

УДК: 669.141.24:669.1.017.001.8

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.281221.18.821

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ (огляд літератури)

БАБАЧЕНКО О. І.¹, *докт. техн. наук*,
 БАЛАХАНОВА Т. В.², *канд. техн. наук*,
 САФРОНОВА О. А.^{3*}, *м. н. с.*,
 ШПАК О. А.⁴, *пров. інж.*,
 КЛИНОВА О. П.⁵, *м. н. с.*

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. акад. Стародубова К. Ф., 1, Дніпро, 49107, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: A_Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4710-0343

² Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. акад. Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2493-218X

^{3*} Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. акад. Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

⁴ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. акад. Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

⁵ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. акад. Стародубова, 1, Дніпро, 49107, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

Анотація. *Мета дослідження* – розглянути можливі фактори впливу на формування структурної та зеренної нерівномірності вуглецевої сталі. *Методика.* На підставі огляду існуючої літератури проаналізовано вплив різноманітних факторів на утворення структурної неоднорідності у вуглецевих сталях. *Результати.* З аналізу літератури виділено низку причин, що впливають на утворення в структурі вуглецевих сталей неоднорідності. До цих факторів належать: хімічний склад, дендритні ліквіації та ліквіації обробки, неметалеві включення, механізми утворення зерен аустеніту, розмір вихідного зерна, а також забрудненість сталі газами. *Наукова новизна.* З боку хімічного складу впливають на ліквіаційне формування такі хімічні елементи як вуглець, мідь, алюміній, кремній, азот, сірка та фосфор. На формування рівня мікроліквіації істотно впливає і тип утвореної структури. Показано, за спрямованої кристалізації рівень ліквіації набагато вищий, ніж за рівновісної. Також формування кінцевої структури пов'язують зі спадковим впливом під час виробництва металопродукції особливостей будови вихідного металу, що залежать від різних технологічних факторів. Закладання певних металогенетичних ознак технологічної спадковості відбувається на всіх етапах плавлення, кристалізації, структуроутворення, твердофазних перетворень; за різних видів термічної, деформаційно-термічної, деформаційної обробки тощо. У більшості випадків саме технологічні чинники відповідають за особливості будови і прояви металургійної та структурної спадковості металів і сплавів. Дисперсність дендритної будови, що зростає зі збільшенням швидкості кристалізації, істотно впливає на розвиток дендритної ліквіації в злитку. У разі збільшення дисперсності дендритної будови зростає загальна поверхня кристалізації і значна частина рідкого металу твердне за вищих температур. *Практична значимість.* Визначено основні фактори впливу на формування кінцевої структурної та зеренної нерівномірності відповідно до сучасних точок зору. Визначення основних принципів та найбільш ефективних чинників дозволить упевнено передбачати можливу мікроструктуру сталі як у литому стані, так і після термообробки.

Ключові слова: *вуглецева сталь; дендритна ліквіація; неметалеві включення; дифузія; кристалізація; деформація; прокат; структурна спадковість*

ANALYSIS OF SPECIFIC FEATURES OF THE FORMATION OF STRUCTURAL INHOMOGENEITY OF CARBON STEEL (Review)

BABACHENKO O.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.)*,
 BALAKHANOVA T.V.², *Ph. D. in Eng. Sc.*,
 SAFRONOVA O.A.^{3*}, *Res. Ass.*,
 SHPAK O.A.⁴, *Sen. Eng.*,

KLINOVA O.P.⁵, *Res. Ass.*

¹ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: A.Babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4710-0343

² Department of Heat Treatment of Metal for Mechanical Engineering, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2493-218X

^{3*} Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

⁴ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

⁵ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Sq. Ac. Starodubov, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net

Abstract. Purpose. To consider possible factors of influence on the formation of structural and grain unevenness of carbon steel. **Methodology.** Based on the analysis of the existing literature, the influence of various factors on the structural heterogeneity in carbon steels is analyzed. **Results.** From the analysis of the literature, a number of reasons were identified that affect the formation of heterogeneity in the structure of carbon steels. These factors include: chemical composition, dendritic liquation and processing liquation, non-metallic inclusions, mechanisms of austenite grain formation, initial grain size, and steel contamination with gases. **Scientific novelty.** On the part of the chemical composition, chemical elements such as carbon, copper, aluminum, silicon, nitrogen, sulfur and phosphorus affect the liquation formation. The formation of the microliquation level is also significantly influenced by the type of the formed structure. It has been shown that the level of segregation with directional crystallization is much higher than with equilibrium crystallization. Also, the formation of the final structure is associated with a hereditary influence in the production of metal products of the structural features of the parent metal, which depend on various technological factors. The contribution of certain metallogenetic signs of technological heredity occurs at all stages of melting, crystallization, structure formation, solid-phase transformations; different types of thermal, deformation-thermal, deformation processing, etc. In most cases, it is technological factors that are responsible for the structural features and manifestations of the metallurgical and structural heredity of metals and alloys. The dispersion of the dendritic structure, which grows with an increase in the crystallization rate, has a significant effect on the development of dendritic segregation in the ingot. With an increase in the dispersion of the dendritic structure, the total crystallization surface grows and a significant part of the liquid metal solidifies at higher temperatures. **Practical significance.** As a result of the performed review of the literature, the main factors influencing the formation of the final structural and grain unevenness were determined in accordance with modern points of view. Determination of the basic principles and the most effective factors will make it possible to confidently assume the possible microstructure of steel both in the cast state and after heat treatment.

Keywords: *carbon steel; dendritic liquation; non-metallic inclusions; diffusion; crystallization; deformation; rolling; structural inheritance*

Вступ. Наразі не виникає жодного сумніву щодо впливу первинної дендритної структури, неоднорідності кінцевої, ліквациї елементів на комплекс механічних та експлуатаційних властивостей вуглецевих сталей [1; 2].

У дослідженнях [3; 7–9] та інших, які ще буде згадано, показано, що первинна (дендритна) структура суттєво впливає на формування кінцевої структури готового прокату і, як наслідок, на якість готової продукції.

Питання зв'язку кристалізація – (деформація) проробка – термічне

оброблення – структура розглядається детально, починаючи з позаминулого століття і понині актуальне. Проаналізувавши доступну літературу, в наявній роботі визначили та відокремили основні моменти впливу первинної структури на формування кінцевої.

Мета дослідження – розглянути можливі фактори впливу на формування структурної та зеренної нерівномірності вуглецевої сталі.

У сучасних працях поняття спадковості дуже популярне. На цей час навіть була зроблена спроба порівняти ці поняття в

живій і неживій природі. У статті [10] надається величезне значення появи матеріалів і зв'язків на атомному рівні, при цьому зв'язок *кристал – готовий виріб* згадується побіжно.

Найбільш поширена думка про визначальний вплив дендритної (внутрішньокристалічної, мікросегрегацій) і зональної ліквації (за перерізом злитка/заготовки) на формування структури вуглецевих сталей.

Як правило [5; 6], цей вплив розглядається як зміна стійкості аустеніту до розпаду за охолодження після високотемпературного нагріву. Нерівномірне співвідношення елементів, які впливають на стабільність α -, γ -фази, зумовлює початок перетворення в певних мікроділянках у різний температурний інтервал і відповідно утворюється як нерівномірний розподіл фаз, так і нерівномірність зеренної структури. У сталях, що містять в основному кремній або інші елементи, які стабілізують ферит, виділення фериту відбувається в рядках, багатих цими елементами, тому що в них підвищується температура A_3 . Якщо сталь легована марганцем або іншими елементами, що стабілізують аустеніт, виділення фериту починається у збіднених цими елементами рядках, тому що ці елементи знижують температуру A_3 [7; 9; 11–12].

Методика. На підставі огляду існуючої літератури проаналізовано вплив різноманітних факторів на утворення структурної неоднорідності у вуглецевих сталях.

