

© О.М. Ракаєв¹, І.Ю. Соловійов², В.В. Філатов², Д.О. Довгаль², А.А. Опанасенко¹

¹Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ПЛАСТИЧНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ ТА СТРУКТУРНИМИ СКЛАДОВИМИ ПРОМІЖНОГО ТИПУ В БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЯХ

© O. Rakaev¹, I. Soloviov², V. Filatov², D. Dovhal², A. Opanasenko¹

¹Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN PLASTIC DEFORMATION AND INTERMEDIATE STRUCTURAL COMPONENTS IN CONSTRUCTION STEEL

Мета. Дослідити зв'язок між структурними складовими бейнітного типу в будівельних сталях після термічної обробки та оцінити вплив статичної деформації на зміну структурного стану і, як наслідок, механічних властивостей матеріалів.

Методика. Для досягнення мети використано: металографічний метод аналізу структури (Neophot-2, AXIOVERT-2000); вимірювання мікротвердості (ПМТЗ); випробування на розтяг (FP 100/1). Дослідження впливу зовнішнього навантаження на пластичну деформацію структурних складових проводили згідно з ДСТУ 1497-94. Зразки було піддано статичному розтягу до стану руйнування, а також зупинене в точках: початок та кінець границі плинності; середина області залишкової деформації.

Результати. Проведено аналіз виробництва низьковуглецевих сталей після зміцнюючої термічної обробки з отриманням бейнітної структури для сучасного будівництва. Досліджено взаємозв'язок формування різних типів бейнітних структур в матеріалах та розвитком пластичної деформації.

Наукова новизна. Набули подальшого розвитку теоретичні закономірності формування різних типів структур бейнітного фериту в низьковуглецевих сталях після зміцнюючої термічної обробки в залежності від розвитку пластичної деформації. Данні, що отримані з деформацій бейнітних колоній в сталях 10ХСНД та 10Г2ФБ при навантаженні в кінці площадки плинності показали, що деформація з краю зразка до 1/2 довжини змінюється з 73 до 68 %; 10Г2ФБ з краю зразка становить 96 %, а в 1/2 довжини 87 %. При цьому, в залежності від ступеня пластичної деформації змінюється морфологія структур бейнітного типу а саме ширина рейок, які впливають на формування механічних властивостей в комплексі, це відкриває можливість корегування мікроструктурою матеріалу та його комплексом властивостей.

Практична значимість. У сучасному будівництві велику роль відіграють низьковуглецеві мікролеговані сталі. Застосування низьковуглецевих мікролегованих сталей з сформованою заданою структурою бейнітного типу в конструкціях каркасу, дозволяє будувати будівлі високої поверховості табільшепролітні споруди.

Ключові слова: пластична деформація, низьколеговані мікролеговані сталі, бейніт.

Вступ. Низьколеговані сталі є найбільш поширеним та перспективним матеріалом для виготовлення різноманітних видів металоконструкції, в першу

чергу листового прокату, який широко застосовується при виробництві будівельних конструкцій [1].

Сучасний розвиток будівельної галузі вимагає від виробників металопрокату, виробництва добре зварюваних високоміцних сталей для виготовлення металевих конструкцій. Щоб задовольнити ці вимоги почали застосовувати легування сталі різними елементами, які б підвищували комплекс механічних властивостей [2].

Конструкційні сталі являються універсальним матеріалом, який задовольняє різноманітні вимоги до конструкцій при поєднанні експлуатаційних та технологічних характеристик. Таке широке застосування металу в будівництві пояснюється наявністю властивостей, що вигідно відрізняють його від інших будівельних матеріалів. Тому важливим напрямком роботи в матеріалознавстві є дослідження взаємозв'язку між пластичною деформацією та структурними складовими проміжного типу в будівельних сталях [3–5].

Однією з найважливіших властивостей металопрокату є здатність чинити опір руйнуванню. Тому робота направлена на дослідження взаємозв'язку між пластичною деформацією та структурними складовими проміжного типу в будівельних сталях є актуальною.

