

УДК: 669.14.018.294:669.017
DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.31.3

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ЗА ПЕРЕТИНОМ ЗАЛІЗНИЧНОЇ РЕЙКИ ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ

БАБАЧЕНКО О. І.¹, д. т. н.,
КОНОНЕНКО Г. А.², к. т. н.,
ФІЛОНЕНКО Н. Ю.³, к. ф-м. н.,
ХУЛІН А. М.^{4*}, к. т. н.

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105

³ Кафедра медико-біологічної фізики і інформатики, Державний заклад «Дніпропетровська медична академія МОЗ України», пл. Соборна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 713-59-51, e-mail: natph2016@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1219-348X

⁴ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: ahulin81@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6707-0877

Анотація. Мета. Розробка моделі зміни температури за перетином в процесі термічного зміцнення за чинною в Україні технологією, для наступного вдосконалення режимів термічної обробки рейок, виготовлених зі сталі, хімічний склад якої відповідає вимогам чинного ДСТУ 4344:2004. **Методика.** Зразок досліджуваної сталі підлягав випробуванню на прогартуваність методом торцевого гартування (за методом Джомені) (ГОСТ 5657). Моделювання гарту рейки проводилося за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ) в середовищі програмного комплексу ANSYS. **Результати.** Результатом моделювання процесу загартування залізничної рейки є закономірності зміни температури металу в процесі її прискореного охолодження. Встановлено, що на поверхні катання рейки швидкість охолодження металу досить висока, близько 12 °C/с. Однак на глибинах понад 11 мм рейка не встигає охолотитися до температур близько 500-550 °C, які необхідні для отримання тонкодисперсної перлітної структури. Замість цього температура металу після загартування становить понад 700°C, тобто сталь продовжує перебувати в аустенітному стані. Це вказує на необхідність коригування способів і режимів термічної обробки рейок в сторону більш інтенсивного охолодження внутрішніх шарів головки рейки. **Наукова новизна.** Установлені закономірності зміни температури за перетином залізничної рейки в процесі термічної обробки. **Практична значущість.** Дана модель може бути застосована для визначення необхідних параметрів охолодження в процесі термічного зміцнення з метою отримання необхідного структурного стану і комплексу властивостей. Це в свою чергу дозволить вибрати оптимальні режими диференційованої термічної обробки з отриманням максимально однорідного структурного стану і, як наслідок, властивостей за перетином головки рейки.

Ключові слова: Залізнична рейка; модель розподілу температури по перетину виробу; швидкість охолодження; термічна обробка; твердість

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ПО СЕЧЕНИЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО РЕЛЬСА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

БАБАЧЕНКО А. И.¹ д. т. н.,
КОНОНЕНКО А. А.², к. т. н.,
ФИЛОНЕНКО Н. Ю.³, к. ф-м. н.,
ХУЛИН А. Н.^{4*}, к. т. н.

¹ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, ул. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепр, Украина, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, ул. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепр, Украина, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105

³ Кафедра медико-биологической физики и информатики, Государственное учреждение «Днепропетровская медицинская академия МЗ Украины», пл. Соборная, 4, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056) 713-59-51, e-mail: natph2016@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1219-348X

⁴ Отдел проблем деформационно-термической обработки конструкционных сталей, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, ул. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Днепр, Украина, тел. + 38 (056) 790-05-14, e-mail: ahulin81@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6707-0877

Аннотация. *Цель.* Разработка модели изменения температуры по сечению в процессе термического упрочнения по действующей в Украине технологии, для последующего совершенствования режимов термической обработки рельсов, изготовленных из стали, химический состав которой соответствует требованиям действующего ДСТУ 4344: 2004. *Методика.* Образец исследуемой стали подлежал испытанию на прокаливаемость методом торцевой закалки (по методу Джоменн) (ГОСТ 5657). Моделирование закалки рельсы проводилось с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в среде программного комплекса ANSYS. *Результаты.* Результатом моделирования процесса закалки железнодорожного рельса являются закономерности изменения температуры металла в процессе его ускоренного охлаждения. Установлено, что на поверхности катания рельса скорость охлаждения металла достаточно высока, около 12°C/с. Однако на глубинах более 11 мм рельс не успевает охладиться до температуры около 500-550°C, которые необходимы для получения тонкодисперсной перлитной структуры. Вместо этого температура металла после закалки составляет более 700°C, то есть сталь продолжает находиться в аустенитном состоянии. Это указывает на необходимость корректировки способов и режимов термической обработки рельсов в сторону более интенсивного охлаждения внутренних слоев головки рельса. *Научная новизна.* Установлены закономерности изменения температуры по сечению железнодорожного рельса в процессе термической обработки. *Практическая значимость.* Данная модель может быть применена для определения необходимых параметров охлаждения в процессе термического упрочнения с целью получения необходимого структурного состояния и комплекса свойств. Это в свою очередь позволит выбрать оптимальные режимы дифференцированной термической обработки с получением максимально однородного структурного состояния и, как следствие, свойств по сечению головки рельса.

