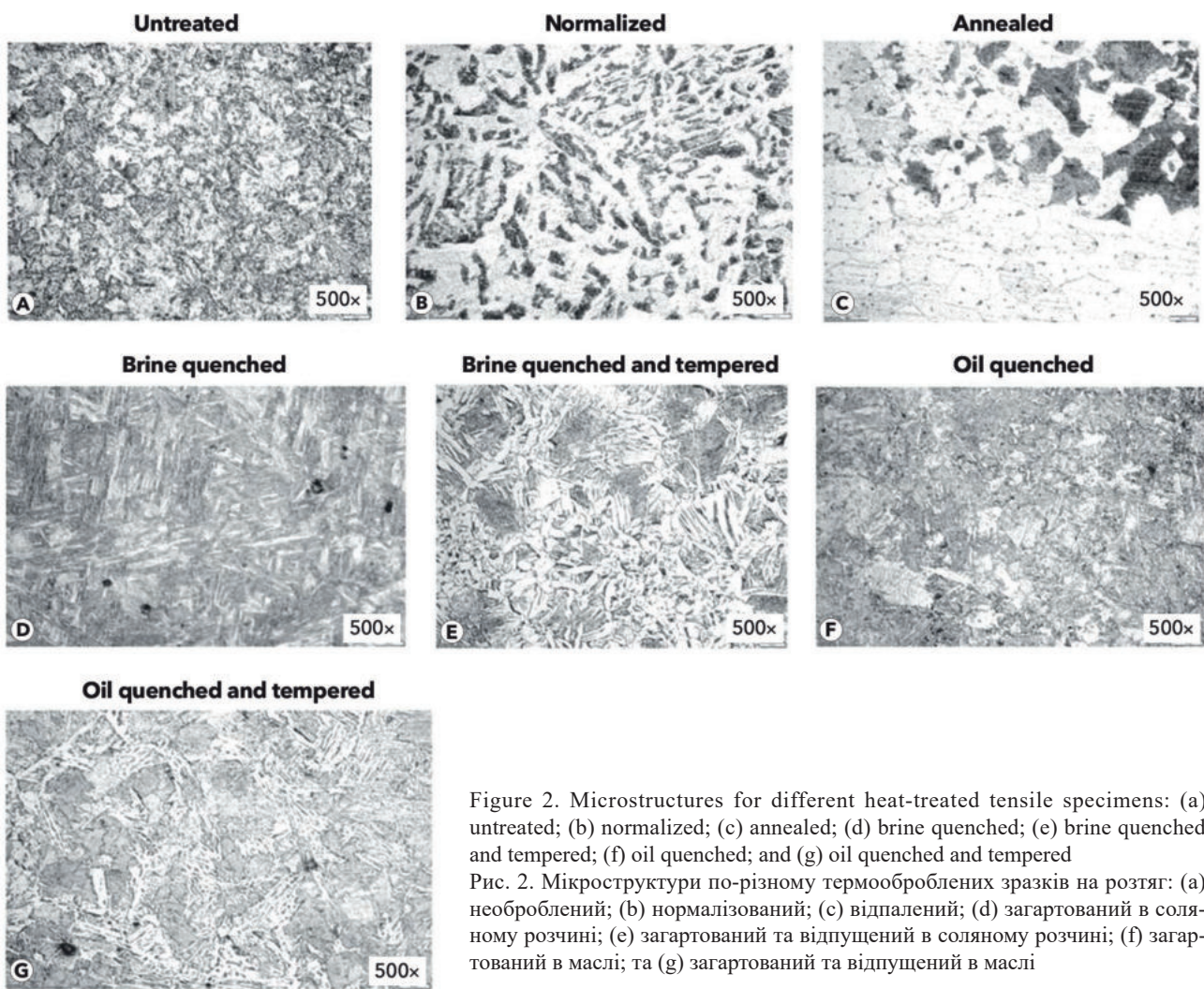


Figure 2. Microstructures for different heat-treated tensile specimens: (a) untreated; (b) normalized; (c) annealed; (d) brine quenched; (e) brine quenched and tempered; (f) oil quenched; and (g) oil quenched and tempered
Рис. 2. Мікроструктури по-різному термооброблених зразків на розтяг: (a) необроблений; (b) нормалізований; (c) відпалений; (d) загартований в соляному розчині; (e) загартований та відпущений в соляному розчині; (f) загартований в маслі; та (g) загартований та відпущений в маслі

of 1 mm was maintained between the GMR sensor and specimen surface. The GMR sensor output data was preamplified and then acquired through an analog-to-digital converter (ADC) card of 16-bit resolution and sampling frequency of 3.5 MS/s. The data was stored in a computer in a spreadsheet for subsequent analysis after voltage to magnetic field conversion (GMR output of 1 V corresponds to 3061 A/m). Data acquisition and signal visualization were performed using an in-house developed software.

AE Setup
The experimental setup used for AE measurement is shown in Figure 5. It consists of a 16-channel AE measurement system along with a broadband AE sensor with a frequency range of 100 kHz to 1 MHz and a resonant AE sensor with a frequency of 150 kHz. The sensor was attached firmly to the surface of each specimen by an elastic cord and a thin film of silicone grease for good transmittance of acoustic signals. The sensor was fixed at the gauge-to-shoulder transition region of the specimens. The AE data was recorded at a sampling rate of 5 MS/s for all the specimens. A preamplifier (40 dB gain) and band-pass filter (100 to 300 kHz) were used to record the

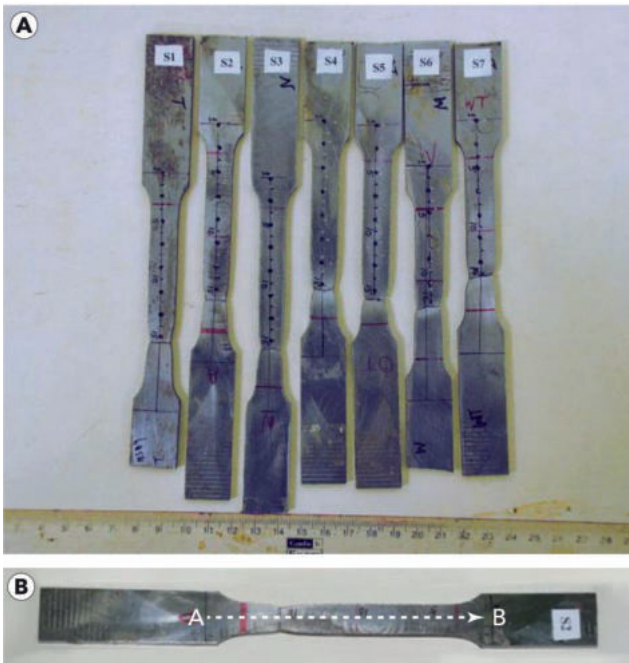


Figure 3. Fracture specimens: (a) photograph; (b) measurement of SMLF along the dotted line AB using a GMR sensor
Рис. 3. Зразки для випробувань на руйнування: (a) фотографія; (b) вимірювання SMLF уздовж пунктирної лінії АВ за допомогою GMR датчика

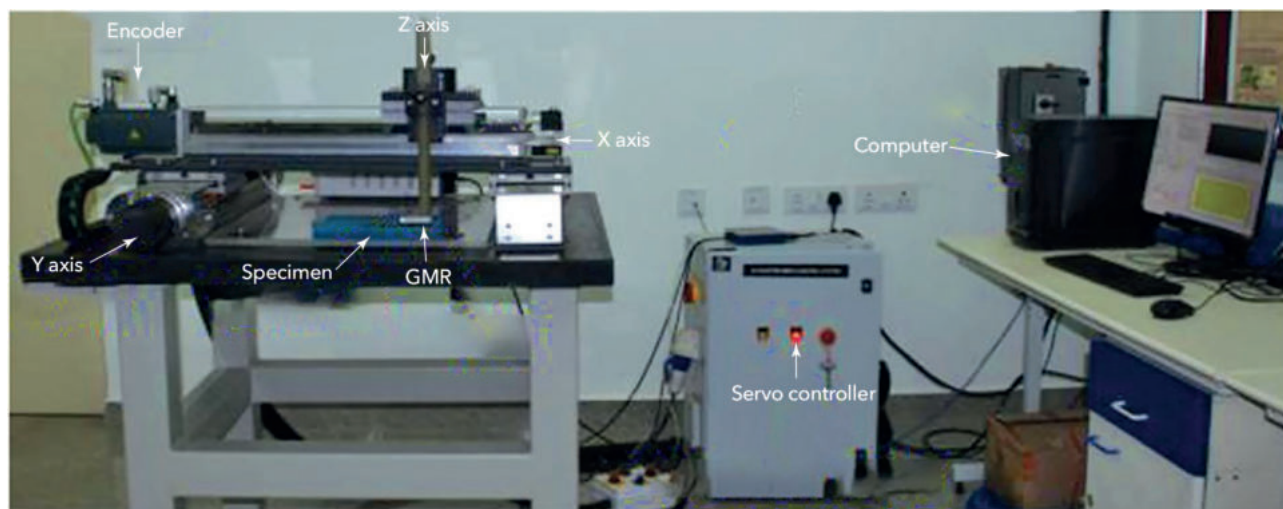


Figure 4. Experimental setup for MMM testing

Рис. 4. Експериментальна установка для досліджень магнітної пам'яті металу (MMM)

signals. A threshold of 40 dB was maintained. The gain and threshold were selected to mitigate external noise during recording.