Результати досліджень. Ступінь дендритних ліквацій визначається як відношення вмісту елемента в міжосьових ділянках до його концентрації в осі дендрита. Дослідження дендритних ліквацій у безперервному і звичайному злитках показує, що, незалежно від способу розливання сталі, ступінь ліквації збільшується від периферії до центра, в основному внаслідок збагачення міжосьових ділянок. Склад осей дендритів по довжині та перерізу практично постійний [13]. Це

пов'язано не тільки з перерозподілом домішок у двофазній області на етапі твердіння, а й з різною рухливістю розчинених легувальних елементів в γ - і α -твердих розчинах у процесі фазових перетворень, що відбуваються під час охолодження [14].

Вуглець [7] може дифундувати як прямо, так і навпаки, залежно від товщини лікваційних смуг і від швидкості проходження через зону перетворення, тобто від часу. Схожі дані отримували автори [15] тільки щодо марганцю і кремнію. Показано, що рівень ліквації цих елементів змінюється в часі.

Нерівномірність зерен феритно-перлітної структури, як правило, пов'язувалася з утворенням нерівноважних голчастих структур [16; 17], які за подальшого недостатнього нагрівання та охолодження зберігалися у вигляді великих перлітних зерен (формування т. зв. грубозернистого зламу). Як показують результати роботи [18], утворення відманштеттгової структури в литій сталі пов'язане з мікронеоднорідністю виділеного фериту. Показано, що чим більше в литій сталі Si та Mn, тим сильніше вони сегрегують і тим частіше в такій сталі зустрічаються структурні аномалії, набуваючи статусу швидше закономірних, ніж випадкових явищ.

Ліквація зумовлює і різний тип сформованих під час виробництва прокату структур. Наприклад у листовій сталі, що містить масову частку 0,3...0,5 % вуглецю і 1,7...1,9 % марганцю, спостерігали утворення структур гарту в результаті ліквації останнього [19]. Ці ж автори показали, що різниця у вмісті марганцю може змінювати термодинамічну активність вуглецю в аустеніті залежно від місцевого вмісту марганцю, що спричинює нерівномірність розподілу вуглецю в аустенітній фазі під час гомогенізації. Автори праць [19] та [20; 21] вказують на значний вплив марганцю на неоднорідність структури. Про істотну здатність марганцю до ліквації зазначено і в статті [22], при цьому стверджується, що вуглець – елемент,

що добре дифундує, розподіляється досить рівномірно. І, попри вагомий вплив марганцю на макро- та мікроліквацію, велика кількість авторів зазначає низьку здатність до ліквації у вуглецевій конструкційній сталі вуглецю та марганцю порівняно з фосфором та сіркою [23; 24].

На формування лікваційної неоднорідності істотно впливає вміст сірки та фосфору в сталі. За наявності в сталі марганцю з не дуже високим умістом сірки) ліквація вуглецю пряма і ферит утворюється переважно в ділянках, що відповідають колишнім дендритним осям. Якщо ж відбувається зворотна сегрегація вуглецю (ферит утворюється переважно в міждендритних ділянках), це зумовлено наявністю в сталі кремнію і фосфору [7].

Навіть наднизький вміст сірки викликає як самостійну ліквацію, так і посилення ліквації інших елементів.

Під час кристалізації відбувається пряма ліквація вуглецю в рідку фазу з одночасним витісненням його з дендритів первинного аустеніту, за ліквації всередину гілок кремнію [25], а подальше $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення фіксує в дендритних гілках знижену дисперсність перліту. Крім цього, під час наступних операцій нагрівання (технологічних або експлуатаційних) в області нижче критичних температур така лікваційна поляризація первинної структури створює термодинамічні умови для утворення в дендритах переважно фериту, що супроводжується зниженням властивостей виливків [26].

До цього ж висновку приходять автори [27], які пропонують у сталі для зварювального дроту для часткового пригнічення дендритної ліквації застосовувати зменшення вмісту зміцнювальних елементів, в основному, шляхом зниження вмісту С, Mn і Si, та раціональне мікролегування сталі бором у співвідношенні $B/N \approx 0,8$.

Автори [27] на підставі міркувань про зміну цими елементами параметрів дифузії та самодифузії по межах зерен також приходять до висновку, що підвищення вмісту С і N у твердому розчині також

сприяє зростанню зерен, тоді як наявність карбідів і нітридів на границях гальмує зростання аустенітних зерен [28]. З цієї точки зору повинні сприяти збільшенню зерен Ni, Si, P, а також, у разі його присутності у твердому розчині аустеніту, Al, які знижують міцність атомного зв'язку в решітці γ -Fe. Показано, що марганець – єдиний елемент, який не викликає гальмування росту зерна [29]. Мідь і алюміній позиціонують як елементи, здатні до значної ліквації [22].

Мікросегрегацію можна суттєво знизити шляхом додавання до сталі феритотвірних елементів [30], і, з іншого боку, збільшити додаванням аустенітоформівних елементів. З'ясовано, що додавання феритотвірних елементів викликає збільшення ступеня дифузії в твердому тілі і, таким чином, знижує мікросегрегацію.

Інші автори наполягають, що підвищити гомогенність сплавів балансуванням співвідношення основних елементів неможливо, через поляризацію дендритних гілок і виникнення градієнта активності вуглецю в часі, а можливо тільки з використанням термообробки, наприклад, термоцикування [15].

Зі збільшенням вмісту вуглецю ліквація домішок збільшується [31].

У працях [32; 33] показано, що в гарячекатаному прокаті великого перерізу, отриманому з безперервнолітої заготовки (БЛЗ), чітко простежується зв'язок нерівномірності феритно-перлітної структури не тільки з розташуванням колишніх дендритних і міждендритних ділянок, й з порядком кристалізації дендритних осей стовпчастих кристалів. У колишніх дендритних осях головного порядку виявлено найбільші зерна перліту.

Дисперсність дендритної будови, що росте зі збільшенням швидкості кристалізації, істотно впливає на розвиток дендритної ліквації в злитку. Під час збільшення дисперсності дендритної будови зростає загальна поверхня кристалізації і значна частина рідкого металу твердне за вищих температур. Певну роль відіграє той факт, що за великої швидкості кристалізації

розділова дифузія в рідині не встигає забезпечити рівноважний склад на поверхні кристала (рідини). Розділювальна дифузія відбувається менш повно, в незатвердлених зонах злитка залишається менша кількість домішок, у зв'язку з чим створюються менш сприятливі умови для утворення і розвитку дендритної неоднорідності [13].

Розширення температурного інтервалу кристалізації сприяє повнішому перебігу розділової дифузії. В результаті цього відбувається збільшення ступеня дендритної ліквідації від периферії до центра злитка. Ідентичність умов кристалізації різних горизонтів безперервнолитого злитка створює умови для рівномірного розподілу елементів по його довжині [34].

На формування рівня мікроліквідації істотно впливає і тип утвореної структури. Показано, що за утворення структури транскристалізації (стовпчасті кристали, спрямована кристалізація) рівень ліквідації набагато вищий, ніж за рівновісної кристалізації. Тут виникає невідповідність – з одного боку, за рівновісної кристалізації більше «стиків» дендритів, тобто гілок перших порядків, у яких рівень ліквідації вищий. Однак дані як ранніх [35], так і більш пізніх [31] праць однозначно показують, що в злитках з рівновісною структурою зональна ліквідація відбувається менш виражено, ніж у злитку із транскристалітною структурою, оскільки сегрегація домішок відбувається в основному внаслідок їх відтискування в розплаві хаотично орієнтованими дендритами, у зв'язку з чим концентрація домішок на фронті твердої фази невелика.

Відтискування домішок у поперечному напрямку відбувається меншою мірою, ніж у випадку транскристалізації. Відношення відстаней між гілками другого порядку до товщини дендритних гілок зберігається постійним незалежно від швидкості охолодження даного сплаву [36].

У [37] показано та пояснено вплив домішкових елементів (сірка і фосфор) на рівень макроліквідації з позиції зниження пластичності кристалізованої сталі (деформація і руйнування стовпчастих

кристалів за впливу напружень, що виникають під час охолодження). Однак є і протилежна точка зору – автори [38] показують, що формування стовпчастої структури більш сприятливе з погляду дисперсності кінцевої структури.

