

9. **Лобов В.Й.** Автоматизовані системи керування конвеєрними установками: монографія / В.Й. Лобов, Л.І. Єфіменко, М.П. Тиханський, С.А. Рубан. Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2015. 450 с. ISBN 978-966-132-027-6

10. **Новиков Е.Е., Смирнов В.К.** Теория ленточных конвейеров для крупнокусковых горных пород. Киев: Наукова думка, 1998. 184 с.

11. **Монастырский В.Ф.** Экспериментальные исследования грузопотока крупнокускового груза / В.Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко, В.И. Плахотник, В.И. Бесчастный. Шахтный и карьерный транспорт. М.: Недра, 1999. Вып. 11. С. 7-14.

12. **Коваль А.В.** Исследование динамических нагрузок на выбор конструктивных параметров роликкоопор шахтных ленточных конвейеров: Дис. канд. техн. наук. М., 1995.

13. **Козлов Е.М.** Определение нагрузок на основные элементы тяжелых ленточных конвейеров ГОКов. Шахтный и карьерный транспорт. М.: Недра, 2000. С. 24-27.

14. **Єфіменко Л.І., Тиханський М.П.** Оценка влияния отдельных нагрузок действующих на формирование металлоемкости става ленточного конвейера. *Вісник Криворізького національного університету* : збірник наукових праць. Вип.33. Кривий Ріг, 2013. С.211-215.

15. **Абрамов, О. В., Розенбаум А. Н.** Прогнозирование состояния технических систем. М.: Наука, 1990. 126с.

15. **Тиханський М.П., Єфіменко Л.І.** Методи й системи діагностики та прогнозування технічного стану стрічкових конвеєрів. *Вісник Криворізького технічного університету* : збірник наукових праць. Вип.21. Кривий Ріг, 2008. С.163-167

16. **Єфіменко Л.І., Тиханський М.П.** Принципи побудови автоматизованої системи діагностики технічного стану конвеєра. *Вісник Криворізького технічного університету* : збірник наукових праць. Вип. 25, 2010. С. 163-167

Рукопис подано до редакції 17.11.2021

УДК 621.771

В.А. ЧУБЕНКО, Т.П. ЯРОШ, кандидати техн. наук, доценти, А.А. ХІНОЦЬКА, ст. викл.
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ В ПРОЦЕСАХ ПРОКАТУВАННЯ МЕТАЛОВИРОБІВ

Мета роботи полягає у тому, щоб дослідити структурні перетворення металів і сплавів при обробці тиском для встановлення режимів обтиснення, які дозволять підвищити якість металовиробів. При розробці нових технологічних процесів прокатування особлива увага приділяється якості отриманих металовиробів, яка цілком залежить від внутрішньої будови металів і сплавів. У зв'язку з цим вивчення впливу режимів обтиснення на структуру металу є задачею актуальною, вирішення якої забезпечить отримання високоякісної продукції.

Методи дослідження базуються на використанні фундаментальних положень матеріалознавства та теорії обробки металів тиском. Експериментальні дослідження проводились з урахуванням особливостей визначення структури металу з використанням металографічного мікроскопу.

Наукова новизна полягає у вивченні впливу режиму обробки при обтисненні на ступінь аморфності металів і металевих сплавів.

Практична значимість роботи полягає у встановленні раціональних режимів обробки, що дозволяють підвищити якість металовиробів за рахунок збільшення ступеня аморфності.

Результати. Було здійснено мікроструктурний аналіз будови металів і сплавів та досліджено металографічні знімки мікрошліфів низьковуглецевої сталі, які показали, що структура металів і металевих сплавів складається з зерен і границь між ними. Запропоновано границі зерен вважати аморфними. Визначено залежність ступеня аморфності сталі від величини зерна внутрішньої будови та досліджено вплив швидкості охолодження на відношення температури аморфізації до температури плавлення, що дозволяє керувати процесом кристалізації. Проаналізовано вплив режимів обтиснення при обробці на зміну структури металовиробів. Встановлено режими обтиснення, що забезпечують інтенсивне збільшення величини аморфізації низьковуглецевої сталі. Визначено способи збільшення ступеня аморфності у внутрішній структурі сплавів, які забезпечують підвищення якості металовиробів.

