

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

УДК 621.777, 621.77.01

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-26-33

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ НА ЯКІСТЬ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

*О. І. Курандо, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: Yurii.Pliesnetsov@kphi.edu.ua*

Дослідження спрямоване на розробку нових методів зміцнення металів. У даній науковій статті досліджено вплив обробки тиском на мікротвердість та деформаційне зміцнення. Метою дослідження було визначення ефективності деформуючого впливу як методу зміцнення. Новизною є вивчення деформуючого впливу на мікротвердість та деформаційне зміцнення цих сплавів, порівняння ефективності, а також встановлення обмежень та напрямків для подальших досліджень. Результати показали, що деформуючий вплив призводить до збільшення мікротвердості. Для ряду сплавів потрібні додаткові джерела деформації для досягнення більшого ступеня зміцнення. Практичне значення полягає у використанні результатів дослідження для розробки нових технологій зміцнення сплавів з різними властивостями. Завдяки цьому підходу, можливості зміцнення матеріалів значно розширюються, відкриваючи шлях до створення нових міцних та легких конструкцій. Впровадження цих інноваційних методів може сприяти революції у виробництві, зменшуючи витрати та покращуючи екологічність процесів. Рівень механічних властивостей металів та сплавів у роботі оцінюється на підставі результатів випробувань з використанням різних способів навантаження. Спосіб випробування на розтягування забезпечує найбільш повну інформацію про властивості металів. Для теоретичного аналізу у роботі використано енергетичний метод, що дозволило, з використанням параметрів зусилля, механічних властивостей заготовки та кількості одночасних деформуючих впливів визначити їх числові значення, що, у свою чергу, дозволяє знайти ступінь деформаційного впливу на метал та ступінь зміцнення, яке при цьому одержується. В роботі також отримана залежність для визначення обертового моменту валкового формування гнутих профілів.

Ключові слова: фізико-механічні властивості матеріалів, метрологічна оцінка напружено-деформованого стану, деформуючий вплив, рівень пластичності, мікротвердість, деформаційне зміцнення, енергетичний метод.

The research is aimed at the development of new methods of strengthening metals. This scientific article investigates the effect of pressure treatment on microhardness and strain hardening. The purpose of the study was to determine the effectiveness of the deforming effect as a strengthening method. The novelty is the study of the impact of the deforming effect on the microhardness and strain hardening of these alloys, the comparison of efficiency, as well as the establishment of limitations and directions for further research. The results showed that the deforming effect leads to an increase in microhardness. For a number of alloys, additional sources of deformation are required to achieve a greater degree of strengthening. The practical significance lies in the use of research results for the development of new technologies for strengthening alloys with different properties. Thanks to this approach, the possibilities of strengthening materials are greatly expanded, opening the way for the creation of new strong and light structures. The implementation of these innovative methods can contribute to a revolution in production, reducing production costs and improving the environmental friendliness of processes. The level of mechanical properties of metals and alloys in work is evaluated based on the results of tests using different loading methods. The most complete information about the properties of metals can be obtained by the method of tensile testing. For the theoretical analysis, the energy method was used in the work, which made it possible, using force parameters, mechanical properties of the workpiece and the number of simultaneous deforming effects, to determine their numerical values, which, in turn, allows to find the degree of deformation effect on the metal and the degree of strengthening, which at the same time is obtained. The work also obtained a dependence for determining the rotational moment of roll forming of bent profiles.

Keywords: physical and mechanical properties of materials, metrological evaluation of stressed-deformed state, deforming effect, level of plasticity, microhardness, strain hardening, energy method.

Вступ

Для підтвердження правильності вихідних передумов теоретичного аналізу, визначення ступеня точності аналітичних залежностей, а також з метою отримання додаткових відомостей, необхідних для розробки технологічного процесу валкового формування зміцнених профілів на профілезгинальних агрегатах, виконано комплекс експериментальних досліджень, результати яких наведено у статті.

Умови та тенденції проведення досліджень щодо деформаційного зміцнення

Процеси деформаційного зміцнення здійснюються при температурах, нижчих за температуру рекристалізації металу і порівняно малих швидкостях деформування [1]. Це дозволяє досягати високих значень інтенсивності накопичених деформацій, причому на кожному циклі деформування можна забезпечити задану величину зміцнення. Профілювання дозволяє багаторазово деформувати заготовку та досягати високих значень деформації, що є необхідною умовою формування дрібнозернистої структури матеріалу. Профілювання може вбудовуватись в існуючі технологічні ланцюжки, що дозволяє отримувати не тільки структуру, а й механічні властивості матеріалів при розтягуванні та стисканні.

