

УДК 621.78:669.15'74-194

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.42.631

## ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОТРИМАННЯ ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНОГО ДРОТУ ЗІ СТАЛІ ГАДФІЛЬДА

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
СОБОЛЕНКО М. О.<sup>2</sup>, асист.,  
ЧМЕЛЬОВА В. С.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ПЕРЧУН Г. І.<sup>4\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-8653-5262.

<sup>3</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 698-21-52, ORCID ID: e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID 0000-0001-9013-4659

**Анотація.** *Мета дослідження* – розроблення удосконаленої технології виробництва дроту малих перетинів із високоміцної аустенітної сталі із застосуванням методів гарячої і холодної пластичної деформації і термічної обробки. *Методика.* Структурні дослідження сталі Гадфільда 110Г13Л проводили методом світлової металографії. Гарячу деформацію литої заготовки здійснювали куванням на молоті типу МА 4134 і гарячою прокаткою на однокільовому двовалковому стані за температури 1 000...1 030 °С. Термічну обробку виконували в потоці волочильного стану з нагріванням в індукторі до температур рекристалізаційного відпалу і подальшим гарту. *Результати.* Аналіз експериментальних досліджень показав принципову можливість отримання зі сталі Гадфільда холоднодеформованого дроту діаметром 2...5 мм, який може бути використаний в автоматах для зварювання та наплавлення. *Наукова новизна.* Розроблено режим, що включає нагрівання, комбінацію деформаційних операцій, а також регламентоване нагрівання і водяне охолодження за принципом вакансійного гарту, що в комплексі дає ефект дрібнозернистої структури, істотно знижуючи інтенсивність деформаційного зміцнення тонкого дроту з високоміцних сталей аустенітного класу. *Практична значимість.* Розроблена технологічна схема значно знижує циклічність виробництва, зменшує час циклу і забезпечує суттєву економію ресурсів.

**Ключові слова:** *дріт; сталь Гадфільда; гаряча і холодна деформація; деформаційне зміцнення; вакансійний гарт; відпал рекристалізаційний, технологічна схема*

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
СОБОЛЕНКО М. А.<sup>2</sup>, асист.,  
ЧМЕЛЛЕВА В. С.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ПЕРЧУН Г. И.<sup>4\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-8653-5262

<sup>3</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9013-4659

**Аннотация.** *Цель исследования* – разработка усовершенствованной технологии производства проволоки малых сечений из высокопрочной аустенитной стали с использованием горячей и холодной деформации и термической обработки. *Методика.* Структурные исследования стали Гадфильда 110Г13Л проводили методом световой металлографии. Гарячую деформацию литой заготовки осуществляли ковкой на молоте типа МА 4134

и горячей прокаткой на одноклетевом двухвалковом стане при температуре 1 000...1 030 °С. Термическую обработку выполняли в потоке волочильного стана с нагревом в индукторе до температур рекристаллизационного отжига и последующей закалкой. **Результаты.** Анализ экспериментальных исследований показал принципиальную возможность получения из стали Гадфильда холоднодеформированной проволоки диаметром 2...5 мм, которая может быть использована в автоматах для сварки и наплавки. **Научная новизна.** Разработан режим, включающий нагрев, комбинацию деформационных операций, а также регламентированный нагрев и водяное охлаждение по принципу вакансионной закалки, что в комплексе дает эффект мелкозернистой структуры, значительно снижая интенсивность деформационного упрочнения тонкой проволоки из высокопрочных сталей аустенитного класса. **Практическая значимость.** Разработанная технологическая схема существенно снижает цикличность производства, сокращает время цикла и обеспечивает значительную экономию ресурсов.

