

ЛІКВАЦІЯ В СТАЛЕВОМУ ЗЛИВКУ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇЇ ЗНИЖЕННЯ

Ф.К. Біктагіров, К.В. Злигорев

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: biktagirfk@ukr.net

Розглянуто проблему хімічної макронеоднорідності у сталевих зливках, причиною утворення якої є перерозподіл (ліквація) розчинених у залізі елементів між твердою та рідкою фазами в процесі твердіння металу. Відзначено, що найбільш схильними до ліквації є вуглець, сірка та фосфор, накопичення яких призводить до утворення загальної та локальних форм хімічної макронеоднорідності. Розглянуто основні гіпотези щодо механізму формування осьових (V-подібних) та позацентрових (А-подібних) дефектів хімічної неоднорідності та роль двофазної зони в їх розвитку. Підвищений вміст ліквуючих домішок у дефектних зонах створює небезпеку передчасного виходу з ладу або навіть руйнування виробу, виготовленого зі зливка. Наведені результати дослідження валка зі сталі 70ХЗГНМФ підтверджують, що у 48-тонному зливку, з якого валок був виготовлений, спостерігається позитивна ліквація з перевищенням допустимого вмісту вуглецю в окремих зонах. Також відзначено прояв V-подібних та А-подібних дефектів, де вміст сірки підвищено у 2...5 разів. Розглянуто традиційні та сучасні технологічні заходи боротьби з макросегрегацією: зниження домішок, багатокочовове розливання (Multi-pouring), а також імпульсну магніто-осциляцію з гарячим верхом (НРМО) і електрошлаковий підігрів та перемішування (ЕШПП). Показано, що примусова конвекція розплаву в середині зливка сприяє зменшенню протяжності двофазної зони, вирівнюванню складу та потенційному зниженню хімічної макронеоднорідності. Автори підкреслюють, що застосування методів зовнішнього впливу, зокрема методу ЕШПП, дозволяє не лише усунути усадкові дефекти, а й підвищити хімічну однорідність сталі та свідчить про перспективність його використання для підвищення якості сталевих злиwkів. Бібліогр. 22, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: сталевий зливко, ліквація, хімічна макронеоднорідність, дефекти, зовнішній вплив, підігрів і перемішування металу

Вступ. Переважна кількість сталевий металопродукції виробляється шляхом виплавки рідкого металу та подальшого його твердіння у тій чи іншій формі для отримання твердої заготовки. Зокрема, шляхом розливання металу у виливниці для отримання злиwkів масою у десятки й сотні тонн, необхідних для виготовлення великогабаритних виробів, переважно для потреб енергетичного та важкого машинобудування. Кристалізація таких великих мас металу з переходом його з рідкого стану в твердий супроводжується складними й різноманітними теплофізичними, фізико-хімічними, гідродинамічними та гравітаційними процесами, які визначають внутрішню будову отриманих злиwkів і, зрештою, їхню якість.

Обговорення проблеми. Підвищення вимог до надійності та довговічності таких виробів, як судини високого тиску, обичайки корпусів атомних електростанцій, прокатні валки та низка інших, зумовлює необхідність отримання злиwkів із мінімальним розвитком різноманітних внутрішніх неоднорідностей і дефектів. Серед них одним із найважче усунених дефектів є хімічна макронеоднорідність. Вона проявляється у вигляді відмінності вмісту легуючих і домішкових елементів як у зливка загалом, так і в окремих його зонах, як це показано на рис. 1.

Причиною хімічної неоднорідності або ліквації у сталевих зливках є відмінність у розчинності елементів у твердій і рідкій фазах та нерівноважні умови кристалізації [1–3]. Зв'язок між концентрацією елементів у твердій (C_s) та рідкій фазах (C_l) визначається залежністю:



Рис. 1. Схема розташування в сталевому зливку локальної хімічної неоднорідності: 1 — позацентрова (А-подібна); 2 — осьова (V-подібна); 3 — негативна ліквація

Ф.К. Біктагіров — <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>, К.В. Злигорев — <https://orcid.org/0009-0003-6829-7795>

Таблиця 1. Коефіцієнти ліквациї елементів, розчинених у залізі [4]