Ключевые слова: Железнодорожный рельс; модель распределения температуры по сечению изделия; скорость охлаждения; термическая обработка; твердость

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE THERMAL FIELD AT THE INTERSECTION OF A RAILROAD RAIL DURING HEAT TREATMENT

BABACHENKO O. I.¹, Dr. Tech. Sc.,
KONONENKO G. A.², Ph. D. in Engineering sciences,
FILONENKO N. Yu.³, Ph. D. in Physics-mathematical sciences,
KHULIN A. M.^{4*}, Ph. D. in Engineering sciences

¹ The department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-2869-3478

² The department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105

³ The Department of Medical Physics and Informatics, State institution "Dnipropetrovsk Medical Academy of Ministry of Health of Ukraine", sq. Sobornaya, 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 713-59-51, e-mail: natph2016@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1219-348X

⁴ The department of structural steels' deformation and heat treatment problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: ahulin81@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6707-0877

Abstract. Goal. The Development of the temperature change model by intersection in the process of thermal strengthening under the current technology in Ukraine, for the further improvement of thermal processing modes of rails made from steel, the chemical composition of which meets the requirements of the current DSTU 4344: 2004. **Method.** A sample of the investigated steel was subjected to a hardenability test by end quenching (Jominy test) (GOST 5657). The simulation of the rail's quenching was carried out using the finite element method (MKE) in the environment of the ANSYS software complex. **Results.** The simulation of the quenching process of the rail is the regularity of the temperature change of the metal in the process of its accelerated cooling. It is established that on the rail's rolling surface or tread, the cooling rate of the metal is quite high, namely about 12°C/s. However, at depths of more than 11 mm, the rails do not have time to cool down to temperatures of about 500-550°C, which are necessary for obtaining a fine pearlite structure. Instead, the temperature of the metal after quenching is more than 700°C, that is the steel continues

to be in austenitic state. This indicates the need to adjust the methods and modes of rails' heat treatment in the direction of more intense cooling of the inner layers of the rail's head. **Scientific novelty.** The regularities of the temperature changing at the intersection of the rail in the process of heat treatment are established. **Practical significance.** This model can be used to determine the required cooling parameters in the process of thermal strengthening in order to obtain the necessary structural state and complex of properties. This, in its turn, will allow us to choose optimal modes of differentiated heat treatment to obtain the maximum homogeneous structural state and, as a consequence, the properties at the intersection of the head of the rail.

Keywords: railway rail; model of temperature distribution by intersection of the product; cooling rate; heat treatment; hardness

Вступ. Безпека руху поїздів, безпека громадян і вантажів в значній мірі залежать від справності утримання, якості, стійкості залізничного полотна, зокрема, головного його елемента - рейок. Проблема підвищення працездатності рейок сьогодні стає ще більш актуальною. В сучасних умовах експлуатації залізничних доріг існує тенденція до збільшення навантаження на вісь при русі важкого транспорту і швидкості руху пасажирських поїздів.

Експлуатаційна стійкість залізничних рейок багато в чому визначається структурою і механічними властивостями металу, з якого їх виготовляють. У зв'язку з цим зростає роль досліджень в області металознавства і термічної обробки сталей, застосування результатів яких здатне забезпечити тривалу міцність виробів при експлуатації.

