

Рис. 1. Класифікація спеціальних видів лиття

**Кудін В.В., Івахненко Є.І., Парахневич Є.М., Кармазін М.О.,  
Пришеленко В.В., Шалдін О.М.**

*(НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)*

**ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ ВАНАДІЄМ НА СТРУКТУРУ  
ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМАРГАНЦЕВОЇ СТАЛІ**

E-mail: [kudin@zp.edu.ua](mailto:kudin@zp.edu.ua)

Незважаючи на багаторічний досвід виробництва високомарганцевої сталі, багаточисленні дослідження впливу різних факторів на весь комплекс ливарних, механічних та експлуатаційних властивостей, витрата і брак виливків

продовжують залишатися не постійними і часто досить високими. Навіть однотипні виливки, в практично однакових умовах експлуатації, відрізняються між собою за стійкістю (терміном експлуатації) в 2-5 рази. Цей факт свідчить, що резерви покращення якості високомарганцевої сталі далеко ще не вичерпані. Тому важливою і актуальною задачею є підвищення якості виливків із високомарганцевої сталі за рахунок раціонального легування і модифікування.

В даній роботі вивчали вплив легування ванадієм на структуру та властивості виливків із високомарганцевої сталі 110Г13Л, а також вдосконалювали режим термічної обробки. Сталь виплавляли на підприємстві ТОВ «ТВІНС СЕРВІС ЛТД» методом переплаву в індукційній печі ІСТ-0,16. Після розплавлення шихти рідкий метал нагрівали до температури 1600 °С, яку контролювали вольфрам-молібденовою термопарою. Для легування сталі використовували ферованадій марки FeV80. На АТ «МОТОР СІЧ» проводили механічні випробування та металографічний аналіз. Дослідження виливків проводили на сирих та термооброблених при 1050 °С зразках.

У сталі, легуваної ванадієм, крім основної карбідної та фосфідної фаз, відбувалося утворення додаткової фази збагаченої ванадієм. Ванадієві виділення представляли собою округлі або багатогранні частини, розташовані як усередині зерен, так і в прикордонних зонах. Металографічними дослідженнями було встановлено, що неметалеві вкраплення мають розмір від 10 мкм до 0,05 мкм. Кількісний аналіз карбідного осаду загартованих на аустеніт зразків показав, що 70-80 % ванадію знаходиться в матриці твердого розчину і 7-8 % в карбідах. Такий розподіл ванадію в сталі обумовлює зміцнення твердого розчину аустеніту.

Ванадій характеризується великою хімічною спорідненістю до азоту. Металографічні дослідження показали на шліфах блідо-рожеві кристали нітриду та золотисто-рожеві з червонуватим відтінком карбонітриди ванадію. Ці вкраплення зазвичай розташовувалися ізольовано або групами всередині зерен аустеніту. Карбонітриди мають високу температуру дисоціації і завжди виявлялися в металі незалежно від температури нагрівання до температури кристалізації. Це дає змогу

вважати, що ванадій може регулювати процеси кристалізації сталі та ефективно подрібнювати аустенітне зерно (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив присадок ванадію на розмір аустенітного зерна

|   |       |      |       |      |      |      |
|---|-------|------|-------|------|------|------|
| Вміст ванадію, %                                    | сліди | 0,18 | 0,24  | 0,34 | 0,44 | 0,80 |
| Довжина границь зерен аустеніту, мм/мм <sup>2</sup> | 20,0  | 25,7 | 28,24 | 33,2 | 35,0 | 36,4 |

Сприятливий вплив ванадію на подрібнення зерна аустеніту пов'язано з частками нітридів та карбонітридів, які випадають з розчину в процесі кристалізації сталі. Встановлено, що ванадій, сприяючи формуванню рівновісної дрібнозернистої будови аустеніту високомарганцевої сталі, підвищує щільність за рахунок зменшення міжкристалічної пористості (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив ванадію на щільність сталі 110Г13Л

|                              |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Вміст ванадію, %             | сліди | 0,18  | 0,24  | 0,34  | 0,44  | 0,80  |
| Щільність, кг/м <sup>3</sup> | 7 783 | 7 803 | 7 807 | 7 800 | 7 778 | 7 730 |

Аналіз даних табл. 2 показав, що при підвищенні концентрації ванадію в сталі до 0,24 % щільність сталі збільшувалась з 7 783 до 7 807 кг/м<sup>3</sup>, при подальшому підвищенні вмісту ванадію щільність сталі знижується та стає нижче, ніж щільність серійної сталі. Можна припустити, що причиною цього є неметалеві вкраплення евтектичного типу, які були виявлені на шліфах при металографічних дослідженнях (табл. 3).