**Ключевые слова:** проволока; сталь Гадфильда; горячая и холодная деформация; деформационное упрочнение; рекристаллизационный отжиг; вакансионная закалка; технологическая схема

## TECHNOLOGY OF PRODUCING COLD DEFORMABLE WIRE FROM HADFIELD STEEL

GUL Yu.P.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
SOBOLENKO M.O.<sup>2</sup>, *Assist.*,  
CHMELEVA V.S.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
PERCHUN G.I.<sup>4\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-57, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID 0000-0003-3754-7731

<sup>2</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua), ORCID 0000-0002-8653-5262

<sup>3</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 320-92-67, e-mail: [kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua](mailto:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua)

<sup>4\*</sup> Department of Metal Heat Treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave. 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 698-21-52, e-mail: [perchun\\_galina@ukr.net](mailto:perchun_galina@ukr.net), ORCID 0000-0001-9013-4659

**Abstract. Purpose.** Development of an improved technology for the production of small cross-section wire from high-strength austenitic steel using hot and cold deformation and heat treatment. **Methodology.** Structural studies of Hadfield steel 110G13L were carried out by light metallography. Hot deformation of the cast billet was carried out by forging on a hammer of type MA 4134 and hot rolling on a single-strand two-roll mill at a temperature of 1 000...1 030 °C. Heat treatment was performed in a drawing mill stream with heating in the inductor to the temperatures of recrystallization annealing and subsequent quenching. **Results.** An analysis of experimental studies showed the fundamental possibility of producing cold-deformed wire from Hadfield steel with a diameter of 2...5 mm, which can be used in automatic machines for welding and surfacing. **Originality.** A mode has been developed that includes heating, a combination of deformation operations, as well as regulated heating and water cooling according to the principle of vacancy hardening, which together gives the effect of a fine-grained structure, significantly reducing the intensity of strain hardening of thin wires from high-strength austenitic steel. **Practical value.** The developed technological scheme significantly reduces the production cycle, reduces the cycle time and provides significant resource savings.

**Keywords:** wire; Hadfield steel; hot and cold deformation; strain hardening; recrystallization annealing; vacancy hardening; technological scheme

**Вступ.** Поєднання високої в'язкості і зносостійкості забезпечило широке застосування сталі Гадфілда в машинобудуванні, гірничовидобувній, металургійній, хімічній, будівельній, автомобілебудівній та інших галузях промисловості [1]. Відомо, що ця сталь застосовується, як правило, в литому стані, оскільки її пластичні властивості і,

особливо, висока швидкість деформаційного зміцнення істотно ускладнюють процеси формозміни шляхом гарячої і, тим більше, холодної деформації [2–6]. У той же час, ефективно застосування сталі Гадфілда як наплавного матеріалу і для зварювання з використанням високошвидкісного автоматизованого обладнання може бути забезпечене тільки у разі отримання дроту з

неї діаметром до 2 мм. Слід зазначити, що в ГОСТ 977-88 передбачено використання сталей типу 110Г13Л у вигляді холоднодеформованого дроту саме зазначених діаметрів. Однак аналіз існуючої науково-технічної інформації не дав результатів відносно існування стабільної технології виробництва електродного дроту з подібних марок сталі.

**Мета дослідження,** результати якого наведені у статті, – розроблення вдосконаленої технології отримання з високоміцної аустенітної сталі дроту малих перетинів із застосуванням гарячої і холодної пластичної деформації та термічної обробки.

**Матеріал і методика дослідження.** Вихідним матеріалом стали циліндричні заготовки діаметром 20 мм і квадратні заготовки розміром 20 × 20 мм зі сталі 110Г13Л, отримані шляхом розливання в спеціальні земляні форми. Хімічний склад сталі наведено в таблиці. Структуру сталі вивчали методом світлової металографії.

**Експериментальна частина.** В основу експериментальної схеми були покладені

принципи наскрізної технології виробництва металопродукції, починаючи з раціонального формування структури литих заготовок, урахування пластифікуючого впливу збільшення відношення вільної поверхні до об'єму заготовки, а також використання у процесі термічної обробки вакансійного гарту, що істотно знижує інтенсивність деформаційного зміцнення під час холодної деформації сталей аустенітного класу [7].

Кристалізація у відливках малого перетину відбувається за більш високих швидкостей охолодження, ніж у великих, що забезпечувало певне диспергування отриманої структури, хоча не усувало виділення карбідів по межах зерен аустеніту. Тому перед гарячою деформацією виконували термічну обробку литих заготовок за режимом, який включав нагрів до 1 050 °С з витримкою 30 хв і наступне охолодження у воді. Після такої обробки отримували практично гомогенну аустенітну структуру сталі (рис. 1б).