Ключові слова: внутрішня будова, структура, зерна, мікрошліф, режими обтиснення, аморфізація, ступінь деформації.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-140-144

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Майже вся металопродукція, що використовується в машинобудуванні, будівництві, транспорті, авіації, верстатобудуванні та інших галузях виготовляється за допомогою процесів прокатування. Такі металовироби повинні витримувати великі навантаження, що діють на них, повинні задовольняти високі вимоги не тільки за точністю розмірів, але й за будовою внутрішньої структури, яка впли-

ває на їхню міцність, зносостійкість, витривалість, працездатність тощо. Визначення раціональних режимів обтиснення дозволить поліпшити об'ємноструктурні перетворення в сталях при обробці металів тиском і дасть можливість керувати якістю прокатних виробів при мінімальних енергетичних витратах. Тому дуже важливою і своєчасною є розробка нових науково обґрунтованих технологій управління якістю прокату за рахунок об'ємноструктурних перетворень в металевих виробках для набуття ними потрібних властивостей.

Аналіз досліджень і публікацій показав, що при виготовленні металургійної продукції суттєва увага приділяється поліпшенню якості металовиробів [1, 2], їх зовнішніх і внутрішніх властивостей. Обробка металів тиском [3-6] здійснюється при великих навантаженнях на прокатне обладнання, де мають місце істотні деформації металів і сплавів і витрачаються великі зусилля.

Метали і сплави, що підлягають пластичній деформації при обробці металів тиском, мають кристалічну будову й упорядковане розташування атомів в об'ємі. Сукупність елементарних комірок утворює в просторі в металевих кристалічних тілах кристалічну решітку. Метали складаються з кристалів, що мають неправильну форму. Ці кристали мають назву зерен [7, 8, 9]. Фрагменти кристалів різного розміру зароджуються в розплавах під час охолодження, де вони мають неупорядковану структуру, яка складається з внутрішніх атомів і зовнішньої розпушеної зони об'ємом приблизно 3-6 %. При подальшому охолодженні металів і сплавів зародки формують кристали, а зовнішня розпушена неупорядкована зона стає міжзерновою границею, яка за структурою ближче до аморфного стану [7, 10], продовжуються зрощення в сталі зерен за рахунок дифузії атомів і при цьому звужуються міжзернові границі.

Процеси обробки металів тиском можливі при умові, якщо метали, що деформуються, характеризуються пластичністю, тобто здатністю безповоротно змінювати свою форму без руйнування [2, 3, 6, 10-12]. При обтисненні металу під час прокатування утворюється складний напружений стан [13-15], який має вплив на подальші процеси деформації. Під час обробки тиском зерна металів і сплавів змінюють свою форму, руйнуються, утворюючи нові додаткові поверхні внаслідок здрібнення зерен і утворення нових дислокацій, вакансій, пор і тріщин. Порушення суцільності матеріалу, що деформується, є не тільки не бажаним явищем, але й недопустимим. При деформації полікристалічного тіла переміщення дислокацій при відсутності перешкод відбувається до виходу на поверхню й утворення сходинки шириною в одну міжатомну відстань. Перешкоди (сторонні включення, границі зерен тощо) гальмують переміщення дислокацій, що викликає локальну концентрацію напружень, при визначеному значенні яких може виникнути мікротріщина. Звичайно, це здійсниться, коли накопичена в локальному об'ємі пружна енергія перевищить поверхневу енергію нової поверхні (стінок тріщини). Руйнування пластичних матеріалів відбувається після підготовчої стадії утворення мікротріщини – деякої пластичної деформації. Тому дуже важливо дослідити структуру металів і сплавів при обробці тиском з метою підвищення якості й уникнення руйнування.

Постановка задачі. Підвищення якості металовиробів при обробці тиском можна досягти при отриманні раціональної внутрішньої структури металів і сплавів, що потребує вирішення наступних задач:

- дослідити структуру сталевих виробів під час кристалізації;
- з'ясувати ступінь впливу режимів обтиснення при прокатуванні на внутрішню структуру металу.