This was done by repeatedly loading and unloading a dummy specimen to higher load levels expected to be taken by any of the specimens. This ensured that the acoustic emission signals were not recorded either from the machine or from external noise.

Results and Discussion

This section presents the results of the experiments.

Tensile Results

Stress-strain curves for all the specimens were generated from load-elongation plots and then tensile properties were determined. Figures 6a and 6b show the mechanical strengths (yield strength and tensile

strength) and elongation, respectively, for the different heat-treated specimens. As can be seen from Figure 6a, both yield strength and tensile strength are highest for the brine-quenched specimen and lowest for the annealed specimen. The maximum strength in the brine-quenched specimen is primarily attributed to the presence of martensite as a major constituent, which is a very strong phase in carbon steels (Long et al. 2014; Adebiyi et al. 2015). The minimum strength in the annealed specimen is essentially due to relieving stress and an increase in grain size leading to free movement of dislocations. During annealing, the specimen undergoes slow cooling, which results in the formation of coarse grains and enhancement of ductility. The strength of the normalized specimen is found to be more than that of the annealed specimen due to the presence of a small amount of martensite in the normalized specimen. The strength of the oil-quenched and tempered specimen is reduced compared to the brine-quenched specimen. The effect of tempering on mechanical strength is more pronounced in the brine-quenched specimen compared to the oil-quenched specimen. This is attributed to the large difference in cooling rate for brine quenched and brine quenched followed by tempering compared to that of oil quenched and oil quenched followed by tempering.

Among all the specimens, the annealed specimen shows maximum elongation while the brine-quenched specimen shows minimum elongation (Figure 6b). The maximum elongation in the annealed specimen is again attributed to the free movement of dislocations without any obstruction. The minimum elongation in the brine-quenched specimen is attributed to the presence of martensite. The brine quenching increases strength and reduces ductility. Tempering reduces strength but improves ductility of the steel.

The changes in tensile properties are influenced mainly by phase transition and residual stress. The

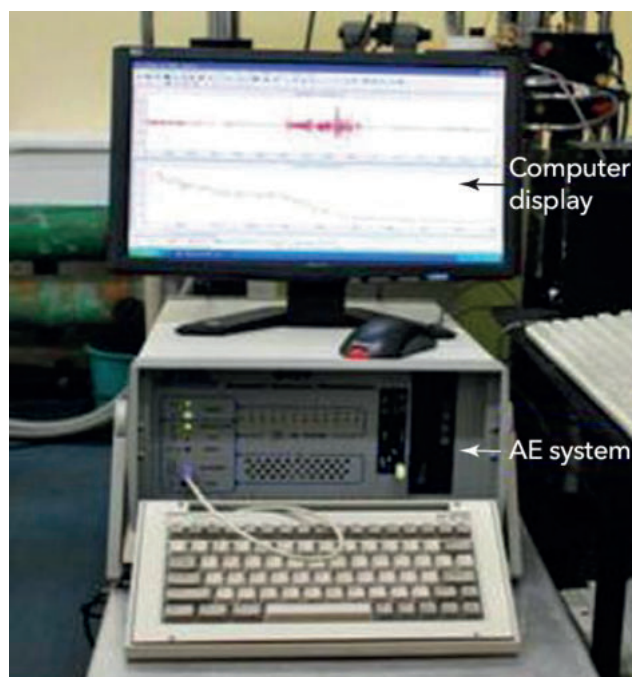


Figure 5. Experimental setup for AE

Рис. 5. Експериментальна установка для досліджень з використанням акустичної емісії (AE)

amounts of marten- site and ferrite are also important factors affecting tensile properties. The tempering process leads to changes in the internal structure of the steel and results in mechanical property changes.

MMM Results

Figure 7a shows the response of the GMR sensor for different specimens scanned along the full gauge length (measured length of 100 mm). As can be seen, the GMR sensor output (after voltage to magnetic field conversion) is different for different specimens, which implies that the SMLF depends upon the microstructure due to different heat treatments. This observation is attributed to the changes in the magnetic properties of carbon steel with the combined effect of microstructure and residual stress (because of tensile deformation) of the steel. As expected, the GMR sensor output is highest at the fracture position for all the specimens due to high magnetic reluctance at the fracture position (Bao et al. 2015). It is also observed that the peak position (~18 to 35 mm) is different for different specimens as the specimens were not fractured at the same location of gauge length.

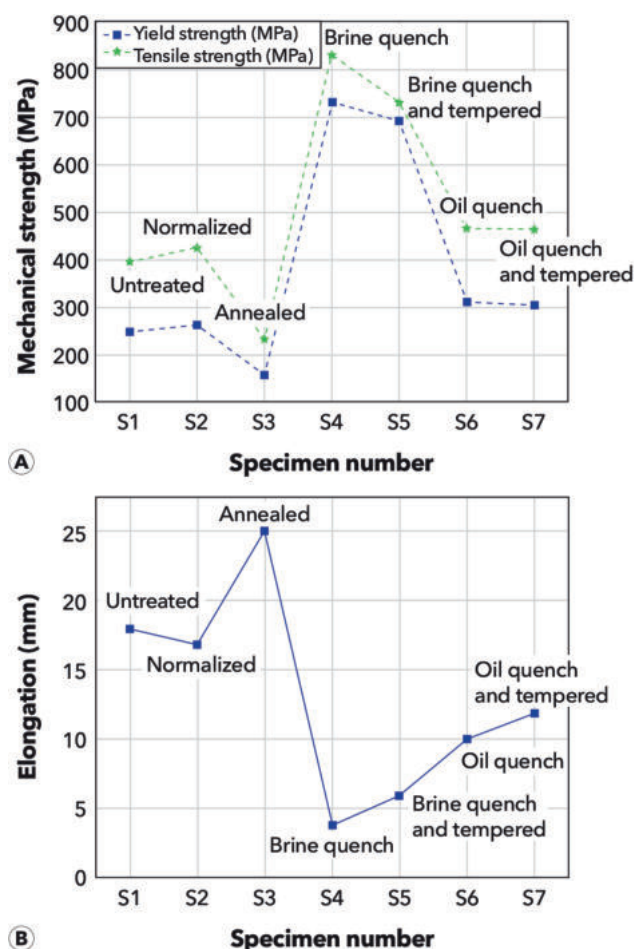


Figure 6. Comparison of different heat-treated specimens: (a) mechanical strength (yield strength and tensile strength); (b) elongation

Рис. 6. Порівняння зразків з різною термічною обробкою: (a) механічна міцність (границя текучості та міцність на розтяг); (b) подовження

In order to analyze the effect of plastic deformation on the SMLFs for all the heat-treated specimens, the response of the GMR sensor scanned along the longer piece of the fractured specimen is plotted in Figure 7b. It can be seen that the GMR sensor output is different due to plastic deformation in different specimens. The GMR sensor output also varies with the degree of plastic deformation. The intensity of the GMR sensor output is found to increase with the increase in deformation. When the tensile load is applied, the stress and magnetic which hinders the motion of the domain wall. It is equivalent to having a reluctance, leading to the distortion of magnetic flow. Therefore, the detectable leakage magnetic field increases and the SMLF signal increases as well.

The response of the GMR sensor for the untreated specimen with and without tensile deformation is also plotted in Figure 7c. As can be seen, the GMR output of the undeformed specimen is a straight line, and it has an average value of about 20 A/m. As compared to the undeformed specimen, the GMR output of the deformed specimen shows a peak at the fracture position and its value is also higher at the plastic deformation region due to the development of dislocation structures.