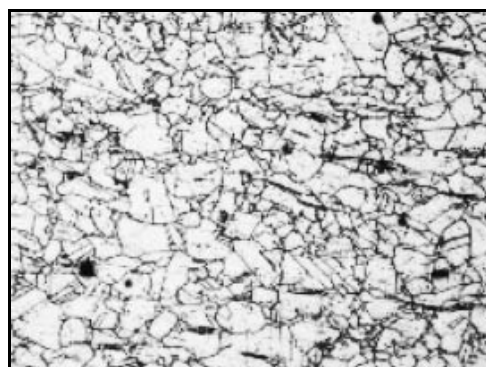
Таблиця

Хімічний склад дослідженої сталі 110Г13Л / Chemical composition of the investigated steel 110Г13Л

№ заготовки	Масова частка елементів, %						
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu
I	1,49	10,9	1,68	0,055	0,011	0,81	0,10
II	1,10	12,4	0,92	0,055	0,004	0,11	0,03



a



б

Рис. 1. Мікроструктура заготовок зі сталі 110Г13Л: а – у вихідному литому стані; б – після термічної обробки, ×500 / Fig. 1. Microstructure of steel billets : 110Г13Л: a – in the original cast condition; b – after thermal processing, ×500

Гарячу пластичну деформацію заготовок проводили двома способами: куванням на молоті типу МА 4134 і гарячою прокаткою на одноклітьовому двовалковому стані за температури 1 000...1 030 °С. Таким чином отримували заготовки діаметром 8,5 мм і довжиною 1 700 мм з використанням одиничних деформацій від 5 до 17 %. Перед кожною наступною деформацією здійснювали термічну обробку з метою розчинення карбідів, що виділяються під час

деформації, і отримання однорідної аустенітної структури. Холодну деформацію заготовок волочінням проводили на стані SKET 2500/1 зі швидкістю 195...280 м/хв за схемою, наведеною на рисунку 2. Дріт діаметром 2 мм отримували за 4...5 циклів деформації з проміжними термічними обробками. Послідовне виконання вказаних операцій дало в результаті дріт діаметром 2 мм без обривів та з високою чистотою поверхні.

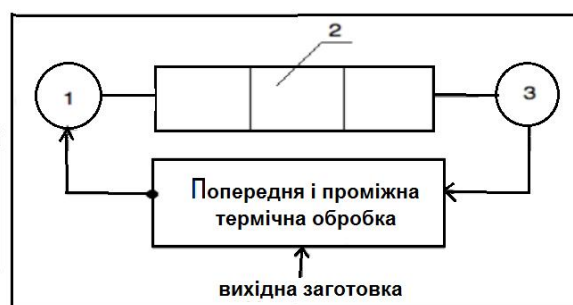


Рис. 2. Технологічна схема отримання дроту зі сталі 110Г13Л холодним волочінням :  
1 – розмотувальний пристрій, 2 – деформувальний пристрій, 3 – намотувальний пристрій /  
Fig. 2. Technological scheme of cold wire drawing of steel 110G13L:  
1 – unwinding device, 2 – deforming device, 3 – winding device

### Результати експерименту та їх аналіз.

На основі аналізу проведених експериментальних досліджень показано принципову можливість виготовлення зі сталі Гадфільда 110Г13Л холоднодеформованого дроту шляхом використання литих заготовок малого поперечного перетину і поєднання гарячої і холодної пластичної деформації з проміжними термічними обробками, які «відновлюють» однорідну аустенітну структуру перед наступним циклом деформації. Недолік застосованого способу полягає в тому, що він характеризується порівняно малими значеннями одиничних деформацій і вимагає великої кількості проміжних термічних обробок. Здійснення деформації заготовки поза технологічним потоком істотно зменшує продуктивність процесу і підвищує витрати на його здійснення.

Тому пропонується у промисловому варіанті отримання холоднодеформованих виробів (наприклад, дроту зі сталі Гадфільда) здійснювати за такою технологічною схемою.