Сучасні тенденції у сфері металообробки свідчать про активне впровадження технологій гноття листового металу завдяки високій ефективності використання матеріалу та продуктивності виробництва. Проте, зростання вимог до якості виробів висуває нові виклики до характеристик інструментів і матеріалів, які використовуються у процесі. Ігнорування таких факторів, як властивості матеріалу, явище пружинення та залишкові напруження, часто призводить до відхилень у геометрії та розмірах профілів, порівняно з їх кресленнями та прийнятно-здавальними характеристиками.

Врахування параметрів, як-от внутрішній радіус гноття та деформаційне

зміцнення матеріалу, значно покращує точність прогнозування пружинення. Дослідження підтвердили, що вдосконалені моделі дозволяють зменшити похибку до 3%, що є значним покращенням порівняно з базовими підходами, які враховували лише геометричні особливості заготовок. Такий підхід забезпечує не лише відповідність кінцевих виробів технічним вимогам, але й знижує рівень дефектів у виробничих процесах, сприяючи подальшому розвитку металообробної галузі.

Методи пластичного деформування, такі як обробка роликками, кульками, вібраційне накатування, шROTOобразивна обробка, віброгартування та інші, сприяють покращенню фізико-механічних властивостей поверхні деталей. Їхня ефективність залежить від чутливості металу до наклепування: твердість поверхні сталі підвищується на 45%, чавуну — на 30–60%, силуміну — на 50%, латуні — на 60%, а глибина наклепу варіюється від 0,8–3 мм для м'яких матеріалів до 0,3–8 мм для середньої твердості. Електромеханічна обробка також суттєво підвищує твердість поверхневих шарів деталей, збільшуючи її у 1,5–2 рази, завдяки поєднанню пластичного деформування і термічної обробки.

Вплив силових і температурних факторів під час виготовлення та експлуатації деталей призводить до змін у фізико-механічних властивостях поверхневого шару матеріалу. Це пов'язано зі структурними змінами в кристалічній решітці, такими як збільшення кількості дислокацій і дефектів, подрібнення зерен та їх витягування у напрямку руху обробки. Утворена текстура залежить від застосованого технологічного методу чи умов експлуатації. Температура та швидкість деформації також відіграють ключову роль у формуванні властивостей поверхневого шару, а за певних умов можливі зміни фазового й хімічного складу матеріалу.

Сукупність зазначених факторів може істотно вплинути на довговічність і надійність деталей, ускладнюючи прогнозування через неможливість користуватися традиційними даними про межу текучості й твердість. У процесі обробки одночасно протікають процеси зміцнення та знеміцнення, спричинені дією високих температур, а співвідношення їхньої інтенсивності визначає кінцеві властивості поверхні. Деформаційне зміцнення та залишкові напруги є ключовими характеристиками для інженерних розрахунків, оскільки зміцнення підвищує твердість і крихкість поверхневого шару, одночасно зменшуючи ударну в'язкість, щільність і підвищуючи внутрішнє тертя.

Методика проведення експериментальних досліджень

Відбір проб, заготовок та зразків із вихідних матеріалів для проведення експериментальних досліджень твердості виконувався згідно з чинними державними стандартами України. Цей процес передбачав ретельне дотримання встановлених нормативних вимог, щоб забезпечити точність, відтворюваність і достовірність отриманих результатів. Особлива увага приділялася вибору відповідних ділянок матеріалу, підготовці зразків та їх розмірам, які мають відповідати вимогам конкретного методу вимірювання твердості, що застосовувався у дослідженнях. Такий підхід дозволив мінімізувати вплив сторонніх чинників на результати експерименту, забезпечуючи об'єктивність та коректність отриманих даних [2-4].

Існує широкий спектр досліджень та розробок, присвячених деформаційному зміцненню, що виникає у різних обставинах [5,6]. З урахуванням вищезазначених особливостей, експериментальні дослідження процесу валкового формування деформаційно зміцнених профілів були проведені безпосередньо в умовах виробництва спеціальних гнутих профілів, які піддаються деформаційному зміцненню.

