

УДК 669.117.56

Ф.К. Біктагіров, докт. техн. н., пров. наук. співроб.;e-mail: biktagirfk@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>**В.В. Барабаш**, аспірант; e-mail: barabash.vv@ukr.net;<https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Київ, Україна)

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПІДІГРІВУ ТА ПЕРЕМІШУВАННЯ МЕТАЛУ НА ФІЗИЧНУ ОДНОРІДНІСТЬ ДОСЛІДНИХ ЗЛИВКІВ ЗІ СТАЛІ 40Х

Розроблено методику та проведено експерименти з отримання дослідних сталевих зливок марки 40Х в лабораторних умовах із застосуванням комбінованого зовнішнього впливу у вигляді підігріву та перемішування металу під час його твердіння. Зливки масою 120 кг відливали у піщано-глинисті форми двома способами: без застосування зовнішніх впливів (контрольні зливки) та з підігрівом і перемішуванням металу (дослідні зливки). Для підведення тепла до поверхні металу в надливці застосовувався електрошлаковий підігрів, а перемішування металу здійснювали продуванням рідкої серцевини зливка аргоном за допомогою фурми, зануреної в металеву ванну. Перемішування починали через 7–8 хв і закінчували через 30–35 хв з моменту початку формування зливка. Інтервал між циклами продування, яких було п'ять, становив від 5 до 6 хв, час кожного продування — близько 30 с. Для дослідження якості отриманих зливок із них вирізали вертикальні осьові темплеті товщиною 20–25 мм. Ближчу до осі зливка поверхню темплетів піддавали шліфуванню, потім із неї знімали сірчані відбитки, за Бауманом, і піддавали травленню для виявлення макроструктури. Із темплетів відбирали зразки для визначення твердості, густини та механічних властивостей металу. Згідно з проведеними дослідженнями, у макроструктурі дослідних зливок, на відміну від контрольних, отриманих без зовнішнього впливу, не виявлено усадкових дефектів, у тому числі у вигляді осьової пористості металу. Дані вимірювань твердості та густини, а також механічні випробування свідчать про відсутність у дослідних зливках будь-якого помітного зниження властивостей металу у верхній осьовій їх частині. У той же час саме в цих місцях у контрольних зливках спостерігалось різке зниження якості металу. Показано, що комбінований метод зовнішнього впливу, який поєднує підігрів і перемішування металу, дозволяє покращити якість сталевих зливок за рахунок суттєвого підвищення їх фізичної однорідності.

Ключові слова: сталевий зливок, зовнішній вплив, підігрів, перемішування, кристалізація, усадкові дефекти, якість металу.

Вступ

При отриманні сталевих зливок шляхом розливки металу у виливниці для підвищення їх якості можна застосовувати різні методи зовнішнього впливу [1–4]. Одним із найефективніших є перемішування рідкої серцевини зливка під час його формування, яке широко використовується під час безперервного лиття сталі [5, 6]. Також добре зарекомендували себе методи додаткового підведення тепла до надливу, зокрема на основі електрошлакового обігріву [7, 8].

В роботі [9] на основі аналізу дії зовнішніх впливів на процеси кристалізації було показано, що найдієвішим із погляду підвищення якості литих заготовок може бути комбінований зовнішній вплив, який поєднує електрошлаковий підігрів та перемішування металу при його твердінні.

Фізичне й математичне моделювання затвердіння ковальських та листових

зливків показало позитивний вплив застосування підігріву й перемішування на умови переходу металу з рідкого стану в твердий та формування його внутрішньої будови [10, 11].

Як показують результати фізичного моделювання з використанням тіосульфату натрію як моделюючого середовища, при комбінованому зовнішньому впливі з продуванням рідкої серцевини модельних зливків газом для її перемішування в них повністю відсутні усадкові дефекти у вигляді закритих усадкових порожнин. А згідно з даними математичного моделювання, при виливці за традиційною технологією 50-тонного листового зливка висотою 3000 мм зі сталі типу 15Г2СФ, що має інтервал кристалізації близько 80 °С, протяжність двофазної зони вздовж його осі досягає 2400 мм, а при застосуванні методу зовнішнього впливу, що розглядається, не перевищує 300–400 мм [11]. Добре відомо, що у двофазній зоні ускладнюється живлення твердіючих ділянок рідким металом; це є причиною утворення пористості в сталевих зливках. Тому зменшення розмірів двофазної зони має призвести до зниження розвитку в зливку таких дефектів.

