

О.М. Жбанова  
Л.Н. Світгарєєв, к.т.н., доц.  
Г.А. Бялік, к.т.н., доц.  
І.Е. Скідін

*ДВНЗ «Криворізький національний університет»,  
Запорізький національний технічний університет*

### МОДИФІКУВАННЯ СТАЛІ 35ГЛ ІМПУЛЬСНИМ СТРУМОМ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

*Розглянуто метод електроімпульсного модифікування розплаву сталі 35ГЛ струмом змінної полярності з тривалістю імпульсів більше  $10^{-3}$ с в межах частоти 5–33 Гц, скважності 5–24 меандрів, сили 30–40 А, при напрузі 180–240 В при кристалізації, який дозволяє отримувати якісні виливки сталі марки 35 ГЛ. Показано, що електроімпульсна обробка розплаву покращує структуру і зменшує фізичну неоднорідність виливків, а також підвищує швидкість розчинення металевих домішок та інших компонентів в розплаві, що забезпечує дрібнокристалічну структуру та підвищує гомогенність металу, зменшує розмір карбідів марганцю, знижує вміст газів і неметалічних включень. Модифікування сталі 35 ГЛ імпульсним струмом при кристалізації розплаву призводить до підвищення фізико-механічних властивостей гартованої сталі: збільшення межі текучості на 30 %, межі міцності на 7 %, відносного подовження на 1,5 %, відносного звуження на 2 %, ударної в'язкості на 20 %.*

**Ключові слова:** електроімпульсна обробка; конструкційна сталь; структура; кристалізація; неметалеві включення; фізична неоднорідність; структурна неоднорідність; карбіди марганцю.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Актуальним завданням металургійних підприємств є поліпшення фізико-механічних властивостей конструкційних сталей. Найбільш доцільним, на нашу думку, є покращення цих властивостей ще на етапі формування виробів та заготовок унаслідок зменшення фізичної неоднорідності (мікротріщини, пористість, раковини), структурної неоднорідності (розмір та розташування зерен), а також хімічної неоднорідності (розподіл компонентів). Вплив на указані параметри структури без зміни хімічного складу розплаву та без застосування витратних та трудомістких способів можливий унаслідок електроімпульсної обробки металу під його час кристалізації. Але параметри струму, які б забезпечили необхідний модифікуючий ефект для сталевих виливків, не обґрунтовані, що підтверджує актуальність досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для підвищення якості та властивостей виливків все більшого застосування знаходить метод впливу електричного струму на розплав при кристалізації [1, с. 91; 2, с. 234]. Такі технологічні рішення дають можливість отримувати литі вироби з підвищеним вмістом необхідних компонентів у поверхневому шарі і знижувати їх вміст у тілі виливка [3, с. 380]. Імпульсно-періодичне струмове навантаження сплаву при кристалізації має певні переваги перед режимами постійного і змінного струму [4, с. 594]. Насамперед, – це більш низькі енерговитрати при одночасному зменшенні витрат на нагрів металу.

Роботи з обробки розплавів електричним струмом в процесі кристалізації, в основному, проводилися на кольорових металах і сплавах [5–7]. Є позитивні результати застосування електрообробки при виготовленні виливків з чавунів [8–9]. Для зазначених сплавів обробка електричним струмом справляє позитивний вплив на процеси теплоаспереносення та структуроутворення, а також обумовлює спрямовану кристалізацію в міжелектродному просторі. Це є особливо важливим при отриманні тонкостінних литих виробів [10, с.15].

Слід зазначити, що електродія струму на марганцевмісні сталеві виливки раніше не вивчалася, тому потрібне проведення комплексу досліджень з вивчення модифікування струмом структури сталевого розплаву під час кристалізації.

