

УДК 620.181.4:691.714

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.26.1039

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТОВЩИНОЮ ТА СТРУКТУРНИМ СТАНОМ МЕТАЛОПРОКАТУ З НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 10Г2ФБ

БЕКЕТОВ О. В.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
ЛАУХІН Д. В.², докт. техн. наук, проф.,
ДАДІВЕРІНА Л. М.³, канд. техн. наук, доц.,
КОЗЕЧКО В. І.⁴, асп.,
ТАРАНЕНКО А. О.⁵, інж.

^{1*} Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 585-54-29, e-mail: Laukhin.D.V@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Кафедра будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 517-33-40, e-mail: Dadiverina.L.M@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-4498-2184

⁴ Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 650-90-22, e-mail: valont1975@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2370-1603

⁵ Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади», вул. Писаржевського, 1А, 49000, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0001-6370-4492

Анотація. У виборі сталей для проєктування висотних та великопрогінних будівель підвищеної несучої здатності доцільно віддавати перевагу товстолистовому прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей, оскільки він, за однакового рівня міцності з будівельними сталями, має більш високий рівень пластичності. При цьому проблема використання товстолистового прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей в будівельній індустрії полягає в анізотропії властивостей металопрокату, яка може підсилюватися зі збільшенням товщини металопрокату. Наразі в Україні контрольована прокатка – одна з найбільш перспективних технологій високотемпературної термомеханічної обробки для виробництва товстолистового металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. При цьому зі збільшенням товщини металопрокату, який виробляється за цією технологічною схемою, ефект регламентованого утворення структурного стану знижується через вплив на температуру поверхневих шарів металопрокату термодинамічного стану внутрішніх шарів та неспроможність наявного на вітчизняних підприємствах прокатного обладнання продеформувати метал по всій площі поперечного перерізу. Отже, актуальним бачиться отримання в товстолистовому металопрокаті такого структурного стану, який забезпечить зниження анізотропії властивостей, що дозволить використовувати такий металопрокат в будівельній індустрії. **Мета статті** – дослідження структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ, яку вироблено за технологією контрольованої прокатки, залежно від товщини металопрокату. **Висновок.** Досліджено взаємозв'язок між структурним станом та товщиною металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ, яку вироблено за технологією контрольованої прокатки. Встановлено, що зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням відсоткового вмісту перлітної фази. Показано, що зміни в мовах утворення структурних складових починаються за збільшення товщини металопрокату понад 30 мм, що пояснюється впливом температури внутрішніх шарів на процеси формування структурного стану, а саме зі збільшенням товщини металопрокату термодинамічна швидкість фазових перетворень у серединних шарах зразків металопрокату зменшується. Цей висновок підтверджується двома чинниками: по-перше, збільшенням розмірів перлітних колоній, по-друге, – зміною морфології цементитного каркаса перлітних колоній із зигзагоподібного (товщина 16...30 мм) на стрічковий (товщина 40...100 мм).

Ключові слова: структурний стан; контрольована прокатка; низьковуглецева низьколегована сталь; мікроструктура; формування мікроструктури; вміст структурних складових

STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THICKNESS AND STRUCTURAL CONDITION OF ROLLED METAL FROM LOW CARBON LOW ALLOY STEEL 10G2FB

BEKETOV O.V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
LAUKHIN D.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
DADIVERINA L.M.³, *PhD, Assoc. Prof.*,
KOZECHKO V.I.⁴, *PhD Student*,
TARANENKO A.O.⁵, *Engineer*

^{1*} Department of Fundamental and Natural Sciences, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (050) 585-54-29, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (066) 517-33-40, e-mail: Dadiverina.L.M@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-4498-2184

⁴ Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (050) 650-90-22, e-mail: valont1975@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2370-1603

⁵ State Enterprise "Scientific-research and design-technological institute of the pipe industry named after Ya.Yu. Osada", 1a, Str. Pysarzhevskiyi, Dnipro, 49000, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-6370-4492