Дослідження реальних сталевих зливків зі сталі 20, що має інтервал кристалізації 40 °С, які були отримані із застосуванням підігріву та перемішування металу, підтвердили позитивну дію комбінованого впливу на їх якість [12, 13]. Роботи з отримання зливків зі сталей із більшим інтервалом кристалізації продовжено.

Їх метою є дослідження впливу підігріву та перемішування металу на фізичну однорідність реальних сталевих зливків зі сталі 40Х, різниця між температурами ліквідус та солідус якої становить 60 °С.

Методика досліджень

З урахуванням наявного плавильного обладнання в лабораторних умовах із сталі марки 40Х, яка широко застосовується як конструкційний матеріал у різних галузях промисловості, відливали зливки масою 120 кг. Метал виплавляли в електрошлаковій тигельній печі та разом із рідким шлаком (шлак марки АН-295) заливали в піщано-глинисті форми, які малі внутрішні розміри: діаметр внизу — 185–190 мм, діаметр вгорі — 240 мм, висота — 600 мм (рис. 1). Використання вогнетривкої ливарної форми дозволяло імітувати умови кристалізації більших зливків, що відливаються в чавунну форму. Так робили автори роботи [14] під час перевірки результатів математичного моделювання формування зливків великої маси дослідженнями якості реальних зливків порівняно невеликих розмірів.

Експерименти проводили двома способами: без застосування зовнішніх впливів (контрольні зливки) та з підігрівом і перемішуванням металу (дослідні зливки). У всіх експериментах після заповнення ливарних форм на дзеркалі металу залишали шар шлаку завтовшки 60–70 мм. При отриманні зливків без зовнішнього впливу в шлак опускали підключений до джерела живлення графітовий електрод діаметром 80 мм і пропускали через шлакову ванну електричний струм силою 200–400 А при напрузі на джерелі живлення 40 В. Такий режим електрошлакового процесу дозволяв зберігати шлак у рідкому стані при температурі 1500–1520 °С. Така температура близька до температури ліквідусу сталі 40Х, що дозволяло підтримувати дзеркало металу в рідкому стані. Через 30–35 хв після заповнення ливарної форми металом підігрів шлаку припиняли.

При отриманні зливків із застосуванням зовнішнього впливу в шлак також опускали графітовий електрод, але електричний режим підігріву шлаку був набагато потужніший для забезпечення нагріву металу. При напрузі 40 В сила струму становила від 600 до 800 А. Температура шлаку при цьому була 1580–1600 °С. Через 30–35 хв після заливання металу у форму силу струму знижували до 200–300 А, а ще через 10 хв електрошлаковий процес припиняли.

Крім підігріву, в експериментах із застосуванням зовнішнього впливу здійснювали перемішування металу шляхом продування аргонем рідкої серцевини зливка за

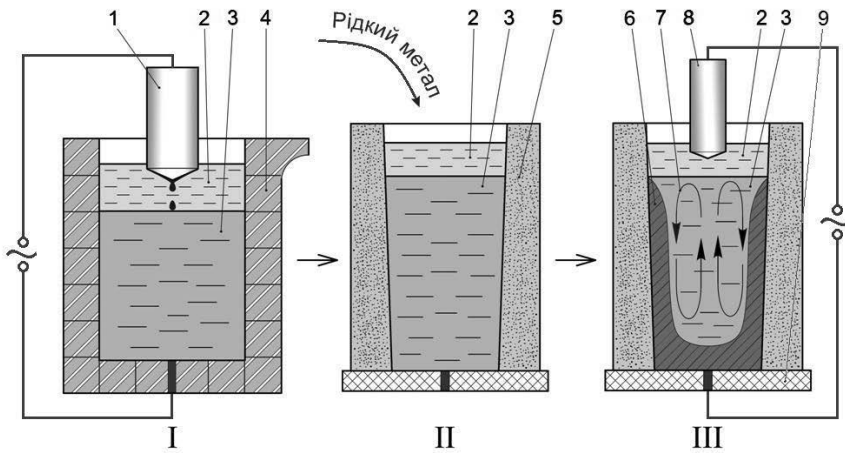


Рис. 1. Схема проведення експериментів з отримання зливоків із застосуванням зовнішнього впливу: I — плавка металу, II — заливка рідкого металу в ливарну форму, III — підігрів та перемішування металу. 1 — сталевий витратний електрод; 2 — рідкий шлак; 3 — рідкий метал; 4 — плавильна ємність (тигель); 5 — піщано-глиниста форма; 6 — твердий метал; 7 — напрямок перемішування металу; 8 — невитратний графітовий електрод; 9 — піддон

допомогою фурми, яку занурювали в металеву ванну. Продування починали через 7–8 хв і закінчували після 30–35 хв від початку формування зливоків. Інтервал між циклами продування, яких було п'ять, становив від 5 до 6 хв, час кожного продування — близько 30 с. Витрати аргону вибирали зважаючи на те, щоб під час продування не сталося надмірного «збудження» шлакової ванни в зоні виходу газів й «оголення» дзеркала металу.