Постановка завдання. Обґрунтування можливості покращення фізико-механічних властивостей та якісних характеристик виливків із конструкційної сталі 35ГЛ у результаті модифікування електроімпульсним струмом в процесі кристалізації розплаву без введення додаткових хімічних елементів

Виклад основного матеріалу. У лабораторних умовах плавильного павільйону ДВНЗ «Криворізький національний університет» була випробувана технологія отримання дослідної партії виливків з металевого сплаву 35ГЛ, яка включає обробку в процесі кристалізації розплаву електроімпульсним струмом змінної полярності тривалістю імпульсів більше  $10^{-3}$ с в межах частоти 5–33 Гц, скважності 5–24 меандрів, сили 30–40 А, при напрузі 180–240 В. Модифікування виливків із марганцевмісних

конструкційних сталей здійснюється у результаті пропускання електричного струму із зазначеними параметрами крізь вилівок через заформовані в піщано-глинисту форму електроди, які контактують безпосередньо з металом у процесі знаходження його в рідкому, твердо-рідкому стані і до закінчення кристалізації.

В результаті електродії структура литого металу має більшу, у порівнянні з базовим (не модифікованим струмом) зразком, хімічну і фізичну однорідність: вміст газів (рис. 1) і неметалевих включень (рис. 2) суттєво (у 1,4–2,5 рази) знижується.

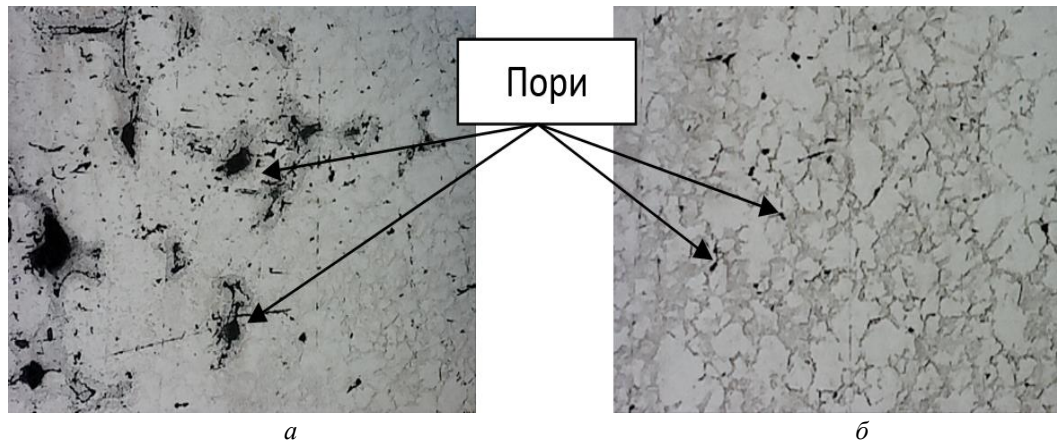


Рис. 1. Макроструктура литої сталі 35ГЛ:  
а – базовий зразок; б – модифікований струмом зразок

Фізична однорідність у модифікованого зразка значно більша, за рахунок усунення міжкристалічної пористості (рис. 1, б).

На нетравленому шліфові базового зразка виявлені скупчення неметалічних включень (екзогенних), (рис. 2, а). На більшості полів зору шліфа модифікованого струмом зразка спостерігаються дезорієнтовані включення  $FeP$ ,  $MnP$ ,  $Fe_3P$ ,  $Mn_3P$  розміром до 10 мкм (рис. 2, б).