На формування структурних зон злитка або БЛЗ впливає перегрівання металу під час кристалізації [37; 39]. Так, для БЛЗ товщиною 150...200 мм встановлено, що збільшення температури металу в сталерозливному ковші з 1580 °С до 1635 °С викликає посилення ліквідації в середньому на 40...45 % по фосфору і сірці та на 30 % по вуглецю [37; 39; 40].

Впливає навіть розташування потоків під час безперервного розливання [41].

Говорячи про дендритну кристалізацію, слід зазначити, що і саме формування вихідної дендритної структури не до кінця вивчене і викликає низку питань [42], наприклад, чому чим більші розміри виливків, тим більш розгалуженими в їх усадкових раковинах виростають дендрити? Адже логічніше, чим більший вилівок, тим повільніше він охолоджується, і тим менше причин для зростання таких «перехідних» кристалів. Також у деяких працях висловлюється думка, що чим нижча швидкість охолодження (кристалізації) виливка, тим нижчий рівень ліквідації [11; 43]. Однак, порівнюючи великі злитки з БЛЗ малого перерізу, які кристалізуються з набагато більшими швидкостями [44], помічаємо, що рівень ліквідації в БЛЗ набагато нижчий.

Сучасний опис теплофізичних процесів у сталевій заготовці, яка твердне, базується на уявленні про кристалізацію сталі в інтервалі температур між ліквідусом і солідусом і неминуче виникнення двофазної зони, яка являє собою переплетення дендритів і розплаву, що розділяє ділянки повністю затверділої кірки і рідкої серцевини заготовки. У статті [45] показано, що на деякому етапі охолодження швидкість кристалізації центральної частини БЛЗ починає різко підвищуватися від 0,1 до 1,75 °С/с, при цьому один і той же об'єм металу кристалізується набагато швидше,

ніж поверхня заготовки на початку кристалізації, при цьому формуються найбільші рівновісні дендрити, що теж становить розбіжність з вищезгаданими положеннями.

Багато дослідників вказують на істотне зниження хімічної неоднорідності під час деформації та довготривалої термічної обробки [24; 46]. У праці [47] показано, що для усунення ліквідаційних смуг деформація виробу повинна бути не менше 8 крат. Автори [48] дійшли висновку, що зниження пластичної деформації викликає зниження механічних властивостей сплаву.

Наступний чинник, що зумовлює зовсім інший механізм впливу первинної структури на кінцеву, стосується наявності та типу неметалевих включень. І найбільша роль у формуванні структури приділяється загальній забрудненості сталі сіркою і фосфором. При цьому неметалеві включення виступають як підкладка для зародження надлишкових фаз або як часточки, які впливають на хімічну мікронеоднорідність поблизу них.

Наприклад, причиною рядковості прокату називають силікати і сульфідні, після їх «розкочування» в нитку (при прокатуванні) поблизу включень утворюються області, збіднені або збагачені вуглецем та/або марганцем, відповідно [49; 50].

Причиною виникнення рядкової структури в сталі 14Г2 автори [51] також визначають сульфідні марганцю і заліза, але вже як підкладку при виділенні надлишкового фериту в процесі охолодження прокату в міжкритичному інтервалі. І тільки як додатковий фактор формування рядковості – ліквідацію супутніх домішок і легувальних елементів.

Ф. Н. Тавадзе [7] наводить такі дані. З одного боку – включення не чинять безпосереднього впливу на перетворення, а лише впливають на зростання зерна. З іншого боку, сульфідні включення викликають збільшення схильності сталі до утворення рядкової неоднорідної структури. У працях [52; 53] показано, що тріщиноподібні неоднорідності та/або ряд

втягнутих включень, що розташовані перпендикулярно напрямку дифузії, також уповільнюють процес гомогенізації.

Формування фериту в найбільш забруднених ділянках литої заготовки спостерігали і пояснювали автори [9; 19]. На прикладі сталі марки 15 показано, що у перерізі сляба дисперсність і щільність різних структурних зон сляба відрізняються в два і три рази відповідно, при цьому чіткої візуальної відповідності між дендритною і литою зерненою структурою в цій сталі не виявлено. Первинні і вторинні осі дендритів розташовані безвідносно границі або тіла литого зерна: кілька дендритних осей можуть перетинати одне або кілька литих зерен.

Установлено, що ферит утворюється на найбільш «брудних» ділянках міждендритного простору, що затверділи останніми. Далі по тілу зерна розташований чистий по сегрегації відманштеттовий ферит, утворений з осей дендритів, а границі литого зерна декоровані алотріоморфним феритом, утвореним у міждендритному просторі між осями другого порядку з помірним вмістом сегрегації. Після деформації рядкова структура спостерігалася тільки в центральних ділянках сляба, вміст марганцю в масивних феритних областях із сульфідними включеннями в півтора рази менший, ніж у середньому по плавці. Пояснюють це тим [9; 54], що у міждендритних ділянках зосереджена вища концентрація як марганцю, так і сірки. Під час зниження температури в аустенітній області марганець концентрується більшою мірою у неметалевому включенні MnS, тим самим знижуючи його концентрацію біля включення.

Таким чином, безпосередньо навколо сульфідних включень відбувається зародження фериту, який, розповсюджуючись відтискує вуглець до протилежної зони, в результаті чого перліт з'являється в областях із низьким вмістом марганцю.

Однак це твердження неповне, оскільки не розділяє умови та тип сульфідного

включення. Наприклад, виникнення включень значно залежить від умісту кисню у сталі, співвідношення сірки з марганцем, кількості вуглецю. Не розглянуто випадок виникнення їх безпосередньо в рідкій сталі, без можливості утворення сульфідної евтектики. У випадку дійсного збагачення включення марганцем під час охолодження сталі повинен виникати навколо сульфідних включень марганцю шар з його низьким вмістом і відбуватися поступове підвищення його концентрації до нормального значення в зоні сегрегації. Однак численні дослідження показали, що рівень марганцю як у фериті, так і у перліті, розташованих в міждендритних зонах, однаковий по всій мікрозоні.

Велику увагу приділяють і вмісту кремнію в сталі [35]. Крім того, що силікати становлять причину виникнення біля них перліту [7]. У праці [55] показано: чим більше значення кремнієвого еквівалента, тим більше «поляризовані» ліквідаційні зони, тим більшої структурної неоднорідності слід очікувати в поверхневих шарах металу.

Цікаві результати отримали автори роботи [48]. Для визначення вмісту вуглецю був розроблений і запропонований експресний метод кількісного визначення вмісту вуглецю в знеуглецьованому шарі сталевих деталей будь-якої форми. Метод заснований на визначенні співвідношення вмісту перліту і фериту у структурі відпаленої сталі. Дослідженню піддавалися вуглецеві сталі – Сталь 10, Сталь 20, Сталь 35, Сталь 45 і У7, вміст вуглецю в яких визначали методом хімічного аналізу і пропонованим способом. Похибка вимірювання ступеня знеуглецьовування знижується зі збільшенням умісту вуглецю в сталі і не перевищує 2 %. Однак автори не наголошували, що на фоні зниження вмісту вуглецю і за наявності неметалевих включень помилка експоненціально зростає.

Автори [56] і [22] пов'язали мікросегрегації та умови утворення сульфиду марганцю, висловивши припущення про вплив неметалевих включень, мікросегрегацій на подальше формування структури.

У праці [57] показано, що здатність сталей до зростання зерна зумовлена не тільки хімічним складом. Основний вплив на цю властивість має розмір вихідного зерна, що залежить від температурно-часових параметрів кристалізації сталі. Дрібнозернисті структури швидкоохолоджених сталей успадковують здатність зберігати невеликі розміри аустенітних зерен під час нагрівання і витримки за високих температур аустенізації. Сталі, що кристалізуються в умовах уповільненого охолодження, мають вищу схильність до зростання зерна за високотемпературної ізотермічної витримки.