Основна частина. Для дослідження впливу зовнішнього навантаження на пластичну деформацію структурних складових було виготовлено зразки для проведення статичних випробувань на розтяг. В ході експерименту зразок кожної марки сталі було піддано розтягу до стану руйнування. У наступних зразках розтяг було зупинене в точках: початок границі плинності, кінець границі плинності та середина області залишкової деформації. Таким чином було отримано данні про навантаження в кожній з точок. Результати досліджень представлені у вигляді графіків на рис. 1–2 та у таблицях 1–2.

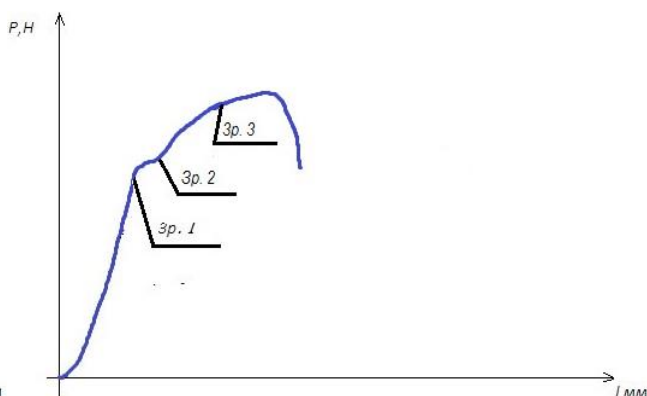
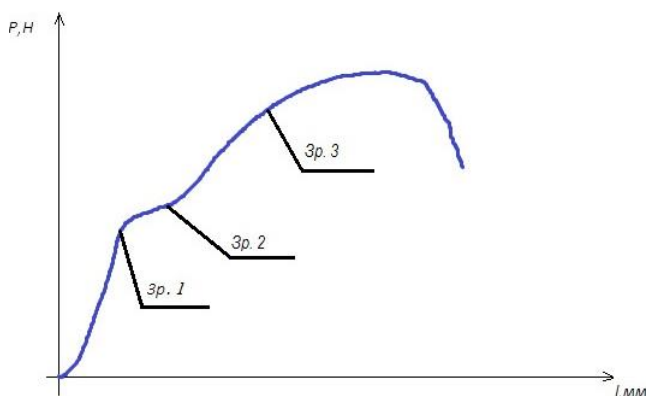


Рис. 1. Діаграма розтягу сталі 10ХСНД Рис. 2. Діаграма розтягу сталі 10Г2ФБ

Таблиця 1
Експериментально розрахункові навантаження при лабораторних дослідженнях

Сталь	Зусилля навантаження Р, Н		
	Зр.1	Зр.2	Зр.3
10ХСНД	5177	5330	6472

Таблиця 2

Експериментально розрахункові дослідження навантаження
при лабораторних дослідження

Сталь	Зусилля навантаження Р, Н		
	Зр.1	Зр.2	Зр.3
10Г2ФБ	5406	6167	7157

За допомогою металографічного методу на мікроскопі «Neophot-2» було отримано і досліджено знімки структури сталей у вихідному стані після термічної обробки (рис. 3–4). По знімкам було вираховано середні розміри бейнітних колоній.