Після повного затвердіння та остигання металу до кімнатної температури зливки відокремлювали від форми. З них вирізали вертикальні осьові темплети товщиною 20–25 мм. Близьку до осі зливка поверхню темплетів піддавали шліфуванню, потім із неї знімалися сірчані відбитки за Бауманом, і далі метал підлягав травленню для виявлення макроструктури. Також проводили за стандартними методиками досліджування твердості, густини металу та випробування для визначення його механічних властивостей.

Результати і обговорення

Аналіз макробудови темплетів показав (рис. 2, 3), що контрольний зливок має характерні для зливоків звичайного виробництва дефекти усадкового характеру. У головній частині розташовується відкрита усадкова раковина, яка в центрі зливка тягнеться на глибину до 110 мм, що становить близько 20 % від його висоти. Таке досить глибоке проникнення усадки пояснюється несприятливою з погляду запобігання усадковим дефектам геометрією зливка — великим співвідношенням висоти до діаметру ($H/D=3$) і малою конусністю, яка складала близько 5 %. Таку геометрію обрано спеціально для кращого прояву усадкових дефектів, що утворюються при формуванні сталевих зливоків.

Також у цьому злитку нижче усадкової раковини в осьовій зоні на відстані 180–220 мм від його верху (приблизно $1/3$ висоти зливка) виявляється зона підвищеної пористості та пухкості металу. Такі усадкові дефекти часто зустрічаються у великих зливках звичайного виробництва, і причиною їх утворення є зменшення об'єму металу в умовах недостатнього живлення рідиною міждендритних проміжків у двофазній зоні.

Крім усадкових дефектів, у цій зоні спостерігається скупчення сірки, що проявляється у вигляді темніших ділянок на сірчаному відбитку (рис. 2). Це цілком зрозуміло, оскільки у двофазній зоні відбувається поступове збільшення вмісту в

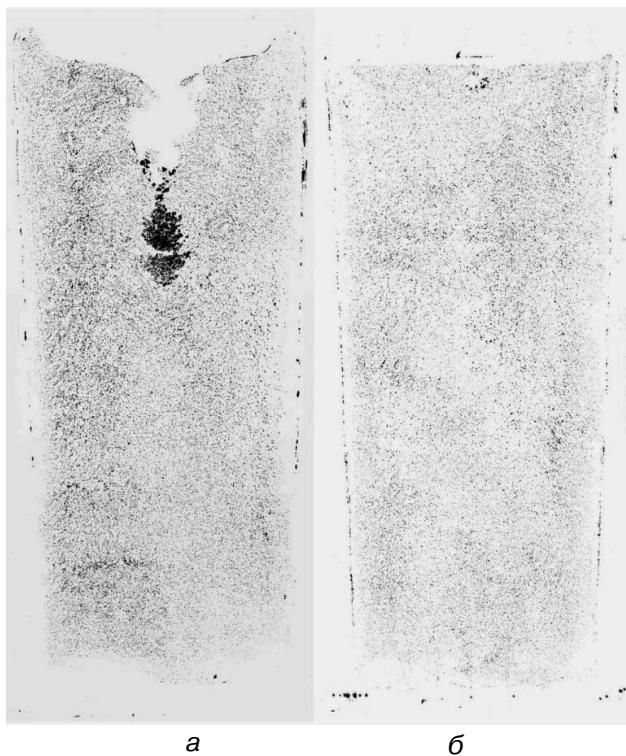


Рис. 2. Вид сірчаних відбитків з осьових темплетів контрольного (а) та дослідного (б) зливків зі сталі 40Х