Елемент	δ-залізо	γ-залізо	Елемент	δ-залізо	γ-залізо
Алюміній	0,08	–	Мідь	0,44	0,12
Бор	0,95	0,96	Молибден	0,20	0,40
Ванадій	0,10	–	Нікель	–»–	0,05
Водень	0,44	0,12	Сірка	0,98	0,98
Вольфрам	0,05	0,50	Вуглець	0,87	0,64
Кобальт	0,10	0,05	Титан	0,86	0,93
Кремній	0,34	0,50	Фосфор	0,87	0,94
Марганець	0,16	0,05	Хром	0,05	0,15

$$C_s = K \cdot C_L,$$

де K — коефіцієнт розподілу.

Величина $1-K$, що називається коефіцієнтом ліквациї, характеризує схильність елементів до ліквациї. Значення коефіцієнта ліквациї розчинних у залізі елементів наведені в табл. 1.

Серед елементів, що зазвичай присутні в середньолегованій конструкційній сталі, найбільшою схильністю до ліквациї володіють сірка, фосфор і вуглець. Значно меншим є коефіцієнт ліквациї, а отже і схильність до ліквациї у кремнії, молибдені та вольфрамі. Інші елементи ліквують ще в меншій мірі.

У процесі затвердіння сталевого зливка відбувається накопичення збагаченої лікватами рідини перед зростаючими гілками дендритів із поступовим збільшенням вмісту розчинених у залізі елементів у напрямку від периферії до центру та знизу до верхньої його частини. Це призводить до формування загальної хімічної неоднорідності в межах усього зливка. Вона може бути досить знач-

ною, про що свідчать наведені в табл. 2 результати дослідження хімічного складу валка холодної прокатки, виготовленого на Новокраматорському машинобудівному заводі (НКМЗ, м. Краматорськ) із зливка масою 48 тонн сталі 70ХЗГНМФ. Зразки для дослідження відбирали з шийки валка, що відповідає верхній частині зливка (рис. 2).

З наведених даних видно, що вміст вуглецю збільшується в напрямку від поверхні валка до його осьової частини, що є проявом загальної позитивної ліквациї. Також відзначається високий вміст вуглецю в цій частині валка, який перевищує верхню допустиму межу (0,75 %) для сталі 70ХЗГНМФ. Найвищий вміст вуглецю (понад 1,0 %) спостерігається на відстані приблизно $1/3 \dots 1/2$ радіуса від поверхні валка та в його осьових зонах (рис. 3). У тих же ділянках у металі зафіксовано більш високий, порівняно з плавковим складом, вміст практично всіх елементів. Ймовірно, це відповідає тим місцям, де у вихідному злив-

Таблиця 2. Хімічний склад металу від поверхневої до осьової зони шийки валка, %

Відстань від поверхні шийки, мм	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
10	0,83	0,5	1,03	0,013	0,005	2,93	0,46	0,57	0,18	0,14
20	0,75	0,48	0,97	–»–	0,008	2,69	0,47	0,48	0,17	0,12
40	0,82	0,53	1,01	0,014	0,004	2,90	0,49	0,55	0,18	0,14
60	1,02	–»–	1,07	0,017	0,011	3,04	0,47	0,62	–»–	0,15
80	1,13	0,5	1,15	0,023	0,053	2,97	0,43	–»–	–»–	0,18
100	0,98	0,51	1,04	0,015	0,010	2,96	0,46	0,60	–»–	0,15
120	0,95	0,52	1,05	–»–	0,011	3,04	–»–	0,64	–»–	–»–
140	0,96	–»–	1,08	0,018	0,018	3,18	0,45	0,72	–»–	–»–
160	0,89	0,5	1,01	0,014	0,010	2,85	0,46	0,54	–»–	0,14
180	0,84	–»–	0,97	0,011	0,005	2,82	–»–	0,52	–»–	0,13
200	0,83	0,48	0,98	0,012	–»–	2,88	0,44	0,55	–»–	–»–
220	1,0	0,5	1,06	0,019	0,017	3,10	0,43	0,68	–»–	0,16
240	1,05	0,47	1,09	0,021	0,020	3,23	0,41	0,76	0,17	0,18
Ковшова проба	0,71	0,45	0,96	0,012	0,004	2,76	0,45	0,50	–	0,12
Марочний склад 70ХЗГНМФ	0,65...0,75	0,4...0,6	0,9...1,3	≤ 0,015	≤ 0,015	2,7...3,3	0,35...0,50	0,50...0,70	0,1...0,3	0,1...0,3

ку були ділянки із позаосьовими (А-подібними) та осьовими (V-подібними) неоднорідностями.