Автори [9] показали значну залежність структурної неоднорідності від розміру аустенітного зерна. При цьому наголошується саме на його розмірі, а не неоднорідності.

Проведено дослідження для пояснення причин формування рядковості в будівельних сталях [58]. Показано, що причиною формування рядкової структури постає «ліквіація обробки» – специфічна хімічна неоднорідність, сформована в процесі деформації за температур нижче температурного порога рекристалізації.

Дослідження показали, що один, два і навіть три цикли нормалізації істотно не змінюють рядковість структури. Тільки проведення нормалізації після попереднього повного відпалу зменшує ступінь рядковості. Однак при цьому істотно знижується твердість сталі. Показано, що в сталі 10Г2ФБ за ступенів деформації до 30 % утворення рядковості не відбувається незалежно від ступеня деформації.

Говорячи про структурну спадковість, необхідно згадати про спадковість, яка проявляється у відновленні розмірів і форми аустенітного зерна після завершення $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ перетворення сталі. На це вперше звернув увагу Д. К. Чернов і показав, що подрібнення зерна може реалізовуватися лише у разі підвищення температури в однофазній аустенітній області вище «точки *b*» [59]. Великий обсяг робіт в цьому

напряму провели С. С. Дьяченко зі співавторами [60].

Серед останніх досліджень, присвячених питанню зв'язку дендритної структури з кінцевою, відомі праці [61–66]. Показано, що причини виникнення спостережуваних структурних зв'язків слід шукати в механізмах утворення зерен аустеніту в литій сталі, будові і властивостях границь зерен.

Визначено, що деформація до 30 % спричинює фрагментацію в першу чергу осьових ділянок дендритів, в яких утворюється більше фериту, ніж у міждендритних. Збільшення ступеня деформації сприяє зростанню напружень, необхідних для фрагментації більш міцних ліквацийних зон, і утворенню в них фериту, підвищуючи рівномірність мікроструктури сталі.

Будова міжфазної границі між неметалевими включеннями й аустенітом часто стає причиною утворення біля них фериту. Тому ступінь чистоти сталі за домішками, спосіб її розкиснення, дегазації і чистота за неметалевими включеннями спадково впливають на формування її первинної і кінцевої мікроструктури. Теоретично, більший вміст газів, що концентруються переважно в ліквацийних міждендритних ділянках, має більший вплив на окрихчування цих ділянок, в результаті цього аустеніт у міждендритних ділянках сталі з високим умістом газів уже в литому стані частіше фрагментується з утворенням міжкристалічних границь, від яких утворюється більша кількість фериту.

При цьому вплив неметалевих включень, що стримують зростання зерен або які впливають на зміну складу навколо них, взагалі не розглядають, спираючись на працю [67], в якій ідеться, що неметалеві включення на зародження дендритів впливають значно менше, ніж утворення власних центрів кристалізації в розплаві.

Таким чином, формування кінцевої структури пов'язують зі збереженням під час подальших операцій виробництва металопродукції особливостей будови вихідного металу, зумовлених впливом

різних технологічних факторів. Закладання певних металогенетичних ознак технологічної спадковості відбувається на всіх етапах плавлення, кристалізації, структуроутворення, твердофазних перетворень; за різних видів термічної, деформаційно-термічної, деформаційної обробки тощо. У більшості випадків саме технологічні чинники відповідають за особливості будови і проявів металургійної та структурної спадковості металів і сплавів.

За результатами проведеного аналізу відомих точок зору на вплив первинної структури на формування кінцевої зеренної та структурної неоднорідності можна виділити такі параметри впливу:

- дендритна ліквация (внутрішньокристалічна, мікросегрегації, хімічна неоднорідність, мікронеоднорідність);
- неметалеві включення, які розглядаються і як підкладки для зародження надлишкових фаз, і як частинки, що впливають на хімічну мікронеоднорідність біля них;
- розмір вихідного зерна, що залежить від температурно-часових параметрів кристалізації сталі;
- ліквация обробки – специфічна хімічна неоднорідність, сформована в процесі деформації за температурах нижче температурного порога рекристалізації;
- механізми утворення зерен аустеніту в литій сталі, будова і властивості границь зерен;
- забрудненість сталі газами (окиснення).

Висновки.

Як бачимо з огляду сучасної літератури, на формування структурної та зеренної нерівномірності впливає досить велика кількість факторів, визначених компетентними авторами. Наведені в літературі дані не дозволяють однозначно говорити про закономірності принципів формування феритно-перлітної структури в прокаті з вуглецевої сталі у процесі його охолодження і термообробки.

Це означає, що відсутність даних не дозволяє впевнено передбачати можливу

мікроструктуру сталі як у литому стані, так і після термообробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабаченко А. И., Кононенко А. А., Подольский Р. В., Сафронова Е. А. Наследственное влияние литой структуры НЛЗ на качество железнодорожных осей. Університетська наука – 2020 : міжнар. конф. (20-21 травня 2020 р., м. Маріуполь). 2020. № 1. С. 155–156.
2. Узлов И. Г., Бабаченко А. И., Кононенко А. А., Дементьева Ж. А. Влияние размера колесной заготовки и режимов её горячей пластической деформации на служебные свойства железнодорожных колес. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2006. С. 137–142.
3. Левченко Г. В., Нефедьева Е. Е., Серов А. И., Смирнов Е. Н., Галухина И. Н. Формирование структуры и механических свойств круглого проката из непрерывнолитой стали. *Металл и литье Украины*. 2011. № 6. С. 3–7.
4. Левченко Г. В., Дёмина Е. Г., Кныш А. В. Влияние содержания кремния на формирование структуры волокнистого композита в арматурном прокате. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 1. С. 83–87.
5. Дёмина Е. Г., Левченко Г. В., Грицай Т. В. Влияние углерода, кремния и марганца на морфологию дендритной структуры конструкционных сталей перитектического типа. *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. 2005. № 10. С. 223–231.
6. Яценко А. И., Левченко Г. В., Репина Н. И., Грушко П. Д. Фазовые превращения и ликвация в низкоуглеродистых конструкционных сталях. *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии*. 1995. С. 191–200.
7. Тавадзе Ф. Н. Металлография железа. В 3 т. Том II. Кристаллизация и деформация сталей (с атласом микрофотографий). Москва : Металлургия, 1972. 236 с.
8. Verhoeven J. Banding : Microsegregation-Induced. In *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*. Taylor and Francis (30 Mar 2016, New York). 2016. Pp. 320–330.
9. Krauss G. Solidification. Segregation and Banding in Carbon and Alloy Steels. *Metallurgical and Material Transactions*. В. 2003. Pp. 781–792.
10. Хакдодов М. М. О проблеме наследственности в металлах и сплавах. *Вестник Таджикского технического университета*. 2008. № 3. С. 66–69.
11. Гуляев А. П. Металловедение. Москва : Металлургия, 1978. 648 с.
12. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. Москва : Металлургия, 1978. 568 с.
13. Голиков И. Н. Дендритная ликвация в стали. Москва : Металлургия, 1953. 206 с.
14. Таран Ю. Н., Яценко А. И., Симоненко О. А., Грушко П. Д. Особенности первичной структуры и внутрикристаллической ликвации в непрерывнолитом слябе из стали 17Г2СФ. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1976. № 2. С. 114–118.
15. Гребнев Ю. В., Карпова Е. Ю., Елисеев С.В., Ефишов С. А. Влияние микрохимической неоднородности на перлитно-ферритную структуру и свойства литой среднеуглеродистой стали. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2017. № 5. С. 49–52.
16. Садовский В. Д. Структурная наследственность в стали. Москва : Металлургия, 1973. 208 с.
17. Дяченко С. С. Наследственность при фазовых превращениях: механизм явления и влияние на свойства. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 4. С. 14–19.
18. Ильинский В. А., Карпова Е. Ю., Костылева Л. В., Габельченко Н. И. Особенности морфологии и структуры видманштеттова и полиэдрического феррита в низкоуглеродистых сталях. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2010. № 4. С. 154–158.
19. Réger M., Fábíán E.R., László T. Centerline inhomogeneity of flat products. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. (16–17 May 2019, Iasi, Romania). 2019. Pp. 1–11. URL: DOI: 10.1088/1757-899X/572/1/012036
20. Hidalgo J., Celada-Casero C., Santofimia M. J. Fracture mechanisms and microstructure in a medium Mn quenching and partitioning steel exhibiting macrosegregation. *Materials Science and Engineering*. 2019. Pp. 766–777. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.055>
21. Al Gahtani M. S. Formation of micro-structural banding in hot-rolled medium-carbon steel. *School of Mechanical. Materials and Mechatronics Engineering*. 2015. 190 p.
22. Bernhard D., Michelic C., Wieser S., Presoly G. On the modelling of microsegregation in steels involving thermodynamic databases. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (3–5 November 2015, Leoben, Austria). 2016. Pp. 1–8. URL: DOI:10.1088/1757-899X/119/1/012027
23. Zeng Q., Xiao C., Li J. Analysis of Micro-Segregation of Solute Elements on the Central Cracking of Continuously Cast Bloom. *Metals*. 2021. № 11 (3). Pp. 1–10. URL: <https://doi.org/10.3390/met11030382>
24. Ghosh A. Segregation in cast products. *Sadhana*. 2001. № 26 (1). Pp. 5–24.