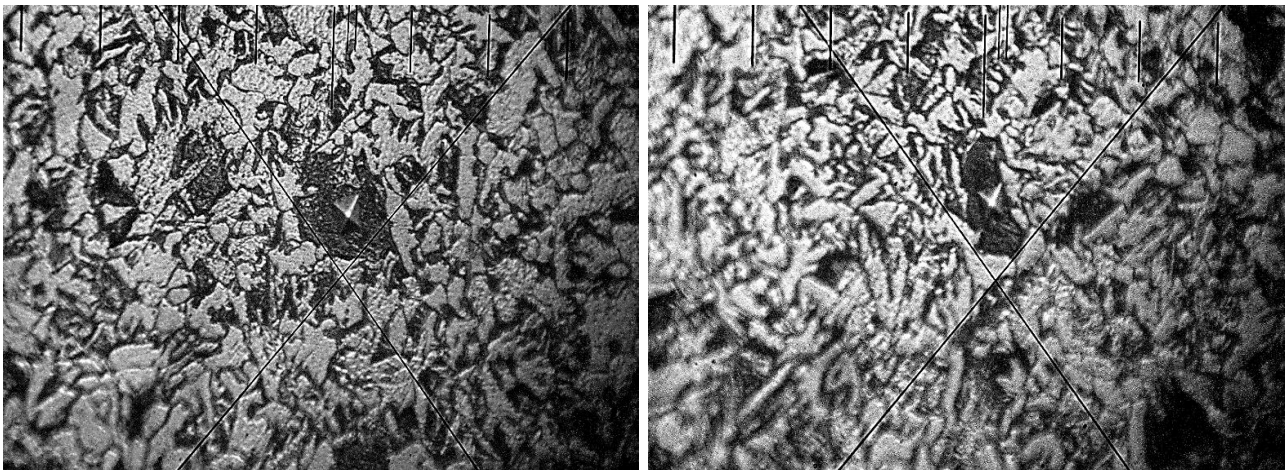


Рис. 3. Мікроструктура сталі 10ХСНД, х 500, з видимими уколами мікротвердоміра у бейнітну область

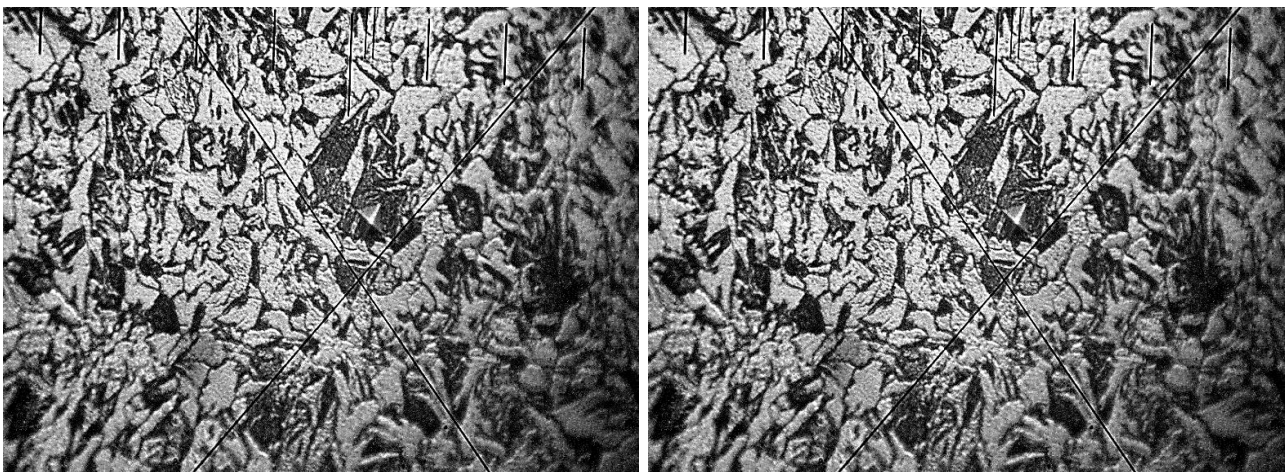


Рис. 4. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ, х 500, з видимими уколами мікротвердоміра у бейнітну область.

З метою кількісного аналізу структурних складових були виміряні геометричні розміри бейнітних колоній. Середній розмір бейнітних колоній у вихідному стані: для сталі 10ХСНД склав 0,0048 мм, для сталі 10Г2ФБ дорівнює 0,0056 мм (рис. 5, 6).