1. *Отримання литих заготовок* із розміром поперечного перетину 20...30 мм. Для подальшої гарячої деформації цю операцію слід здійснювати з використанням машин безперервного розливання вертикального типу.

2. *Примусове охолодження.* Режим охолодження в кристалізаторі повинен забезпечувати однорідну аустенітну структуру, що дозволить відмовитися від попередньої термічної обробки.

3. *Гаряча деформація* на сортовому стані, зазвичай розташованого в безпосередній близькості до пристроїв, які транспортують заготовки, що виходять з кристалізатора.

4. *Істотна відмінність* технології гарячої деформації в зазначеному стані – це наявність пристроїв для швидкісного нагрівання (індуктора) і охолодження заготовок між клітьями. Функція швидкісного високотемпературного нагрівання полягає у швидкому розчиненні частинок карбідів, що виділяються під час деформації, а швидкісне охолодження забезпечує деформацію за оптимальної

температури і, певною мірою, – ефект вакансійного гартування [8]. У сукупності така термічна обробка позитивно впливає на пластичність заготовки, яка деформується, що дозволяє збільшити величини одиничних обтиснень і зменшити їх кількість.

5. *Холодна деформація.* Її доцільно також виконувати циклічно (деформація + нагрів) безпосередньо в потоці волочильного стану. Термічна обробка проводиться за режимом швидкісного рекристалізаційного відпалу з використанням нагріву внутрішнім теплоносієм (наприклад, в індукторі), і наступного охолодження зі швидкістю, яка забезпечує ефект вакансійного гарту і отримання чистої поверхні заготовки.

Така операція дає можливість скорочення понад удвічі кількості «деформаційних» проходів, – внаслідок зменшення інтенсивності деформаційного зміцнення після вакансійного гартування, а збереження чистої поверхні з тонкою оксидною плівкою, що відіграє роль мастила, дозволяє відмовитися від традиційної підготовки поверхні заготовки перед волочінням.

Описана технологічна схема істотно знижує циклічність виробництва, зменшує

час циклу і дає значну економію інших ресурсів.

### Висновки

Показано принципову можливість отримання зі сталі Гадфільда холодно-деформованого дроту діаметром до 2 мм шляхом використання литих заготовок малого поперечного перетину і поєднання гарячої і холодної пластичної деформації з проміжними термічними обробками.

Розроблено і запропоновано схематичне рішення наскрізної технології для отримання дроту зі сталі Гадфільда, яке включає: отримання литих заготовок необхідного поперечного перетину на машині безперервного розливання; гарячу деформацію з проміжними термічними обробками в потоці сортопрокатного стану; холодну деформацію волочінням із термічною обробкою в потоці волочильного стану з рекристалізаційним відпалом в індукторі і вакансійним гартуванням.

Запропонована технологія істотно знижує інтенсивність деформаційного зміцнення сталей аустенітного класу і розширює можливості їх застосування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шульте Ю. А. Электрометаллургия стального литья : монография. Москва : Metallurgy, 1970. 224 с.
2. Тен Э. Б., Базлова Т. А., Лихолобов Е. Ю. Влияние внепечной обработки на структуру и механические свойства стали 110Г13Л. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. № 3. С. 26–28.
3. Черняк С. С., Бройдо В. Л., Агрызков Л. Е. Влияние дополнительного легирования и упрочняющих обработок (ВТМО, НТМО, ТЦО, ИМО) на структуру и свойства высокомарганцевых сталей. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016. № 1 (49). С. 79–88.
4. Сеницкий Е. В., Нефедьев А. А., Ахметова А. А., Овчинникова М. В., Хренов И. Б., Дерябин Д. А. Обзор результатов исследований, направленных на улучшение свойств отливок из высокомарганцевой стали. *Теория и технология металлургического производства. Литейное производство*. 2016. № 2 (19). С. 45–57.
5. Вдовин К. Н., Горленко Д. А., Феоктистов Н. А. Исследование влияния скорости охлаждения в интервале выделения избыточных фаз на литую микроструктуру стали Гадфильда. *Металлургия : технологии, инновации, качество*. Под общ. ред. Е. В. Протопопова. Москва, 2015. С. 125–129.
6. Гуль Ю. П., Соболенко М. А. Основы технологической деформируемости стали 110Г13Л при горячей и холодной пластической деформации. *Металлознание та термічна обробка металів*. 2011. № 4. С. 31–36.
7. Гуль Ю. П., Лещенко А. Н., Пилипченко В. Ю. Роль вакансионной закалки при термопластическом упрочнении сталей аустенитного класса. *Металлы*. 1990. № 4. С. 77–83.
8. Gul Yu., Ivchenko A., Perchun G., Chmelova V., Kondratenko P. Basic principles of the new technology project of manufacturing steel products hardened by the cold deformation. Scientific development and achievements: monograph. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, N1 7GU, 2018. Vol. 5. Pp. 225–244.