25. Ильинский В. А., Костылева Л. В. Микроликвация кремния в железоуглеродистых сплавах. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1989. № 12. С. 39–43.
26. Барон А. А., Палаткина Л. В., Таранова М. С., Гурулев Д. Н. Структурные изменения при нагреве в дендритных кристаллах серого чугуна. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 2. С. 76–80.
27. Бигеев В. А., Сычков А. Б., Потапова М. В., Камалова Г. Я. Последствия микрофизической ликвации химических элементов в сварочных сталях. *Черная металлургия : бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. № 75 (2). С. 206–213.
28. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. Москва : Металлургия, 1978. 248 с.
29. Богданов В. И., Теплухина И. В., Цветков А. С., Титова Т. И., Шульган Н. А., Милякова Л. А. Особенности роста зерен аустенита в металле поковки из крупного слитка конструкционной стали. *Письма о материалах*. 2019. № 9 (3). С. 304–309.
30. Basso A. D., Toda-Caraballo I., Eres-Castellanos A., San-Martin D., Jimenez J.A., Caballero F. G. Effects of alloying elements on interdendritic microsegregation of carbon steel. *Metals*. 2020. № 10 (5). 574 p. URL: <https://doi.org/10.3390/met10050574>
31. Комаров О. С., Розенберг Е. В., Урбанович Н. И., Барановский К. Э. Влияние макроструктуры на ликвацию в стальном слитке. *Литьё и металлургия*. 2017. № 1 (86). С. 45–49.
32. Левченко Г. В., Демина Е. Г., Воробей С. А., Нефедьева Е. Е., Мединский Г. А. Оценка деформационного состояния металла по изменению параметров дендритной структуры. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2009. № 4. С. 72–75.
33. Левченко Г. В., Демина Е. Г., Нефедьева Е. Е., Буга И. Д., Антонов Ю. Г., Мединский Г. А. Влияние деформированного состояния заготовок на однородность микроструктуры железнодорожных осей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 3. С. 70–75.
34. Манохин А. И. Получение однородной стали. Москва : Металлургия, 1978. 224 с.
35. Голиков И. Н., Масленков С. Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. Москва : Металлургия, 1997. 224 с.
36. Ильинский В. А., Габельченко Н. И., Костылева Л. В., Карпова Е. Ю., Житникова Н. П. Исследование особенностей формирования дендритных структур сталей. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2009. № 11 (59). С. 74–78.
37. Рыжкова И. О., Дождиков В. И. Влияние перегрева стали на развитие осевой ликвации в непрерывнолитых заготовках. *Планирование и проведение исследований и интерпретация экспериментальных данных по изучению материалов различной природы*. 2017. С. 93–98.
38. Казаков А. А., Пахомова О. В., Казакова Е. И. Исследование эволюции литой структуры при пластической обработке феррито-перлитной стали. *Черные металлы*. 2019. № 9. С. 15–20.
39. Глотова И. О., Дождиков В. И., Васютин А. Ю. Влияние перегрева стали на степень развития осевой ликвации в непрерывном слитке. *Евразийское Научное Объединение*. 2019. № 10 (2). С. 109–111.
40. Мурасов Ф. М., Гирский В. Е., Есюнина В. А. и др. Влияние технологии непрерывной разливки на развитие осевой ликвации в широких слябах. *Проблемы стального слитка : тр. 5-й конф. по слитку*. 1974. С. 673–677.
41. Числавлев В. В., Фейлер С. В., Темлянцев М. В., Неунывахина Д. Т. Исследование ликвационных процессов при непрерывной разливке рельсовой стали. *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2018. № 41. С. 80–85.
42. Прокопович Л. В. Дендриты: полемика продолжается. *Труды Одесского политехнического университета*. 2006. № 2. С. 193–197.
43. Хентов В. Я., Шачнева Е. Ю., Семченко В. В. О связи ликвации с температурой Дебая. *Chemical Bulletin*. 2018. № 1 (1). С. 41–46.
44. Смирнов Е. Н. Свойства и структура заготовок из непрерывнолитого металла для производства проката ответственного назначения. *Металл и литьё Украины*. 2001. № 3–4. С. 17–20.
45. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. К., Трусова К. А., Калиневич Е. В. Осевая химическая неоднородность непрерывнолитых стальных заготовок. *Литьё и металлургия*. 2005. № 4 (36). С. 73–80.
46. Разгулин И. А., Чикишев Д. Н., Завалищин А. Н. Исследование трансформации химической неоднородности (ликвации) в процессе толстолистовой прокатки микролегированных трубных сталей. *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2017. № 23. С. 44–49.
47. Неучев А. Л. Применение стали непрерывной разливки в кузнечном производстве. *Кузнечно-штамповое производство*. 1986. № 11. С. 21–22.
48. Ганиев М. М., Швеев А. И., Астащенко В. И., Швеева Т. В. Нейтрализация металлургических дефектов стали в машиностроительном производстве. *Прогресивні технології і системи машинобудування*. 2013. № 1. С. 65–73.