Abstract. When choosing steels for the design of high-rise and long-span buildings with increased load-bearing capacity, it is advisable to give preference to thick rolled steel from low-carbon, low-alloy steels, since it, with the same level of strength as construction steels, has a higher level of plasticity. At the same time, the problem of using thick rolled steel from low-carbon, low-alloy steels in the construction industry are the anisotropy of the rolled metal properties, which can increase with an increase in the thickness of the rolled metal. Currently, in Ukraine, controlled rolling is one of the most promising technologies of high-temperature thermomechanical processing for the production of thick rolled metal from low-carbon, low-alloy steels. At the same time, with an increase in the thickness of the rolled metal, which is produced with this technological scheme, the effect of the regulated formation of the structural state decreases due to the influence on the temperature of the surface layers of the rolled metal, the thermodynamic state of the inner layers and the inability of the rolling equipment available at domestic enterprises to deform the metal over the entire cross-sectional area. Therefore, the task of obtaining such a structural state in the thick sheet metal roll, which will ensure the reduction of the anisotropy of the properties, which will allow the use of such rolled metal in the construction industry, is urgent. **Purpose of the article** is to study of the structural state of low-carbon low-alloy steel 10G2FB, which was produced using the technology of controlled rolling, depending on the thickness of the rolled metal. **Conclusion.** The relationship between the structural state and the thickness of rolled metal from low-carbon low-alloy steel 10G2FB, which was produced by controlled rolling technology, was studied. It was established that with the increase in thickness, the percentage content of the ferrite component increases with a simultaneous decrease in the percentage content of the pearlite phase. It is shown that changes in the formation languages of structural components begin with an increase in the thickness of the rolled metal over 30 mm, which is explained by the influence of the temperature of the inner layers on the processes of forming the structural state, namely, with an increase in the thickness of the rolled metal, the thermodynamic rate of phase transformations in the middle layers of the rolled metal samples decreases. This conclusion is confirmed by two factors: firstly, an increase in the size of pearlite colonies, and secondly, a change in the morphology of the cementite framework of pearlite colonies from zigzag (thickness 16...30 mm) to ribbon (thickness 40...100 mm).

Keywords: *structural condition; controlled rolling; low-carbon low-alloy steel; microstructure; microstructure formation; content of structural components*

Постановка проблеми. У виборі сталей для проєктування висотних та великопрогінних будівель підвищеної несучої здатності доцільно віддавати перевагу товстолистовому прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей, оскільки він, за однакового рівня міцності з

будівельними сталлями, має більш високий рівень пластичності. Незважаючи на порівняно високу вартість цих сталей, використання їх у промисловому і цивільному будівництві стало економічно доцільним, завдяки економії грошових витрат за рахунок зменшення вартості

монтажу, транспортування, зварювальних робіт, об'єму наплавленого матеріалу тощо [1].

Разом із цим проблема використання товстолистового прокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей в будівельній індустрії полягає в анізотропії властивостей металопрокату [2]. Тобто під час виробництва зварних металевих конструкцій із зазначеного типу сталей та подальшої їх експлуатації може постати проблема фізичної нелінійності (термінологія згідно з вимогами [3]). При цьому низка експериментальних досліджень (див., наприклад, роботи [4; 5]) показують, що ефект фізичної нелінійності збільшується зі збільшенням товщини металопрокату. Отже, актуальним бачиться завдання отримання в товстолистовому металопрокаті такого структурного стану, який забезпечить зниження анізотропії властивостей, що дозволить використовувати такий металопрокат у будівельній індустрії.

Аналіз публікацій. Наразі в Україні контрольована прокатка – одна з найбільш перспективних технологій високо-температурної термомеханічної обробки для виробництва товстолистового металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. Це пояснюється тим, що технологічна схема контрольованої прокатки надає можливість одночасного підвищення міцності, пластичності, в'язкості і холодостійкості за рахунок отримання в процесі гарячої прокатки дрібного зерна фериту в поєднанні з ефектом дисперсійного зміцнення.

Найважливіша особливість металу, виробленого за технологією контрольованої прокатки, полягає в наявності мікродобавок потужних карбідоутворюючих елементів. Параметр решітки карбідів і нітридів прямо впливає на можливість зміцнення шляхом дисперсійного твердіння під час прокатки [6].