Hardness measurements (Figure 8a) were carried out at discrete positions (5 mm spacing) of the longer piece of the fractured specimens using a digital Rockwell hardness tester. As can be seen, the hardness values are different (average hardness ~150 to 270 HV) for different heat-treated specimens as well as for different positions of the same tensile deformed specimen. Hardness is highest in the brine-quenched specimen and lowest in the annealed specimen, as expected. The peak amplitudes of the GMR sensor output and hardness values for all the specimens were determined and plotted in Figure 8b. It can be seen that the GMR peak amplitude is highest in the brine-quenched and tempered specimen and lowest in the annealed specimen. The maximum GMR peak amplitude in the brine-quenched and tempered specimen is primarily attributed to its more refined and homogeneous martensitic structure and stronger ferromagnetism of tempered martensite than that of the quenched martensite (Long et al. 2014). After tempering, SMLF increases as the relative permeability values become higher due to tempering. The minimum GMR peak amplitude in the annealed specimen is essentially due to relieving stress and an increase in grain size leading to free movement of dislocations.

AE Results

Figures 9a through 9g show stress versus time plots for different specimens. The variations of acoustic emission counts with time are also superimposed on the same plots. According to the stress-strain curve, the tensile process in the untreated, normalized, and annealed specimens can be divided

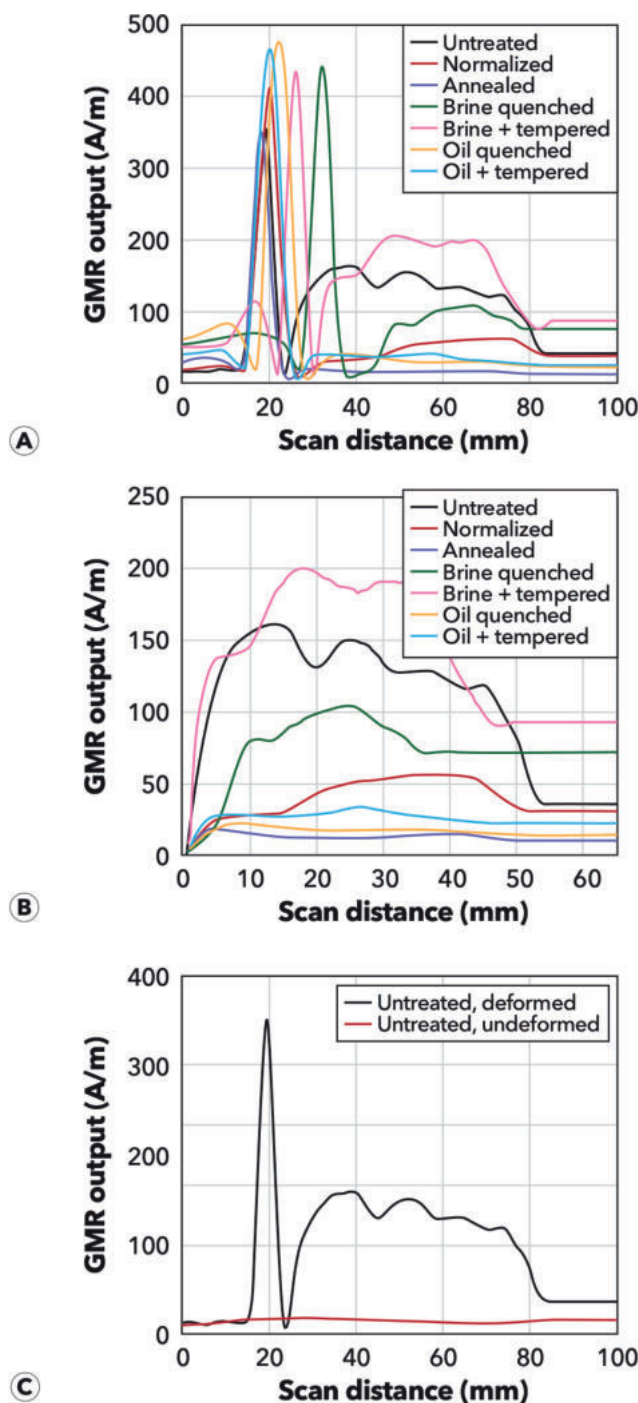


Figure 7. Response of GMR sensor for different heat-treated specimens: (a) scanned along the full gauge length; (b) scanned along longer piece of fractured specimen; (c) response of GMR sensor for the untreated specimen with and without tensile deformation (GMR output of 1 V corresponds to 3061 A/m)
Рис. 7. Відповідь датчика GMR для зразків з різною термічною обробкою: (а) сканування по всій ширині; (б) сканування уздовж довшого шматка зруйнованого зразка; (с) відповідь датчика GMR для необробленого зразка з деформацією розтягу та без неї (вихід GMR 1 В відповідає 3061 А/м)

into three regimes; namely, elastic region, Lüders or discontinuous yield region, and strain hardening region. In the brine-quenched, oil-quenched, and tempered specimens, the Lüders region is absent. In the quenched and tempered specimens, the presence of

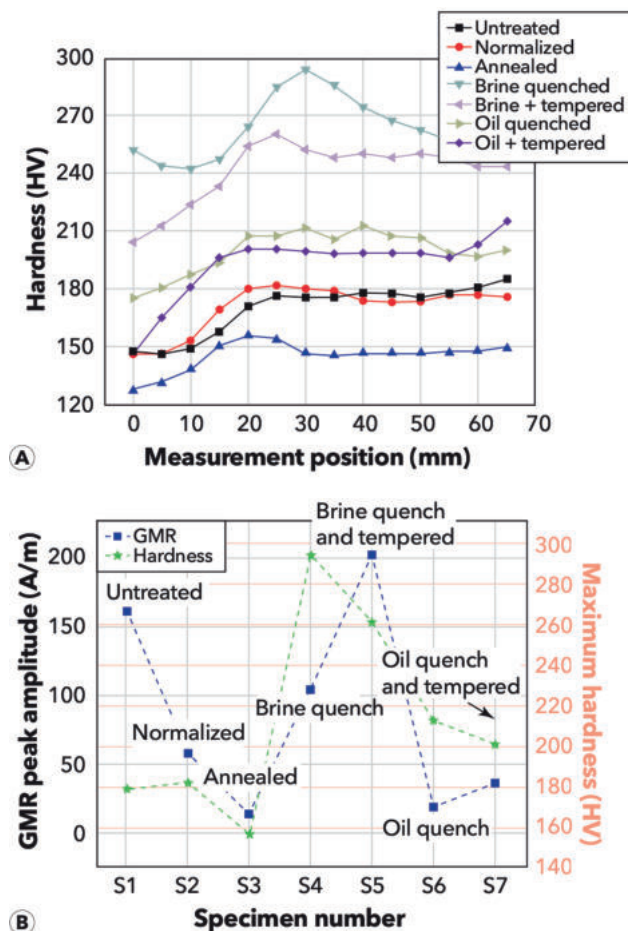


Figure 8. Comparison of different heat-treated specimens: (a) hardness measured at discrete positions of longer fractured specimen; (b) comparison of GMR peak signal amplitude with maximum hardness

Рис. 8. Порівняння зразків з різною термічною обробкою: (а) твердість, виміряна в дискретних положеннях довшого зруйнованого зразка; (б) порівняння амплітуди пікового сигналу GMR з максимальною твердістю

martensite causes initial yielding to commence at low stresses and the stress-strain curve becomes smooth and rounded. This is due to the presence of large densities of new dislocations created by martensitic transformation; retained austenite, which is much softer; and residual stresses after quenching, which assist in local yielding at low applied loads. Peak amplitude distribution of acoustic emission hits (or events) of two specimens (untreated and brine quenched) is shown in Figures 10a and 10b. Ranges of peak amplitude for different specimens are shown in Table 2.

In the untreated specimen (Figure 9a), higher counts are generated during preyield and yield deformation, and this is attributed to the generation and movement of dislocations. In the elastic region, emission is high. The acoustic emission counts in the Lüders region are comparatively lesser than the elastic region, and this is attributed to the reduced dislocation motion caused by an increase in dislocation density. At higher strain levels, a lesser num-

ber of counts compared to up-to-yield is due to the reduction in glide distance and velocity of moving dislocations. AE signals emitted by the normalized specimen are given in Figure 9b, where acoustice-mission activity is higher in the elastic and Lüders region in comparison with the strain-hardening region. Higher counts in the normalized specimen than in the case of the untreated specimen are due to the presence of martensite and the heterogeneous nature of the microstructure. In the case of the annealed specimen (Figure 9c), acoustic emission counts are significantly higher in the elastic region and reduced in the Lüders region and work-hard-

ing region. Thus, in general, acoustic emission activity in untreated, normalized, and annealed specimens shows higher counts in the elastic region. In carbon steels, an increase in acoustic emission activity near yield point and a decrease thereafter was reported (Akbari and Ahmadi 2010). Acoustic emissions generated during micro-yielding were attributed to dislocation activity at grain boundaries and a rapid increase in acoustic emissions after massive plastic deformation was attributed to intensive development of slip bands in ferrite grains and Lüders band propagation in the lower yield point (Wang et al. 2015).

