

Дослідженням встановлено, що в процесі ГП відбувається «заліковування» мікропор й рихлот, що розташовувалися у внутрішніх об'ємах виливків, а майже повна їх відсутність сприяла стабілізації структури й властивостей матеріалу.

Механічні властивості зразків, отриманих з використанням дослідного комплексу модифікаторів, після ГП й стандартної термічної обробки задовільні й відповідають вимогам нормативно технічної документації. Слід відмітити, що більші показники ударної в'язкості (критичного параметру, що визначає працездатність лопаток турбіни зі сплаву ЖСЗДК-ВІ) отримані з використанням 0,50% - 0,75% Ti[Ti(C,N)] коли її значення становили 60-70 Дж/см². Модифікування дослідним комплексом з використанням 0,25% Ti[Ti(C,N)] забезпечило значення ударної в'язкості на рівні 5 Дж/см².

Час до високотемпературного руйнування сплаву ЖСЗДК-ВІ, модифікованого дослідними комплексами усіх варіантів, відповідав вимогам нормативної документації. При цьому модифікування з використанням 0,50% Ti[Ti(C,N)] забезпечило показники, що приблизно в 10 разів перевищували вимоги нормативної документації.

УДК 669.35.15.017: 621.891

**С.Я. Шипицин, Г.Є. Федоров, М.В.Карпець, І.Ф. Кірчу, Д.І. Лихovej,
Т.В.Степанова**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ
+38(044) 423 15 83, odus@ptima.kiev.ua

ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМАРГАНЦЕВИХ СТАЛЕЙ УДОСКОНАЛЕННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕ- СІВ ЇХ ПЛАВЛЕННЯ, МІКРОЛЕГУВАННЯ ТА МОДИФІКУВАННЯ

Серед численних марок сталей, які використовують для виробництва литих деталей, що працюють в екстремальних умовах ударно-абразивного зносу, й сьогодні провідне місце посідають високомарганцеві аустенітні сталі. Найбільш поширеною для роботи в таких умовах є сталь 110Г13Л, оскільки вона єдина має цілий комплекс унікальних властивостей: високу в'язкість металу, опір ударним навантаженням, наклепуваність внаслідок деформацій від дії зовнішніх динамічних навантажень й утворення на поверхні виробу зміцненого шару, який забезпечує високу зносостійкість цієї сталі. Крім того, відсутність дефіцитних складових у шихті для виплавляння цієї сталі

в поєднанні з високими фізико-механічними властивостями та експлуатаційними характеристиками металу зумовлює виняткову економічність і масовість її використання як ливарного матеріалу. Із сталі 110Г13Л виготовляють понад 50% литих заготовок або деталей за масою. Отже інтерес до цієї сталі не зменшується й в теперішній час.

За ДСТУ 8781:2018 хімічний склад сталі 110Г13Л характеризується широкими діапазонами вмісту вуглецю (від 0,9% до 1,5%) та марганцю (від 11,5% до 15,0%), що негативно позначається на стабільності властивостей металу різних плавів навіть в умовах одного ливарного цеху. Залишається спірним і питання щодо відношення вмісту марганцю до вмісту вуглецю в сталі, особливо для різних умов експлуатації зносостійких деталей. Недоліком сталі є надмірний вміст фосфору, який за нормативним документом може досягати до 0,12%. Він вноситься в розплав, переважно, феромарганцем, що вміщує від 0,30% до 0,55% фосфору, під час легування вуглецевого розплаву. Крім того, на якість металу у виливках із високомарганцевої сталі суттєвий вплив справляє вимушене використання некондиційних шихтових матеріалів внаслідок втрати в Україні відповідних технологій їх підготовки на металобазі.

Оскільки використання дорогого низькофосфористого феромарганцю економічно недоцільно в умовах великосерійного та масового виробництва, особливо середніх і великих зносостійких литих деталей, а покращання якості вихідних шихтових матеріалів в сучасних умовах не передбачається, завданням науковців залишаються пошуки нових заходів, здатних компенсувати шкідливий вплив фосфору та некондиційних шихтових матеріалів на властивості високомарганцевої сталі доступними й дешевими методами – удосконаленням технологічних операцій плавлення, чітким визначенням оптимальної температури розплаву перед розливанням його у форми з урахуванням конструкції вилівки та фізико-хімічних особливостей ливарної форми, оскільки у виливках із сталі, яка не має фазових перетворень під час тверднення, дрібнозернисту структуру можна досягти тільки регулюванням процесів кристалізації металу.

Перспективним напрямком досягнення необхідної структури є додаванням у розплав або у ливарну форму компонентів, які забезпечують модифікувальний і мікролегувальний ефекти, і подрібнюють структуру металу під час кристалізації металу та підвищують властивості високомарганцевої сталі. Важливим регулятором властивостей цієї групи сталей залишається вибір оптимального режиму термічного оброблення.