Основним дефектом при нормальній роботі залізничних рейок є їх знос. Для забезпечення високого опору зношуванню, твердість рейки має бути високою, при чому не лише на поверхні, а й у центральних об'ємах її головки. Крайні світові виробники досягають твердості на глибині 10 мм від поверхні кочення головки – не менше 360 HB (EN 13674-1:2011 для марки R370CrHT) та не менше 390

HB (EN 13674-1:2011 для марки R400HT) [1]. Українським стандартом ДСТУ 4344:2004 вимагається твердість на глибині 11 мм – не менше 321 HB [2]. При цьому закордонні стандарти нормують також твердість на глибині 20 мм: не менше 340 HB (EN 13674-1:2011 для марки R370CrHT) та не менше 370 HB (EN 13674-1:2011 для марки R400HT); на глибині 22 мм: не менше 352 HB (ГОСТ Р 51685-2013) [3]. Такий рівень твердості українськими виробниками не досягається. При цьому однією з вимог ДСТУ 4344:2004 є відсутність структури мартенситу в головці рейки.

Мета. Розробка моделі зміни температури за перетином в процесі термічного зміцнення за чинною в Україні технологією, для наступного вдосконалення режимів термічної обробки рейок, виготовлених зі сталі, хімічний склад якої відповідає вимогам чинного ДСТУ 4344:2004.

Матеріал для досліджень. Сталь марки K76Ф виробництва ПАТ «МК «Азовсталь». Зразки для відпрацювання параметрів моделі були виготовлені з металу головки рейки типу Р65. Хімічний склад досліджуваної сталі наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваної сталі для залізничних рейок, мас. %/

Chemical composition of the investigated steel for railway rails, mass. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V
0,80	0,25	0,97	0,011	0,007	0,04	0,03	0,03	0,006	0,005	≤0,01	0,055

Результати досліджень.

Для досягнення поставленої мети, в роботі було розроблено методику для визначення необхідних швидкостей охолодження, що полягає в наступному. Зразок досліджуваної сталі підлягав випробуванню на прогартуваність [4] методом торцевого гартування (за методом Джомені). Було встановлено закономірність зміни твердості від відстані до торцю, з якого проводилося охолодження, та визначено місця, в яких твердість відповідала вимогам світових виробників. На наступному етапі досліджень було зачеканено термопари у визначених точках та записано криві охолодження, що дозволило визначити швидкості охолодження: максимально припустиму для поверхні кочення головки рейки, при якій не відбувається утворення мартенситу (9 мм: середня $V_{\text{охол.}}$ в інтервалі 900...500°C ~12,5°C/сек, в інтервалі 900...20°C ~8°C/сек); мінімально необхідну для осевих ділянок на глибині ≥ 20 мм для

досягнення твердості на рівні світових аналогів (43,5 мм: середня $V_{\text{охол.}}$ в інтервалі 900...500°C ~2°C/сек, в інтервалі 900...20°C ~1,5°C/сек); мінімально необхідну для осевих ділянок на глибині 11 мм для досягнення твердості на рівні вимог українського стандарту (55,5 мм: середня $V_{\text{охол.}}$ в інтервалі 900...500°C ~1,5°C/сек, в інтервалі 900...20°C ~1°C/сек) [5].

Результати цих досліджень були використані як початкові умови для математичного моделювання процесу диференційованої термічної обробки головки рейки при різних схемах подачі охолоджувача (тепловідведення), розробки методики розрахунку технологічних параметрів їх диференційованого охолодження при зміцнюючій термічній обробці.

Рейки на підприємствах України піддаються диференційованої термічній обробці - нагрів тільки головки рейки з подальшим прискореним

охлаждения [6]. Для аналізу існуючої технології виробництва залізничних рейок в умовах ПАТ «МК«Азовсталь» з точки зору формування в них температурних полів при термічній обробці і розуміння причини неможливості в даний час виробляти продукцію, яка відповідає світовим вимогам, була розроблена математична модель розподілу теплових полів за перетином рейки.

Моделювання гарту рейки проводилося за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ) в середовищі програмного комплексу ANSYS. МКЕ є чисельним методом, який дозволяє зводити вирішення системи диференціальних рівнянь до системи найпростіших алгебраїчних рівнянь.

Результатом моделювання процесу загартування залізничної рейки є графік зміни температури, а також залежність коефіцієнта тепловіддачі охолоджувача (води) від температури металу. Для вирішення кожної теплової задачі в ANSYS була написана підпрограма мовою APDL, що дозволяє автоматизувати моделювання.