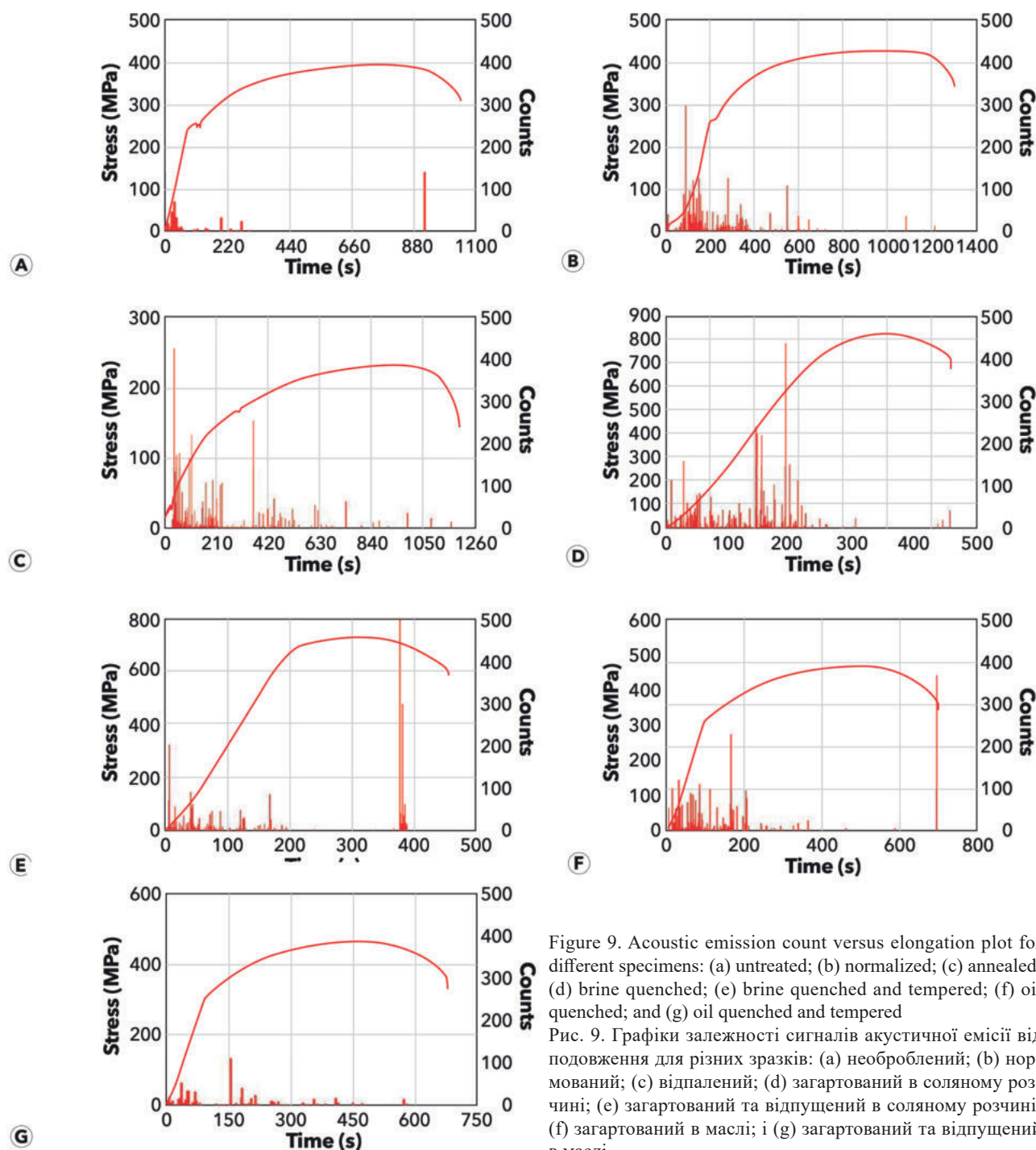


Figure 9. Acoustic emission count versus elongation plot for different specimens: (a) untreated; (b) normalized; (c) annealed; (d) brine quenched; (e) brine quenched and tempered; (f) oil quenched; and (g) oil quenched and tempered

Рис. 9. Графіки залежності сигналів акустичної емісії від подовження для різних зразків: (а) необроблений; (б) нормований; (с) відпалений; (д) загартований в соляному розчині; (е) загартований та відпущений в соляному розчині; (ф) загартований в маслі; і (г) загартований та відпущений в маслі

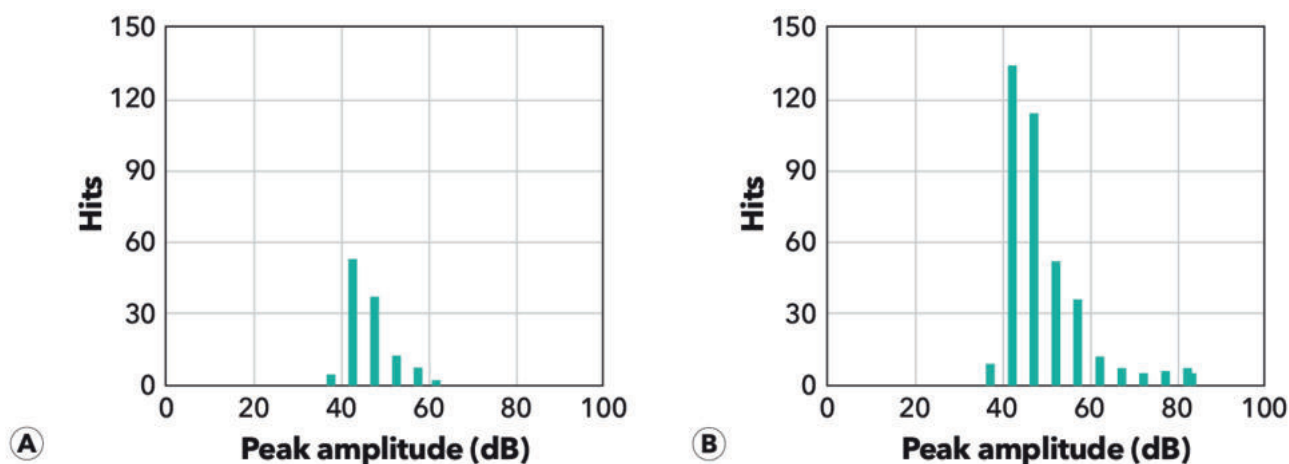


Figure 10. Distribution of acoustic emission hits by peak amplitude: (a) untreated; (b) brine quenched

Рис. 10. Розподіл сигналів акустичної емісії за піковою амплітудою: (a) необроблений; (b) загартований в соляному розчині

In the brine-quenched specimen (Figure 9d), acoustic emission counts are generated continuously from the beginning and are higher during strain hardening compared to the elastic region. The acoustic emission counts in the oil-quenched specimen (Figure 9f) follow an almost similar trend. The increasing acoustic emission activity with strain in quenched specimens could be attributed to cracking at interfaces and in martensitic particles. This generates signals of higher amplitude in these two specimens compared to the untreated, normalized, and annealed specimens (Table 2). The number of hits in the brine-quenched specimen is also higher compared to the untreated specimen (Figure 10). In DPS, for tensile fracture of samples with low martensite content, the dominant micromechanism of failure is ferrite/martensite interface decohesion; but in samples with high martensite content, martensite phase fracture is also observed (Khamedi et al. 2010; Fallahi et al. 2012). The cracking in martensite is apparently related to the residual stress at the interfaces and the toughness of the martensitic particles themselves (Long and Hua-zi 1990). After tempering, residual stresses are considerably reduced. This decreases acoustic emission counts in both of the tempered specimens (Figures 9e and 9g). A decrease in acoustic emissions in tempered specimens compared to quenched specimens is known (Haneef et al. 2010).

This study demonstrates that the SMLF is influenced by microstructure as well as residual stress aroused due to plastic deformation in heat-treated AISI 1025 carbon steel. Similar effects are found in acoustic emission signals and mechanical properties. AE is effective in evaluating the deformation behavior of heat-treated carbon steel specimens during tensile deformation, while the MMM technique is effective in evaluating deformation behavior after testing. Therefore, it is recommended to use both MMM and AE techniques for comprehensive understanding of deformation and, hence, damage estimation of carbon

steel. The MMM technique is semivolumetric, which is sensitive to only surface and near-surface discontinuities and deformation. On the other hand, AE is a volumetric technique, which is sensitive to deformation and damage occurring throughout the volume of the material. Also, the MMM technique can be used only for ferromagnetic materials, while AE can be used for both ferromagnetic and nonferromagnetic materials. Further, it is suggested to consider the microstructure effect for reliable damage estimation of engineering components using the MMM technique. It will be beneficial to develop techniques to differentiate the effect of microstructure and residual stress in tensile-deformed carbon steels. Efforts are underway in this direction.

