переохолодження й формування твердої фази в основній частині потоку, а останнє приводить до передчасної зупинки потоку металу і неповного заповнення ним форми (недолив виливка) [1].

Напруження у виливку (блок 1.5, рис. 1) при ЛГМ виникають переважно у вакуумованій формі. Вони пов'язані з надлишковими тривалістю і рівнем вакуумування наповнювача в контейнері (P_1, $t_в$) у період затвердіння й охолодження виливка, що усуває піддатливість форми. Це створює умови для збільшення напружень у виливках аж до їхнього жолоблення та утворення тріщин. Для зниження рівня або зняття напружень у виливках необхідно оптимізувати тривалість вакуумування форми [1].

Ливарна усадка (блок 1.10, рис. 1) при ЛГМ збільшується при високій піддатливості наповнювача форми в період затвердіння виливка після зняття вакууму з контейнера (контейнерної опоки). Для стабілізації рівня ливарної усадки виливків необхідно оптимізувати величину P_1 та тривалість $t_в$ вакуумування форми [1].

Література:

1. Принципи побудови та ідентифікації багаторівневої системи контролю параметрів технологічного циклу одержання литих конструкцій / О. Й. Шинський, І. А. Шалевська, В. О. Шинський, П. Б. Калюжний, Т. В. Лисенко та ін. // Eastern-European Jornal of Enterprise Technologies. – 2018. – С. 25-32.

Клименко С.І., Дорошенко В.С.
(ФТІМС НАН України, м. Київ)

ПРИКЛАД ОТРИМАННЯ ІЗОТЕРМІЧНО ЗАГАРТОВАНОГО ЧАВУНУ З ВИСОКИМИ ЕКСПЛУТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

E-mail: doro55v@gmail.com

Нині більше чверті всіх виливків у світі складають виливки з високоміцного чавуну (ВЧ). При цьому зростання виробництва ВЧ сталось саме за рахунок найміцніших його марок [1]. Незважаючи на кризові явища у світі, зростання виробництва ВЧ в останні десятиліття має сталу динаміку, що важливо як для

ливарників-практиків (позаяк дозволяє прогнозувати зростання попиту на ВЧ у найближчі роки), так і для вчених-фахівців з чавуну, адже доводить актуальність поглиблених досліджень по тематиці ВЧ. Вочевидь, зараз відбувається своєрідне «друге народження» чавунів у сенсі переорієнтації областей їх застосування на вельми навантажені деталі машин у найвідповідальніших областях техніки: автомобілебудуванні, залізничному, трубопровідному транспорті, верстатобудуванні, суднобудуванні.

Крім вже давно і добре відомих виробів типу блоків циліндрів, поршневих кілець, колінчастих і розподільчих валів, з’явились нові приклади деталей, для яких конструктори ще недавно навіть не припускали використання ВЧ. За кордоном ВЧ масово застосовується для виготовлення шестерень головної передачі автомобільної трансмісії важких вантажівок фірм «Форд», «Крайслер», деталей підвіски залізничних вагонів (компанія «Zanardi»), ґрунтообробного інструменту тощо [1]. Очевидна цікава ситуація – литий матеріал за рахунок кращої технологічності та високих характеристик міцності витісняє легований сталевий прокат, що пройшов кілька металургійних переділів, причому це відбувається в самих передових галузях машинобудування [1, 2]. Серед країн, найбільших виробників литва з ВЧ, нині, безумовно, лідирує з великим відривом Китай – 50% світового виробництва, далі йдуть США – 13%, Японія – 7%, Німеччина – 7%, Індія – 5%.

Нинішній етап розширення областей застосування ВЧ пов'язаний з формування мікроструктури металевої матриці не «класичного» типу у вигляді ферито-перлітної суміші, а все частіше - поєднання бейніту та залишкового аустеніту, одержуваних за рахунок спеціальної термічної обробки (ТО).