Вивченню природи утворення цих локальних видів хімічної неоднорідності присвячено велику кількість досліджень. Особливості розташування та виду V-подібних неоднорідностей свідчать, що їх розвиток пов'язаний із усадковими переміщеннями збагаченої домішками рідкої сталі під час затвердіння осьової верхньої зони зливка в умовах розгалуженої двофазної зони з утворенням тут пережимів, порожнин і мікротріщин [5, 6]. Для запобігання такій неоднорідності необхідно створювати умови для вільного надходження маточного розплаву до зон, що твердіють. Наприклад, шляхом поліпшення роботи прибутку, збільшення конусності зливків, подачі додаткового тепла до головної частини зливка.

Що стосується позаосьової неоднорідності то дослідники висували багато різних гіпотез її утворення, серед яких найбільше визнання отримали дві, що пояснюють механізм такого своєрідного розташування розглядуваного дефекту. Згідно з теорією, обгрунтованою в роботі [7] і згодом розвиненою іншими дослідниками [8, 9], шнури позаосьової неоднорідності в розгалуженій двофазній області, в умовах ускладненого живлення усадкових порожнин рідким металом із серцевини зливка, заповнюються шляхом стікання збагаченої домішками рідини з верхніх міжосьових просторів дендритів. Почавшись у будь-якому місці, процес стікання викликає безперервний ланцюг таких послідовних переміщень металу з утворенням витягнутих у вертикальному напрямку, з нахилом у бік руху фронту затвердіння шнурів позацентральної ліквіації.

Пізніше теорія, більш обгрунтовано пояснююча особливості утворення та розташування у зливку позацентральної ліквіації, була викладена в роботах [10, 11]. Автори вважають, що появу А-подібної неоднорідності пов'язано з спливанням під дією гравітаційних або термогравітаційних сил збагаченої розчиненими речовинами та менш щільної рідини з міждендритних просторів. Під час руху такої рідини у двофазній зоні до верхньої частини зливка її температура підвищується, але склад залишається практично незмінним завдяки повільній дифузії маси. Ця більш гаряча рідина потім спричиняє уповільнення росту або підплавлення твердого матеріалу навколо себе, створюючи стійкі канали, збагачені розчиненими речовинами. При цьому було виявлено, що А-ліквіація починає утворюватися в міжфазній зоні, коли частка твердої фази становить від 0,3 до 0,35, і зберігається до тих пір, поки частка твердої фази не досягне 0,7.

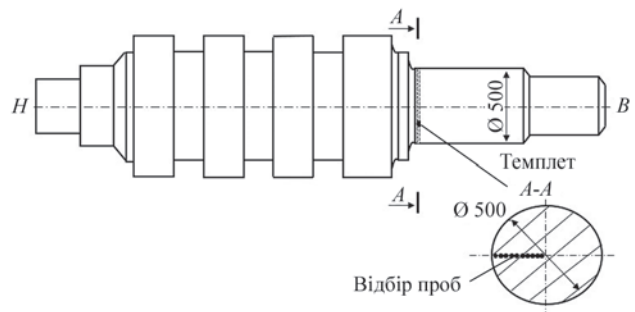


Рис. 2. Схема валка зі 48-тонного зливка сталі 70ХЗГНМФ і місце відбору темплета для досліджень

Попри різні пояснення причин утворення позацентральної ліквіації однозначно встановлено залежність ступеня її розвитку від протяжності двофазної зони та швидкості кристалізації [11, 12]. При цьому зі зменшенням першого показника та збільшенням другого зазначена неоднорідність знижується. Тому за інших рівних умов зливки зі сталей із широким інтервалом кристалізації сильніше уражаються позацентральною ліквіацією.