Conclusions

MMM and AE measurements were carried out to investigate the tensile deformation behavior of AISI 1025 carbon steel with different microstructures. The results show that SMLF signals are influenced by microstructure as well as residual stress in AISI 1025 carbon steels. Among various specimens, SMLF signal peak amplitude is highest in brine-quenched specimens followed by tempering, while hardness is highest in the brine-quenched specimen. However, SMLF signal peak amplitude and hardness are lowest in the annealed specimen. The SMLF signal is found to be more in tempered specimens compared to untempered specimens. From AE measurements, it is observed that AE in untreated, normalized, and annealed specimens shows higher counts in the elastic region. The quenched specimens with higher martensite emit higher acoustic emissions during deformation but decreases when tempered. Acoustic emissions in the quenched specimens generate a signal of higher amplitude than the tempered specimens. These results would be useful for reliable estimation of damage in engineered structures using MMM and AE techniques. They could also be used to provide effective feedback on the heat-treatment process.

Acknowledgments

Authors are thankful to Dr. Shaju K. Albert, Former Director, Metallurgy and Materials Group (MMG), IGCAR, and Dr. R. Divakar, Associate Director, Materials Characterization & Engineering Group, MMG, IGCAR, for encouragement and support.

References

1. Adebisi, K.A., L.O. Mudasiru, and I.A. Babatunde, 2015, "Effect of Brine Solution on Grain Size Formations in AISI 1080 Low Carbon Steel," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 178–183, <https://doi.org/10.9790/1684-1232178183>
2. Akbari, M., and M. Ahmadi, 2010, "The Application of Acoustic Emission Technique to Plastic Deformation of Low Carbon Steel," *Physics Procedia*, Vol. 3, pp. 795–801, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.102>
3. ASNT, 2005, *Nondestructive Testing Handbook, Vol. 6: Acoustic Emission Testing*, 3rd edition, American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH
4. ASTM, 2009, *ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA
5. Bao, S., and D. Zhang, 2015, "The Effect of Loading Speed on the Residual Magnetic Field of Ferromagnetic Steels Subjected to Tensile Stress," *Insight*, Vol. 57, No. 7, pp. 401–405, <https://doi.org/10.1784/insi.2015.57.7.401>
6. Bao, S., X. Liu, and D. Zhang, 2015, "Variation of Residual Magnetic Field of Defective U75V Steel Subjected to Tensile Stress," *Strain*, Vol. 51, pp. 370–378, <https://doi.org/10.1111/str.12147>
7. Byeon, J.W., and S.I. Kwun, 2003, "Magnetic Evaluation of Microstructures and Strength of Eutectoid Steel," *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 10, pp. 2184–2190
8. Carpenter, S.H., and C. Pfeiderer, 1994, "Acoustic Emission from AISI 4340 Steel as a Function of Strength," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 12, pp. 141–148
9. Doubov, A.A., 2001, "Diagnostics of Equipment and Constructions Strength with Usage of Magnetic Memory," *Inspection Diagnostics*, Vol. 6, pp. 19–29
10. Fallahi, A., R. Khamedi, G. Minak, and A. Zucchelli, 2012, "Monitoring of the Deformation and Fracture Process of Dual Phase Steels Employing Acoustic Emission Techniques," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 548, pp. 183–188, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.104>
11. Haneef, T.K., C.K. Mukhopadhyay, B.P.C. Rao, and T. Jayakumar, 2010, "Acoustic Emissions Generated during Lüders Band Elongation of Tempered Medium Carbon Steel," *Strength, Fracture and Complexity*, Vol. 6, pp. 149–159, <https://doi.org/10.3233/SFC-2011-0113>
12. Hu, B., L. Li, X. Chen, and L. Zhong, 2010, "Study on the Influencing Factors of Magnetic Memory Method," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 33, pp. 1351–1357, <https://doi.org/10.3233/JAE-2010-1260>
13. Khamedi, R., A. Fallahi, and A.R. Oskoue, 2010, "Effect of Martensite Phase Volume Fraction on Acoustic Emission Signals Using Wavelet Packet Analysis during Tensile Loading of Dual Phase Steels," *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 2752–2759, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.019>
14. Leng, J., Y. Liu, G. Zhou, and Y. Gao, 2013, "Metal Magnetic Memory Signal Response to Plastic Deformation of Low Carbon Steel," *NDT & E International*, Vol. 55, pp. 42–46, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.01.005>
15. Liu, B., X. Xue, J. Li, R. Li, S. Dong, and J. Fang, 2019, "Grain Size Effect on Metal Magnetic Memory Signal for Stress Damage Evaluation of Low Carbon Steel," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 34, No. 3, pp. 267–282, <https://doi.org/10.1080/10589759.2019.1590830>
16. Long, F., J. Wang, G. Gao, W. Li, and J. Zhao, 2014, "Tempering Effect and Tensile Properties Evaluation of C45 Steel Based on Magnetic Memory Technology," *Materials Evaluation*, Vol. 72, No. 11, pp. 1414–1420
17. Long, Q.Y., and Y. Huazi, 1990, "Acoustic Emission during Deformation of Dual-Phase Steels," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21, No. 1, pp. 373–379, <https://doi.org/10.1007/BF02782417>
18. Min, Y., G. Rui-Bin, Z. Chunyu, Q. Yinhu, S. Zhiyuan, and X. Zhanshan, 2014, "Research on the Relationship between Metal Magnetic Memory Signal Distortion and Yield Strain under Static Tension Test," *Insight*, Vol. 56, No. 12, pp. 669–675, <https://doi.org/10.1784/insi.2014.56.12.669>
19. Moonesan, M., and M. Kashefi, 2018, "Effect of Sample Initial Magnetic Field on the Metal Magnetic Memory NDT Result," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 460, pp. 285–291, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.04.006>
20. Singh, W.S., R. Stegmann, and M. Kreutzbruck, 2016, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Stress-Induced Geometry Effect on Self-Magnetic Leakage Fields during Tensile Deformation," *Insight*, Vol. 58, No. 10, pp. 544–550, <https://doi.org/10.1784/insi.2016.58.10.544>
21. Song-ling, H., L. Lu-ming, S. Ke-ren, and W. Xiao-fen, 2004, "Magnetic Field Properties caused by Stress Concentration," *Journal CSUT*, Vol. 11, No. 1, pp. 23–26
22. Sonntag, N., R. Stegmann, B. Skrotzki, and M. Kreutzbruck, 2014, "Deformation Induced Magnetization of Ferromagnetic Steels Using the Example of an Unalloyed Structural Steel," *Proceedings of the Werkstoffprüfung*, pp. 355–360 (in German)
23. Tang, J., J. Li, H. Wang, Y. Wang, and G. Chen, 2019, "In-Situ Monitoring and Analysis of the Pitting Corrosion of Carbon Steel by Acoustic Emission," *Applied Sciences*, Vol. 9, <https://doi.org/10.3390/app9040706>
24. Vivekananda, K.S., and K.S. Venkataraman, 2006, "NDE Techniques for Reliable Inspection of Carbon Steel Tubes," *Proceedings of National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, 7–9 December, Hyderabad, India
25. Wadley, H.N.G., and C.B. Scruby, 1991, "Cooling Rate Effects on Acoustic Emission-Microstructure Relationships in Ferritic Steels," *Journal of Materials Science*, Vol. 26, pp. 5777–5792, <https://doi.org/10.1007/BF01130115>
26. Wang, H.W., H.M. Yu, H.Q. Xiao, Z.Y. Han, and H.Y. Luo, 2015, "Steel Damage based on Acoustic Emission," *Materials Research Innovations*, Vol. 19, <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.0000000001094>
27. Wang, Z.D., Y. Gu, and Y.S. Wang, 2012, "A Review of Three Magnetic NDT Technologies," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, pp. 382–388, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.08.048>
28. Xing, C., L. Luming, H. Bin, C. Xiaojie, D. Yuanhui, Y. Dezhi, and Y. En, 2006, "Magnetic Evaluation of Fatigue Damage in Train Axles without Artificial Excitation," *Insight*, Vol. 48, No. 6, pp. 342–345, <https://doi.org/10.1784/insi.2006.48.6.342>

Permission to Reprint 20.10.2022:
The American Society for Nondestructive Testing, Inc.
CITATION
Materials Evaluation 80 (6): 44-53
<https://doi.org/10.32548/2022.me-04195>
©2022 American Society for Nondestructive Testing



КОНФЕРЕНЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ»



17 листопада 2022 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України було проведено одноденну науково-технічну конференцію «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України». Організаторами конференції виступили Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України і Міжнародна Асоціація «Зварювання».