Таким чином, структурний стан, що утворюється внаслідок застосування контрольованої прокатки, залежить від [7]:

- температури перетворення аустеніту: чим нижча температура перетворення аустеніту, тим менший розмір кінцевого зерна фериту;

- величини вихідного зерна аустеніту: феритна складова зароджується переважно на границях колишніх зерен аустеніту;

- морфології аустенітного зерна;

- утворення частинок другої фази, які виділяються в феритному зерні.

Разом із цим, зі збільшенням товщини металопрокату, який виробляється за технологією контрольованої прокатки, ефект регламентованого утворення структурного стану знижується за рахунок двох факторів:

- розігріву металу за рахунок тепла внутрішніх шарів (чинить суттєвий вплив у разі товщини металопрокату понад 40 мм);

- неспроможності наявного на підприємствах України прокатного обладнання продеформувати метал по всій площі поперечного перерізу (має місце для товщин металопрокату більших за 20 мм).

Мета статті – дослідження структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ, яку вироблено за технологією контрольованої прокатки, залежно від товщини металопрокату.

Результати досліджень. Як матеріал для дослідження обрано низьковуглецеву низьколеговану сталь 10Г2ФБ в товщинах: 16, 20, 30, 40, 50, 70, 100 мм. Відповідний для кожної товщини хімічний склад (усереднений) наведено в таблиці 1. Хімічний склад зразка визначався за допомогою приладу «SPECTROMAX» згідно з рекомендаціями [8].

Дослідження структурного стану здійснювали із застосуванням растрового електронного мікроскопа РЕМ-106І згідно з рекомендаціями, наведеними у праці [9]. Кількісний аналіз структурного стану робили згідно з пропозиціями, викладеними в праці [8].

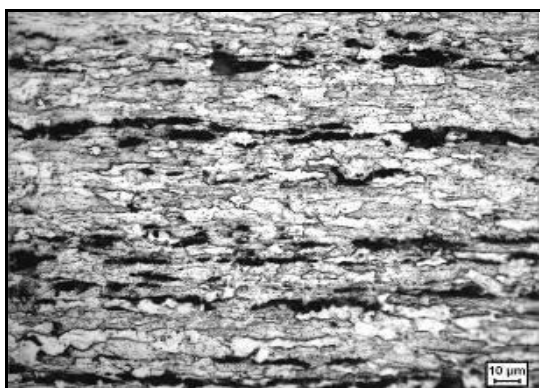
Аналіз морфології структурного стану зразків сталі 10Г2ФБ (рис. 1, 2) показав, що для всіх досліджуваних товщин структура сталі являє собою ферито-перлітний

конгломерат. Феритні зерна мають колонії квазіевтектоїду. поліедричну форму. Перліт являє собою

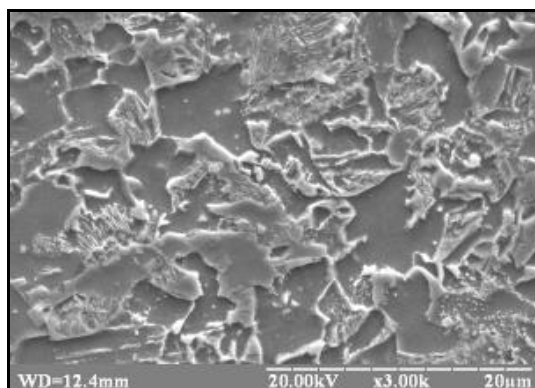
Таблиця 1

Хімічний склад сталі 10Г2ФБ

Товщина, мм	Елемент, %									
	C	Mn	Si	S	Cr	Ni	Ti	Mo	V	Nb
16	0,15	1,29	0,25	0,004	0,02	0,01	0,016	0,002	0,062	0,04
20	0,16	1,28	0,24	0,004	0,02	0,01	0,015	0,001	0,061	0,038
30	0,16	1,26	0,23	0,004	0,02	0,01	0,015	0,002	0,062	0,038
40	0,16	1,27	0,26	0,003	0,02	0,01	0,016	0,002	0,059	0,042
50	0,17	1,37	0,21	0,004	0,03	0,02	0,014	0,006	0,046	0,037
70	0,17	1,43	0,19	0,004	0,08	0,02	0,015	0,009	0,036	0,016
100	0,18	1,43	0,34	0,003	0,04	0,02	0,014	0,002	0,036	0,024