Викладення матеріалу та результати. Вважаючи, що на границях зерен концентруються атоми інших елементів і дислокації, на шліфах (рис. 1) були сфотографовані границі зерен, які мають товщину, що може дорівнювати 0,2-0,4 мкм [16, 17]. У дослідженнях припускається, що міжзернові границі в металах за структурою подібні до застиглих розплавів і на їх утворення витрачається теплота плавлення відповідних металів і сплавів.

На рис. 1 показано структуру литого виробу, виготовленого з низьковуглецевої сталі, де видно розташування зерен і границь між ними у недеформованому стані. Очевидно, що товщина міжзернових границь у приповерхневих металічних зернах є більшою у порівнянні з внутрішніми міжзерновими границями, бо перші утворилися внаслідок розриву зерен, а другі – внаслідок остигання й ущільнення розплаву.

Середні величини номерів зерен (G), середнього діаметра зерна (d_m) і середнього числа зерен в 1 мм^3 (N_v) згідно Держстандарту [18] наведено в табл. 1. Ці вихідні дані були використані

для розрахунку величини середньої поверхні міжзернової границі, її об'єму при товщині, рівній параметру чарунки заліза, та її частки в загальному об'ємі (табл. 1).

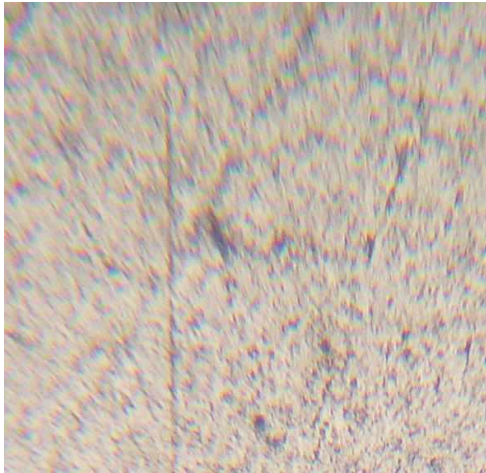


Рис. 1. Металографічний знімок низьковуглецевої сталі (x200000)

Розрахунок поверхні зерна здійснювався за формулою [7]

$$F_m = \frac{6}{2} \cdot d_m^2 N_v, \quad (1)$$

де d_m – середній діаметр зерна; 6 – число граней у куба; 2 – коефіцієнт, який свідчить, що міжзернова поверхня розподіляється на два зерна; N_v – середнє число зерен в 1 м^3 .

На відміну від раніше виконаних розрахунків, коли товщина розпушеної зони приймалася рівною $0,08 \text{ мкм}$ [7], у даному випадку прийнята товщина міжзернової поверхні в аустенітній сталі з вмістом вуглецю в межах $0-2 \%$ рівною $3,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, тобто середнє значенні між $(3,56-3,63) \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Як видно з табл. 1, при товщині міжзернової границі $3,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ її об'єм наближається до об'єму зерен розміром $2,7 \text{ мкм}$. Для з'ясування відповіді на питання, що за таких умов визначає міцність металу – зерна чи їхні границі, продовжимо табл. 1 ще на шість номерів (до 20) з розміром зерен до $0,216 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. При цьому ступінь аморфності сталі досягає 100% . Аморфність сталі A розраховується за формулою [7]

$$A = \frac{V_{зг} \cdot 10^{-22}}{V_m \cdot 10^{-18}} = \frac{3,6 \cdot 10^{-10} \cdot 3,14 \cdot 10^{-12} d_m^2}{0,5236 \cdot 10^{-18} d_m^3} = \frac{21,6 \cdot 10^{-4}}{d_m}, \quad (2)$$

де $V_{зг}$, V_m , d_m – об'єм зернових границь, об'єм зерна та середній діаметр зерен відповідно; $3,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ – товщина границі зерна.