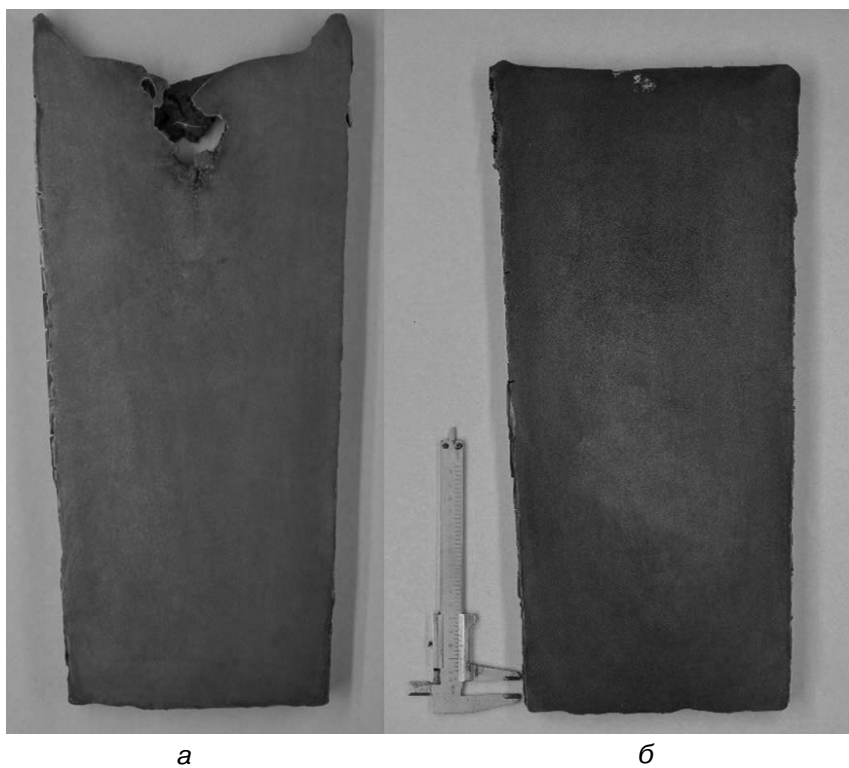


Рис. 3. Фотографії макроструктури металу контрольного (а) та дослідного (б) зливків зі сталі 40Х

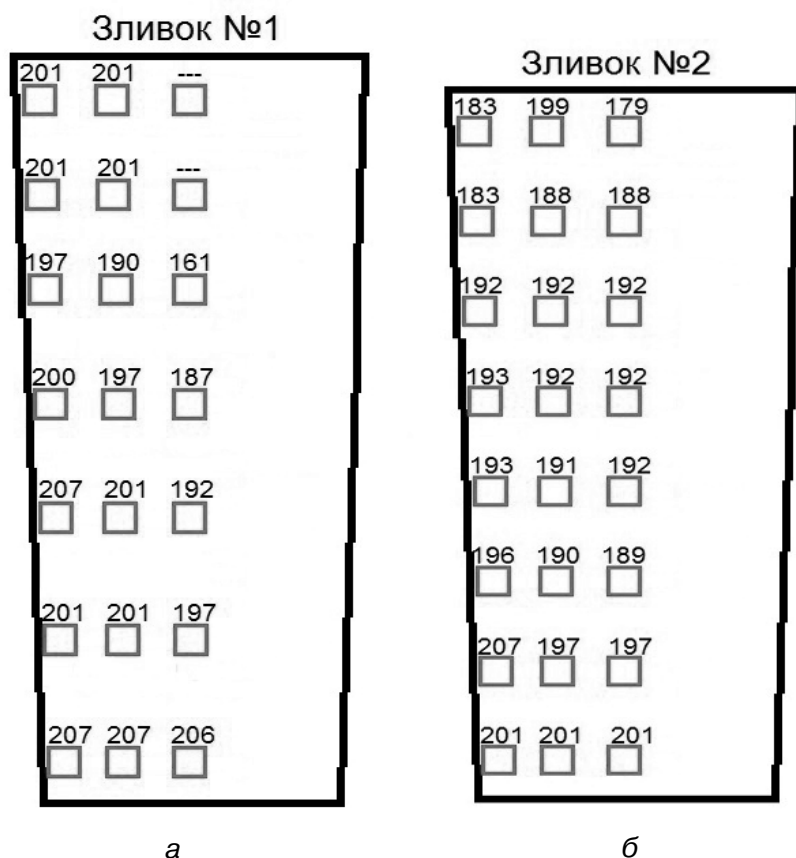


Рис. 4. Показники твердості металу за Бринеллем (НВ) у різних точках контрольного (а) та дослідного зливків (б) зі сталі 40Х

міждендритних ділянках такої схильної до ліквації домішки, як сірка. Тому метал тут має знижену температуру кристалізації і твердне останнім з утворенням дефектів у вигляді пористості. Одночасна наявність у верхній осьовій зоні усадкових та лікваційних дефектів має негативно позначитися на механічних властивостях металу цих ділянок.