Ділянки зливка, де проявляються позаосьова та осьова ліквіації, мають підвищені пористість і концентрацію ліквіуючих елементів, головним чином вуглецю, сірки та фосфору. Наприклад, за даними [7], вміст сірки може бути вдвічі і більше вищим порівняно з вихідним, а при дослідженні 225-тонного зливка було визначено, що максимальна ліквіація в деяких його ділянках складає, %: за вуглецем — 300, фосфором — 380, а за сіркою — 500 [13].

Надмірно високий вміст сірки, у 3...10 разів вищий порівняно з ковшовою пробою, у деяких зразках на відстані 1/2...1/3 від поверхні та в центральній частині шийки дослідженого валка (рис. 4), явно свідчить про ураження зливка, з якого виготовлявся валок, ліквіаційними дефектами А-подібного та V-подібного характеру. Тому метал у цих ділянках буде механічно ослаблений, що може бути причиною передчасного виходу з ладу або навіть руйнування виробу, виготовленого зі зливка.

Окрім позитивної у зливках часто спостерігається і негативна ліквіація. Ділянки з пониженим вмістом легуючих залізо елементів знаходяться в донній осьовій частині, так званому конусі осадження. Він утворюється на початкових етапах формування

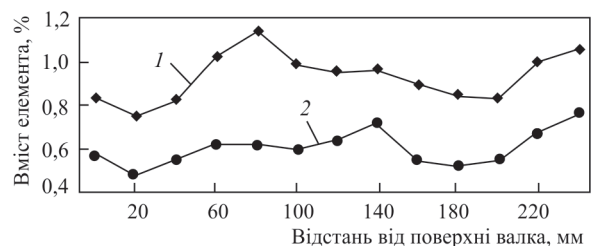


Рис. 3. Розподіл вуглецю (1), молібдену (2) за перерізом шийки валка

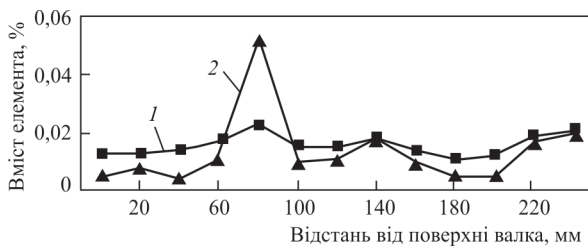


Рис. 4. Розподіл сірки (1), фосфору (2) за перерізом шийки валка

зливка внаслідок осідання під дією сили тяжіння, а також низхідними потоками кристалів, гетерогенно зароджених у рідкій фазі або з якихось причин відокремлених від зростаючих дендритів. Ці кристали збіднені розчиненими домішками, що і визначає їх нижчий вміст у конусі осадження.

Численні дослідження проявів ліквідації при отриманні сталевих зливок шляхом розливання рідкого металу у виливниці дозволили прояснити багато процесів і явищ, що призводять до утворення в них дефектів хімічної неоднорідності. Наприклад, з'ясувалося, що зниження вмісту кремнію в металі призводить до ослаблення розвитку позацентральної ліквідації. Це пов'язано з тим, що у низькокремнієвій сталі формується більш щільний каркас дендритів і зменшується текучість сталі. Тому ускладнюється витікання міждендритної рідини, спливання якої призводить до утворення А-ліквідації.

До заходів боротьби з хімічною неоднорідністю у зливках належить і загальне зниження вмісту небажаних домішок у виплавленій сталі, передусім сірки та фосфору, а також водню шляхом вакуумування металу. Для зменшення загальної хімічної неоднорідності за вуглецем при виробництві великих зливок застосовують метод послідовного заливання у виливницю сталі з кількох ковшів із зменшенням концентрації вуглецю за ходом заповнення виливниці — процес *Multi-pouring* (MP) [14].

Хоча технологія MP добре відома і давно застосовується на підприємствах, що спеціалізуються на виробництві ковальських зливок, її можливості щодо вирівнювання вмісту вуглецю в об'ємі зливка обмежені часом розливки, коли відбувається інтенсивне перемішування металу. Надалі процеси перерозподілу розчинених у залізі елементів між рідкою та твердою фазами протікають відповідно до умов формування конкретних зливок. Тому, особливо при отриманні зливок із високовуглецевих сталей із широким інтервалом кристалізації, ступінь їхньої загальної хімічної неоднорідності за вуглецем може бути досить великою, не кажучи вже про скупчення цього елемента, як і інших, у місцях розташування А- та V-подібних ліквідацій.