### REFERENCES

1. Shulte Yu.A. *Elektrometallurgiya stalnogo litya* [Steel casting electrometallurgy]. Moscow : Metallurgy, 1970, 224p. (in Russian).

2. Ten E.B., Bazlova T.A. and Liholobov E.Yu. *Vliyanie vnepechnoy obrabotki na strukturu i mehanicheskie svoystva stali 110G13L* [The effect of out-of-furnace treatment on the structure and mechanical properties of 110G13L steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 3, pp. 26–28. (in Russian).

3. Chernyak S.S., Broydo V.L. and Agrizkov L.E. *Vliyanie dopolnitelnogo legirovaniya I uprochnyauchih obrabotok (VTMO, NTMO, TZO, IMO) na strukturu I svoystva visokomargancevih staley* [The effect of additional alloying and hardening treatments (HTMO, NTMO, TTZO, IMO) on the structure and properties of high manganese steels]. *Sovremennii tekhnologii. Sistemniy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2016, no. 1 (49), pp. 79–88. (in Russian).

4. Sinititskiy Ye.V., Nefedev A.A., Ahmetova A.A., Ovchinnikova M.V., Hrenov I.B. and Deryabin D.A. *Obzor rezultatov issledovaniy, napravlennykh na uluchshenie svoystv otlivok iz vyisokomargantsevoy stali* [Обзор результатов исследований, направленных на улучшение свойств отливок из высокомарганцевой стали]. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. Liteynoe proizvodstvo* [Theory and technology of metallurgical production. Foundry]. 2016, no. 2 (19), pp. 45–57. (in Russian).

5. Vdovin K.N., Gorlenko D.A. and Feoktistov N.A. *Issledovanie vliyaniya skorosti ohlazhdeniya v intervale vyideleniya izbyitochnykh faz na lituyu mikrostrukturu stali Gadfilda* [Investigation of the effect of the cooling rate in the interval of the allocation of excess phases on the cast microstructure of Hadfield steel]. *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy: technology, innovation, quality]. Edited by. Ye.V. Protopopova. Moscow, 2015, pp. 125–129. (in Russian).

6. Gul Yu.P. and Sobolenko M.A. *Osnovniy tekhnologicheskoy deformiruемости stali 110G13L pri goryachey i holodnoy plasticheskoy deformatsii* [Fundamentals of technological deformability of steel 110G13L during hot and cold plastic deformation]. *Metalloznavstvo ta termichna obrobka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2011, no. 4, pp. 31–36. (in Russian).

7. Gul Yu.P., Leschenko A.N. and Pilipchenko V.Yu. *Rol vakantsionnoy zakalki pri termoplasticheskom uprochnenii staley austenitnogo klassa* [The role of vacancy hardening in thermoplastic hardening of austenitic steels]. *Metallyi* [Metals]. 1990, no. 4, pp. 77–83. (in Russian).

8. Gul Yu., Ivchenko A., Perchun G., Chmeliova V. and Kondratenko P. Basic principles of the new technology project of manufacturing steel products hardened by the cold deformation. Scientific development and achievements: monograph. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, N1 7GU, 2018, vol. 5, pp. 225–244.

Надійшла до редакції: 09.02.2020 р.