У дослідному зливку, за даними макродосліджень, усадкова раковина повністю відсутня, що є наслідком електрошлакового підігріву металу та його збереження тривалий час у верхній частині зливка в перегрітому вище за температуру плавлення стані. Цим забезпечується безперешкодне надходження рідкого металу на нижче розташовані горизонти для компенсації усадки. Лише в найвищій його частині, де метал твердів в останню чергу, є невелика ділянка з проявом дефектів, викликаних усадкою.

Мало того, в дослідному зливку не виявляється зона підвищеної пористості в осьовій його верхній зоні. Це свідчить про те, що застосування перемішування при отриманні цього зливка привело до зміни умов кристалізації. Сталося це, на нашу думку, за рахунок зменшення розмірів двофазної зони при надходженні перегрітого металу до фронту затвердіння, а також за рахунок вимивання інтенсивними потоками металу збагаченої лікватами міждендритної рідини вглиб зливка.

Про високу фізичну однорідність дослідного зливка зі сталі 40Х свідчать і дані вимірювання твердості та густини металу.

На рис. 4 наведено дані зміни твердості металу за висотою та перерізом отриманих зливків. Загальною для контрольного зливка (№1) і дослідного зливка (№2) є тенденція зниження твердості металу в напрямку від поверхні до осі та від нижньої до верхньої частини. Однак у контрольному зливку в зоні підвищеної

пористості твердість металу різко падає, а в найвищій осьовій його частині через наявність усадкових порожнеч визначити твердість було неможливо (рис. 5).

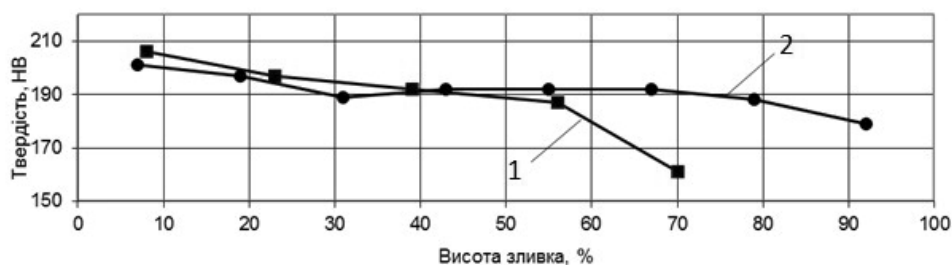


Рис. 5. Твердість металу по осі контрольного (1) та дослідного зливків (2)

Густина металу визначали на одному з дослідних зливків. Для цього з осьових темплетів, відповідно до схеми, наведеної на рис. 6, а., вирізали зразки металу та з кожного робили по три зразки для вимірів густини металу.

Результати вимірювань наведено в табл. 1, а середні значення по пере-різу та висоті зливка на рис. 6, б.

Як впливає з отриманих даних, густина металу дослідного зливка досить однорідна, переважно в межах 7,8–7,85 г/см³. А відсутність будь-якого істотного падіння твердості у його верхній осьовій зоні є показником відсутності тут дефектів усадкового походження у вигляді пористості та пухкості металу.

Крім твердості та густини, були визначені механічні властивості металу контрольного (зливок 1) та дослідного (зливок 2) зливків. Відібрані з різних ділянок осьового темплета зразки проходили стандартну для 40Х сталі термічну обробку. Загартування сталі проводилося при температурі 850 °С, зразки витримували при такій температурі протягом 15 хв, після чого охолоджували їх у воді. Далі відбувався високотемпературний відпуск (500 °С), витримка тривала 1 год, а охолодження відбувалося на повітрі.

Результати визначення межі міцності при випробуванні зразків металу на розрив показані на рис. 7.

Відзначимо чітко виражене в контрольному зливку падіння міцності в зоні підвищеної пористості. У дослідному зливку така зміна у верхній осьовій зоні відсутня.