Для аналізу процесів пластичного формоутворення металу найбільш широко використовуються геометричні методи експериментального аналізу. Ці методи базуються на порівнянні геометричних параметрів елементів матеріалу до та після процесу деформації. У даному дослідженні зазначений підхід було застосовано для визначення рівня стоншення металу в поперечному перерізі профілів, особливо в місцях вигину та на плоских ділянках. Використання цього методу дозволило отримати кількісні характеристики змін товщини металу, що забезпечило ґрунтовний аналіз впливу процесу деформації на якість профілів [7-9].

Такий підхід дозволив оцінити ефективність процесу формування, визначити критичні ділянки та запропонувати оптимальні параметри для мінімізації небажаних змін у структурі металу.

Зразки вихідної заготовки та темплети профілю були піддані випробуванням на розтягування із застосуванням спеціалізованої випробувальної машини. Визначення твердості проводили за методом Віккерса на твердомірі ТК при навантаженні 0,49 Н, що забезпечувало точність і повторюваність отриманих результатів. Для вивчення мікроструктури матеріалу зразків застосовували метод травлення в 4% розчині азотної кислоти (HNO₃). Дослідження структури виконували за допомогою мікроскопа Neophot-2, використовуючи збільшення в діапазоні від x100 до x1000. Такий підхід дозволив детально оцінити зміни в структурі металу, зокрема, визначити наявність деформаційних зон, зерен та інших мікроструктурних особливостей, що виникають у процесі формування профілів. Комбіноване використання механічних випробувань, твердомірного аналізу та мікроструктурного дослідження дозволило отримати всебічну оцінку властивостей матеріалу та їх змін у процесі деформації. Оцінка структури виконувалася згідно з унормованими вимогами стандартів.

Метод тензометрії отримав найширше застосування для експериментального визначення енергосилових параметрів процесів валкового формування гнутих профілів. У ході досліджень використовувалося сучасне обладнання, зокрема тензостанція «Топаз-1», прилад живлення «Гранат» і шлейфовий осцилограф Н-700. Для забезпечення високої точності та надійності експериментальних вимірювань градуювання вимірювальних систем і шпинделів виконувалося як перед серією вимірювань, так і після неї. Нестабільність градуювальних характеристик залишалася в межах допустимих значень і не перевищувала 1%. Для побудови шкал використовували результати двох перевірок, що забезпечувало підвищення надійності результатів.

Оцінку точності вимірювальної апаратури здійснювали з урахуванням паспортних даних і значень випадкових похибок окремих її елементів. Для розрахунку враховували довірчу ймовірність, що дозволяло мінімізувати вплив випадкових і систематичних похибок. В результаті точність вимірювальної апаратури, яка застосовувалася для визначення зусиль деформування та обертових моментів, з урахуванням систематичної похибки її елементів становила 9,2%. Точність вимірювання твердості за Віккерсом на твердомірі ТК дорівнювала 2,7%.

Аналіз якості виготовлених профілів здійснювався за допомогою статистичних методів, що дозволило об'єктивно оцінити їх відповідність встановленим стандартам. Такий комплексний підхід до вимірювання, градуювання та обробки даних забезпечив високу достовірність отриманих результатів і можливість оптимізації процесу валкового формування. Статистичні результати отримані відповідно до вимог [2].

Іншими робочими стандартами за напрямом деформаційного зміцнення є [3, 4].

Процеси деформаційного зміцнення здійснюють при температурах нижчих за

температуру рекристалізації металу і порівняно малих швидкостях деформування. Це дозволяє досягати високих значень інтенсивності накопичених деформацій, причому на кожному циклі деформування можна забезпечити задану величину зміцнення. Профілювання дозволяє багаторазово деформувати заготовку та досягати високих значень деформації, що є необхідною умовою формування дрібнозернистої структури матеріалу.

Дослідження структури, деформаційного зміцнення та стоншення металу в зоні деформування

Металографічні дослідження виявили дрібнозернисту мікроструктуру вихідної заготовки, яка складається із рівновісних зерен фериту та перліту в співвідношенні 80:20. Розмір зерен фериту відповідає 8–9 балам, а перліт характеризується щільною, потайно-пластинчастою структурою, оціненою в 1–2 бали. Забрудненість металу неметалевими включеннями, такими як сульфіди заліза, марганцю та крихкі силікати, витягнуті в напрямку деформації, відповідає 2 балам, що вказує на помірний рівень включень.