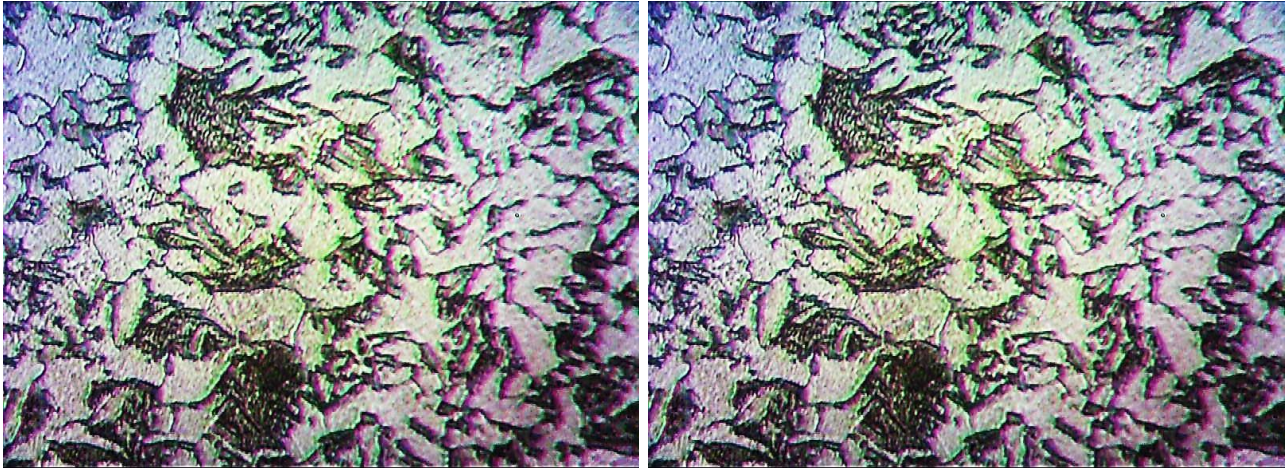


Рис. 5. Мікроструктура сталі 10ХСНД, х 500, після розтягнення з навантаженням 6472 Н: приповерхнева область зразка, $\frac{1}{4}$ від поверхні зразка

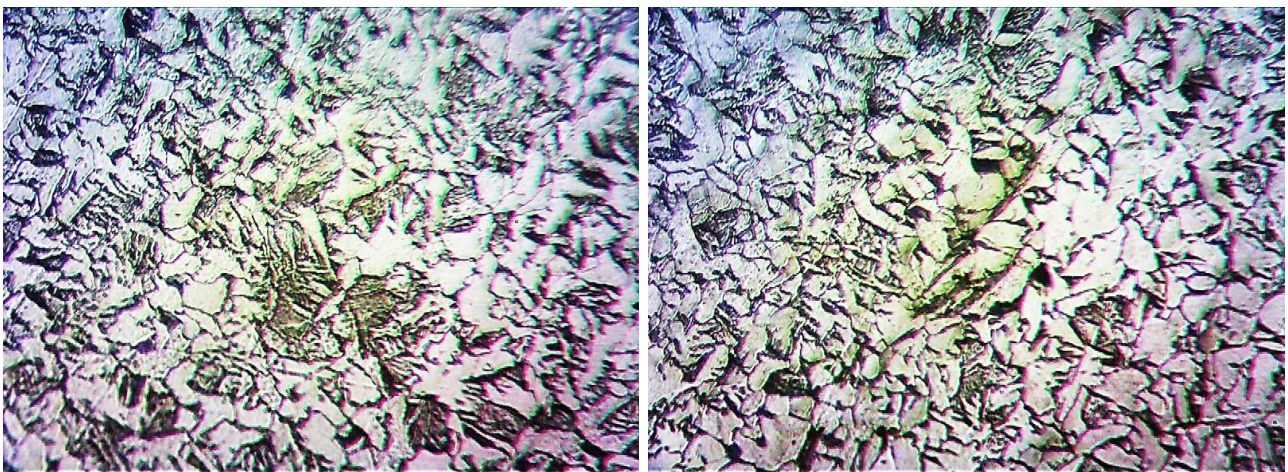


Рис. 6. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ, х 500, після розтягнення з навантаженням 7157 Н: приповерхнева область зразка, $\frac{1}{4}$ від поверхні зразка.