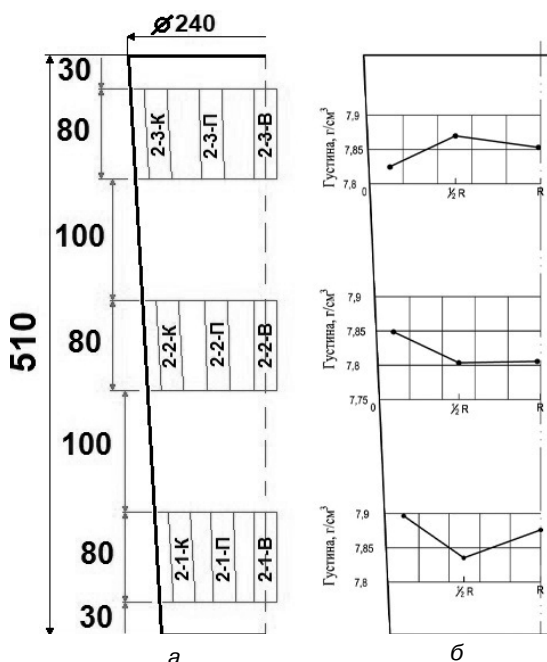


Рис. 6. Схема вирізки з темплета дослідного зливка зразків визначення густини металу (а) та зміна густини металу за перетином та висотою зливка (б)

Дані вимірювання густини металу дослідного зливка зі сталі 40Х

Позна-чення зразка	Номер зразка	Густина металу, г/см³		Позна-чення зразка	Номер зразка	Густина металу, г/см³		Позна-чення зразка	Номер зразка	Густина металу, г/см³	
		Зразка	Середня			Зразка	Середня			Зразка	Середня
2-3-К	1	7,80852	7,8245	2-3-П	1	7,87572	7,8648	2-3-В	1	7,8302	7,8586
	2	7,87227			2	7,85981			2	7,87121	
	3	7,79255			3	7,85887			3	7,87433	
2-2-К	1	7,81637	7,84997	2-2-П	1	7,82427	7,82382	2-2-В	1	7,81447	7,82788
	2	7,86784			2	7,81692			2	7,71167	
	3	7,8657			3	7,83026			3	7,77749	
2-1-К	1	7,8376	7,8845	2-1-П	1	7,88891	7,83039	2-1-В	1	7,79945	7,87602
	2	7,89604			2	7,79664			2	7,95787	
	3	7,91986			3	7,80562			3	7,87074	

Дані механічних випробувань, як і результати вимірювання твердості й густини металу, свідчать про підвищення фізичної однорідності зливка зі сталі 40Х, отриманого при застосуванні комплексного методу зовнішнього впливу — підігріву та перемішування металу.

Висновки

1. Проведено експерименти та отримані зливки з конструкційної сталі 40Х за традиційною технологією та із застосуванням комплексного впливу на умови твердіння у вигляді електрошлакового підігріву та перемішування металу.

2. Виконано дослідження будови зливоків. Виявлено, що контрольні зливки мають у головній частині відкриту усадкову раковину, а в осьовій верхній частині підвищену пористість і пухкість металу. Дослідні зливки, отримані з підігрівом і перемішуванням металу, видимих дефектів усадки не мають.

3. Показано, що комплексний метод зовнішнього впливу на умови формування сталевих зливоків, що полягає в електрошлаковому підігріві та перемішуванні металу в процесі їх отримання, дозволяє підвищити фізичну однорідність зливоків і якість металу. Так, густина металу у всьому обсязі дослідного зливка перебуває в межах 7,8–7,85 г/см³ та, на відміну від контрольного зливка, тут відсутні ділянки зі зниженою твердістю, густиною і механічними властивостями металу, що свідчить про відсутність у ньому дефектів усадкового походження, у тому числі в підусадковій осьовій частині.

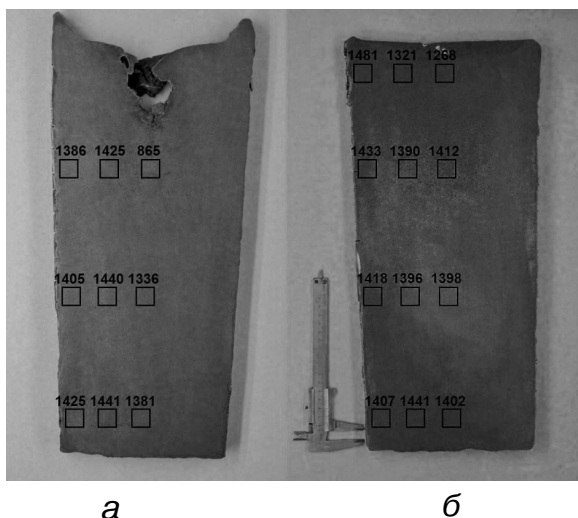


Рис. 7. Значення механічних властивостей (σ_b) металу в різних точках контрольної (а) та дослідного (б) зливоків зі сталі 40Х