Аналіз шляхів підвищення якості литих виробів, виконаний у роботі [15], показав, що для цього можуть бути застосовані методи зовнішнього впливу, які дозволяють безпосередньо впливати на процеси кристалізації — модифікування, вібраційна обробка, перемішування металу, підведення тепла та металу у прибуток. Що стосується великих сталевих зливок, найбільш ефективними серед них є перемішування рідкої серцевини зливка, що кристалізується, та підведення додаткового тепла і металу у прибуток. Дослідження, виконані в ІЕЗ ім. Є.О. Патона з використанням запропонованого методу електрошлакового підігріву та перемішування металу продуванням його незатверділої серцевини аргоном [16], показали, що при такому комбінованому зовнішньому впливі створюються умови для суттєвого зменшення протяжності двофазної зони та забезпечення безперешкодного надходження рідкого розплаву з головної частини зливка до зон, що твердять [16, 17]. Внаслідок цього у сталевих зливках, отриманих із застосуванням нагріву та перемішування металу, не лише відсутні грубі дефекти усадкового походження у вигляді закритої усадкової раковини та усадкових порожнин, а й значно зменшується осьова пористість та пухкість металу [18]. Беручи до уваги таке підвищення фізичної однорідності, можна очікувати подібного ефекту і щодо хімічної однорідності зливок, оскільки процеси усадки та ліквідації тісно взаємопов'язані.

Приблизно за таким же шляхом пішли й у роботах [19–21], виконаних за участю співробітників Шанхайського університету (КНР), які для мінімізації усадкової раковини, несучільності (пор, тріщин) та макросегрегації у сталевому зливку випробували метод імпульсної магніто-осциляції з гарячою верхньою частиною (*Hot-top Pulsed Magneto-Oscillation*, НРМО). Суть методу полягає в розміщенні на рівні прибуткової частини зливка спеціального індуктора, електромагнітне поле якого змушує циркулювати рідку сталь поблизу прибутку. Це призводить до того, що зерна кристалів, що зародилися в розплаві, а також відокремлені від стінок прибутку або виливниці, переміщуються вниз і осідають у середині зливка. Це явище відоме як осадження, дощ кристалів, дрібнить затверділу структуру, підвищує гомогенізацію розчинених речовин і зменшує сегрегацію. Джоулеве тепло, яке генерується в процесі НРМО, забезпечує збереження металу в головній частині зливка в переґрітому стані та живлення нижніх ділянок розплавом, що виключає утворення усадкових дефектів у вигляді центральної пористості та тріщин. Крім того, перемішування металевого розпла-

ву під дією магнітного поля сприяє спливанню неметалічних включень та очищенню металу від них.

Експериментальні дослідження (спочатку зі зливками масою 200 кг, а потім 18 тонн) показали, що застосування НРМО призводить до формування очікуваної затверділої структури у зливках зі зменшенням розміру рівноосного зерна на 56...83 %, зменшенням кількості включень на 41 % і нормальної сегрегації вуглецю на 50...75 % порівняно з контрольними зливками [22].

Дія методу НРМО, так само як і методу електрошлакового підігріву та перемішування [17, 19], базується на створенні примусової конвекції металеві ванни всередині твердіючого зливка. Відмінність полягає в джерелах, що створюють нагрів і перемішування. На нашу думку метод ІЕЗ, який назвемо методом ЕШПП (електрошлаковий підігрів і перемішування), має більші можливості для організації перемішування не лише верхньої, але й нижньої частин зливка, а також для більш глибокого очищення металу від неметалічних включень завдяки його рафінуванню шлаком. Більше того, використання замість електрошлакового нагріву електрошлакової підпитки з використанням витратного металевого електрода з пониженим, порівняно з відлитим металом, вмістом вуглецю повинно дозволити вирівняти вміст цього елемента по висоті та перерізу зливка.

Метод ЕШПП дозволяє зменшити розміри двофазної зони, у якій зароджується такий небезпечний дефект хімічної неоднорідності як А-подібна ліквіація, та знизити розвиток усадкових дефектів із супутнім утворенням дефектів у вигляді V-подібної неоднорідності. Крім того, він створює умови для додавання у головну частину зливка металу з пониженим вмістом сильно ліквіуючих елементів, зокрема вуглецю. Усе це в сукупності повинно позитивно позначитися на хімічній однорідності сталевих зливок та в кінцевому підсумку має підняти їхню якість на новий рівень.