49. Кудря А. В., Соколовская Э. А., Салихов Т. Ш. и др. Оценка неоднородности качества листовых сталей. *Известия ВУЗов. Чёрная металлургия*. 2008. № 11. С. 30–37.
50. Ищук А. Г. О металлургическом качестве стали. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2008. № 39. С. 67–76.
51. Дука В. В., Арефьева Л. П., Пустовойт В. Н., Киселёва Д. А. Исследование строчечной структуры строительной стали методом атомно-силовой микроскопии. *Письма о материалах*. 2020. № 10 (4). С. 445–450.
52. Казаков А. А., Пахомова О. В., Казакова Е. И. Исследование литой структуры промышленного сляба феррито-перлитной стали. *Чёрные металлы*. 2020. № 11. С. 9–15.
53. Wang K., Yu T., Song Y. et al. Effects of MnS Inclusions on the Banded Microstructure in Non-quenched and Tempered Steel. *Metall Mater Trans B*. 2019. № 50. Pp. 1213–1224. URL: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01532-0>
54. Verhoeven J. D. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels. *Journal of materials engineering and performance*. 2000. № 9 (3). Pp. 286–296.
55. Ильинский В. А., Карпова Е. Ю., Костылева Л. В., Габельченко Н. И. Особенности морфологии и структуры видманштеттова и полиэдрического феррита в низкоуглеродистых сталях. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2010. № 4. С. 154–158.
56. Dali Y., Michelic S. K., Wieser G., Christian B. Modeling of manganese sulfide formation during the solidification of steel. *Journal of Materials Science*. 2017. № 52. Pp. 1797–1812. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0470-y>
57. Кондратьюк С. Є. Структурутворення, спадковість і властивості литої сталі. Київ : Наукова думка, 2010. 176 с.
58. Горбатенко В. П., Лукін А. В. Особливості структурутворення високоміцних будівельних сталей під час контрольованої прокатки та наступної термічної обробки. *Металеві конструкції*. 2010. № 2. С. 113–121.
59. Чернов Д. К. Избранные труды по металлургии и металлостроению. Москва : Наука, 1983. 448 с.
60. Дьяченко С. С., Петриченко А. М., Слива А. А. Влияние легирования на температуру структурной перекристаллизации сталей. *МиТОМ*. 1971. № 1. С. 14–17.
61. Левченко Г. В., Балаханова Т. В., Борисенко А. Ю., Моспан В. В., Антонов Ю. Г., Мединский Г. А. Наследственное влияние дендритной структуры на размер зерна непрерывнолитых заготовок из среднеуглеродистой стали. *Металл и литье Украины*. 2017. № 11–12. С. 25–33.
62. Балаханова Т. В., Левченко Г. В., Борисенко А. Ю. Прояв структурної спадковості та її вплив на властивості гарячекатаних трубних заготовок різного діаметру. *Металознавство та обробка металів*. 2020. С. 19–26.
63. Борисенко А. Ю., Кононенко А. А. Наследственное влияние механизмов кристаллизации на образование ферритно-перлитной структуры в стали. *Современные проблемы физики металлов и металлических систем*. Институт металлофизики (м. Київ, 25-27 травня), 2016. 199 с.
64. Борисенко А. Ю., Кононенко А. А. Генезис зеренной структуры в литых металлах и сплавах. *Современные проблемы физики металлов и металлических систем*. Институт металлофизики (Київ, 25-27 травня). 2016. 28 с.
65. Сухомлин В. И., Борисенко А. Ю., Кононенко А. А., Бабаченко А. И., Яценко А. И., Чухлеб В. Л., Ткач В. Н., Тараненко А. А., Кузьмичев Е. М. Схемы и механизмы формирования феррито-перлитной структуры колесных сталей после кристаллизации, термической обработки и горячей пластической деформации. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2010. № 2. С. 62–75.
66. Борисенко А. Ю., Кононенко А. А., Бабаченко А. И., Науменко Л. Д. Микроструктурные исследования формирования первичного зерна аустенита после кристаллизации углеродистых сталей с 0, 5–0,7 % С. *Доповіди Національної академії наук України*. 2010. № 9. С. 70–77.
67. Пронов А. П. Кристаллизация стального слитка. Москва : Изд-во АН СССР, 1960. 150 с.

REFERENCES

1. Babachenko A.I., Kononenko A.A., Podol'skij R.V. and Safronova E.A. *Nasledstvennoe vliyanie litoj struktury NLZ na kachestvo zheleznodorozhnyh osey* [The hereditary influence of the cast structure of the NLZ on the quality of railway axles]. *Universitets'ka nauka – 2020 : Mizhnarodna konferenciya (20–21 travnya 2020 r., m. Mariupol')* [University Science – 2020 : International Conference (May 20–21, 2020, Mariupol)]. 2020, no. 1, pp. 155–156. (in Russian).
2. Uzlov I.G., Babachenko A.I., Kononenko A.A. and Dement'eva Zh.A. *Vliyanie razmera kolesnoj zagotovki i rezhimov eyo goryachej plasticheskoj deformacii na sluzhebnye svojstva zheleznodorozhnyh koles* [Influence of the size of the wheel blank and the modes of its hot plastic deformation on the service properties of railway wheels]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. 2006, pp. 137–142. (in Russian).

3. Levchenko G.V., Nefed'eva E.E., Serov A.I., Smirnov E.N. and Galuhina I.N. *Formirovanie struktury i mekhanicheskikh svojstv kruglogo prokata iz nepreryvnolitoj stali* [Formation of the structure and mechanical properties of continuous cast steel round bars]. *Metall i lit'e Ukrainy* [Metal and Casting of Ukraine]. 2011, no. 6, pp. 3–7. (in Russian).
4. Levchenko G.V., Dyomina E.G. and Knysh A.V. *Vliyanie sodержanie kremniya na formirovanie struktury voloknistogo kompozita v armaturnom prokate* [Influence of silicon content on the formation of a fiber composite structure in reinforcing bars]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2009, no. 1, pp. 83–87. (in Russian).
5. Dyomina E.G., Levchenko G.V. and Gricaj T.V. *Vliyanie ugleroda, kremniya i marganca na morfologiyu dendritnoj struktury konstrukcionnyh stalej peritekticheskogo tipa* [Effect of carbon, silicon and manganese on the morphology of the dendritic structure of structural steels of the peritectic type]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chyrnoy metallurgii* [Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy]. 2005, no. 10, pp. 223–231. (in Russian).
6. Yacenko A.I., Levchenko G.V., Repina N.I. and Grushko P.D. *Fazovye prevrashcheniya i likvaciya v nizkouglerodistykh konstrukcionnyh stalyah* [Phase Transformations and Liquefaction in Low Carbon Structural Steels]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chyrnoy metallurgii* [Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy]. 1995, pp. 191–200. (in Russian).
7. Tavadze F.N. *Metallografiya zheleza. V 3 t. Tom II. Kristallizaciya i deformaciya stalej (s atlasom mikrofotografij)* [Iron metallography: in 3 vol. Vol. II. Crystallization and deformation of steels (with atlas of micrographs)]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1972, 236 p. (in Russian).
8. Verhoeven J. Banding : Microsegregation-Induced. In *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*. Taylor and Francis : March 30, New York, 2016, pp. 320–330.
9. Krauss G. Solidification. Segregation and Banding in Carbon and Alloy Steels. *Metallurgical and Material Transactions B*. 2003, pp. 781–792.
10. Hakdodov M.M. *O probleme nasledstvennosti v metallah i splavah* [On the problem of heredity in metals and alloys]. *Vestnik Tadzhijskogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tajik Technical University]. 2008, no. 3, pp. 66–69. (in Russian).
11. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metal Science]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1978, 648 p. (in Russian).
12. Gorelik S.S. *Rekristallizaciya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1978, 568 p. (in Russian).
13. Golikov I.N. *Dendritnaya likvaciya v stali* [Dendritic segregation in steel]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1953, 206 p. (in Russian).
14. Taran Yu.N., Yacenko A.I., Simonenko O.A. and Grushko P.D. *Osobennosti pervichnoj struktury i vnutrikristallicheskoj likvacii v nepreryvnolitom slyabe iz stali 17G2SF* [Features of the primary structure and intracrystalline segregation in a continuously cast steel slab]. *Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous Metallurgy]. 1976, no. 2, pp. 114–118. (in Russian).
15. Grebnev Yu.V., Karpova E.Yu., Eliseev S.V. and Efshov S.A. *Vliyanie mikrohimicheskoy neodnorodnosti na perlitno-ferritnyuyu strukturu i svojstva litoj sredneuglerodistoj stali* [Influence of microchemical heterogeneity on the pearlite-ferrite structure and properties of cast medium-carbon steel]. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2017, no. 5, pp. 49–52. (in Russian).
16. Sadovskij V.D. *Strukturnaya nasledstvennost' v stali* [Structural inheritance in steel]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1973, 208 p. (in Russian).
17. Dyachenko S.S. *Nasledstvennost' pri fazovyh prevrashcheniyah : mekhanizm yavleniya i vliyanie na svojstva* [Heredity during phase transformations : mechanism of the phenomenon and influence on properties]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2000, no. 4, pp. 14–19. (in Russian).
18. Il'inskij V.A., Karpova E.Yu., Kostyleva L.V. and Gabel'chenko N.I. *Osobennosti morfologii i struktury vidmanshtetova i poliedricheskogo ferrita v nizkouglerodistykh stalyah* [Features of the morphology and structure of Widmanstätten and polyhedral ferrite in low-carbon steels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 154–158. (in Russian).
19. Réger M., Fábíán, E.R. and László T. Centerline inhomogeneity of flat products. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* (May 16–17 2019, Iasi, Romania), 2019, pp. 1–11. URL: DOI: 10.1088/1757-899X/572/1/012036.
20. Hidalgo J., Celada-Casero C. and Santofimia M.J. Fracture mechanisms and microstructure in a medium Mn quenching and partitioning steel exhibiting macrosegregation. *Materials Science and Engineering*. 2019, pp. 766–777. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.055>
21. Al Gahtani M.S. Formation of micro-structural banding in hot-rolled medium-carbon steel. *School of Mechanical, Materials and Mechatronics Engineering*. 2015, 190 p.