Дослідження місць згинання виявило неоднорідність мікроструктури. У цих ділянках структурні складові витягуються, повторюючи форму поперечного перерізу у напрямку деформації (рис. 1). Відповідно до обраної методики [10], на відібраних зразках із різних зон вихідної заготовки та профілів (рис. 2) проведено вимірювання твердості за Віккерсом на торцевих поверхнях, перпендикулярних до основної площини металу. Результати вимірювань представлені у таблиці 1.

Аналіз отриманих даних (табл. 1) свідчить про залежність змін твердості від інтенсивності деформацій. У зоні осаджування (точки 4, 5, 6) твердість зростає на 9% порівняно з вихідною заготовкою. У вершинах гофру (точки 3, 7) приріст твердості досягає 25%. У ділянках зі змінною висотою (точка 5), на виходах місць згинання у площину, твердість збільшується на 13%.

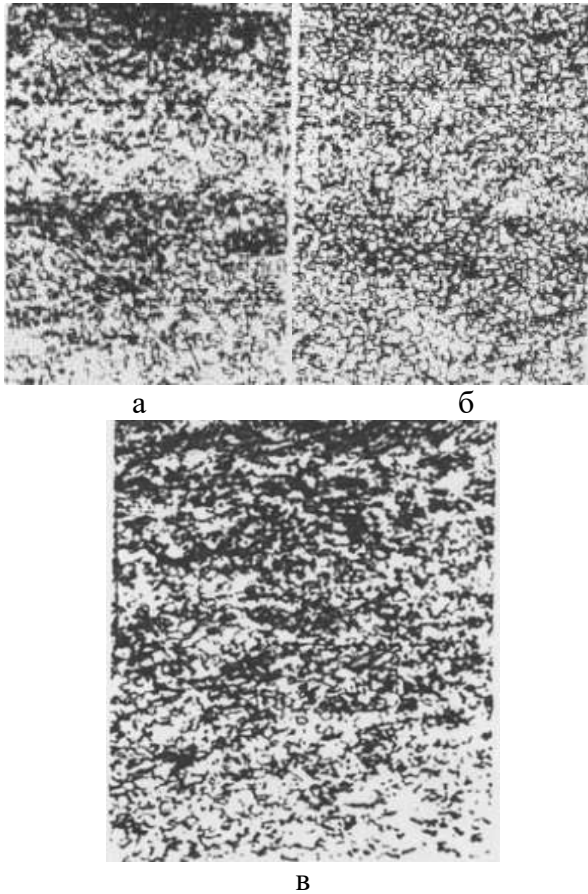


Рисунок 1 – Мікроструктура (x100) елементів:
 а – деформована ділянка; б – ділянка місця згинання змінної висоти; в – верхні місця згинання

Такі зміни мікроструктури та механічних властивостей підтверджують вплив деформаційних процесів на якість і експлуатаційні характеристики готових профілів.

Якісне оцінювання деформаційного зміцнення металу гнутих профілів було проведено на основі досліджень стандартних (поздовжніх і поперечних) зразків як вихідної заготовки, так і металу після валкового формування. Отримані діаграми розтягування (рис. 3) демонструють, що межа міцності зросла на 16,8%, а межа плинності – на 19,7% порівняно з вихідною заготовкою. Водночас відносне подовження знизилося на 61%, що вказує на зменшення пластичності матеріалу. Узагальнені результати випробувань подано у таблиці 2.