Список літератури

- Ефимов, В. А. (1998). Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл. *Сталь*, (4), 21–27.
- Тарасевич, Н. И., Нурадинов, А. С., & Таранов, Е. Д. (2006). Влияние вибрационной обработки на параметры затвердевания стальной заготовки. *Процессы литья*, (1), 64.
- Нурадинов, А. С., & Ефимов, В. А. (2002). Исследование теплофизических условий затвердевания стальных слитков в поле упругих волн. *Процессы литья*, (4), 30.
- Патон, Б. Е., Медовар, Б. И., & Саенко, В. Я. (1981). Управление кристаллизацией слитков путем ввода макрохолодильников при электрошлаковом переплаве. *Литье с применением инокуляторов*, 13–19.
- Смирнов, А. Н., Пилюшенко, В. Л., Минаев, А. А., Момот, С. В., & Белобров, Ю. Н. (2002). Процессы непрерывной разливки. Донецк: ДонНТУ, 536, 1.
- Верзілов, О., Смірнов, О., & Семенко, А. (2022). Вплив режимів роботи електромагнітного перемішувача на структуру сортової заготовки в умовах сучасних мікрозаводів. *Метал та лиття України*, 30(3). <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.048>
- Бастраков, Н. Ф., Тулин, Н. А., & Немченко, В. П. (1978). Электрошлаковая разливка стали. Москва, Металлургия.
- Биктагиров, Ф. К., Шаповалов, В. А., Ефимов, М. В., Селютин, А. А., & Падалка, В. Г. (2011). Повышение качества крупных слитков. *Современная электрометаллургия*, (1), 7–11.
- Барабаш, В. В., & Биктагиров, Ф. К. (2024). Застосування зовнішнього впливу при виробництві сталевих зливоків. Огляд. *Сучасна електрометалургія*, (1). <https://doi.org/10.37434/sem2024.01.05>
- Протокивиллов, И. В., Порохонько, В. Б., Биктагиров, Ф. К., Качан, Р. Ю., & Гнатушенко, А. В. (2019). Физическое моделирование кристаллизации слитков в изложнице в условиях электрошлакового обогрева и подпитки. *Современная электрометаллургия*, (3), 3–9. <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.01>

- 11 Shapovalov, V. O., Biktagirov, F. K., Barabash, V. V., Hnatushenko, O. V., Gnizdylo, O. M., & Protokovilov, I. V. (2025). New method for improving physical homogeneity of steel ingots. In *Welding and Related Technologies* (pp. 21–24). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003518518-4>
- 12 Шаповалов, В., Барабаш, В., Біктагіров, Ф., Протоковілов, І., Гнатушенко, О., Ігнатов, А., & Злигорев, К. (2023). Вплив зовнішніх чинників на формування сталевих зливків. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні*. С. 365–371.
- 13 Barabash, V., Biktagirov, F., Shapovalov, V., & Hnatushenko, O. (2024). The Influence of Metal Heating and Stirring on the Conditions of Steel Ingot Solidification. *Science And Education* (с. 70–74).
- 14 Sang, B. G., Kang, X. H., Liu, D. R., & Li, D. Z. (2010). Study on macrosegregation in heavy steel ingots. *International Journal of Cast Metals Research*, 23(4), 205–210.