У роботі конференції, яка була організована у вигляді сесій пленарних (наживо та онлайн) і стендових доповідей, взяли участь понад 80 науковців та спеціалістів з України. Конференцію відкрив директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік І.В. Кривцун. У своєму виступі він відзначив традиційність проведення подібних заходів у стінах ІЕЗ, особливості та складність поточного військового положення в країні, що зумовлені широкомасштабною агресією росії, життєву важливість і актуальність підготовки та реалізації програми післявоєнного відновлення і подальшого розвитку економіки країни, в яку значний внесок мають зробити вчені і спеціалісти зварювального виробництва та неруйнівного контролю.

У конференції взяли участь представники ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ФМІ ім. Г.В. Карпенка, ПрАТ «Червона Хвиля», ТОВ «Патон Інтернешнл», НУ «Львівська політехніка», ДП «Міжнародний центр електронно-променевих технологій ІЕЗ», НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ТОВ «Ультракон Сервіс», ДП «Антонов», НУ Кораблебудування ім. адмірала Макарова, ТОВ «Діагностичні Прилади», Дніпровський ДТУ, ДКТБ ІЕЗ, ТОВ «Плазер», Навчально-науковий ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ФТІМС, ДП НВЦ «Титан» ІЕЗ, ТОВ «Стіл Ворк», ПрАТ «ПлазмаТек», ТОВ «МІGATEX ін-

дустрія», ТОВ «Плазма Мастер», ТОВ «Електро-терм» та інші.

Спонсорську підтримку в організації проведення конференції надали ТОВ «Патон Інтернешнл», НВЦ «Титан» ІЕЗ, КУІЗ ім. Є.О. Патона, ТОВ «Ультракон Сервіс», ТОВ «Діагностичні Прилади», ТОВ «Велтек».

На конференції було заслухано 12 пленарних та 65 стендових доповідей, присвячених таким напрямкам зварювального виробництва та суміжних технологій, як дугове зварювання, електронно-променеві технології, 3D-друк, зварювальні матеріали та обладнання, неруйнівний контроль та інші.

Були заслухані наступні пленарні доповіді: *Синергетична активація процесу TIG зварювання* (Кривцун І.В., Коваленко Д.В., Коваленко І.В.), *Розвиток устаткування для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом* (Жерносеков А.М., Токмаков М.М.), *Застосування профільних електронних променів для розширення технологічних можливостей 3D-друку та супутніх процесів* (Ковальчук Д.В., Мельник В.Г., Мельник І.В.), *Використання методу фотограметрії для технічної діагностики Київської телевежі* (Лобанов Л.М., Стельмах Д.І., Савицький В.В., Шуткевич О.П.), *Сучасні технології електрофізичної обробки для регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань* (Лобанов Л.М., Пашин М.О., Михайлюк О.Л., Кривий В.І.), *Науково-виробнича фірма «Діагностичні прилади» – 25 років інноваційного розвитку* (Павлій О.В.), *Прогнозування впливу водневої деградації трубних сталей на несучу здатність зварних елементів магістральних газопроводів при транспортуванні ними газоводневих сумішей* (Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І.), *Електрошлаковий переплав як метод рециклінгу в умовах обмеженого ресурсу сировинної бази* (Педченко Є.О., Костецький Ю.В., Полішко Г.О., Петренко В.Л., Зайцев В.А.), *Modelling of heat transfer and fluid flow in the metal being welded during DC and HFPC TIG spot welding* (Semenov O., Krivtsun I., Demchenko V., Reisgen U, Mokrov O., Sharma R., Sydoruk V.), *Розробка самозахисних порошкових дрітків для ремонтно-відновлювального зварювання металоконструкцій рухомого складу залізничного транспорту та споруд гірничо-металургійного комплексу* (Шлепаков В.М., Котельчук О.С., Головка В.В.). *Застосування вібродіагностичних систем відбору та обробки вібраційних сигналів для визначення технічного*

стану промислового обладнання (Юзефович Р.М., Яворський І.М., Слєпко Р.Т., Личак О.В., Стецько І.Г., Варивода М.З., Трохим Г.Р.) (онлайн доповідь), *Можливості сучасних електронно-променевих технологій для отримання нових матеріалів та захисних покриттів* (Яковчук К.Ю.).

Також під час роботи конференції можна було ознайомитись із 65 стендовими доповідями. Вони відображають результати широкого спектру досліджень і розробок в галузі зварювання та суміжних технологій.

Тези доповідей разом із програмою роботи конференції було опубліковано до початку роботи конференції. Тези доповідей у електронному вигляді розміщені на сайті конференції www.pwiscientists.com/ukr/wtd2022.

Учасники конференції відзначили високий науковий рівень та практичну значимість пленарних та стендових доповідей, що дозволило зокре-

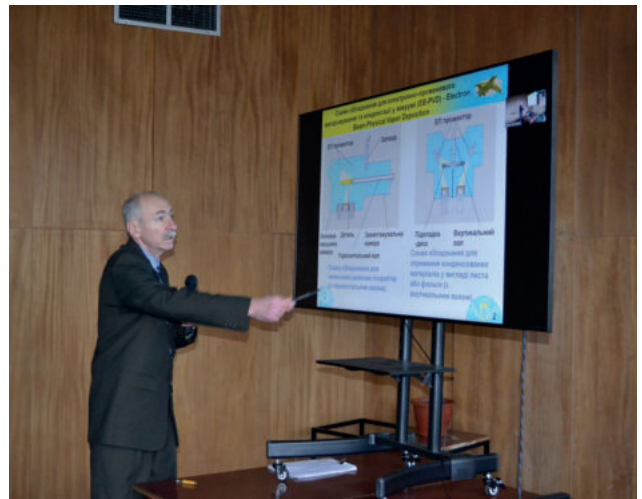
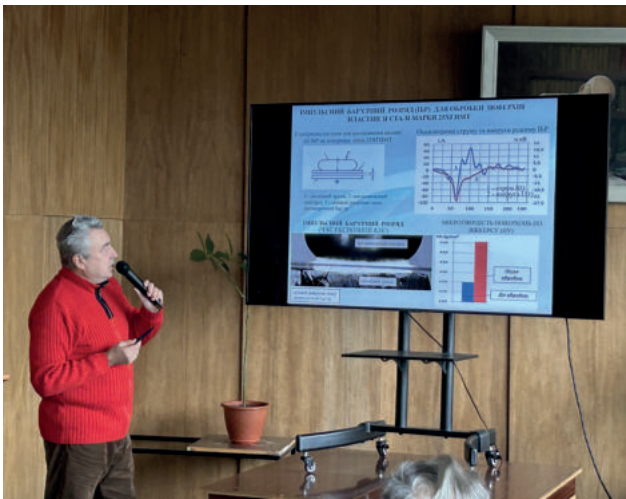
ма обговорити перспективи розвитку подальших досліджень у галузі зварювання та неруйнівного контролю.

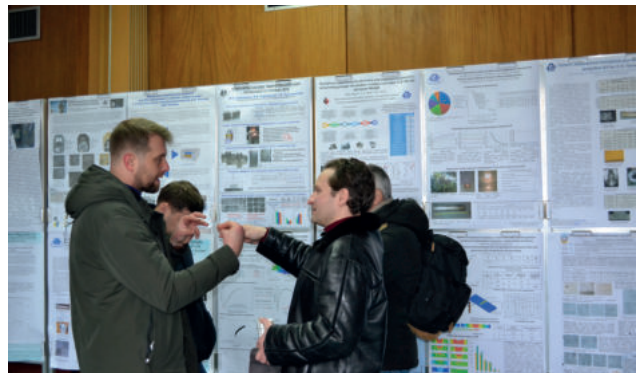
Під час роботи конференції працювала виставка «Зварювання та споріднені технології». У виставці взяли участь ТОВ «Патон Інтернешнл», ТОВ «Діагностичні прилади», ПрАТ «Червона Хвиля», ТОВ «Плазма Мастер», ТОВ «Ультракон», ТОВ «Спектран».

Учасники конференції могли ознайомитись з останніми випусками журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», «The Paton Welding Journal» та оформити передплату на ці видання на 2023 р., а також ознайомитись з новою книгою «Моніторинг стану конструкцій» (автор В.О. Троїцький) та замовити її.

Олександр Зельніченко







ДАТИ, ПОДІЇ, ФАКТИ З ІСТОРІЇ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

(календар IV кв.)