Для дослідження впливу процесів плавлення, розливання та модифікування на зміну фізико-механічних властивостей сталі для визначення фізико-механічних властивостей та експлуатаційних характеристик використано циліндричні та призматичні

заготовки розмірами: діаметром 12 мм і довжиною 70 мм і 12 мм×12 мм×60 мм з використанням розробленої нами оснастки, яка дає змогу одержувати у формі одночасно 10 і 8 заготовок відповідно.

Досліджено вплив температури розплаву перед розливанням у ливарні форми на структуру й властивості стандартної та модифікованої азотом високомарганцевої сталі 110Г13Л в діапазоні температур від 1420 °С до 1540 °С і вмісту азоту від 0,010 мас.% до 0,110 мас.%.

Установлено, що найвищі фізико-механічні властивості сталь 110Г13Л має за температури розплаву перед розливанням у форми 1420 °С після додавання в розплав 0,069 мас.% азоту: $\sigma_B = 720$ МПа, (без додавання азоту $\sigma_B = 630$ МПа), $\delta = 24,6\%$, (без додавання азоту $\delta = 22,0\%$), $KCU = 2,42$ МДж/м² (без додавання азоту $KCU = 2,20$ МДж/м²). За таких температури та вмісту азоту сталь має найвищу щільність (7,79 г/см³).

Нами підтверджено, що для сталей залежно від їх хімічного складу й швидкості охолодження, має місце як наскрізна стовпчаста кристалізація, так і різні поєднання стовпчастої від стінки й рівноважної в об'ємі, хоча при цьому експериментально не фіксується термічне переохолодження перед фронтом тверднення, необхідне для зародження центрів кристалізації.

Модифікування азотом суттєво нівелює негативний вплив підвищення температури розплаву перед розливанням у форми на механічні властивості сталі. Після термічного оброблення на аустеніт модифікування азотом забезпечує одночасне підвищення на 15 – 20 % міцності й пластичності металу внаслідок зернограничного зміцнення та зміцнення аустеніту твердорозчинним азотом.

Позитивний вплив модифікування азотом на диспергування складових дендритної структури високомарганцевої сталі пов'язаний з його концентраційним і поверхнево-активним накопиченням на фронті кристалізації, зниженням лінійної швидкості кристалізації на початкових стадіях твердіння та, як наслідок, підвищення швидкості зниження температурного градієнта й реалізацію концентраційного переохолодження на ранніх стадіях тверднення виливка.

Негативний вплив підвищення температури розплаву перед розливанням у форми й позитивний вплив модифікування азотом на щільність високомарганцевої сталі, головним чином, пов'язані із зміною відстаней між гілками в дендритах, які у першому випадку збільшуються, а в другому зменшуються.

За одержаними результатами можна вважати, що оптимальна температура розплаву перед розливанням його у форми має бути в межах від 1410 °С до 1480 °С

залежно від товщини стінок литої деталі та її габаритних розмірів. Така температура забезпечує необхідний рівень рідкоплинності розплаву, високі фізико-механічні властивості та якість виливків з товщиною стінок до 20 мм.

Наслідуюване з литого стану зниження модифікуванням азотом хімічної й структурної неоднорідності сталі після термічного оброблення на аустеніт забезпечує покращання механічних властивостей сталі, яке практично компенсує негативний вплив підвищення температури розплаву перед розливанням у форми.

Визначено зміну зносостійкості модифікованої азотом високомарганцевої сталі 110Г13Л в умовах одночасної дії на виріб удару та абразиву за утратою маси зразків під час випробовування в лабораторному галтувальному барабані діаметром 500 мм і довжиною 600 мм. У барабан завантажували сухий кар'єрний кварцовий пісок, зірочки із білого чавуну масою від 30 до 50 г. Як об'єкт дослідження використано половинки зразків після визначення ударної в'язкості. Випробування здійснювали протягом 40 год за кількості оборотів 45 хв^{-1} . За еталон прийнято загартований зразок із стандартної високомарганцевої сталі 110Г13Л. Знос такого зразка приймали за 100%. Зносостійкість інших зразків розраховували по відношенню до еталонного.

Додавання в сталь азоту внаслідок дисперсійного зміцнення металу сприяє помітному підвищенню її зносостійкості. Найвищі показники отримано для сталі з концентрацією від 0,068% до 0,091% азоту, відносна зносостійкість при цьому підвищується майже вдвічі.. Подальше зростання вмісту азоту в сталі не сприяє підвищенню зносостійкості.