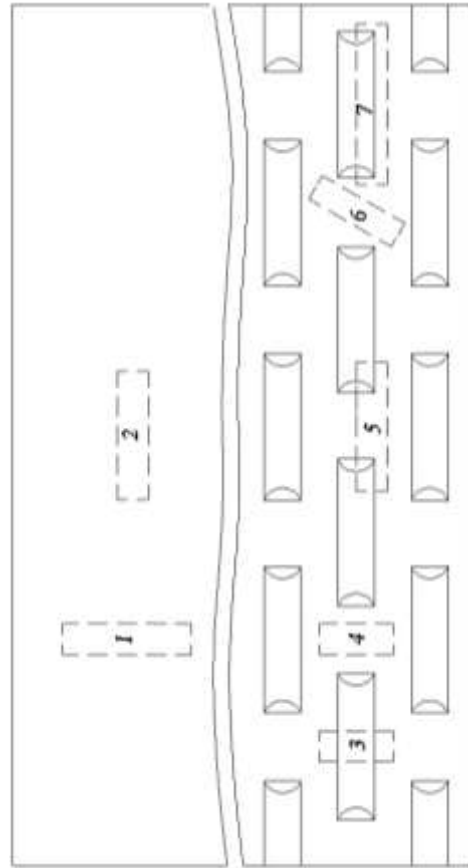


Рисунок 2 – Схема відбору зразків

Таблиця 1 – Результати вимірювання твердості зразків за Віккерсом

Величина твердості зразків, маркованих відповідно до рис. 2				
1, 2	4, 5, 6	Місця згинання у площину (5)	7	3
127±9 HV	140±8 HV	146±8 HV	170±10 HV	170±10 HV

Таблиця 2 – Результати випробувань на розтягування зразків вихідної заготовки та зміцненого гнутого профілю

№ зразків	Результати випробування				
	Межа плинності		Межа міцності		Відносне подовження (δ_{10}), %
	кг/мм ²	МПа	кг/мм ²	МПа	
Початкова заготовка					
1	28,5	279,3	39,5	387,0	29,5
Деформаційно зміцнений гнутий профіль					
2	35,5	348,0	47,5	465,5	11,5

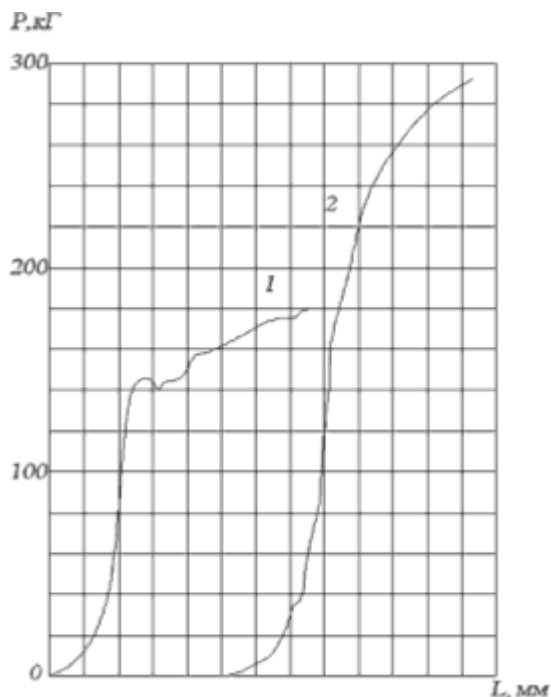


Рисунок 3 – Діаграми розтягування:
 1 – зразків вихідної заготовки;
 2 – зміцнених елементів гнутих профілів

Аналіз зміни твердості металу в різних зонах профілю свідчить про її залежність від інтенсивності деформацій. У зоні осаджування (точки 4, 5, 6) твердість зростає на 9% порівняно з вихідною заготовкою. На вершинах гофру (точки 3, 7) приріст твердості досягає 25%, а на ділянках зі змінною висотою (вихід місця згинання у площину, точка 5) – 13%.

Дослідження стоншення металу в поперечному перерізі місць згинання і плоских ділянок (рис. 4) показали, що максимальне стоншення спостерігається на вершинах гофру і становить 0,57 мм (точка 10, рис. 4). На бічних ділянках місць згинання стоншення залишається постійним і дорівнює 0,3 мм (точки 3, 4, 5, 6). Зміни товщини локалізуються в зоні формування місць згинання і не поширюються на сусідні ділянки, які не зазнають деформації.

Графік розподілу стоншень у поперечному перерізі плоскої ділянки місця згинання (рис. 4, точка 3) має форму кривої з трьома максимумами, які відповідають вершинам осадженого металу (точки 4, 3, 10, рис. 3). Значення стоншень у цих зонах становлять 0,42 мм і 0,2 мм