Дані табл. 3 показують, що індекс забрудненості сталі залежить від кількості присадок ванадію. При вмісті ванадію до 0,24 % індекс забрудненості сталі збільшувався, в основному, за рахунок нітридів і карбонітридів ванадію. При більш високих концентраціях ванадію індекс забрудненості має тенденцію до різкого збільшення за рахунок утворення в сталі оксидів і шпінелі ванадію.

Таблиця 3 – Вплив присадки ванадію на ступінь забрудненості сталі 110Г13Л неметалевими вкрапленнями

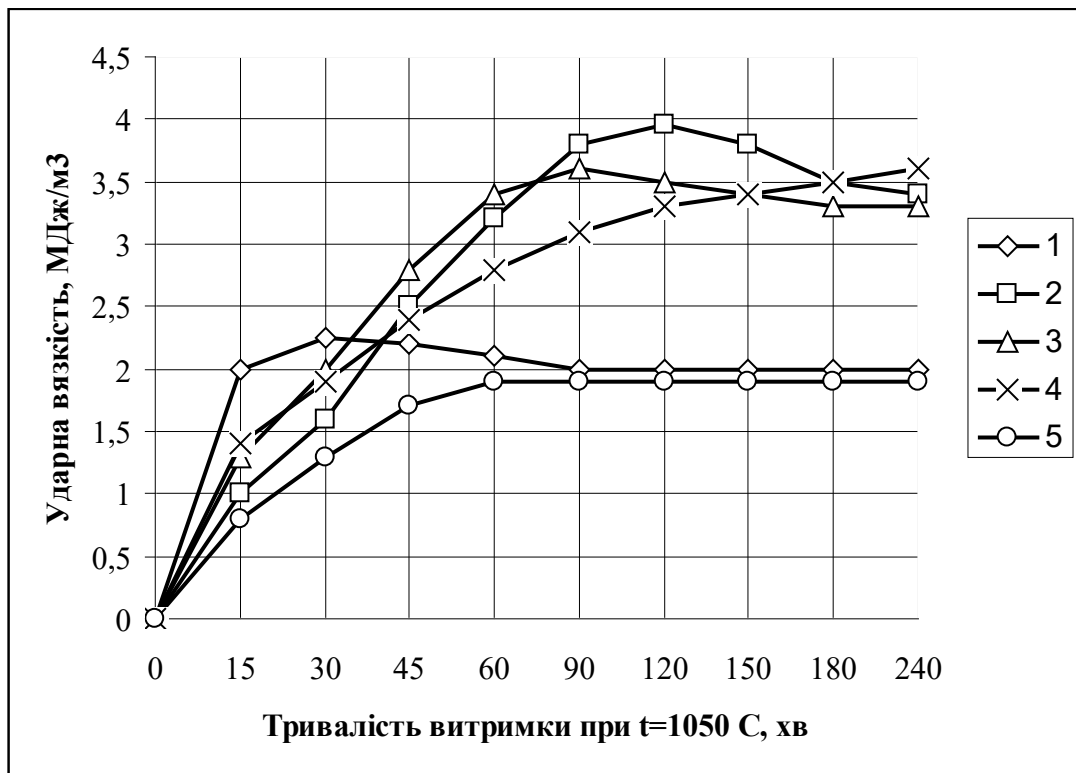
| Вміст ванадію, % | Індекс забрудненості, $I \cdot 10^3$ |                             |                                     |                              |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
|                  | загальний                            | окисульфідами та силікатами | нітридами та карбонітридами ванадію | оксидами та шпінеллю ванадію |
| Сліди            | 0,420                                | 0,420                       | –                                   | –                            |
| 0,18             | 0,620                                | 0,186                       | 0,483                               | 0,021                        |
| 0,24             | 0,996                                | 0,179                       | 0,787                               | 0,030                        |
| 0,44             | 3,874                                | 0,170                       | 1,292                               | 2,412                        |
| 0,71             | 17,740                               | 0,172                       | 3,548                               | 14,020                       |
| 0,80             | 25,000                               | 0,169                       | 5,000                               | 19,831                       |

Таким чином, на підставі виконаних досліджень встановлено, що ванадій в загартованій високомарганцевій сталі може знаходитися: твердому розчині аустеніту (70-80 %); карбідах типу VC і  $V_2C$  (7-8 %); нітриді й карбонітриді типу VN,  $V_2N$  і V(CN) (до 7 %); а також різного роду оксидах  $V_2O_3$ ,  $V_2O_5$  і шпінелі типу  $FeO \cdot V_2O_3$ . Вплив ванадію на подрібнення структури пов'язано із зародковою дією карбідних, нітридних і оксидних частинок, що виділяються.

Оскільки ванадій є енергійним карбідоутворювальним елементом, необхідно звертати особливу увагу на зміну термічної обробки сталі, легованої ванадієм. Для дослідження впливу ванадію на механічні властивості високомарганцевої сталі були проведені дослідні плавки. Для кожної партії зразків із різним вмістом ванадію підбирали відповідний режим термічної обробки. Зразки для випробування механічних властивостей завантажували в піч. При досягненні температури 1050 °C та після відповідної витримки при цій температурі до 240 хвилин проводили гартування у воді (рис. 1).