Надійшла 30.04.2025

References

- 1 Efimov, V. A. (1998). The influence of external factors on liquid and crystallizing metal. *Steel*, (4), 21–27 [in Russian].
- 2 Arasevich, N. I., Nuradinov, A. S., & Taranov, E. D. (2006). The influence of vibration treatment on the solidification parameters of steel workpieces. *Casting processes*, (1), 64 [in Russian].
- 3 Nuradinov, A. S., & Efimov, V. A. (2002). Study of thermophysical conditions of solidification of steel ingots in the field of elastic waves. *Casting Processes*, (4), 30 [in Russian].
- 4 Paton, B. E., Medovar, B. I., & Saenko, V. Ya. (1981). Control of ingot crystallization by introducing macrocoolers in electroslag remelting. *Casting using inoculators*, 13–19. [in Russian]
- 5 Smirnov, A. N., Pilyushenko, V. L., Minaev, A. A., Momot, S. V., & Belobrov, Yu. N. (2002). Continuous casting processes. *Donetsk: DonNTU*, 536, 1 [in Russian].
- 6 Verzilov, O., Smirnov, O., & Semenko, A. (2022). Influence of electromagnetic stirrer operating modes on the structure of the billet in modern micro-plants. *Metal and casting of Ukraine*, 30(3). <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.048> [in Ukrainian].
- 7 Bastrakov, N. F., Tulin, N. A., & Nemchenko, V. P. (1978). Electroslag casting of steel. *Moscow, Metallurgy* [in Russian].
- 8 Biktagirov, F. K., Shapovalov, V. A., Efimov, M. V., Selyutin, A. A., & Padalka, V. G. (2011). Improving the quality of large ingots. *Electrometallurgy Today*, (1), 7–11 [in Russian].
- 9 Barabash, V. V., & Biktagirov, F. K. (2024). Application of external influence in the production of steel ingots. *Review. Electrometallurgy Today*, (1). <https://doi.org/10.37434/sem2024.01.05> [in Ukrainian].
- 10 Protokovilov, I. V., Porokhonko, V. B., Biktagirov, F. K., Kachan, R. Yu., & Gnatushenko, A. V. (2019). Physical modeling of ingot crystallization in a mold under electroslag heating and feeding conditions. *Electrometallurgy Today*, (3), 3–9. <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.01> [in Russian].
- 11 Shapovalov, V. O., Biktagirov, F. K., Barabash, V. V., Hnatushenko, O. V., Gnizdylo, O. M., & Protokovilov, I. V. (2025). New method for improving physical homogeneity of steel ingots. In *Welding and Related Technologies* (pp. 21–24). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003518518-4>.
- 12 Shapovalov, V., Barabash, V., Biktagirov, F., Protokovich, I., Gnatushenko, O., Ignatov, A., & Zlygorev, K. (2023). Influence of external factors on the formation of steel ingots. *New materials and technologies in mechanical engineering*. P. 365–371 [in Ukrainian].
- 13 Barabash, V., Biktagirov, F., Shapovalov, V., & Hnatushenko, O. (2024). The Influence of Metal Heating and Stirring on the Conditions of Steel Ingot Solidification. *Science And Education*. P. 70–74.

- 14 Sang, B. G., Kang, X. H., Liu, D. R., & Li, D. Z. (2010). Study on macrosegregation in heavy steel ingots. *International Journal of Cast Metals Research*, 23(4), 205–210.

Received 30.04.2025

F.K. Biktagirov, Dr. Sci. (Engin), Leading Research Scientist.;
e-mail: biktagirfk@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>

V.V. Barabash, Ph.D. student; e-mail: barabash.vv@ukr.net;
<https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

INFLUENCE OF ELECTROSLAG HEATING AND METAL STIRRING ON THE PHYSICAL HOMOGENEITY OF EXPERIMENTAL 40CR STEEL INGOTS

A methodology was developed, and experiments were conducted to obtain experimental steel ingots of grade 40Cr under laboratory conditions using a combined external influence in the form of heating and metal stirring during solidification. Ingots weighing 120 kg were cast in sand-clay molds in two variants: without external influences (control ingots) and with heating and metal stirring (experimental ingots). Electro-slag heating was used to supply heat to the metal surface in the feeder head, while metal stirring was performed by blowing argon into the liquid core of the ingot using a submerged lance. Stirring began 7–8 minutes after the start of ingot formation and ended 30–35 minutes later. The interval between blowing cycles, of which there were five, ranged from 5 to 6 minutes, with each blowing lasting approximately 30 seconds. To investigate the quality of the obtained ingots, vertical axial templates 20–25 mm thick were cut from them. The surface of the templates closest to the ingot axis was ground, followed by the obtaining of sulfur prints using the Bauman method and etching to reveal the macrostructure. Samples were taken from the templates to determine the hardness, density, and mechanical properties of the metal. According to the conducted studies, the macrostructure of the experimental ingots, unlike that of the control ingots obtained without external influence, showed no shrinkage defects, including axial porosity. Measurements of hardness and density, as well as mechanical testing, indicate the absence of any noticeable reduction in metal properties in the upper axial region of the experimental ingots. In contrast, a sharp decline in metal quality was observed in these areas in the control ingots. It has been demonstrated that the combined method of external influence, which integrates heating and metal stirring, improves the quality of steel ingots by significantly enhancing their physical homogeneity.

Keywords: steel ingot, external influence, heating, stirring, crystallization, shrinkage defects, metal quality.