Висновки

1. У сталевих зливках одним із найбільш небезпечних дефектів є хімічна макронеоднорідність, яка знижує якість і надійність готової металопродукції.

2. Найбільш схильними до ліквіації елементами у середньолегованих конструкційних сталях є вуглець, сірка та фосфор, накопичення яких у центральних та позаосьових зонах зливка призводить до формування А- та V-подібних ліквіаційних дефектів.

3. Ступінь проявів хімічна неоднорідність істотно залежить від складу сталі та умов кристалізації, особливо від протяжності двофазної зони, де зароджуються дефекти ліквіаційного походження.

4. У валку, виготовленого із 48-тонного зливка сталі 70ХЗГНМФ, загальна позитивна ліквіація приводить к істотному перевищенню цього елемента в металі, а в окремих зонах вміст сірки в 2...4 рази більше, ніж у вихідній сталі.

5. Перспективними шляхами боротьби з макросегрегацією в сталевих зливках є застосування технологій зовнішнього впливу, зокрема, методу електрошлакового підігріву і перемішування їх рідкої серцевини в процесі твердіння металу.

Список літератури/References

- Ageev, N.V. (1947) *The nature of chemical bonds in metallic alloys*. Moscow, Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR [in Russian].
- Weingart, U. (1967) *Introduction to the physics of metal crystallization*. Moscow, Mir [in Russian].
- Flemings M.C. (1974) *Solidification processing materials*. In: *Science and engineering series*. New York.
- Saratovkin, D.D. (1957) *Dendritic crystallization*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
- Gulyaev, B.B. (1950) *Solidification and heterogeneity of steel*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
- Efimov, V.A. (1976) *Steel casting and crystallization*. Moscow, Metallurgy [in Russian].
- Tageev, V.M. (1952) *Heterogeneity of the structure of steel ingots*. In: *Steel ingot*. Moscow, Metallurgizdat, 40–66 [in Russian].
- Tageev, V.M., Smironov, Yu.D. (1958) *Study of the formation of off-axis heterogeneity in steel ingots and castings*. In: *Solidification of Metals*. Moscow, Mashgiz, 352–372 [in Russian].
- Smirnov, Yu.D. (1969) *On the mechanism of the formation of off-axis heterogeneity in steel ingots*. *Problems of the Steel Ingot*, **3**, 49–53 [in Russian].
- Suzuki, K., Taniguchi, K., Watanabe, J. (1979) *Control of macro-segregation in large forging ingots by vacuum carbon deoxidation*. In: *Proc. of the Sixth Inter. Conf. on Vacuum Metallurgy, San Diego, California*.
- Suzuki K., Taniguchi K. (1981) *The mechanism of reducing «A» in steel ingot*. *Transact. Iron and Steel Inst., Jap.*, **4**, 235–342.
- Efimov, V.A. (1969) *State and prospects of research in the field of improving steel casting and the quality of steel ingots*. In: *Problems of the steel ingot*. Moscow, Metallurgizdat, 3–24 [in Russian].
- Dickenson, H.S. (1965) *Segregation in large steel ingots*. *Iron and Steel Institute*, **1**, 177–196.
- Wutao, T., Xiong, Z., Houfa, S., Baicheng, L. (2014) *Numerical simulation on multiple pouring process for a 292 t steel ingot*. *Research and Development*, **11**(1), 52–58.
- Barabash, V.V., Biktagirov, F.K. (2024) *Application of external influence in the production of steel ingots*. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **1**, 40–48 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.01.05>
- Shapovalov, V., Biktagirov, F., Gnatushenko A. et al. (2020) *Method for preparing steel ingot*. Pat. Chine ZL2018 1 1041752.7, 02.06.2020.
- Barabash, V.V., Biktagirov, F.K., Shapovalov, V.O. et al. (2024) *New method for improving physical homogeneity of steel ingots*. In: *Proc. of the VII Inter. Conf. on Welding and Related Technologies, WRT 2024, 7–10 October, Yaremche, Ukraine*. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518>