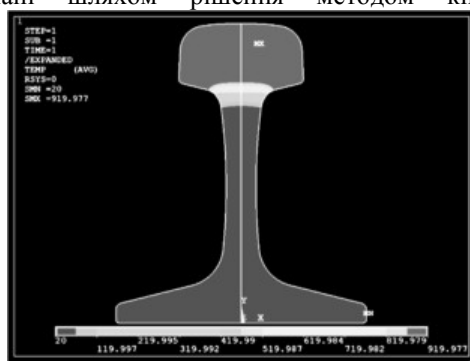
Значення температури головки залізничної рейки в різних її зонах після гарту протягом 70 секунд були отримані шляхом рішення методом кінцевих

елементів диференціального рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є):

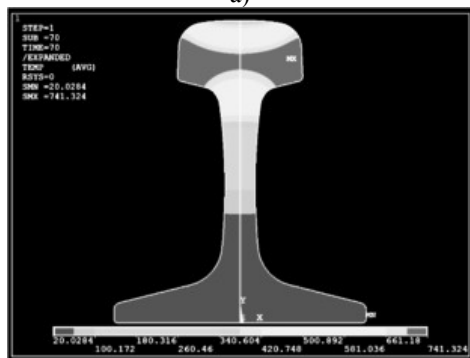
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho},$$

де t - температура; τ - час; a - коефіцієнт температуропроводності; $\nabla^2 t$ - оператор Лапласа (сума других частинних похідних); q_v - кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму в одиницю часу; c - теплоємність; ρ - щільність.

Дана модель може бути застосована для визначення необхідних параметрів охолодження в процесі термічного зміцнення з метою отримання необхідного структурного стану і комплексу властивостей. Це в свою чергу дозволить вибрати оптимальні режими диференційованої термічної обробки з отриманням максимально однорідного структурного стану і як наслідок властивостей за перетином головки рейки. Результати математичного моделювання процесу термічного зміцнення рейок в умовах ПАТ «МК«Азовсталь» представлені на рис. 1 і 2.



а)



б)

Рис. 1. Результати розрахунку за математичною моделлю розподілу температури по перетину рейки до (а) і після (б) прискореного охолодження/

Results of calculation by mathematical model of temperature distribution along the intersection of the rails to (a) and after (b) accelerated cooling

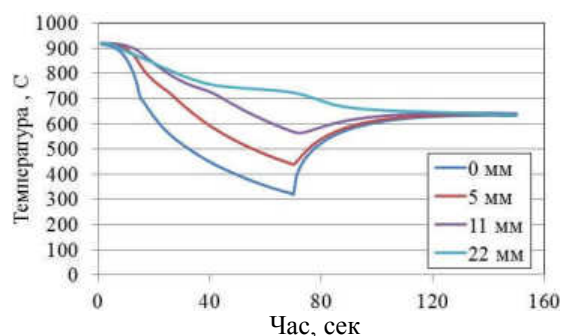


Рис. 2. Зміна температури по перетину головки рейки в процесі термічної обробки (гартування і самовідпуск)/

Temperature change at the intersection of the rail's head during the heat treatment (quenching and self-tempering)

З рис. 2 видно, що на поверхні катання рейки швидкість охолодження металу досить висока, близько 12 °C/с. Однак на глибинах понад 11 мм (верхня крива) рейок не встигає охолотитися до температур близько 500-550°C, які необхідні для отримання тонкодисперсної перлітної структури. Замість цього температура металу після загартування становить понад 700 °C, тобто сталь продовжує перебувати в аустенітному стані. Це вказує на необхідність коригування способів і режимів ТО рейок в сторону більш інтенсивного охолодження внутрішніх шарів головки рейки.

Висновки.

1. В роботі розроблена математична модель, яка дозволяє прогнозувати зміну температури, швидкостей охолодження по перетину головки рейки в процесі його термічної обробки. Модель може бути використана для визначення необхідних параметрів

загартування рейки з метою отримання необхідного структурного стану і комплексу властивостей металу.

2. Показано, що чинна технологія термічного зміцнення не дозволяє отримати твердість осевих ділянок головки рейки на рівні світових аналогів через недостатнє охолодження центральних об'ємів металу: температура металу після загартування становить понад 700 °С.