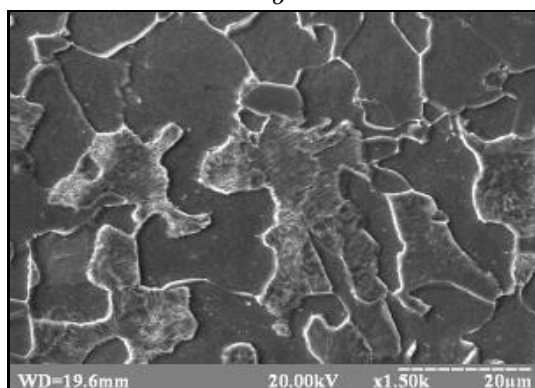
a



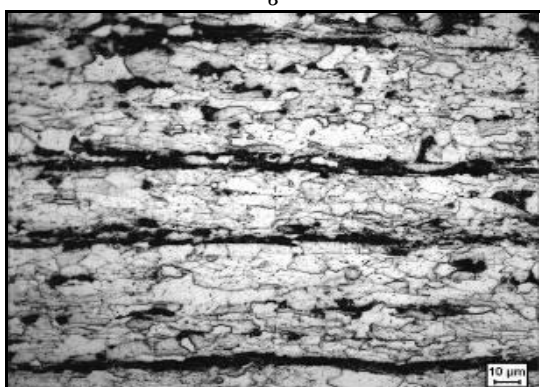
б



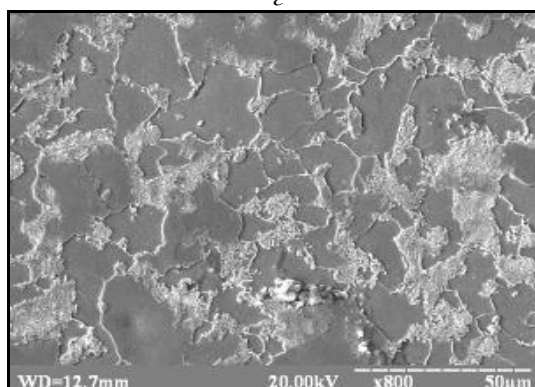
в



г



д



е

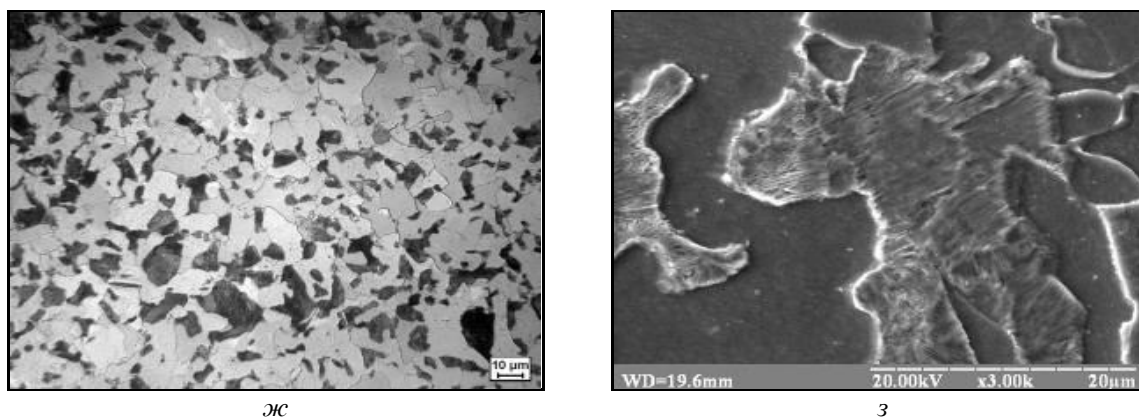


Рис. 1. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ в товщинах: а, б – 16 мм; в, г – 20 мм; д, е – 30 мм; ж, з – 40 мм