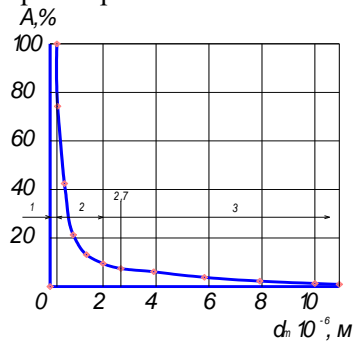
Таблиця 1

Геометричні співвідношення в сталі залежно від розміру зерен

Номер зерна G [18]	Середній діаметр зерна d_m , м , $\times 10^{-6}$ [18]	Середнє число зерен в 1 м^3 , $N_v \cdot 10^9$ [18]	Об'єм зерна V_m , м^3 , $\times 10^{-18}$,	Поверхня зерна F_m , м^2 , $\times 10^{-12}$,	Об'єм границі зерен $V_{зг}$, м^3 , $\times 10^{-22}$,	Частка об'єму границі зерна, %
- 3	1000	1	523,6	3,14	11,3	0,022
- 2	707	2,8	185,04	1,57	5,652	0,03
- 1	500	8	65,45	0,765	2,826	0,043
0	353	22,6	23,03	0,516	1,86	0,081
1	250	64	8,18	0,196	0,705	0,086
2	177	181	2,9	0,0984	0,354	0,122
3	125	512	1,02	0,0491	0,177	0,174
4	88	1448	0,357	0,0243	0,0875	0,245
5	62	4096	0,125	0,0121	0,0436	0,349
6	44	11585	0,0446	0,0061	0,022	0,493
7	31	32768	0,0156	0,003	0,011	0,705
8	22	92682	0,0056	0,00152	0,0055	0,982
9	15	262144	0,00176	0,00071	0,0026	1,48
10	11	741485	0,0007	0,00038	0,0012	1,71
11	7,9	2097152	0,00026	0,0002	0,00072	2,77
12	5,6	5931008	0,000092	0,0001	0,00036	3,91
13	3,9	16777216	0,00003	0,00005	0,00018	6,0
14	2,7	47449064	0,00001	0,000023	0,000083	8,3
15	2,0	123809524	0,0000042	0,0000126	0,000045	10,7
16	1,5	296610169	0,00000177	0,0000071	0,0000254	14,35
17	1,0	1019231000	0,000000524	0,00000314	0,0000113	21,56
18	0,5	8916666900	0,000000065	0,000000785	0,0000028	43,1
19	0,3	37851400000	0,000000014	0,000000283	0,00000102	72,86
20	0,216	100566600000	0,0000000053	0,000000146	0,00000053	100,0

Як видно з рис. 2, стандарт [18] закінчується зерном розміром $2,7 \cdot 10^{-6}$ м і наявністю в структурі сталі аморфності 8,3 % [7]. При зменшенні розміру зерен до $0,216 \cdot 10^{-6}$ м у структурі сталі її ступінь аморфності збільшується до 100 %. Цей діапазон $(0,216 \dots 2,7) \cdot 10^{-6}$ м зміни розміру зерен є проміжним (перехідним) до нанокристалічного стану з діаметром зерен менше 216 нм.

Рис. 2. Залежність ступеня аморфності сталі від величини діаметра її зерен: 1 – аморфна сталь нанокристалічна ($d_m < 0,216 \cdot 10^{-6}$, м); 2 – проміжні кристали ($0,216 \cdot 10^{-6} < d_m < 2,7 \cdot 10^{-6}$, м); 3 – зерна розміром $2,7 \cdot 10^{-6} < d_m < 10^{-5}$, м

