

Дослідження процесу формування біметалевих виливків дробильно-розмельного обладнання

Афтанділянц Є. Г., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри,
aftyev@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5864-9855>

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

Аналіз стану виробництва зносостійких матеріалів показав, що одним із перспективних напрямків підвищення їх якості є застосування біметалевих виливків, які мають комплекс властивостей, диференційованих по об'єму і поверхням виробів. Однак проблема отримання якісного з'єднання основи та робочого шару не вирішена до теперішнього часу.

В статті розглянуто вплив на процес формування біметалевих виливків хімічного складу, температурних параметрів та співвідношення мас сплавів біметалевих пар.

Метою дослідження було вивчення кінетики росту та структурно-фазового складу перехідних дифузійних шарів біметалевих виливків залежно від хімічного складу, температурних параметрів та співвідношення мас сплавів біметалевих пар.

В результаті досліджень встановлено, що формування перехідних шарів біметалевих виливків визначається процесами дифузії та структурно-фазовими перетвореннями в зоні взаємодії "твердий (затверділий) – рідкий метал". Характер протікання цих процесів значною мірою залежить від хімічного складу біметалевих пар, температурних параметрів та співвідношення мас шарів.

Визначено, що у біметалевих виливках, отриманих способом заливки рідкого металу на попередньо нагріту тверду заготовку, перехідний шар характеризується наявністю двох зон – перлітної, зі сторони металу-основи і безкарбідної області матриці робочого шару.

Встановлено, що формування перехідних шарів у біметалевих виливках, отриманих послідовним заливанням розплавів у ливарну форму через автономні ливникові системи супроводжується насиченням сталі вуглецем чавуну на глибину до 600-800 мкм та утворенням вздовж границі з'єднання сплавів зони із структурою пластинчатого перліту, а перехідний шар між чавуном і сталлю складається з перліту у вигляді вузької смуги та зони хромистого фериту зі сторони чавуну.

В результаті дослідження особливостей формування перехідних шарів біметалевих виливків при заливанні рідкого металу на тверду заготовку встановлено, що ступінь розчинення металу-основи у рідкому чавуні збільшується при підвищенні температури попереднього нагріву заготовки та температури розплаву, а також співвідношення маси рідкого чавуну до одиниці площі поверхні металу-основи. При цьому швидкість розчинення пропорційна градієнту між температурами контактної поверхні та солідус чавуну.

Встановлено, що утворення надійного дифузійного зв'язку для біметалевих пар „вуглецева (низьколегована) сталь – високохромистий чавун” забезпечується за умови, якщо

Фазові перетворення

температура контактної поверхні перевищує температуру евтектичного перетворення чавуну.

Розкрито механізм формування структури перехідної зони.

Матеріали статті можуть бути використані науковцями для подальших досліджень та практиками у виборі матеріалів для роботи в екстремальних умовах.

Ключові слова: *сталь, чавун, температура, перехідний шар, солідус, ліквідус, розплав, тверднення.*

Проблема підвищення зносостійкості матеріалів, збільшення технічного ресурсу деталей машин і обладнання, що працюють в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування, скорочення безповоротних втрат металу, зниження витрат високолегованих дорогих сплавів є одною з найактуальніших на сьогоднішній день [1]. Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми є застосування біметалевих виливків, які мають комплекс властивостей, диференційованих по об'єму і поверхням виробів.

Для забезпечення високої зносостійкості робочих поверхонь біметалеві виливки повинні мати складний комплекс фізичних, механічних та хімічних властивостей. Найбільш важливими вимогами до біметалевих виливків визначені надійний дифузійний зв'язок між сплавами, що входять до складу біметалевих пар; високі міцні характеристики перехідної дифузійної зони, які повинні перевищувати відповідні показники матеріалу робочого шару біметалевих виливків, а також близькість значень коефіцієнтів лінійного розширення сплавів, що входять до складу біметалевих пар.

Метою роботи є вивчення кінетики росту та структурно-фазового складу перехідних дифузійних шарів біметалевих виливків залежно від хімічного складу, температурних параметрів та співвідношення мас сплавів біметалевих пар.

Для виготовлення деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування, найбільш широко використовуються комплекснолеговані білі чавуни. Аналіз досліджень [2-10] впливу хімічного складу чавунів на їх міцність, пластичність та абразивну зносостійкість показує, що хімічний склад сплавів робочого шару біметалевих виливків повинен бути в наступних межах: C = 1,6-3,4 %; Si = 0,2-1,0 %; Mn = 0,5-5,2 %; Cr = 11,0-30,0 %; Mo = 0,5-2,4 %; S ≤ 0,08 %; P ≤ 0,1 %; Cu = 1,0-1,5 %; V = 0,15-0,35 %; Ti = 0,15-0,35 %.