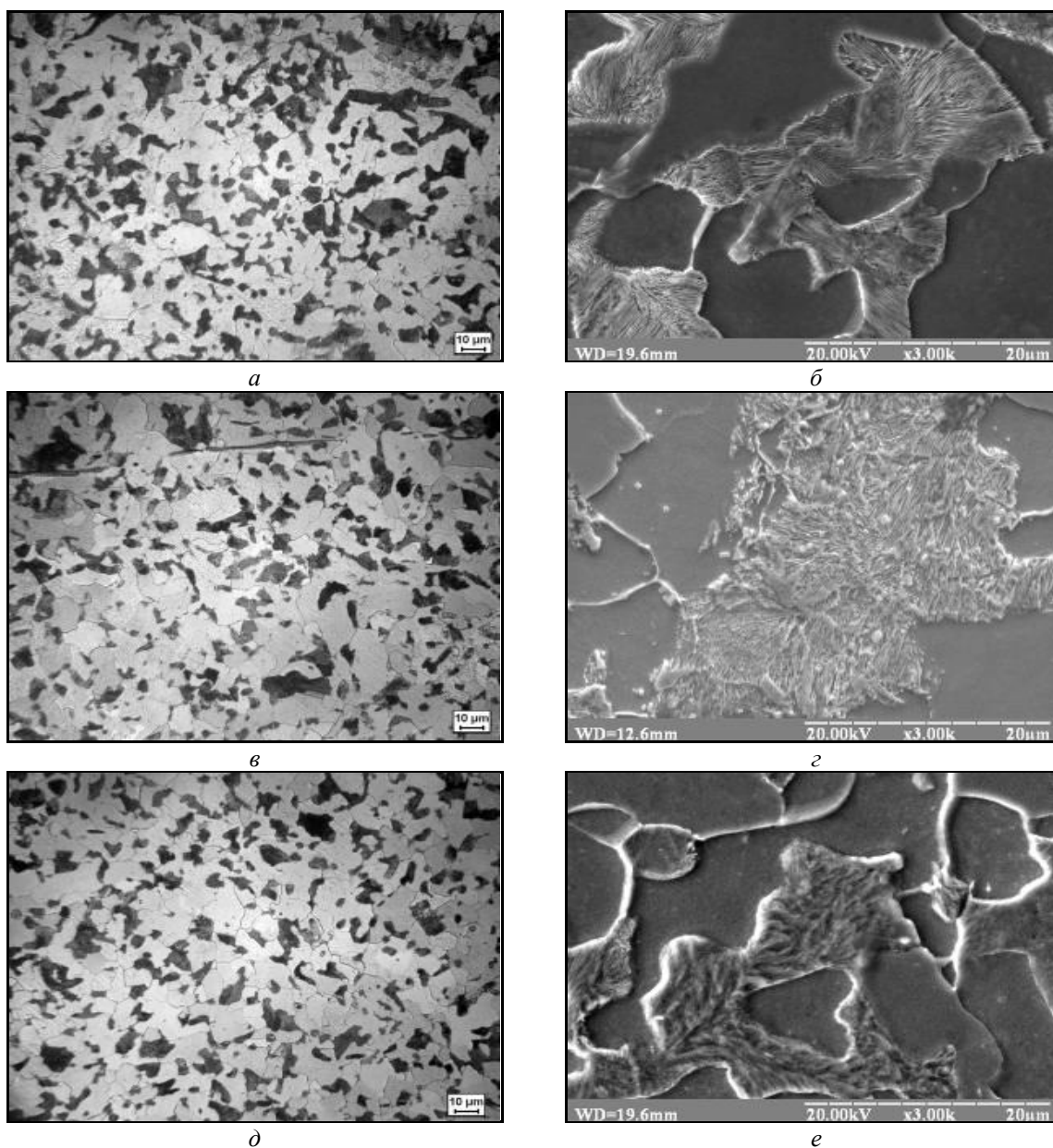


Рис. 2. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ в товщинах: а, б – 50 мм; в, г – 70 мм; д, е – 100 мм

Результати проведених досліджень показали, що при товщинах 16...30 мм

структурний стан формується за добре описаним у літературі механізмом фазових

перетворень, які відбуваються під час контрольованої прокатки [10]. Відповідно до запропонованих концепцій, зародки нових фаз з'являються найчастіше на поверхні зерен аустеніту й включень. Надалі відбувається поступове зростання цементиту й фериту у вигляді приблизно рівновісних утворень.