З метою виявлення розповсюдження пластичної деформації у сталях із структурою проміжного типу перетворення (бейнітна складова) [5–8] було проведено вимірювання геометричних розмірів бейнітних колоній після деформації з відповідними навантаженнями. Результати проведених підрахунків приведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Середній розмір бейнітних колоній після деформації

Сталь	Зразок	Зона зразка	Розмір колонії в мм	Навантаження
10ХСНД	3. 1. 1	при поверхнева область зразка	0,0069	5177
		¼ від поверхні зразка	0,0072	6472
	3. 1. 2	при поверхнева область зразка	0,0065	5177
		¼ від поверхні зразка	0,0068	5330
		½ від поверхні зразка	0,0071	6472
	3. 1. 4	при поверхнева область зразка	0,0061	5177
		¼ від поверхні зразка	0,0064	5330
		½ від поверхні зразка	0,0069	6472
10Г2ФБ	Х1	при поверхнева область зразка	0,0058	5406
		¼ від поверхні зразка	0,0061	6167
		½ від поверхні зразка	0,0064	7157
	Х2	при поверхнева область зразка	0,0060	5406
		¼ від поверхні зразка	0,0062	6167
		½ від поверхні зразка	0,0065	7157
	Х3	при поверхнева область зразка	0,0054	5406
		¼ від поверхні зразка	0,0059	6167
		½ від поверхні зразка	0,0063	7157

Відповідно до отриманих даних була розраховані значення деформація бейнітних колоній за наступною формулою:

$$\varepsilon = \Delta X_0 / \Delta X_K \times 100\%$$

Результати підрахунків приведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Деформація бейнітних колоній у досліджуваних сталях

Сталь	Зона зразка	ε , %
10ХСНД	приповерхнева область зразка	73
	¼ від поверхні зразка	70
	½ від поверхні зразка	68
10Г2ФБ	приповерхнева область зразка	96
	¼ від поверхні зразка	91
	½ від поверхні зразка	87

Висновок. Для дослідження впливу зовнішнього навантаження на пластичну деформацію структурних складових було виготовлено зразки для проведення статичних випробувань на розтяг. В ході експерименту зразок кожної марки сталі було піддано розтягу до стану руйнування. У наступних зразках розтяг було зупинено в точках: початок границі плинності, кінець границі плинності та середина області залишкової деформації. Таким чином було отримано данні про навантаження в кожній з точок. За допомогою металографічного методу на мікроскопі «Neophot-2» було отримано і досліджено знімки структури сталей у вихідному стані після термічної обробки. По знімкам було вираховано середні розміри бейнітних колоній, які склали: 10ХСНД – 0,0048 мм; 10Г2ФБ – 0,0056 мм.

Досліджено знімки структури після деформації, вираховані середні розміри бейнітних колоній в таких зонах зразку: при поверхнева область, $\frac{1}{4}$ довжини, $\frac{1}{2}$ довжини, які склали: 10ХСНД – край – 0,0065 мм.; $\frac{1}{4}$ довжини – 0,0064 мм.; $\frac{1}{2}$ довжини – 0,0071. 10Г2ФБ – край – 0,0060 мм.; $\frac{1}{4}$ довжини – 0,0062 мм.; $\frac{1}{2}$ довжини – 0,0065.

Данні отримані з деформацій бейнітних колоній в сталі 10ХСНД при навантаженні в кінці площадки плинності показали, що деформація з краю зразка становить 73 %, в $\frac{1}{4}$ довжини вона становить 70 % а в $\frac{1}{2}$ довжини 68 %; 10Г2ФБ при навантаженні в кінці площадки плинності деформація з краю зразка становить 96 %, в $\frac{1}{4}$ довжини вона становить 91 % а в $\frac{1}{2}$ довжини 87 %. В залежності від обраної марки сталі та зміцнюючої термічної обробки відкриває можливість корегування мікроструктурою матеріалу, і як наслідок, його комплексом властивостей.