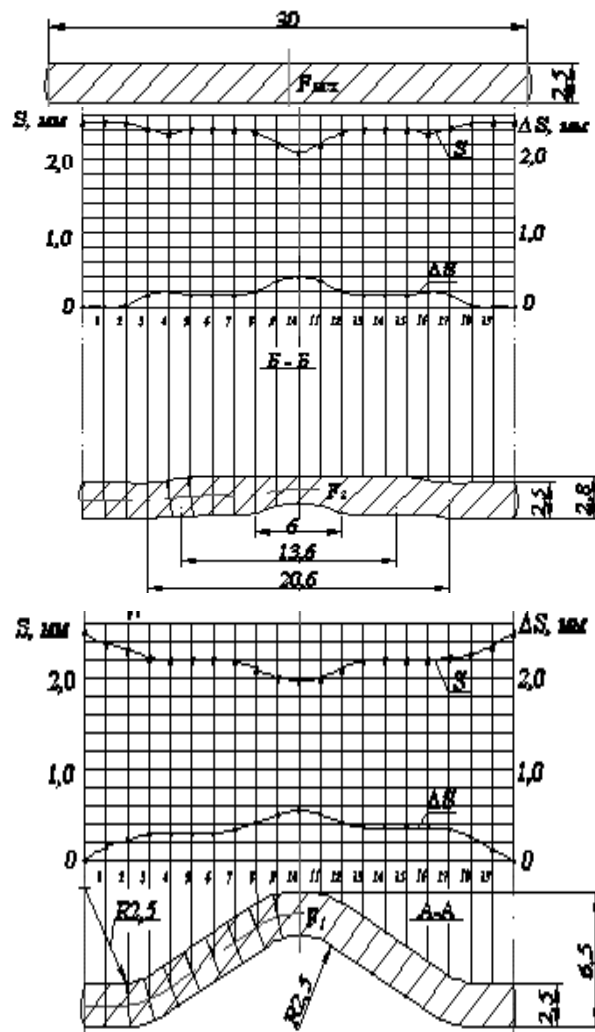


Рисунок 4 – Вихідна заготовка (1) та графіки зміни товщини металу S та розподілу стоншення ΔS за геометричним перерізом місць згинання (2) та плоскої ділянки (3)

відповідно, що демонструє зниження абсолютних значень товщини на 26,3% для вершини та на 33,3% для ділянки виходу гофру у площину.

Таким чином, стоншенням відбулося зі зниженням їх абсолютних значень на 26,3% для вершини та на 33,3% для ділянки виходу місця згинання у площину.

Визначення енергосилових параметрів валкового формування деформаційно зміцнених профілів

Результати вимірювань зусиль і обертових моментів [11], які отримано при валковому формуванні зміцнених гнутих профілів, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Зусилля та обертові моменти при формуванні деформаційно зміцнених листових гнутих профілів

Наймен. параметра	Профіль 2-960	Профіль 2-760	Профіль 2-560
1 перехід (витягування металу в місцях згинання)			
Зусилля, кН (т)	352,8 (36)	284,2 (29)	199,92 (20,4)
Обертові моменти, кНм (тм)	149,67 (15,3)	120,57 (12,3)	84,8 (8,65)
2 перехід (деформаційне зміцнення місць згинання)			
Зусилля, кН (т)	165,0 (16,84)	135,0 (13,78)	95,0 (9,69)
Обертові моменти, кНм (тм)	70,0 (7,14)	57,3 (5,84)	40,3 (4,11)

Висновки

1. Виконано аналіз отриманої в ході формоутворення мікроструктури матеріалу металовиробу. Встановлено, що мікроструктура вихідної заготовки дрібнозерниста і складається з рівновісних зерен фериту і перліту зі співвідношенням 80:20, відповідно. Розмір зерна фериту відповідає 8-9 балу. Перліт щільний, потайно-пластинчастий, відповідає 1-2 бали.

2. Проведено детальний аналіз якісного стану структури осередку деформації металовиробів, що досліджуються. Результати аналізу мікроструктури перерізу місць згинання продемонстрували її виражену неоднорідність, що є характерною для процесів пластичної деформації. Встановлено, що мікроструктура нейтрального шару поперечного перерізу місць згинання зазнає меншого ступеня деформації, ніж зовнішні шари металу, які розташовані ближче до поверхні прокату.

3. Отримані діаграми розтягування показують, що межа міцності зростає на 16,8%, межа плинності зростає на 19,7%. Вивчаються можливості автоматизації та

комп'ютеризації оцінки деформованого стану з метою попередження перевищення припустимих характеристик напружено-деформованого стану металовиробу при формоутворенні в межах поточного технологічного процесу.