У деякий момент на границях зерен виникають зародки цементиту, які ростуть у вигляді пластин усередину зерна. На поверхні кожної пластини цементиту, як на підкладці, кристалізується ферит, чому сприяє збагачення цієї ділянки аустеніту залізом. Ріст пластини фериту викликає збагачення вуглецем сусідньої ділянки аустеніту, що полегшує появу нового зародка цементиту.

Таким чином, позмінна перекристалізація цементиту й фериту поширюється уздовж границь. З'являються колонії перліту, ріст яких триває до їх взаємного зіткнення (див., наприклад, рис. 1 *з*). При цьому форму цементитного каркасу можливо віднести до зигзагоподібного типу (згідно з даними [11]). Також при зазначених товщинах у структурі спостерігається так звана перлітна смугастість (чергування смужок фериту та перліту, див. рис. 1 *а, в, д*), притаманна сталям, які виготовлені саме за

технологічною схемою контрольованої прокатки [6; 7].

При товщинах більших 30 мм перлітна складова не утворює смуги, а рівномірно розподіляється по об'єму металу (рис. 1 *ж*; рис. 2 *а, в, д*). Це свідчить, що при збільшенні товщини понад 30 мм температура внутрішніх шарів безпосередньо впливає на процеси формування структурного стану. Як наслідок, встигає відбутися перерозподіл зернограничної субструктури: міграція границь шляхом збільшення геометричних розмірів аустенітних зерен і, як наслідок, зменшення потенційних місць зародження фериту. Це спричинює одночасне збільшення розмірів феритної (див. рис. 2 *б*) і зміни умов (у першу чергу, швидкості охолодження) формування перлітної складових, що підтверджується зміною, зі збільшенням товщини металопрокату, форми цементитного каркасу перлітних колоній з зигзагоподібного (див. рис. 1 *б, г, е*) на стрічковий (див. рис. 2 *б, г, е*) відповідно до класифікації, яку запропоновано у роботі [11].

Кількісний аналіз відсоткового вмісту структурних складових та результати кількісної оцінки розмірів структурних складових (феритних зерен та колоній перліту) наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати кількісної оцінки параметрів структурного стану

Товщина металопрокату, мм	Відсотковий вміст структурних складових, %		Розмір структурних складових, мкм	
	ферит	перліт	ферит	перліт
16	80	20	7	7
20	85	15	8	0
30	75	25	9	11
40	80	20	13	13
50	80	20	4	14
70	75	25	15	16
100	75	25	18	17

Сумісний аналіз даних рисунків 1...3 та таблиць 2, 3 показує, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається зростання розмірів структурних складових, при цьому їх відсоткове співвідношення майже не змінюється (зміни перебувають у межах допустимої похибки). Цей факт

також можливо пояснити впливом термодинамічного стану внутрішніх шарів на фазові перетворення, які відбуваються у разі переохолодження аустеніту. Тобто зі збільшенням товщини металопрокату термодинамічна швидкість фазових перетворень у серединних шарах зразків

металопрокату зменшується. Підтвердженням цього є, по-перше, збільшення розмірів перлітних колоній, по-друге, зміна морфології цементитного каркаса. Згідно з результатами, отриманими в роботі [11], зигзагоподібна форма цементитного каркасу перлітної колонії (спостерігається для товщин 16...30 мм) утворюється зі швидкістю охолодження, більшою, ніж стрічкова (спостерігається для товщин 40...100 мм).

Висновки

1. Досліджено взаємозв'язок між структурним станом та товщиною металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ, виробленої за технологією контрольованої прокатки.