22. Bernhard D., Michelic C., Wieser S. and Presoly G. On the modelling of microsegregation in steels involving thermodynamic databases. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (3–5 November 2015, Leoben, Austria), 2016, pp. 1–8. URL: DOI:10.1088/1757-899X/119/1/012027.
23. Zeng Q., Xiao C. and Li J. Analysis of Micro-Segregation of Solute Elements on the Central Cracking of Continuously Cast Bloom. *Metals*. 2021, no. 11 (3), pp. 1–10. URL: <https://doi.org/10.3390/met11030382>
24. Ghosh A. Segregation in cast products. *Sadhana*, 2001, no. 26 (1), pp. 5–24.
25. Il'inskij V.A. and Kostyleva L.V. *Mikrolikvaciya kremniya v zhelezouglerodistyh splavah* [Microliquetation of silicon in iron-carbon alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 1989, no. 12, pp. 39–43. (in Russian).
26. Baron A.A., Palatkina L.V., Taranova M.S. and Gurulev D.N. *Strukturnye izmeneniya pri nagreve v dendritnyh kristallah serogo chuguna* [Structural changes upon heating in dendritic crystals of gray cast iron]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University]. 2020, no. 2, pp. 76–80. (in Russian).
27. Bigeev V.A., Sychkov A.B., Potapova M.V. and Kamalova G.Ya. *Posledstviya mikrofizicheskoy likvacii himicheskikh elementov v svarochnykh stalyah* [Consequences of microphysical segregation of chemical elements in welding steels]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information]. 2019, no. 75 (2), pp. 206–213. (in Russian).
28. Bokshitejn B.S. *Diffuziya v metallah* [Diffusion in metals]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1978, 248 p. (in Russian).
29. Bogdanov V.I., Tepluhina I.V., Cvetkov A.S., Titova T.I., Shul'gan N.A. and Milyakova L.A. *Osobennosti rosta zeren austenita v metalle pokovki iz krupnogo slitka konstrukcionnoj stali* [Features of the growth of austenite grains in the metal of a forging from a large ingot of structural steel]. *Pis'ma o materialah* [Materials Letters]. 2019, no. 9 (3), pp. 304–309. (in Russian).
30. Basso A.D., Toda-Caraballo I., Eres-Castellanos A., San-Martin D., Jimenez J.A. and Caballero F.G. Effects of alloying elements on interdendritic microsegregation of carbon steel. *Metals*. 2020, no. 10 (5), 574 p. URL: <https://doi.org/10.3390/met10050574>
31. Komarov O.S., Rozenberg E.V., Urbanovich N.I. and Baranovskij K.E. *Vliyanie makrostruktury na likvaciyu v stal'nom slitke* [Effect of macrostructure on segregation in steel ingot]. *Lit'yo i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2017, no. 1 (86), pp. 45–49. (in Russian).
32. Levchenko G.V., Demina E.G., Vorobej S.A., Nefed'eva E.E. and Medinskij G.A. *Ocenka deformacionnogo sostoyaniya metalla po izmeneniyu parametrov dendritnoj struktury* [Assessment of the deformation state of the metal by changing the parameters of the dendritic structure]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2009, no. 4, pp.72–75. (in Russian).
33. Levchenko G.V., Demina E.G., Nefed'eva E.E., Buga I.D., Antonov YU.G. and Medinskij G.A. *Vliyanie deformirovannogo sostoyaniya zagotovok na odnorodnost' mikrostruktury zhelezodorozhnyh osey* [Influence of the deformed state of workpieces on the uniformity of the microstructure of railway axles]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2010, no. 3, pp. 70–75. (in Russian).
34. Manohin A.I. *Poluchenie odnorodnoj stali* [Getting a homogeneous steel]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1978, 224 p. (in Russian).
35. Golikov I.N. and Maslenkov S.B. *Dendritnaya likvaciya v stalyah i splavah* [Dendritic segregation in steels and alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1997, 224 p. (in Russian).
36. Il'inskij V.A., Gabel'chenko N.I., Kostyleva L.V., Karpova E.Yu. and Zhitnikova N.P. *Issledovanie osobennostej formirovaniya dendritnyh struktur stalej* [Study of the peculiarities of the formation of dendritic structures of steels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University]. 2009, no. 11 (59), pp. 74–78. (in Russian).
37. Ryzhkova I.O. and Dozhdikov V.I. *Vliyanie peregreva stali na razvitie osevoj likvacii v nepreryvnolityh zagotovkah* [Influence of steel overheating on the development of axial segregation in continuously cast billets]. *Planirovanie i provedenie issledovanij i interpretaciya eksperimental'nyh dannyh po izucheniyu materialov razlichnoj prirody* [Planning and conducting research and interpretation of experimental data for the study of materials of various nature]. 2017, pp. 93–98. (in Russian).
38. Kazakov A.A., Pahomova O.V. and Kazakova E.I. *Issledovanie evolyucii litoj struktury pri plasticheskoy obrabotke ferrito-perlitnoj stali* [Investigation of the evolution of a cast structure during plastic processing of ferrite-pearlitic steel]. *Chernye metally* [Black Metals]. 2019, no. 9, pp. 15–20. (in Russian).
39. Glotova I.O., Dozhdikov V.I. and Vasutin A.Yu. *Vliyanie peregreva stali na stepen' razvitiya osevoj likvacii v nepreryvnom slitke* [Influence of steel overheating on the degree of development of axial segregation in a continuous ingot]. *EvrAzijskoe Nauchnoe Ob"edinenie* [Eurasian Scientific Association]. 2019, no. 10 (2), pp. 109–111. (in Russian).