4. В роботі вперше експериментально отримані результати вимірювань зусиль і обертових моментів для трьох типів зміцнених гнутих профілів при валковому формуванні, які потрібно враховувати при виборі, розробці, модернізації технологічного обладнання для виробництва зміцнених гнутих профілів.

Список використаних джерел

1. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні: підручник. Київ: Наукова думка, 2007. 557 с.
2. ДСТУ-Н РМГ 61:2006. Метрологія. Показники точності, правильності, прицезійності методик кількісного хімічного аналізу. Методи оцінювання (РМГ 61-2003, IDT).
3. ДСТУ 2494-94. Метали. Оброблення зміцнювальне. Терміни та визначення.
4. ДСТУ 2825-94. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять.
5. Горик О. В., Черняк Р. Є., Чернявський А. М., Брикун О. М. Дробоструминне очищення. Теорія і практика. Полтава: видавництво ПП «Астроя», 2021. 326 с.
6. Мажейка О. Й. Лазерна, плазмова і детонаційна технології зміцнення поверхонь: монографія. Кіровоград: видавець Лисенко В. Ф., 2011. 260 с.
7. Попович В. В., Кондир А. І., Плешаков Е. І., Паздрій І. П. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: навчальний посібник. Львів: видавництво Світ, 2009. 552 с.
8. Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І. Матеріалознавство: підручник. Харків: ХНАДУ, 2007. 440 с.

9. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навчальний посібник. Київ: видавництво Либідь, 2002. 326 с.

10. Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. Металознавство: підручник. Київ: ІВЦ «Видавництво Політехніка», 2008. 384 с.

11. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. Основи творення машин: підручник. Харків: видавництво «НТМТ», 2017. 448 с.

References

1. Yushchenko K. A., Borysov Y. S., Kuznetsov V. D., Korzh V. M. Inzheneriia poverkhni: pidruchnyk. Kyiv: Naukova dumka. 2007. 559 p. [in Ukrainian]

2. DSTU-N RMH 61:2006. Metrolohiiia. Pokazyky tochnosti, pravynosti, prytseziinosti metodyk kilkisnoho khimichnoho analizu. Metody otsinennia (RMH 61-2003, IDT). [in Ukrainian]

3. DSTU 2494-94. Metaly. Obroblennia zmitsniuvalne. Terminy ta vyznachennia. [in Ukrainian]

4. DSTU 2825-94. Rozrakhunky ta vyprobuvannia na mitsnist. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat. [in Ukrainian]

5. Horyk O. V., Cherniak R. Y., Cherniavskiy A. M., Brykun O. M. Drobostrumynne ochyshchennia. Teoriia i praktyka. Poltava: vydavnytstvo PP «Astraiia», 2021. 326 p. [in Ukrainian]

6. Mazheika O. Y. Lazerna, plazmova i detonatsiina tekhnolohii zmitsnennia poverkhon: monohrafiia. Kirovohrad: vydavnytstvo Lysenko V. F., 2011. 260 p. [in Ukrainian]

7. Popovych V. V., Kondyr A. I., Pleshakov E. I., Pazdriy I. P. Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv i materialoznavstvo: navchalniy posibnyk. Lviv: vydavnytstvo Svit, 2009. 552 p. [in Ukrainian]

8. Diachenko S. S., Doshchechkina I. V., Movlian A. O., Pleshakov E. I. Materialoznavstvo: pidruchnyk. Kharkiv: KhNADU, 2007. 440 p.

9. Khilchevskiy V. V. Materialoznavstvo i tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: navchalniy posibnyk. Kyiv: vydavnytstvo Lybid, 2002. 326 p. [in Ukrainian]

10. Bialik O. M., Chernenko V. S., Pysarenko V. M., Moskalenko Y. N. Metaloznavstvo: pidruchnyk. Kyiv: IVTs «Politekhnika», 2008. 384 p. [in Ukrainian]

11. Buchynskiy M. Y., Horyk O. V., Cherniavskiy A. M., Yakhin S. V. Osnovy tvorennia mashyn: pidruchnyk. Kharkiv: vydavnytstvo «NTMT», 2017. 448 p. [in Ukrainian]

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DEFORMATION STRENGTHENING OF METAL ON THE QUALITY OF ROLLED SHAPES

O. I. Kurando, Yu. O. Pliesnetsov, S. Yu. Pliesnetsov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: Yurii.Pliesnetsov@khp.edu.ua