2. Проведений комплекс досліджень показав, що для усіх товщин, які розглядалися в роботі, структура містить феритно-перлітний конгломерат у різному відсотковому співвідношенні. Ферит формується у вигляді зерен поліедричної форми, а перлітна складова являє собою колонії квазіевтектоїду.

3. Дослідженнями встановлено, що зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням відсоткового

вмісту перлітної фази. Для сталі товщиною 100 мм мікроструктура складається з 80% фериту та 20% перліту.

4. Результати проведених досліджень показали, що зміни в умовах утворення структурних складових починаються при збільшенні товщини металопрокату понад 30 мм. При товщинах металопрокату 16...30 мм спостерігається перлітна смугастість, притаманна сталям, які виготовлені саме за технологічною схемою контрольованої прокатки.

Разом із цим, при товщинах більших за 30 мм перлітна складова не утворює смуги, а рівномірно розподіляється по об'єму металу. Таку зміну морфології можливо пояснити впливом температури внутрішніх шарів на процеси формування структурного стану, а саме зі збільшенням товщини металопрокату термодинамічна швидкість фазових перетворень у серединних шарах зразків металопрокату зменшується.

Цей висновок підтверджується двома чинниками: по-перше, збільшенням розмірів перлітних колоній, по-друге, зміною морфології цементитного каркаса перлітних колоній із зигзагоподібного (спостерігається для товщин 16...30 мм) на стрічковий (спостерігається для товщин 40...100 мм).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гезенцевей Ю. І. Внутрішні критерії оцінки якості конструктивних рішень при проектуванні сталевих будівельних конструкцій. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2020. № 4. С. 40–42. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21RE F=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP meta&C21COM=S&2 S21P03=FILE=&2 S21STR=Pbis 2020 4
2. Гезенцевей Ю. І., Большаков В. І. Формування полігонізованої структури в товстолистовому прокаті для забезпечення механічних властивостей у трьох напрямках. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 2 (002). С. 55–61. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/235816>
3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 197 с. URL: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3022132243112920267/2023-01-23/f8e72731-4394-4c5c-825f-0eff1fc3281a.pdf
4. Honeycombe R. W. K., Bhadeshia H. K. D. H. Steels. Microstructure and properties. London : Edward Arnold, 1995. 323 p. URL: <https://search.worldcat.org/title/steels-microstructure-and-properties/oclc/33045504>
5. Gladman T., Dulieu D., McIvor I.D. Structure–property relationships in high strength microalloyed steels. International Conference “Micro–Alloying-75”, Washington, USA, 1-3 october 1975. Ohio : Metals park, 1975. Pp. 32–58. URL: https://www.researchgate.net/publication/306134928_Evolution_of_Microalloyed_Steels_Since_Microalloying_75_with_Specific_Emphasis_on_Linepipe_and_Plate
6. Beketov O., Laukhin D., Rott N., Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. Pp. 13–19. URL: <https://www.scientific.net/SSP.291.13>
7. Krauss G. Steels. Processing, Structure and Performance. Ohio : ASM International, Metals park, 2006. 593 p. URL: <https://www.asminternational.org/wp-content/uploads/files/23403074/23403074-toc.pdf>

8. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Лаухин Д. В. Атлас металлов и сплавов : учеб. пособ. Днепропетровск : ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», 2010. 174 с. URL : <https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/05/bolshakov-vy-atlas-struktur-metallov-y-splavov.pdf>
9. Stokes D. J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 221 p. URL : https://www.researchgate.net/publication/285935810_Principles_and_Practice_of_Variable_PressureEnvironmental_Scanning_Electron_Microscopy_VP-ESEM
10. Лаухін Д. В., Ротт Н. О., Бекетов О. В., Пустовой Д. С., Письменкова Т. О., Бабенко Є. О. Дослідження структури і властивостей будівельних сталей після безперервної контрольованої прокатки. *Вісник ХНАДУ*. 2020. Вип. 91. С. 49–57. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/article/view/220041>
11. Бекетов О. В. Теоретичні основи формування субструктури переохолодженого аустеніту та механічних властивостей мікролегованих будівельних сталей : дис. ... док. техн. Наук : 05.02.01. Дніпро : ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2020. 340 с. URL: https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2021/04/diser_Beketov.pdf