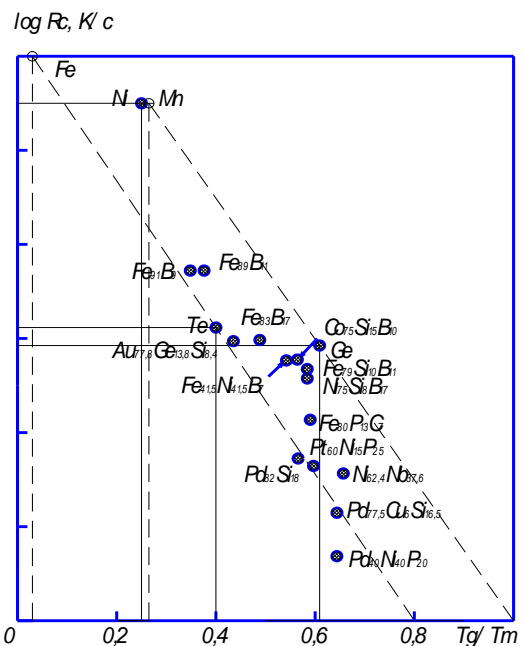


У діапазоні нанокристалічного стану були отримані аморфні плівки *Mn, Cr, Ga, As, Te, Sb, Al, V, Pd, Zr, Hf, Nb, Na, W, Re, Mo* методом вакуумного напилення [15].

Приведені дані дають можливість проаналізувати зв'язок частки аморфізованого шару, який утворився під час кристалізації, від критичної швидкості охолодження. Для цього була побудована графічна залежність (рис. 3) логарифму швидкості охолодження від відношення температури аморфізації T_q до температури плавлення T_m (T_q/T_m), на яку нанесли відомі дані для різних розплавів металів і сплавів [7]. Усі дані скупчені у певній ділянці графіку, що обмежена двома паралельними штриховими прямими, які описуються узагальненим рівнянням $\log Rc = f(T_q/T_m) = (13,49 \dots 15,732) T_q/T_m$.

Такі залежності дають змогу виявити наявність металів і сплавів, які мають однакові швидкості охолодження при навіть досить суттєвій розбіжності у величинах відношення їх температури аморфізації до температури плавлення (T_q/T_m). Як приклад можна навести *Ni* і *Mn*, *Fe₉₁B₉* і *Fe₈₉B₁₁*, *Au_{77,8}G_{13,8}Si_{8,4}* і *Fe₈₃B₁₇*, *Fe_{41,5}Ni_{41,5}B₇* і *Co₇₅Si₁₅B₁₀*, *Pd₈₂Si₁₈* і *Ni_{62,4}Nb_{37,6}* тощо.

Рис. 3. Співвідношення (кореляція) між критичною швидкістю охолодження Rc і відношенням температури аморфізації до температури плавлення (T_q/T_m)



В основі цієї закономірності лежить припущення про єдину фізичну структуру кристалічної будови металевих сплавів, незважаючи на існуючі відмінності в їхньому хімічному й елементарному складі. Тому можна зробити висновок про змогу виготовляти металовироби з визначеним ступенем аморфізації шляхом зміни швидкості охолодження.

При виконанні досліджень був з'ясований вплив режиму обтиснення на структури металу. Дані досліджень дозволили розрахувати розмір зерна та частку аморфізованого шару в умовах холодного прокатування, що приведено в табл. 2. При розрахунках було прийнято, що товщина міжзернових границь є величиною постійною.

З табл. 2 видно, що підвищення ступеня деформації приводить до збільшення ступеня аморфності. Це дає підстави вважати, що холодну обробку металовиробів бажано виконувати при більш інтенсивних режимах обтиснення.

Таблиця 2

Дослідження впливу режиму обтиснення на зміну внутрішньої структури металу

Ступінь деформації, %	Розмір зерна, мкм		Ступінь аморфності, %
	вздовж деформації	впоперек деформації	
15	17	15	14
25	15	12,0	28
50	14	28	52

Висновки та напрямок подальших досліджень. Металографічне дослідження, виконане для вивчення мікроструктури низьковуглецевої сталі, показало, що внутрішня будова сталевих виробів складається з зерен і границь між ними, пор, вакансій. Запропонувавши границі зерен

вважати аморфними, виконані розрахунки об'єму зерен і міжзернових границь у металевих виробках. Визначено режими обтиснення, які забезпечують інтенсивне збільшення ступеня аморфності металу та сплаву при обробці та дозволяють підвищити якість металовиробів.

У подальшому необхідно більш детально дослідити зміни внутрішньої будови металовиробів при обтисненні з метою з'ясування характеру залежності ступеня аморфності від режиму обробки для різних металевих сплавів.