1 жовтня 1934 р. Президія АН УРСР затвердила директором Інституту електрозварювання Євгена Оскаровича Патона (1870-1953 рр.). Для визнання зварювання як надійного технологічного процесу знадобились комплексні дослідження механіки зварних конструкцій, металургійних процесів і металознавства зварювання, фізики дугового розряду. Необхідно було створити апаратуру, матеріали та нові технології зварювання та випробування. Саме для цих цілей і був створений перший в світовій практиці інститут, що в наступні роки зайняв лідируючі позиції в розвитку зварювальної науки і техніки.



1 жовтня 1931 р. розпочав роботу Харківський тракторний завод, з конвеєра якого зійшли перші 10 тракторів СХТЗ 15/30 потужністю 15-30 кінських сил (його прототип – американський International 15/30). Завод став випускати біля 50 тис. тракторів на рік. Цього ж року на заводі розпочав працювати один з перших в Україні ВТК – Відділ технічного контролю. Згодом завод став найбільшим в Україні підприємством з виробництва уніфікованих гусеничних та колісних сільськогосподарських тракторів. З 2016 року входить до складу ДСН.



1 жовтня 1960 р. з конвеєра заводу «Комунар» в Запоріжжі зійшли перші українські мікролітражні автомобілі моделі ЗАЗ-965 «Запорожець». До кінця року було випущено близько 1,5 тис. «Запорожців». Цей автомобіль швидко став популярним, тому що порівняно мало коштував та був економічним. Експлуатаційна витрата пального становила 7,3 л на 100 км. Повноцінна 4-місна машина була компактною та маневреною: довжина її становила 3,33 м, а радіус повороту за колією зовнішнього колеса – 5 м. Незалежна підвіска всіх коліс, рівне, без тунелю для «кардана», дно, 20-сантиметровий кліренс під задньою віссю забезпечували непогану прохідність.



3–7 жовтня 1926 р. в Празі відбувся Перший український науковий з'їзд – форум українських науковців в екзилі. Голова оргкомітету з'їзду – академік Іван Горбачевський. З'їзд розпочав роботу в Геологічному інституті Праги в присутності українських і чеських учених та представників емігрантських організацій у Чехії. Робота з'їзду відбувалась у 4-х секціях: історично-філологічній; права і суспільних наук; природничій; технічно-математичній. Загалом відбулись 41 засідання та обговорення 154 доповідей. Робота секцій проходила у стінах Карлового університету.



14 жовтня 1884 р. американський бізнесмен і винахідник, засновник компанії «Eastman Kodak» Джордж Істмен (1854-1932 рр.) запатентував фотоплівку. Все його життя і діяльність були пов'язані з фотографією: він поставив перед собою мету максимально спростити цей трудомісткий процес. У 1879 р. Істмен побудував машину для виготовлення сухих броможелатинових фотографічних платівок, а з вересня 1880 р. почав випускати самі фотопластинки. У 1883 р. його фірма випустила рулонну плівку, яка підходила практично до всіх фотоапаратів зі скляними пластинками. Сьогодні важко уявити життя без фотографії.



15 жовтня 1964 р. відбулася офіційна церемонія запуску нафтопроводу «Дружба». Він збудований для транспортування нафти в країни Європи. Загальна довжина – близько 5200 км. Маршрут нафтопроводу розгалужується на дві гілки: північну (через Білорусь, Польщу та Німеччину) і південну (через Україну, Чехію, Словаччину та Угорщину). Будівництво трубопроводів супроводжується великим обсягом робіт зі зварювання та технічного контролю.

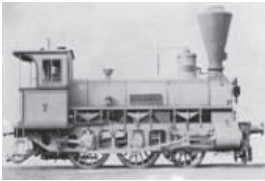


25 жовтня 2007 р. розпочато експлуатацію авіалайнера A380 – широкофюзеляжного двопалубного пасажирського літака, найбільшого серійного авіалайнера у світі. За словами працівників, найскладнішим завданням при створенні літака стала проблема зниження його маси. Місткість – 525 пасажирів у салонах трьох класів, 853 пасажирів в однокласовій конфігурації. Для зниження маси літака використовувались прогресивні технології зварювання та покращені алюмінієві сплави. На нижніх панелях фюзеляжу застосовано лазерне зварювання стрингерів та обшивки, що суттєво знизило кількість кріплень. У виробництві літаків застосовано велику кількість випробувальних та контрольних операцій.





29 жовтня 2013 р. спущено на воду ескадрений міноносець «Зумвольт», що є першим в програми SC-21 ВМС США. Програма, розпочата в 1991 р., була спрямована на створення сімейства універсальних кораблів нового покоління. Есмінці цієї серії є багатоцільовими та призначені для атаки супротивника на узбережжі, боротьби з авіацією супротивника та вогневої підтримки військ з моря. Розробка цього типу корабля – одне з останніх досягнень військової техніки. При реалізації проекту широко використовувалось електродугове зварювання з підвищеними вимогами до якості зварних швів.



4 листопада 1861 р. до Львова прибув перший потяг з Кракова (через Перемишль) по новозбудованій Галицькій залізниці ім. Карла Людвіга. Зі Львова залізницю продовжили до Бродів (1869 р.). З Красного було прокладено відгалуження до Золочева, Зборова, Тернополя і Підволочиська (1871 р.). У південному напрямку залізниця вела з Кракова до Цешина і далі до Угорщини. Відтинки залізниці від кордону до Львова вважається першою на території України залізницею. Паровози Галицької залізниці закуплялись впродовж 1858-1884 р.р. на паровозобудівних підприємствах Німеччини і Австро-Угорщини.



5 листопада 1953 р. відкрито рух мостом через Дніпро в Києві. Згодом цей міст став носити ім'я Є.О. Патона. Провідна роль у проектуванні, виготовленні та монтажі прогнових будов належала Інституту електрозварювання та особисто Є.О. Патону. Проект мосту розроблено інститутом «Укрпроектстальконструкція». Міст довжиною 1543 м має 24 прольоти, з них чотири судноплавні з висотою 87 м. Основний обсяг робіт зі зварювання головних балок було виконано розробленими в ІЕЗ автоматами та напівавтоматами. У 2020 р. виконано діагностування технічного стану несучих конструкцій мосту.



6 листопада 1960 р. у Києві пущено першу чергу метрополітену – ділянку Святошинсько-Броварської лінії від станції «Вокзальна» до станції «Дніпро». Одночасно було запущено перше депо для технічного огляду та ремонту. Депо розташовувалося у невеликому будинку, поблизу від наземного вестибюля станції «Дніпро», і було розраховано на два вагони. Згодом було створено технічні служби дефектоскопії рельсового шляху, рухомого складу та ескалаторів.



14 листопада 1918 р. гетьман Павло Скоропадський підписав Закон про заснування Української Академії наук. Затверджений закон ухвалював статут Академії, визначав її структуру та організацію, процедуру прийняття рішень, обговорював бюджет. Складався з 9-и статей. Набув чинності 27 листопада 1918 р. Першим президентом обрано академіка Володимира Вернадського – українського науковця, природознавця, засновника геохімії, біогеохімії та радіогеології, вчення про біосферу, ноосферу, космізм. Згодом розпочалось формування установ Академії наук.



15 листопада 1878 р. американським винахідником Томасом Едісоном засновано компанію «General Electric». Спочатку вона називалась «Едісон електрик лайт», а після об'єднання в 1892 р. з компанією «Томсон-Х'юстон Електрик компані», заснованою іншим видатним американським винахідником – Е. Томсоном, отримала свою сучасну назву. З самого заснування компанія була першопрохідником у багатьох галузях науки та техніки, місцем розвитку технологій з'єднання та технічного контролю. На сьогодні до складу компанії входять ряд підприємств, що виробляють засоби неруйнівного контролю: Krautkramer, Seifert, AGFA NDT, Everest VIT, Hocking NDT та ін.



16 листопада 1990 р. на Установчій конференції, що відбулась в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона, утворене Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД) – творча громадська організація, яка об'єднує науковців, інженерів і робітників різних організацій, підприємств і лабораторій, професійна діяльність яких пов'язана з неруйнівним контролем та технічною діагностикою. Організаційну підтримку ініціативній групі надали Спілка наукових та інженерних об'єднань України та Національна Академія наук України. Установча конференція прийняла Статут Товариства, обрала правління та голову (проф. В.О. Троїцький). Товариство зареєстроване в Міністерстві юстиції України як всеукраїнське громадське об'єднання.