Цей експеримент показав, що для поліпшення механічних властивостей час витримки при температурі 1050 °C перед гартуванням необхідно збільшити на 25-30 %. Металографічними дослідженнями встановлено, що із збільшенням часу витримки карбіди ванадію поступово подрібнюються і при оптимальній витримці стають невиразними під світловим мікроскопом. Зразки сталі, що містять більше

0,6 % ванадію, навіть при витримці 4 години містили велику кількість карбідів та мали знижені механічні властивості.



1 – сліди; 2 – 0,18 %; 3 – 0,24-0,34 %; 4 – 0,44 %; 5 – 0,7-0,8 %

Рис. 1. Зміна ударної в'язкості високомарганцевої сталі 110Г13Л при різному вмісті ванадію та витримці при температурі гартування

Вибір оптимального режиму термообробки дав змогу отримати максимально можливі властивості сталі. Ванадій збільшує показники міцності, пластичності та ударної в'язкості сталі 110Г13Л. Найкращі механічні характеристики отримані при присадці ванадію в кількості 0,15-0,30 %. Відносно подовження та звуження при цьому збільшувалися на 50-60 %, ударна в'язкість на 80 %, а межа міцності збільшилась на 5 %. При збільшенні вмісту ванадію понад 0,6 % механічні властивості сталі поступово зменшувалися.

Наслідком зниження пластичності та в'язкості є неметалеві вкраплення оксидів і шпінелі, а також карбідів, загальний вміст яких збільшувався по мірі підвищення концентрації ванадію. Наприклад, при підвищенні вмісту ванадію в сталі з 0,24 % до 0,80 % індекс забрудненості неметалевими вкрапленнями зростав

у 25 разів (табл. 3, рис. 2), відповідно механічні властивості сталі знижувалися, ударна в'язкість з 3,6 до 2,2 МДж/м<sup>2</sup>, відносне подовження з 35 % до 18 %.

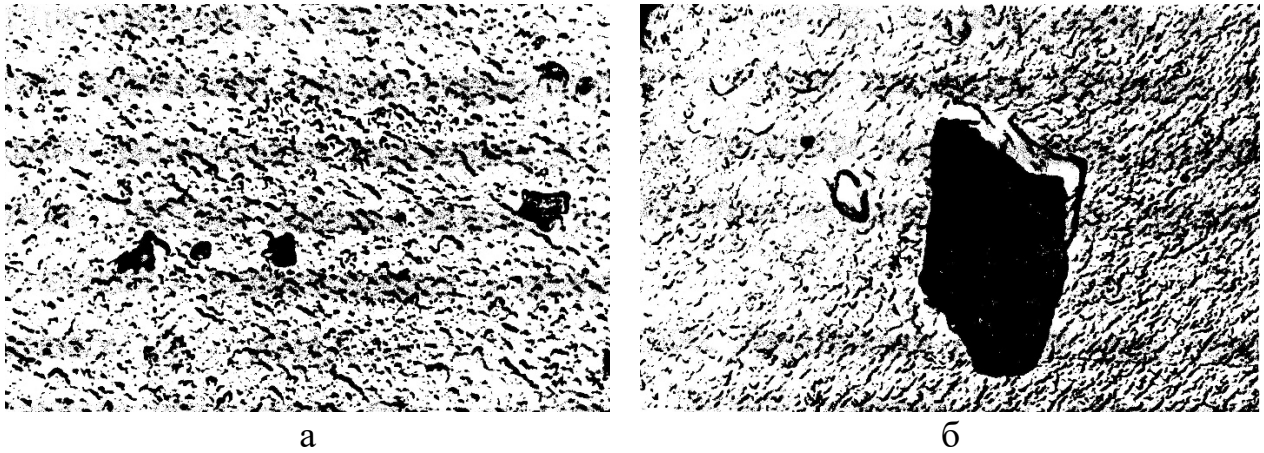


Рис. 2. Неметалеві вкраплення високомарганцевої сталі 110Г13Л при різному вмісті ванадію, ( $\times 10000$ ): а – 0,24 %; б – 0,80 %

Легування ванадієм високомарганцевої сталі з відносно високим вмістом фосфору призводило до значного підвищення механічних характеристик. Пояснюється це утворенням великої кількості дрібнодисперсних неметалевих вкраплень карбонітридів ванадію, які виступали додатковими центрами кристалізації, що подрібнювали аустенітне зерно. Протяжність границь зерен при цьому різко зростала і вкраплення фосфідної евтектики розподілялися на більшій довжині. Таким чином відбувалося відносне очищення границь зерен, за рахунок чого реалізувався ефект легування.