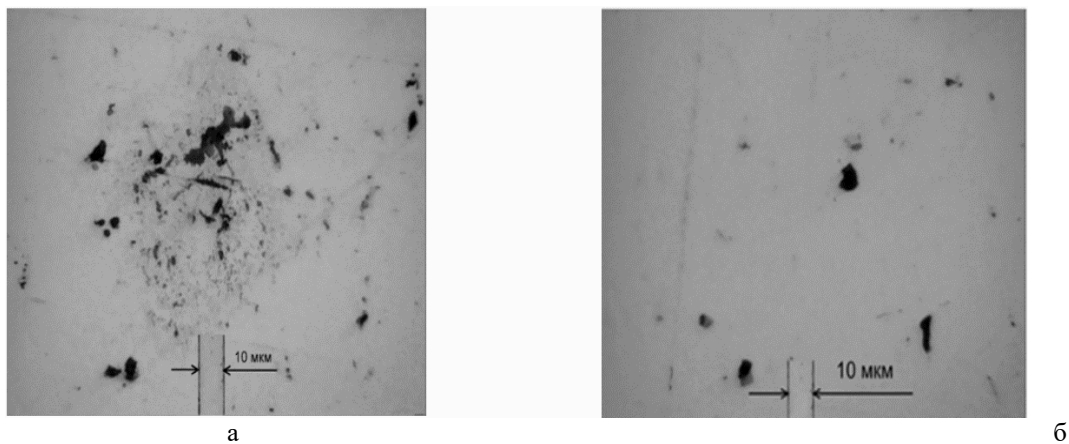


Рис. 2. Неметалічні включення на нетравленому шліфі:  
а – базовий зразок; б – модифікований струмом зразок

Для виявлення мікроструктури шліфи труїли в 4 % спиртовому розчині азотної кислоти. Литя структура обох зразків складається з аустеніту і надлишкових карбідів  $(Fe, Mn)_3C$ , які виділяються на межі зерен і знижують міцність та в'язкість сталі (рис 3, а). Мікроструктура модифікованого струмом зразка (рис. 3, б) є однорідною і представлена більш дрібними первинними зернами металевої основи і дезорієнтованими зернами карбідів.

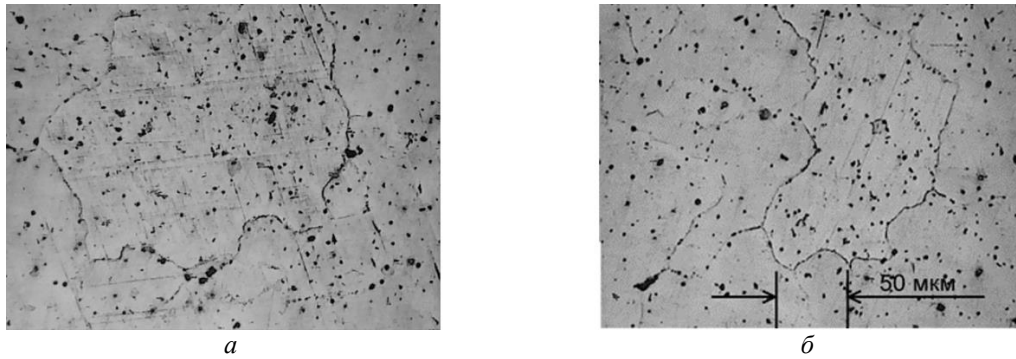


Рис. 3. Мікроструктура зерен литої сталі:  
а – базовий зразок; б – модифікований струмом зразок

Для визначення фізико-механічних властивостей для усіх зразків застосовувався такий режим термічної обробки: нагрівання від 600 °С до 950°С. та витримка при цій температурі упродовж 40 хвилин. Гартування проводилося у воді 18°С.

Отримані металографічні шліфи зразків вивчали під мікроскопом МІМ-8М, оснащеним відеокамерою, з'єднаною з комп'ютером. Аналіз мікроструктур загартованих зразків показав, що надлишкові карбіди розчиняються у зернах фериту або розташовані виключно у їх центрах (рис 4). Модифікування струмом із зазначеними параметрами забезпечує зменшення розміру феритних зерен та зерен карбідів марганцю відповідно у 2 та 1,5 рази (рис. 4, б).