За західною термінологією цей новий клас чавунів називають Austempering Ductile Iron (ADI) – ВЧ, загартований на аусферитну структуру. Вітчизняні ливарники нерідко за старою термінологією називають цей тип чавунів «бейнітними» [1, 2]. Перші публікації з аустеніто-бейнітного чавуну відносяться до 50-х років XX століття. Після того, як на дослідних зразках було досягнуто значення межі міцності при розтягуванні на рівні 1500 МПа та відносного

подовження до 10%, почалося стрімке освоєння високоміцного бейнітного чавуну. Показова в цьому сенсі діаграма (рис. 1), на якій зіставлена хронологія вдосконалення мікроструктури цього класу ВЧ з характеристиками міцності.

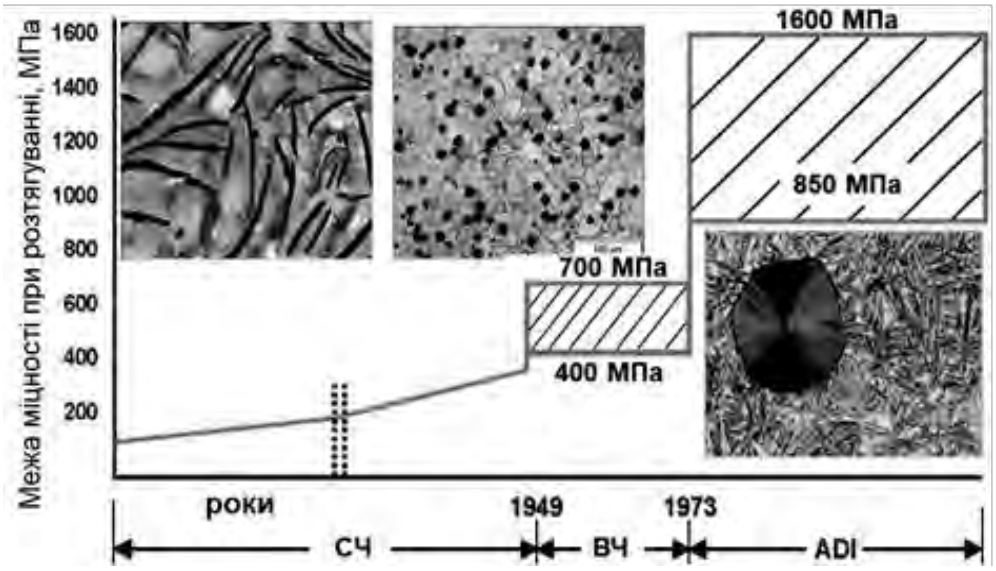


Рис. 1. Хронологія вдосконалення структури чавунів зі зростанням міцності ВЧ (із презентації A. Nofal, CMRDI, Єгипет)

Діаграма ілюструє, що з 70-х років домінують чавуни з міцністю 850-1600 МПа, що сприяє зростанню попиту у світі та випуску високоякісних ВЧ. Однак неминучою «платою» за підвищені характеристики ADI-чавунів є дві серйозні проблеми: потреба у додатковому легуванні та складна ТО з багатогодинною ізотермічною витримкою. Для збільшення прожарювання та стабілізації аустеніту зазвичай використовується класична тріада легуючих елементів: Ni, Cu, Mo; тенденція світових цін на металеву сировину яких має щорічне стійке зростання (рис. 2) [1].

Сьогодні найбільш уживаний інтервал легування ADI-чавунів наступний: C – 3,2–3,8 мас.%; Si – 2,0–2,4; Mn – 0,2–0,5; Ni – 0,8–2,5; Cu – 0,5–1,5; Mo – 0,2–0,8 мас. %. Таким чином, сумарний вміст найдорожчих легувальних елементів (Mo, Ni, Cu) може сягати 5%. Причому, якщо намагатися знижувати вміст ключових елементів, то у разі реалізації класичної технології (лиття модифікованого ВЧ + аустенізація + ізотермічне загартування в соляних ваннах) неминучі втрати у механічних властивостях [1].