40. Murasov F.M., Girskij V.E. and Esyunina V.A. *Vliyanie tekhnologii nepreryvnoj razlivki na razvitie osevoj likvacii v shirokikh slyabah* [Influence of continuous casting technology on the development of axial segregation in wide slabs]. *V sbornike Problemy stal'nogo slitka : Trudy 5 konferencii po slitku* [In the collection Problems of Steel Ingot : Proceedings of the 5th Conference on Ingot]. 1974, pp. 673–677. (in Russian).
41. Chislavlev V.V., Fejler S.V., Temlyancev M.V. and Neunyvahina D.T. *Issledovanie likvacionnyh processov pri nepreryvnoj razlivke rel'sovoy stali* [Study of liquation processes during continuous casting of rail steel]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekcii Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Otdelenie metallurgii* [Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy]. 2018, no. 41, pp. 80–85. (in Russian).
42. Prokopovich L.V. *Dendrity : polemika prodolzhaetsya* [Dendrites: controversy continues]. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Odessa Polytechnic University]. 2006, no. 2, pp. 193–197. (in Russian).
43. Hentov V.Ya., Shachneva E.Yu. and Semchenko V.V. *O svyazi likvacii s temperaturoj Debaya* [On the relationship of liquation with the Debye temperature]. *Chemical Bulletin*. 2018, no. 1 (1), pp. 41–46. (in Russian).
44. Smirnov E.N. *Svojstva i struktura zagotovok iz nepreryvnolitoj metalla dlya proizvodstva prokata otvetstvennogo naznacheniya* [Properties and structure of billets from continuously cast metal for the production of rolled products for critical purposes]. *Metall i lit'yo Ukrainy* [Metal and Casting of Ukraine]. 2001, no. 3–4, pp. 17–20. (in Russian).
45. Samojlovich Yu.A., Timoshpol'skij V.K., Trusova K.A. and Kalinevich E.V. *Osevaya himicheskaya neodnorodnost' nepreryvnolityh stal'nyh zagotovok* [Axial chemical heterogeneity of continuously cast steel billets]. *Lit'yo i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2005, no. 4 (36), pp. 73–80. (in Russian).
46. Razgulin I.A., Chikishev D.N. and Zavalishchin A.N. *Issledovanie transformacii himicheskoy neodnorodnosti (likvacii) v processe tolstolistovoj prokatki mikrolegirovannyh trubnyh stalej* [Investigation of the transformation of chemical heterogeneity (liquation) in the process of plate rolling of microalloyed pipe steels]. *Modelirovanie i razvitie processov OMD* [Modeling and Development of OMD Processes]. 2017, no. 23, pp. 44–49. (in Russian).
47. Neuchev A.L. *Primenenie stali nepreryvnoj razlivki v kuznechnom proizvodstve* [Application of continuous casting steel in forging]. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo* [Forging and Stamping Production]. 1986, no. 11, pp. 21–22. (in Russian).
48. Ganiev M.M., Shveyov A.I., Astashchenko V.I. and Shveyova T.V. *Nejtralizaciya metallurgicheskikh defektov stali v mashinostroitel'nom proizvodstve* [Neutralization of metallurgical defects in steel in mechanical engineering]. *Progresivni tekhnologii i sistemi mashinobuduvannya* [Advanced Technologies and Systems and Machinery]. 2013, no. 1, pp. 65–73. (in Russian).
49. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A. and Salihov T.Sh. *Ocenka neodnorodnosti kachestva listovyh stalej* [Assessment of the heterogeneity of the quality of sheet steel]. *Izvestiya VUZov. Chyornaya metallurgiya* [Bulletin of the University. Ferrous Metallurgy]. 2008, no. 11, pp. 30–37. (in Russian).
50. Ishchuk A.G. *O metallurgicheskom kachestve stali* [Metallurgical quality of steel]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering.] 2008, no. 39, pp. 67–76. (in Russian).
51. Duka V.V., Aref'eva L.P., Pustovojt V.N. and Kiselyova D.A. *Issledovanie strochechnoj struktury stroitel'noj stali metodom atomno-silovoj mikroskopii* [Investigation of the line structure of building steel by atomic force microscopy]. *Pis'ma o materialah* [Materials Letters]. 2020, no. 10(4), pp. 445–450. (in Russian).
52. Kazakov A.A., Pahomova O.V. and Kazakova E.I. *Issledovanie litoj struktury promyshlennogo slyaba ferrito-perlitnoj stali* [Investigation of the cast structure of an industrial ferrite-pearlitic steel slab]. *Chernye metally* [Black Metals]. 2020, no. 11, pp. 9–15. (in Russian).
53. Wang K., Yu T. Song Y. et al. Effects of MnS Inclusions on the Banded Microstructure in Non-quenched and Tempered Steel, *Metall Mater Trans B*. 2019, no. 50, pp. 1213–1224. URL: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01532-0>
54. Verhoeven J.D. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels. *Journal of materials engineering and performance*. 2000, no. 9 (3), pp. 286–296.
55. Il'inskij V.A., Karpova E.Yu., Kostyleva L.V. and Gabel'chenko N.I. *Osobennosti morfologii i struktury vidmanshtettova i poliedricheskogo ferrita v nizkouglerodistykh stalyah* [Features of the morphology and structure of Widmanstätten and polyhedral ferrite in low-carbon steels]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University]. 2010, no. 4, pp. 154–158. (in Russian).
56. Dali Y., Michelic S.K., Wieser G. and Christian B. Modeling of manganese sulfide formation during the solidification of steel. *Journal of Materials Science*. 2017, no. 52, pp. 1797–1812. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0470-y>
57. Kondratyuk S. *Strukturoutvorenniya, spadkovist' i vlastivosti litoj stali* [Structure, heredity and properties of cast steel]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 2010, 176 p. (in Ukrainian).

58. Gorbatenko V.P. and Lukin A.V. *Osoblivosti strukturoutvorenniya visokomicnih budivel'nih stalej pid chas kontrol'ovanoj prokatki ta nastupnoï termichnoï obrobki* [Features of structure formation of high-strength building steels during controlled rolling and subsequent heat treatment]. *Metalevi konstrukcii* [Metal Designs]. 2010, no. 2, pp. 113–121. (in Ukrainian).
59. Chernov D.K. *Izbrannye trudy po metallurgii i metallovedeniyu* [Selected works on metallurgy and metal science]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 448 p. (in Russian).
60. D'yachenko S.S., Petrichenko A.M. and Sliva A.A. *Vliyanie legirovaniya na temperaturu strukturnoj perekristallizacii stalej* [Effect of alloying on the structural recrystallization temperature of steels]. *MiTOM* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1971, no. 1, pp. 14–17. (in Russian).
61. Levchenko G.V., Balahanova T.V., Borisenko A.Yu., Mos'pan V.V., Antonov Yu.G. and Medinskij G.A. *Nasledstvennoe vliyanie dendritnoj struktury na razmer zerna nepreryvno lytykh zagotovok iz sredneuglerodistoj stali* [Hereditary influence of dendritic structure on grain size of continuously cast medium carbon steel billets]. *Metall i lit'e Ukrainy* [Metal and Casting of Ukraine]. 2017, no. 11–12, pp. 25–33. (in Russian).
62. Balahanova T.V., Levchenko G.V. and Borisenko A.Yu. *Proyav strukturnoi spadkovosti ta ïï vpliv na vlastivosti garyachekatanih trubnih zagotovok riznogo diametru* [Manifestation of structural heredity and its influence on the properties of hot-rolled pipe billets of different diameters]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv* [Metallurgy and Metal Processing]. 2020, pp. 19–26. (in Ukrainian).
63. Borisenko A.Yu. and Kononenko A.A. *Nasledstvennoe vliyanie mekhanizmov kristallizacii na obrazovanie ferritno-perlitnoj struktury v stali* [Hereditary influence of crystallization mechanisms on the formation of a ferrite-pearlite structure in steel]. *Sovremennyye problemy fiziki metallov i metallicheskih sistem* [Modern problems of physics of metals and metal systems]. Institute of Metal Physics (Kyiv, May 25–27), 2016, 199 p. (in Russian).
64. Borisenko A.YU. and Kononenko A.A. *Genezis zerennoj struktury v lityh metallah i splavah* [Genesis of grain structure in cast metals and alloys]. *Sovremennyye problemy fiziki metallov i metallicheskih sistem* [Modern Problems of Physics of Metals and Metallic Systems]. Institute of Metal Physics (Kyiv, May 25–27), 2016, 28 p. (in Russian).
65. Suhomlin V.I., Borisenko A.Yu, Kononenko A.A., Babachenko A.I., Yacenko A.I., Chuhleb V.L., Tkach V.N., Taranenko A.A. and Kuz'michev E.M. *Skhemy i mekhanizmy formirovaniya ferrito-perlitnoj struktury kolesnyh stalej posle kristallizacii, termicheskoy obrabotki i goryachej plasticheskoy deformacii* [Schemes and mechanisms of the formation of the ferrite-pearlite structure of wheel steels after crystallization, heat treatment and hot plastic deformation]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2010, no. 2, pp. 62–75. (in Russian).
66. Borisenko A.Yu., Kononenko A.A., Babachenko A.I. and Naumenko L.D. *Mikrostrukturnye issledovaniya formirovaniya pervichnogo zerna austenita posle kristallizacii uglerodistykh stalej s 0,5–0,7 % C* [Microstructural studies of the formation of primary austenite grains after crystallization of carbon steels with 0,5–0,7% C]. *Dopovidi Nacional'noi akademii nauk Ukraïni* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2010, no. 9, pp. 70–77. (in Russian).
67. Pronov A.P. *Kristallizaciya stal'nogo slitka* [Crystallization of a steel ingot]. Moscow : Publ. AN SSSR, 1960, 150 p. (in Russian).

Стаття надійшла до редакції: 17.11.2021.