Перелік посилань

1. Liu, F., Yu, X., Huang, C., He, L., Chen, Y., & Bu, W. (2015). Microstructure and mechanical properties of AerMet 100 ultra-high strength steel joints by laser welding. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 30(4), 827–830. <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1236-0>
2. Keehan, E., Zachrisson, J., & Karlsson, L. (2010). Influence of cooling rate on microstructure and properties of high strength steel weld metal. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(3), 233–238. <https://doi.org/10.1179/136217110x12665048207692>
3. Svensson, L. (2007). Microstructure and Properties of High Strength Weld Metals. *Materials Science Forum*, 539–543, 3937–3942. <https://www.semanticscholar.org/paper/eb6b76c01ec0d8067a7e429ed77c1d92592e0498>
4. Markashova, L. I., Poznyakov, V. D., Shelyagin, V. D., Berdnikova, E. N., Bernatsky, A. V., & Alekseenko, T. A. (2018). Effect of metal structure on service properties of high-strength steel welded joints produced using different methods of welding. *The Paton Welding Journal*, 2018(2), 7–13. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.02.02>
5. Feng, X., Wang, B., Gu, N., & Ma, X. (2005). Effect of moderate temperature deformation on microstructure of link chain steel 23MnNiCrMo54. *Journal of iron and steel research*, 3, 42–46. http://caod.oriprobe.com/articles/8919493/Effect_of_Moderate_Temperature_Deformation_on_Microstructure
6. Kania, H., & Liberski, P. (2013). The Structure and Growth Kinetics of Zinc Coatings on Link Chains Produced of the 23MnNiCrMo5-2 Steel. *Solid State Phenomena*, 212, 145–150. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.212.145>

7. Laukhin, D., Ziborov, K., Fedoryachenko, S., & Rott, N. (2024). Influence of Temperature-Strain Parameters of Shelters Reinforcing Materials on Increasing Properties in the Z-Direction. *Materials Science Forum*, 1126, 111–118. <https://doi.org/10.4028/p-j10tbj>
8. Kostin, V. A., Laukhin, D. V., & Nyrkova, L. I. (2023). Cracking of the Concrete Matrix Due to the Pressure of Corrosion Products in Reinforced Concrete. *Materials Science*, 58(6), 774–780. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00729-8>

ABSTRACT

Objective. To investigate the relationship between the structural components of the bainite type in structural steels after heat treatment and to assess the influence of static deformation on the change in the structural state and, as a result, the mechanical properties of materials.

Methodology. To achieve the goal, the following were used: metallographic method of structure analysis (Neophot-2, AXIOVERT-2000); microhardness measurement (PMT3); tensile test (FP 100/1). The study of the influence of external load on plastic deformation of structural components was carried out in accordance with DSTU 1497-94. The samples were subjected to static tension to the state of failure, and also stopped at the points: the beginning and end of the yield point; the middle of the residual deformation region.

Results. Further development of the theoretical patterns of formation of various types of bainitic ferrite structures in low-carbon steels after intense thermal processing in storage due to the development of plastic deformation began to develop. Data from the deformation of bainite colonies in steels 10XCHД and 10Г2ФБ with the addition of a planarity at the end of the platform showed that the deformation from the edge of the grain changes from 73 to 68 up to $\frac{1}{2}$. 10G2FB at the edge of the cooling becomes 96%, and at $\frac{1}{2}$ 87%. In this case, in the course of the stage of plastic deformation, the morphology of bainitic-type structures and the width of the slats itself changes, which influences the formation of mechanical forces in the complex, which opens up the possibility of microstructure of the material and its complex of powers.

The originality. The theoretical regularities of the formation of different types of bainitic ferrite structures in low-carbon steels after strengthening heat treatment depending on the development of plastic deformation have been further developed. The data obtained from the deformations of bainite colonies in steels 10XSND and 10G2FB under loading at the end of the yield point showed that the deformation from the edge of the sample to $\frac{1}{2}$ the length changes from 73 to 68%; 10G2FB from the edge of the sample is 96%, and at $\frac{1}{2}$ the length 87%. At the same time, depending on the degree of plastic deformation, the morphology of bainite-type structures changes, namely the width of the rails, which affect the formation of mechanical properties in the complex, this opens up the possibility of adjusting the microstructure of the material and its complex of properties.

Practical implementation. Low-carbon microalloyed steels play a large role in modern construction. The use of low-carbon microalloyed steels with a pre-formed bainite-type structure in frame structures allows for the construction of high-rise buildings and multi-span structures.

Keywords: plastic deformation, low-carbon microalloyed steels, bainite.