3. Встановлено, що для забезпечення твердості в осевих ділянках головки рейки на рівні світових аналогів необхідна розробка нових режимів термічної обробки з більш інтенсивним охолодженням або розробка нових сталей для залізничних рейок, що мають більшу прогартуваність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Railway applications – Track – Rail – Part 1 : Vignole railway rails 46 kg/m and above : EN 13674-1:2011 (E). - [With effect from 2011-08-01]. - Brussels. : European Committee For Standardization, 2011. - 108 p. - (CEN national Members).
2. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови: ДСТУ 4344:2004. - [Чинний від 2005-10-01]. - К. : Держспоживстандарт України, 2005. - 31 с. - (Національний стандарт України).
3. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (EN 13674-1:2011, NEQ): ГОСТ Р 51685–2013. - [Дата введения 2014-07-01]. - М. : Стандартинформ, 2014. - 96 с. - (Национальный стандарт Российской Федерации).
4. Сталь. Метод испытания на прокаливаемость (ГОСТ 5657-69) [Действующий с 01.01.1993]. – М.: Стандартинформ, 2017. - 10 с. - (Национальный стандарт Российской Федерации).
5. Визначення оптимальної швидкості охолодження при термічній обробці залізничних рейок / Бабаченко О.І., Узлов О.В., Пучіков О.В., Хулін А.М., Кононенко Г.А.//Наукові праці 77 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», 2017, С. 302-304
6. Большаков В. И. Технология термической и комбинированной обработки металлопродукции / Большаков В. И., Долженков И. Е., Долженков В. И. - Днепропетровск: Gaudeamus, 2001. - 261 с.

REFERENCES

1. Railway applications – Track – Rail – Part 1 : Vignole railway rails 46 kg/m and above : EN 13674-1:2011 (E). - [With effect from 2011-08-01]. - Brussels. : European Committee For Standardization, 2011. - 108 p. - (CEN national Members).
2. Derzhspozhivstandart Ukraini. Reyki zvychni dlya zaliznits shirokoyi koliiyi. Zagalni tehichni umovi: DSTU 4344:2004. Natsionalnyi standart Ukraini. Chinniy vid 2005-10-01 [National standard of Ukraine. DSTU 4344: 2004. Common rails for wide-gauge railways. General specifications: Effective from 2005-10-01]. Kyiv, 2005, 31 p. (in Ukrainian).
3. Standartinform. Relsy zheleznodorozhnye. Obshie tehicheskie usloviya (EN 13674-1:2011, NEQ): GOST R 51685–2013. [National Standard of the Russian Federation GOST R 51685–2013. Railway rails. General specifications]. Moscow, 2014, 96 p. Available at: <http://gostexpert.ru/data/files/51685-2013/68407.pdf>. (in Russian).
4. Standartinform. Stal. Metod ispytaniya na prokalivaemost: GOST 5657-69 [State standard of the USSR GOST 5657-69. Steel. Test method for hardenability]. Moscow, 1993, 10 p. Available at: <http://internet-law.ru/gosts/gost/18039/>. (in Russian).
5. Babachenko O.I., Uzlov O.V., Puchikov O.V., Hulin A.M. and Kononenko G.A. Vyznachennya optimalnoyi shvidkosti oholodzhennya pri termichnij obrobci zaliznichnih rejok. Naukovi praci 77 Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenciyi «Problemi i perspektivi rozvitku zaliznichnogo transportu» [Determination of the optimal cooling rate for the thermal treatment of railway rails. Scientific papers 77 International Scientific and Practical Conference «Problems and Prospects for the Development of Railway Transport»]. Dnipro: DNUZT, 2017, P. 302-304. (in Ukrainian).
6. Bolshakov V.I., Dolzhenkov I.E. and Dolzhenkov V.I. Tehnologiya termicheskoy i kombinirovannoy obrabotki metalloprodukcii [Technology of thermal and combined processing of metal products]. Dnipro: Gaudeamus, 2001, 261 p. (in Russian).

Стаття рекомендована до друку д-ром техн. наук, с.н.с. С. В. Бобирем (Україна); д-ром техн. наук, проф. Д. М. Тогобицькою (Україна)