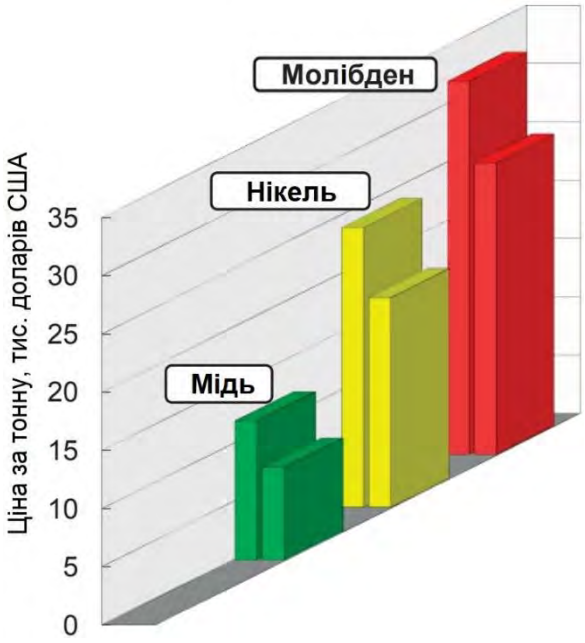


Рис. 2. Порівняння середньорічних цін на молібден, нікель, мідь за 2020 р. (діаграми на передньому плані) та за 2021 р. (на задньому плані)

Високі механічні характеристики ADI дозволяють його застосування в деталях передач, підвісок, рейок, гальмівних колодках та інших конструкціях, що вимагають високого контактного навантаження, де зносостійкість ADI має вирішальне значення. Цікавими є приклад дослідження ADI, легованого міддю (1 мас. % Cu) [3], оскільки мідь є нерідкісною та найбільш дешевою легуючою добавкою до чавуну з трьох вищевказаних. Вона відома як стабілізатор аустеніту, що може затримати початок перлітного перетворення.

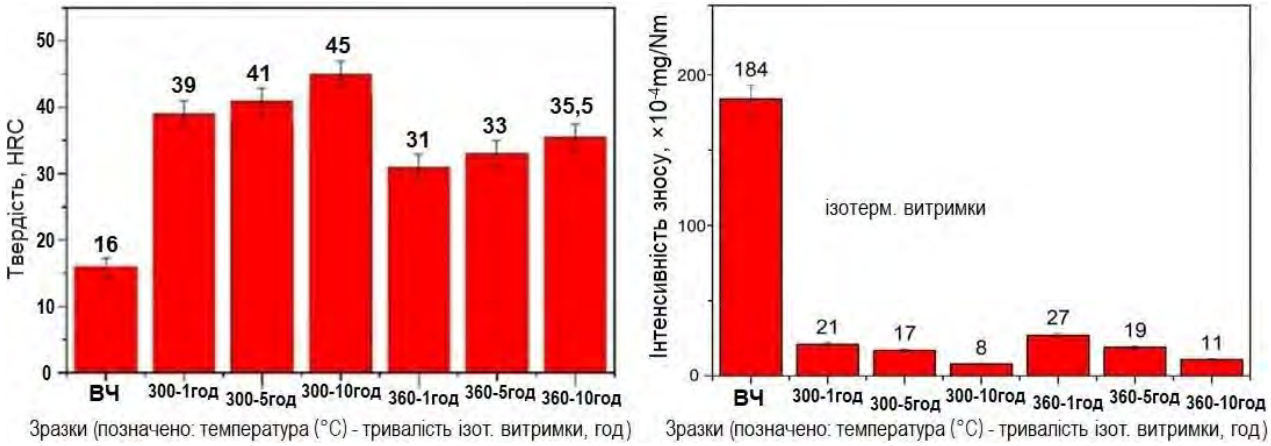
У роботі [3] з чавуну з хімічним складом (мас. %): C – 3,42; Si – 1,93; Mn – 0,24; P – 0,05; S – 0,02; Cu – 1,01; Fe – решта, отримали ВЧ при модифікуванні лігатурою з Mg. Зразки ВЧ виливали в піщаній формі, потім вирізали з них диски діаметром 20 мм і товщиною 3 мм для випробування на зношування. Для кожного експерименту готували три зразки. Хімічний склад ВЧ аналізували за допомогою оптичної спектроскопії тліючого розряду (GDOS).