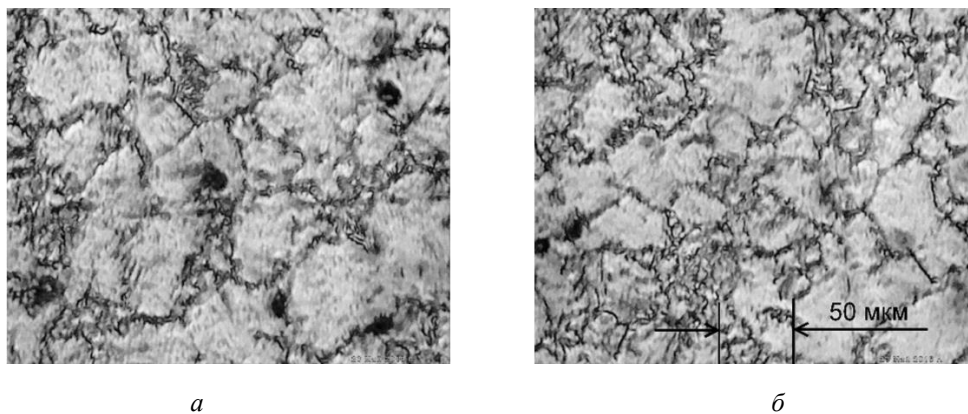


Рис. 4. Мікроструктура після гартування:  
а – базовий зразок; б – модифікований струмом зразок

Отримання такої мікроструктури свідчить про обґрунтовану можливість підвищення фізико-механічних властивостей модифікованої струмом сталі (табл.1).

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості гартованих зразків

Характеристика досліджуваних зразків	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>
Базовий зразок	230	503	11,00	19	243
Модифікований струмом зразок	302	540	12,05	21	296

Такий модифікуючий ефект, на нашу думку, досягається унаслідок макро- та мікро структурних перебудов в розплаві під дією струму змінної полярності з тривалістю імпульсів більше  $10^{-3}$ с в межах частоти 5–33 Гц, скажності 5–24 меандрів, сили 30–40 А, при напрузі 180–240 В, який змінює ближній порядок атомів у кластерах та зменшує їх розмір унаслідок резонансних явищ, які відбуваються в процесі енергетичного впливу.

**Висновки та перспективи подальших розвідок.** Результати досліджень показали, що електроімпульсне модифікування розплаву сталі 35ГЛ струмом змінної полярності з тривалістю імпульсів більше  $10^{-3}$ с в межах частоти 5–33 Гц, скажності 5–24 меандрів, сили 30–40 А, при напрузі 180–240 В при кристалізації сприяє суттєвому зменшенню фізичної і структурної неоднорідності та підвищенню фізико-механічних властивостей сплаву: межа текучості – на 30 %, межа міцності – на 7 %, відносне подовження - на 1,5 %, відносне звуження – на 2 %, ударна в'язкість – на 20 %.

#### Список використаної літератури:

1. *Иванов А.В.* Электротокковая обработка жидких и кристаллизующихся сплавов в литейных технологиях / *А.В. Иванов, А.В. Синчук, В.Н. Цуркин* // Электронная обработка материалов. – 2011. – № 5. – Том 47. – С. 89–98.
2. *Sethian J.A.* Crystal growth and dendritic solidification / *J.A. Sethian, J.Strain* // *J. Comput. Phys.* – 1992. – Vol. 92. – Pp. 231–253.
3. *Strain J.* A boundary integral approach to unstable solidification / *J.Strain* // *J. Comput. Phys.* – 1989. – Vol. 85. – Pp. 342–389.
4. *Mikheev L.M.* Mobility of a diffuse simple crystal-meltinterface / *L.M. Mikheev, A.A. Chernove* // *J. Cryst Grow.* – 1991. – Vol. 112. – Pp. 591–596.
5. Влияние наследственности на предсудачное расширение сплавов / *И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.П. Войтков и др.* // *Металлургия машиностроения.* – 2005. – № 6. – С. 15–17.
6. *Миненко Г.Н.* Об энергетическом воздействии на металлический расплав / *Г.Н. Миненко* // *Металлургия машиностроения.* – 2006. – № 3. – С. 10–12.
7. *Миненко Г.Н.* Физическая модель воздействия электрического тока на процесс кристаллизации сплава / *Г.Н. Миненко, Ю.А. Смирнова* // *Металлургия машиностроения.* – 2009. – № 3. – С. 48–49.
8. *Миненко Г.Н.* Эффект влияния обработки пульсирующим электрическим полем на механические свойства литой стали / *Г.Н. Миненко* // *Литье Украины.* – 2015. – № 2. – С. 5–11.
9. *Тимченко С.Л.* Исследование кристаллизации сплава под действием электрического тока / *С.Л. Тимченко* // *Расплавы.* – 2011. – № 4. – С. 53–61.
10. *Кольчурина И.Ю.* Влияние внешних воздействий на микроструктуру кристаллизующегося сплава / *И.Ю. Кольчурина, И.Ф. Селянин* // *Литейное производство.* – 2009. – № 8. – С. 13–15.