За визначенням Ю.А. Шульте неметалеві вкраплини є основною плавковою характеристикою високомарганцевої сталі, які визначають її ливарні, механічні та спеціальні властивості. Неметалеві вкраплини в металі виливків, виготовлених із цієї сталі, слід розглядати як продукт взаємного впливу на них металу й форми. Ступінь впливу неметалевих вкраплин на властивості сталі залежить від їх кількості, форми й розподілу в мікро- та макрооб'ємах вилівка й не залежить від причин появи їх у металі. Загальна кількість вкраплин тим більшою мірою впливає на зниження пластичності та міцності сталі, чим вони дисперсніші, тобто чим більша їх контактна поверхня із зернами металу та слабкіший зв'язок між металом і вкраплинами. Ступінь забрудненості сталі такими неметалевими вкраплинами визначає процеси окрихчування металу за низьких температур, оскільки вони є концентраторами напружин і сприяють зародженню тріщин, визначаючи цим перехід сталі із в'язкого стану в крихкий.

Індекс забрудненості сталей неметалевими вкраплинами, їх розміри та морфологію визначали за ДСТУ 8966:2019, використовуючи лінійний метод.

Досліджено морфологію та розміри неметалевих вкраплин і визначено загальний індекс забрудненості в сталях 110Г13Л, модифікованій азотом 110Г13АЛ і мікролегованій ванадієм й модифікованій азотом 110Г13АФЛ. Установлено, що в усіх сталях у різних кількостях знаходяться нітриди, оксиди, сульфіди та силікати, які мають розміри від 2 мкм до 12 мкм. Загальний індекс забрудненості неметалевими вкраплинами складає: для сталі 110Г13Л – 0,00723, для сталі 110Г13АЛ – 0,00490, для сталі 110Г13АФЛ – 0,00576. Найменші розміри в усіх сталях мають нітриди – від 2 мкм до 4 мкм, найбільші – оксиди розмірами від 8 мкм до 12 мкм.

Дисперсійне нітридне після модифікування азотом і мікролегування ванадієм суттєво диспергують аустенітне зерно сталі, як у литому стані так і після гартування. Перевагою нітридів ванадію в порівнянні з нітридами інших хімічних елементів є те, що вони мають нижчу температуру виокремлення із твердого розчину (біля 500 °С). Отже виокремлення ще дисперсніших нітридів ванадію здійснюється й в процесі відпуску сталі. Це справляє суттєвий вплив на покращання її фізико-механічних властивостей та експлуатаційних характеристик. Бал зерна 4 стандартної сталі підвищується до 6 після модифікування її азотом і мікролегування ванадієм, що сприяє підвищенню на 15...17 % міцності та на 40...60% пластичності за збереження високого рівня в'язкості сталі. Модифікування сталі 110Г13Л азотом та мікролегування її ванадієм внаслідок дисперсійного нітридванадієвого зміцнення забезпечує зниження в 1,5...3,0 рази індексу забрудненості сталі неметалевими вкраплинами різної морфології.

Для досягнення мінімального вмісту в сталях оксидів необхідно виконувати глибоке розкиснення розплаву сталей за схемою $Mn \rightarrow Si \rightarrow A1 \rightarrow ЛЗМ \rightarrow РЗМ$. Це сприяє утворенню легкоплавких продуктів окиснення, які легко спливають, або таких, які мають глобулярну форму та є менш шкідливими в умовах експлуатації виробів.

Відомо, що вироби із сталі 110Г13Л практично не піддаються механічному обробленню різанням через наклепування поверхні високими питомими тисками в процесі різання й, як наслідок цього явища, призводить до швидкого зношування обробного інструменту.

З метою установлення можливості підвищення механічної оброблюваності виробів із високомарганцевих сталей досліджено вплив відпуску зразків із сталей 110Г13Л і 110Г13АЛ за різних температур і визначено зміну твердості металу сталей в порівнянні з їх твердістю в литому стані. Здатність сталей до механічного оброблювання визначали за масою стружки після свердління зразків протягом 1 хв виготовленим із сталі У8 свердлом діаметром 5 мм за швидкості його обертання 450 хв^{-1} і навантаження на свердло 5 кг.

Установлено, що підвищення температури відпуску від 400 °С до 700 °С сприяє збільшенню твердості від 29,5 HRC до 35,8 HRC у сталі 110Г13Л і від 26,5 HRC до 31,5 HRC – у сталі 110Г13АЛ, оскільки за таких температур відбувається розпадання аустеніту й утворення значної кількості карбідів цементитного типу в сталі 110Г13Л і додатково нітридів марганцю в сталі 110Г13АЛ. Оброблюваність за такого діапазону відпуску погіршується (для сталі 110Г13Л від 2,45 г до 0,92 г, а для сталі 110Г13АЛ – від 2,19 г до 1,90 г). Отже, одержаними нами даними однозначно установлено, що здійснення відпуску виробів з литого стану з метою зниження їх твердості й наклепуваності для підвищення механічного оброблювання є недоцільним.