REFERENCES

1. Hezentsvey Yu.I. *Vnutrishni kryteriyi otsinky yakosti konstruktyvnykh rishen' pry proyektuvanni stalevykh budivel'nykh konstruktсий* [Internal criteria for assessing the quality of structural solutions in the design of steel building structures]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy* [Industrial Civil Engineering and Engineering Structures]. 2020, no. 4, pp. 40–42. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Pbis_2020_4_8 (in Ukrainian).
2. Hezentsvey Yu.I. and Bol'shakov V.I. *Formuvannya polihonizovanoyi struktury v tovstolystovomu prokati dlya zabezpechennya mekhanichnykh vlastyvostry u tr'okh napryamakh* [Formation of a polygonized structure in thick rolled steel to ensure mechanical properties in three directions]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 2 (002), pp. 55–61. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/235816> (in Ukrainian).
3. *DBN V.2.6-198:2014 Stalevi konstruktсийi. Normy proektuvannya* [DBN V.2.6-198:2014 Steel structures. Design standards]. Kyiv Minrehion Ukrayiny Publ., 2014, 197 p. URL : https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3022132243112920267/2023-01-23/f8e72731-4394-4c5c-825f-0eff1fc3281a.pdf (in Ukrainian).
4. Honeycombe R.W.K. and Bhadeshia H.K.D.H. Steels. Microstructure and properties. London : Edward Arnold, 1995, 323 p. URL: <https://search.worldcat.org/title/steels-microstructure-and-properties/oclc/33045504>
5. Gladman T., Dulieu D. and McIvor I.D. Structure–property relationships in high strength microalloyed steels. International Conference “Micro–Alloying 75”, Washington, USA, 1–3 October 1975, Ohio : Metals park, 1975, pp. 32–58. URL: https://www.researchgate.net/publication/306134928_Evolution_of_Microalloyed_Steels_Since_Microalloying_'75_with_Specific_Emphasis_on_Linepipe_and_Plate
6. Beketov O., Laukhin D., Rott N. and Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*. 2019, vol. 291, pp. 13–19. URL : <https://www.scientific.net/SSP.291.13>
7. Krauss G. Steels. Processing, Structure and Performance. Ohio : ASM International, Metals park, 2006, 593 p. URL: <https://www.asminternational.org/wp-content/uploads/files/23403074/23403074-toc.pdf>
8. Bolshakov V.I., Sukhomlin G.D. and Laukhin D.V. *Atlas metallov i splavov : uchebnoye posobiye* [Atlas of metals and alloys : textbook]. Dnipropetrovsk : SHEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 2010, 174 p. URL : <https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/05/bolshakov-vy-atlas-struktur-metallov-y-splavov.pdf> (in Russian).
9. Stokes D.J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008, 221 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/285935810_Principles_and_Practice_of_Variable_PressureEnvironmental_Scanning_Electron_Microscopy_VP-ESEM
10. Laukhin D.V., Rott N.O., Beketov O.V., Pustovoy D.S., Pys'menkova T.O. and Babenko Ye.O. *Doslidzhennya struktury i vlastyvostry budivel'nykh staley pislya bezpererвної kontrol'ovanoi prokatky* [Study of the structure and properties of structural steels after continuous controlled rolling]. *Visnyk KHNADU* [Herald of the KhNASM]. 2020, no. 91. pp. 49–57. URL: <http://bulletin.khadi.kharkov.ua/article/view/220041> (in Ukrainian).
11. Beketov O.V. *Teoretychni osnovy formuvannya substruktury pereokholodzhеноho austenitu ta mekhanichnykh vlastyvostry mikrolegovanykh budivel'nykh staley : dys. ... dok. tekhn. Nauk : 05.02.01* [Theoretical basis of substructure formation of supercooled austenite and mechanical properties of microalloyed structural steels : Dys. ... Dr. Tech. Sc. : 05.02.01]. Dnipro : SHEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 2020, 340 p. URL : https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2021/04/diser_Beketov.pdf (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 01.03.2024.