18 листопада 1885 р. випробувано перший в історії мотоцикл з двигуном внутрішнього згоряння, Daimler Reitwagen, конструкції німецьких інженерів Готтліба Даймлера і Вільгельма Майбаха. Бензиновий карбюраторний двигун мав потужність 1,5 к.с. і був встановлений на дерев'яній рамі з дерев'яними колесами. На перших випробуваннях мотоцикл розвинув швидкість 12 км/год. У цьому ж році він був запатентований Даймлером як «машина для верхової їзди з газовим двигуном». Таким чином, мотоцикл в сучасному розумінні з'явився на рік раніше першого бензинового автомобіля. Мотоцикл є однією з найбільш доступних форм автотранспорту. У світі станом на 2002 р. було приблизно 205 мільйонів мотоциклів, або 33 мотоцикла на 1000 чоловік.



23 листопада 2022 р. на засіданні Президії НАН України було прийнято рішення про присудження Золотої медалі ім. Б.Є. Патона НАН України. За результатами конкурсу 2022 р. нагороду було присуджено заступнику директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона академіку НАН України Л.М. Лобанову за створення технологій бездеформаційного зварювання виробів ракетно-космічної техніки та розроблення й впровадження методів лазерної інтерферометрії для оцінювання якості зварних з'єднань. Слід зазначити, що Золота медаль ім. Б.Є. Патона НАН України була присуджена вперше. Вона була заснована у 2020 р. з метою увічнення пам'яті академіка Б.Є. Патона.



25 листопада 1896 р. було ухвалено рішення про заснування Київського політехнічного інституту на нараді почесних громадян міста, представників міської влади, адміністрації Південно-західної залізниці, інженерів та промисловців. Згідно з ухваленим протоколом навчальний заклад мав бути політехнічним інститутом за типом і складатися з кількох відділів різних спеціальностей, за прикладом політехнікумів у Цюриху, Мюнхені, Відні тощо. На сьогодні це один із найбільших університетів України за кількістю студентів з широким спектром спеціальностей і освітніх програм для підготовки фахівців з технічних і гуманітарних наук. Успішно працює в університеті кафедра ПЗНК – Прилади і засоби неруйнівного контролю.



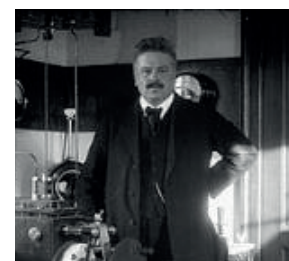
27 листопада 1918 р. народився Борис Євгенович Патон (1918-2020 рр.) – видатний український вчений у галузі зварювання, металургії та матеріалознавства. Видатний громадський діяч та талановитий організатор науки, академік Національної академії наук України, Академії наук СРСР, Президент НАН України, Міжнародної асоціації академії наук, директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, заслужений діяч науки та техніки УРСР, лауреат Ленінської та Державних премій СРСР та України, двічі Герой Соціалістичної Праці, Герой України. Разом зі своїм батьком, Євгеном Оскаровичем Патonom, створив всесвітньо відому патонівську науково-інженерну школу.



28 листопада 1660 р. засновано Лондонське королівське товариство з розвитку знань про природу – провідне наукове товариство Великої Британії, одне з найстаріших у світі. Перший президент – сер Роберт Морей. Лондонське королівське товариство, будучи незалежною від урядових наукових установ, відіграє важливу роль в організації та розвитку наукових досліджень Великої Британії та діє як дорадчий орган при розв'язанні основних питань наукової політики, виступаючи як національна Академія наук. У 1665 р. Лондонське королівське товариство почало видавати перший у світі журнал, присвячений виключно науці – «Philosophical Transactions of the Royal Society», запровадивши процедуру рецензування, яка зараз широко практикується у наукових журналах.



1 грудня 1898 р. данський інженер Вальдемар Поульсен (1869-1942 рр.) запатентував перший прилад для магнітного запису звуку – телеграфон. У першому приладі використовувався металевий (сталевий) дріт як носій. У 1928 р. в Німеччині з'явилась магнітна стрічка, але базовий принцип аналогового запису звуку не змінився: з підсилювача сигнал подається на записувальну головку, повз яку з постійною швидкістю переміщується носій (стрічка або дріт), у результаті чого носій намагнічується відповідно до звукового сигналу. При відтворенні звуку носій з тією ж швидкістю протягується повз головку відтворення. У середині XX століття з'явився магнітографічний метод неруйнівного контролю, заснований на магнітному запису на стрічку.





6–7 грудня 1994 р. в одній з аудиторій корпусу 20 Київського політехнічного інституту було проведено першу в Україні виставку засобів неруйнівного контролю. Організаторами виставки були кафедра «Прилади і системи неруйнівного контролю» КПІ (проф. С.М. Маєвський) та НВФ «Ультракон» (В.І. Павлій, І.В. Павлій). На виставці було продемонстровано засоби ультразвукового, магнітного, вихрострумового, капілярного контролю, товщинометрії, твердометрії, вібродіагностики тощо. Одночасно з виставкою було проведено семінар, де виступили розробники з Києва, Харкова, Дніпра, Донецька, Львова, Миколаєва і Севєродонецька.



17 грудня 1897 р. на Харківському паровозобудівному заводі збудували перший український паровоз (останній у Харкові випустили у 1968 р.). Підприємство засноване 1895 р. поруч із харківським Балашовським вокзалом як паровозобудівний завод, і було одним із найбільших у Російській імперії та СРСР. Згодом стали випускати двигуни (з 1911 р.; зокрема, дизель-генератори), сільськогосподарську (1909 р.) та вугледобувну техніку (з 1922 р.; зокрема, рудникові електровози), трактори (1924 р.), тепловози, танки та тягачі (1927 р.). Нині ДП «Завод імені В. О. Малишева» пропонує і реалізує на зовнішньому ринку бронетехніку: основні бойові танки Т-84У «Оплот», бронетранспортери БТР-3 та БТР-4, здійснює модернізацію танків, випущених у колишньому СРСР – Т-54, Т-55, Т-62, Т-64, Т-72, Т-80; бронетранспортерів – БТР-60, БТР-70.



21 грудня 1928 р. Президент США Джон Калвін Кулідж (1872–1933 рр.) підписав білль, що дав змогу здійснити проект будівництва залізобетонної греблі на річці Колорадо. Перша електрика була вироблена генераторами станції вже через вісім років. Гребля Гувера (так вона названа на честь 31-го президента США, який відіграв важливу роль у її спорудженні) – унікальна гідротехнічна арочна споруда заввишки 221 м. Вода до турбін гідроелектростанції надходить з висоти 100 м крізь сталеві циліндричні колодязі, зібрані зі зварних сегментів. Греблю включено до Національного реєстру історичних місць США.



22 грудня 1895 р. німецький фізик Вільгельм Рентген опромінив руку своєї дружини «Х-променями», отримавши один із перших рентгенівських знімків. Рентген 8.11.1895 р. відкрив короткохвильове електромагнітне випромінювання, відоме нині як рентгенівське проміння – досягнення, завдяки якому отримав першу Нобелівську премію з фізики у 1901 р. Його відкриття мало величезний вплив на подальший розвиток фізики, зокрема призвело до виявлення радіоактивності та сприяло швидкому практичному застосуванню винаходу у медицині та техніці. На сьогодні радіаційний контроль (радіографічний, радіометричний, радіоскопічний) є основним методом діагностування металопродукції.



23 грудня 1913 р. відбувся перший політ літака Ігоря Сікорського «Ілля Муромець». Це загальна назва декількох серій чотиримоторних біпланів, що випускалися в Російській імперії на Російсько-Балтійському вагонному заводі протягом 1913–1918 рр. Уперше в світовій практиці в даних літаках був застосований суцільний фюзеляж, який містить кабінку в обтічному корпусі. Цей літак поставив низку рекордів: вантажопідйомності, кількості пасажирів, часу і максимальної висоти польоту. Є першим у світі бомбардувальником, який вироблявся масово. Першими пілотами повітряних кораблів стали інструктори Гатчинської авіашколи. Пілотуванню їх вчив особисто конструктор Ігор Сікорський на кораблі «Київському», який згодом став навчальним.



24 грудня 1993 р. в Києві на установчій конференції проголошено створення Української асоціації фахівців з неруйнівного контролю «ОКО». Головною метою її діяльності названо вирішення питань контролю якості продукції, оцінки технічного стану обладнання підприємств, а також забезпечення підприємств засобами контролю. Президентом обраний проф. І.П. Білокур. У наступні роки Асоціацію «ОКО» було реформатовано. Вона об'єднала провідні підприємства України в розробці засобів неруйнівного контролю: ТОВ «Ультракон-Сервіс», ТОВ «Промприлад», ПрАТ УкрНДІНК. На сьогодні Асоціацію «ОКО» очолює Т.М. Луценко.