#### References:

1. *Ivanov, A.V., Sinchuk, A.V. and Curkin, V.N.* (2011), «Elektrotokovaja obrabotka zhidkih i kristallizujushhhsja splavov v litejnyh tehnologijah», *Jelektronnaja obrabotka materialov*, No. 5, Vol. 47, pp. 89–98.
2. *Sethian, J.A. and Strain, J.* (1992), «Crystal growth and dendritic solidification», *J. Comput. Phys.*, Vol. 92, pp. 231–253.
3. *Strain, J.* (1989), «A boundary integral approach to unstable solidification», *J. Comput. Phys.*, Vol. 85, pp. 342–389.
4. *Mikheev, L.M. and Chernove, A.A.* (1991), «Mobility of a diffuse simple crystal-meltinterface», *J. Cryst Grow*, Vol. 112, pp. 591–596.
5. *Seljanin, I.F., Deev, V.B. and Vojtkov, A.P.* (2005), «Vlijanie nasledstvennosti na predusadochnoe rasshirenie splavov», *Metallurgija mashinostroenija*, No. 6, pp. 15–17.
6. *Minenko, G.N.* (2006), «Ob jenergeticheskom vozdejstvii na metallicheskiy rasplav», *Metallurgija mashinostroenija*, No. 3, pp. 10–12.
7. *Minenko, G.N. and Smirnova, Ju.A.* (2009), «Fizicheskaja model' vozdejstvija jelektricheskogo toka na process kristallizacii splava», *Metallurgija mashinostroenija*, No. 3, pp. 48–49.
8. *Minenko, G.N.* (2015), «Jeffekt vlijanija obrabotki pul'sirujushhim jelektricheskim polem na mehanicheskie svojstva litoj stali», *Lit'e Ukrainy*, No. 2, pp. 5–11.
9. *Timchenko, S.L.* (2011), «Issledovanie kristallizacii splava pod dejstviem jelektricheskogo toka», *Rasplavy*, No. 4, pp. 53–61.
10. *Kol'churina, I.Ju. and Seljanin, I.F.* (2009), «Vlijanie vneshnih vozdejstvij na mikrostrukturu kristallizujushhegosja splava», *Litejnoe proizvodstvo*, No. 8, pp. 13–15.

ЖБАНОВА Олена Миколаївна – асистент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, факультету рудопідготовки та обробки металів ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Наукові інтереси:

- модифікування металів;
- обробка розплавів електричним струмом.

E-mail: [zhbanova.olena@gmail.com](mailto:zhbanova.olena@gmail.com).

САЙГАРЕЄВ Леван Наїльевич – кандидат технічних наук, доцент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, заступник декана факультету рудопідготовки та обробки металів ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Наукові інтереси:

- художнє та ювелірне литво;
- моделювання технологічних процесів.

E-mail: [slevann@rambler.ru](mailto:slevann@rambler.ru)

БЯЛІК Гаррі Абрамович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машини і технологія ливарного виробництва Запорізького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- вакуумне травлення для дослідження мікроструктур;
- модифікування магнієвих сплавів.

E-mail: [byalik@zntu.edu.ua](mailto:byalik@zntu.edu.ua)

СКІДІН Ігор Едуардович – старший викладач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Наукові інтереси:

- дослідження впливу металевого наповнювача термітної шихти;
- позапічна обробка розплавів.

E-mail: [skidin\\_igor@mail.ru](mailto:skidin_igor@mail.ru)

Стаття надійшла до редакції 16.03.17.