18. Barabash, V.V., Biktahirov, F.K., Shapovalov, V.O., Hnatushenko, O.V. (2004) The influence of metal heating and stirring on the conditions of steel ingot solidification. In: *Proc. of the 18th Inter. Conf. on Scientific on Science and Education, Hajduzsobozlo, Hungary, 04–11 January*.
19. Biktahirov, F.K., Barabash, V.V. (2025) Influence of electroslag heating and stirring of metal on the physical homogeneity of experimental 40Kh steel ingots. *Casting Processes*, 2(160), 10–19 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2025.02.010>
20. Li, H.C., Liu, Y.X., Zhang, Y.H. et al. (2018.) Effects of hot top pulsed magneto-oscillation on solidification structure of steel ingot. *China Foundry*, 15, 110–116. DOI: 10.1007/s41230-018-7198-z
21. Zhang, F., Zhong, H.G., Yang, Y.Q. et al. (2022) Improving ingot homogeneity by modified hot-top pulsed magneto-oscillation. *J. Iron Steel Res. Int.*, 29, 1939–1950.
22. Zhong, H., Huang, J., Han, K. et al. (2024) Homogenization technology for heavy ingots: Hot-top pulsed magneto-oscillation. *Metallurgical and Materials Transact.*, 55, 1083–1097. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-024-03019-z>

SEGREGATION IN A STEEL INGOT AND POSSIBILITIES FOR ITS LOWERING

F.K. Biktahirov, K.B. Zlygoriev

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: biktahirov@ukr.net

The problem of chemical macroheterogeneity in steel ingots is considered, which is caused by redistribution (segregation) of elements dissolved in iron, between the solid and liquid phases during metal solidification. It is determined that carbon, sulphur and phosphorus are the most prone to segregation. Their accumulation leads to formation of the general and local forms of chemical macroheterogeneity. Two main hypotheses are considered as to the mechanism of formation of the axial (V-shaped) and off-center (A-shaped) defects of chemical heterogeneity and the role of the two-phase zone of their development. Increased content of healing additives in the defective zones creates a risk of premature failure or even breaking up of the product made from the ingot. Results of studying a roll from 70Kh3GNMF steel are given, which confirm that positive segregation is observed in a 48 ton ingot from which the roll was made, with exceeding the admissible carbon content in individual zones. Also noted is the manifestation of V-shaped and A-shaped defects, where sulphur content is 2...5 times higher. Traditional and modern technological means of preventing the macrosegregation are considered: reduction of impurities, multipouring, as well as hot-top pulsed magnetic oscillation (HPMO) and electroslag heating and stirring (ESHS). It is shown that forced convection of the melt inside the ingot promotes reducing the extent of the two-phase zone, homogenizing of the composition and potential lowering of chemical macroheterogeneity. The authors emphasize that application of the methods of external influence, in particular, ESHS method, allows not only eliminating the shrinkage defects, but also enhancing the chemical homogeneity of steel, and it is indicative of the good prospects for its application to improve the quality of the steel ingots. 22 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: steel ingot, segregation, chemical macroheterogeneity, defects, external influence, metal heating and stirring

Отримано 01.10.2025

Отримано у переглянутому вигляді 11.12.2025

Прийнято 22.12.2025

ЕЛЕКТРОШЛАКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ СЬОГОДНІ



Електрошлакові технології широко застосовуються для отримання високоякісних зливків і виливок із широкою номенклатурою сталей і сплавів у процесі виготовлення деталей відповідального призначення для авіаційної, енергетичної, хімічної та інших високотехнологічних галузей, де необхідно використовувати матеріали з унікальними експлуатаційними властивостями.



Застосування електрошлакових процесів також створює ефективні можливості для рециклінгу металевих відходів у контексті розвитку циркулярної економіки та технологій «зеленої» металургії.



Фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України стояли біля витоків створення процесу електрошлакового переплаву. В інституті накопичено значний багаторічний досвід розроблення та вдосконалення широкого спектру технологій електрошлакового переплаву, а також проектування та модернізації обладнання для їхньої реалізації у промисловості. Роботи виконуються для замовників із різних країн світу, що підтверджує високий рівень компетентності інституту в цій галузі.