Список літератури

1. **Zhbanova O.M., Saithareyev L.N., Skidin I.E., Shapovalova N.N., Gubin G.G** Investigation of the influence of electro-impulse current on manganiferous liquid-alloy. Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, Sumy, Ukraine. P. 207-213 https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_22.
2. **Viktoriya Chubenko, Alla Khinotskaya, Tatiana Yarosh and Levan Saithareiev.** Sustainable development of the steel plate hot rolling technology due to energy-power process parameters justification / The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020), Kryvyi Rih, Ukraine, Edited by Semerikov, S.; Chukharev, S.; Sakhno, S.; Striuk, A. and etc.; E3S Web of Conferences, Volume 166, id.06010. May 2020, DOI: 10.1051/e3sconf/202016606009.
3. **Василев Я.Д.** Теорія поздовжньої прокатки / **Я.Д. Василев, О.А. Мінаєв.** – Підручник. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
4. Технологія процесів обробки металів тиском: навчальний посібник / **В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька** – Кривий Ріг: Видавець Чернявський Д.О., 2020 – 208 с.
5. **Попович В.В.** Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: підручник / **В.В. Попович, В.В. Попович.** – Львів: Світ, 2006. – 624 с.
6. Теорія обробки металів тиском / **В.М. Данченко, В.О. Грінкевич, О.М. Головка** – Підручник. – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
7. Дослідження об'ємноструктурних і енергетичних перетворень в сталях при прокатуванні. Монографія/**В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька.** - Кривий Ріг: Видавництво (ФО-П Чернявський Д.О.), 2018. – 178 с.
8. Матеріалознавство. Підручник / **Є.Г. Афгандіянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько** // Київ: Вища освіта, 2012. – 548 с.
9. Матеріалознавство. Підручник / **С.С. Дяченко, І.В. Дошечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков** // Харків: ХНАДУ, 2007. – 440 с.
10. **Губенко С.И.** Парусов В.В. Деформация металлических материалов: Учебное пособие для вузов. Днепропетровск: Арт Пресс, 2006. – 36 с.
11. **Губенко С.И., Большаков В.И.** Физические основы пластической деформации металлов: Учебное пособие для вузов. Днепропетровск: ПГАСА, 2004. – 126 с.
12. **Данченко В.М.** Обробка металів тиском: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів з напрямом «Металургія». – Дніпропетровськ: Пороги, 2006. – 183 с.
13. Исследование контактных напряжений при однозонном скольжении металла в валках/ **О.П. Максименко, В.М. Самохвал, О.Е. Лейко** // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 4. – С. 52-55.
14. Исследование предельных условий захвата при прокатке высоких полос / **О.П. Максименко, С.С. Зелянова**// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 5. – С. 32-35.
15. **К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото.** Аморфные металлы. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.
16. **Мала гірнича енциклопедія** : у 3 т. / за ред. **В.С. Білецького.** – Д. : **Донбас**, 2004. – Т. 1 : А – К. – 640 с.
17. ДСТУ 8975:2019 Сталь. Методи випробування та оцінювання мікроструктури
18. ДСТУ 8972:2019 Сталі та сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна.

Рукопис подано до редакції 18.11.2021

УДК 528.48

О. Є. КУЛІКОВСЬКА, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет
В.О. КАТУШКОВ, д-р техн. наук, проф.,
 Київський національний університет будівництва і архітектури

ГЕОДЕЗИЯ, КАРТОГРАФИЯ ТА КАДАСТР В ЯПОНІ

Мета. У зв'язку з появою сучасних вимог щодо забезпечення необхідною інформацією органів державної влади та органів місцевого самоврядування, зацікавлених підприємств, установ і організацій, а також громадян з метою регулювання земельних та інших відносин, визначення розміру плати за землю і цінності земель у складі природних ресурсів, контролю за використанням та охороною земель, економічного, екологічного обґрунтування бізнес-планів та господарських проектів постала мета проаналізувати практику організації геодезичних, картографічних і кадастр-