Литі зразки нагрівали в печі, витримували при 910 °C протягом 1,5 год (аустенізували), а потім гартували в соляній ванні для ізотермічної витримки.

Зокрема, зразки окремо піддавалися ізотермічній витримці при 300 °С та 360 °С протягом різної тривалості (1, 5 і 10 годин) для отримання ADI з різними показниками. Зразки позначалися як 300-1 год, 300-5 год, 300-10 год, 360-1 год, 360-5 год і 360-10 год, відповідно (рис. 3).

На рис. 3, а показано порівняння значень твердості для литого ВЧ та ADI. Твердість ADI (31–45 HRC) була значно вищою, ніж у литого ВЧ (16 HRC). Серед ADI твердість загартованого зразка при 300 °С, була вищою, ніж при 360 °С. Це пояснюється тим, що перший має більш щільну голчасту аусферитну мікроструктуру, нижчий вміст залишкового аустеніту та вищий вміст вуглецю в аустеніті. Збільшення тривалості витримки зразків ADI зменшує кількість залишкового аустеніту та призводить до вищого рівня твердості. Зразок 300-10 год ADI показав максимальне значення твердості 45 HRC.

На рис. 3, б показано порівняння інтенсивності зношування литого ВЧ та різних ADI після випробувань на сухе зношування. Видно, що швидкість зносу ADI була значно нижчою, ніж ВЧ. Також вважають доцільним застосовувати механізм підвищеної зносостійкості ADI, пов’язаний з наявністю залишкового аустеніту в мікроструктурі, який генерує мартенситне перетворення під навантаженням. На рис. 3 помітно залежність, що зі збільшенням твердості зменшується інтенсивність зношування [3].



а б

Рис. 3. Порівняння значень твердості (а) та інтенсивності зношування (б) зразків між литими з ВЧ та після ізотермічного гартування з ADI з маркуванням зразків «температура – тривалість ізотермічної витримки»

Таким чином, приклад з роботи [3] показує, що ADI має набагато вищу твердість, ніж литий ВЧ (31-45 проти 16 HRC). На твердість ADI впливала температура ізотермічної витримки, причому при 300 °C ADI був твердішим, ніж при 360 °C. Серед усіх зразків «ADI 300–10 год» мав найвище значення твердості (45 HRC). Витримка з температурою нижнього бейніту і довшим часом підвищують зносостійкість ADI. Так, ADI після ізотермічного гартування з 10-годинною витримкою при 300 °C показав найвищу зносостійкість.

Література:

1. Покровский А.И. Концепция создания экономнолегированных аусферритных (бейнитных) высокопрочных чугунов // Литье и металлургия, 2022. № 4. С. 29-37.

2. Найдек В.Л., Гаврилюк В.П., Неижко И.Г. Бейнитный высокопрочный чугун. Киев: Национальная академия наук Украины, ФТИМС, 2008. –140 с.

3. Cheng-Hsun Hsu, Chun-Yin Lin, Wei-Shih You. Microstructure and Dry/Wet Tribological Behaviors of 1% Cu-Alloyed Austempered Ductile Iron.Materials 2023, 16(6), 2284. URL:https://www.mdpi.com/1996-1944/16/6/2284.

Клименко С.І.[1], Дорошенко В.С.[1], Калюжний П.Б.[1], Янченко О.Б.[2]
([1]ФТІМС НАН України, м. Київ; [2]Вінницький нац. техн. ун-т., м. Вінниця)

СПОСОБИ ВИЛИВАННЯ ЛЕМЕХІВ ПЛУГІВ ПРИ ВИДАЛЕННІ ЇХ З ЛИВАРНОЇ ФОРМИ В ГАРЯМОМУ СТАНІ ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ

E-mail:doro55v@gmail.com

Використання сучасних ґрунтообробних машин дозволяє істотно підвищити продуктивність, якість і ефективність обробки ґрунту. В той же час робочі органи багатьох з них мають вкрай малий ресурс. Так, зокрема, у роботі [1] показано, що напрацювання на відмову лемехів чи доліт плуга при обробці ґрунтів різного виду та фізичного стану становить менше 20 га.