Високолеговані сплави робочого шару біметалевих виливків характеризуються високою твердістю та зносостійкістю, однак мають низьку в'язкість [11, 12]. Тому до матеріалу металу-основи пред'являються підвищені вимоги до механічних властивостей (границі міцності та текучості, ударна в'язкість) та конструктивної міцності, тобто міцності, яка виявляється в умовах реального застосування і характеризує спроможність протидіяти руйнуванням при наявності високих динамічних навантажень та концентрацій напружень. Виходячи з цього, в якості матеріалу металу-основи найбільш доцільно використовувати низьколеговані (до 2-3 % легуючих елементів) хромомарганцевисті, хромомолібденові та інші сталі, які поряд з

високими механічними властивостями мають підвищені показники твердості та зносостійкості.

Аналіз робіт [13-20] показує, що оптимальний хімічний склад сталей, визначених для застосування у якості металу-основи біметалевих виливків, повинен бути у наступних межах: $C = 0,22-0,50 \%$; $Si = 0,17-0,9 \%$; $Mn = 0,35-1,3 \%$; $Cr \leq 3,0 \%$; $Mo = 0,2-0,5 \%$; $S \leq 0,045 \%$; $P \leq 0,04 \%$; $Ni \leq 0,9 \%$; $Ti = 0,03-0,09 \%$.

Аналіз огляду літератури показує, що на теперішній час відсутня інформація про дослідження процесу формування перехідних шарів біметалевих виливків при їх виробництві. Тому необхідно проведення дослідження впливу хімічного складу, температурних параметрів та співвідношення мас сплавів біметалевих пар на тепломасообігові процеси при формуванні перехідних шарів біметалевих виливків.

Серед методів отримання біметалевих виливків, що включають одночасне або послідовне заливання рідких сплавів в форму з відокремлюючої перегородкою; послідовне заливання в форму рідких сплавів; заморожування металу із розплаву на тверду заготовку; заливання рідкого металу на тверду заготовку, попередньо розташовану в ливарній формі найбільш поширено використовують одержання виливків з використанням рідких розплавів, а також рідких розплавів і твердих заготовок.

Дослідження кінетики формування перехідних шарів біметалевих виливків залежно від хімічного складу біметалевих пар, температурних параметрів та співвідношення мас сплавів проводили на зразках, які отримували шляхом занурення твердих заготовок із сталі, попередньо нагрітих під шаром захисного покриття, у рідкий чавун, а також послідовним заливанням розплавів у ливарну форму через автономні ливникові системи.

Стосовно до першого випадку, попередній нагрів твердих заготовок здійснювали в індукторі установки ТЗЧ-800. Довжина зразків металу-основи дорівнювала 40 мм. Масу рідкого чавуну вибирали таким чином, щоб її співвідношення до одиниці площі поверхні заготовки при діаметрах зразків 12; 18 та 24 мм складало відповідно 12,7; 6,6 та 3,0 г/см². Температуру нагріву металу-основи змінювали в інтервалі від 800 до 1200 °С, а температуру рідкого чавуну – від 1200 до 1500 °С. Контроль температури нагріву здійснювали з використанням платино-платино - родієвої термопари та потенціометра КСП-4, а температури розплаву – приладом ТТЦ-103 з термоперетворювачем ТВР-301-01. Температуру контактної поверхні визначали за допомогою термограм, на яких фіксували зміну температур металу-основи та розплаву для кожного режиму, а також методів планування експерименту та регресійного аналізу.

У другому випадку застосовували кокіль з внутрішньою прямокутною порожниною, що має розміри 60x80x220 мм, та конічний кокіль, внутрішня порожнина якого виконана у вигляді зрізаного конуса з мінімальним та максимальним діаметрами відповідно 38 та 95 мм і висотою 110 мм. Зверху кокіль перекривали проміжною металевою вставкою. Перед заливанням кожного наступного шару металу на вільну поверхню попереднього наносили синтетичний рафінуючий флюс при його питомій витраті 0,04 г/см². Товщину

Фазові перетворення

шарів, що заливалися, регулювали за допомогою металевих пластин-фіксаторів рівня. При заливанні у прямокутний кокіль товщина шарів складала 15-20 мм, а у конічний – 30-40 мм. Виплавку металу проводили в індукційних електропечах ІСТ-0,06 з кислою футеровкою на основі кварциту. Температуру розплавів вимірювали приладом ТТЦ-103. Хімічний склад дослідних зразків визначали на експрес аналізаторі JY50E.

Для вивчення мікроструктури біметалевих виливків у литому стані та після термічної обробки, а також визначення ступеню розчинення металу-основи та розмірів перехідних шарів використовували оптичний мікроскоп МИМ-10. Структурні складові виявляли хімічним травленням зразків у розчині спирту з масовою часткою азотної кислоти 2-4 %. Після травлення зразки промивали у воді або спирті. Твердість сплавів визначали на твердомірах Роквелл та Брінель. Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3М з автоматичним записом даних при навантаженні 0,5 Н. Середнє значення мікротвердості для кожної точки визначали на підставі 5-6 вимірів.

Формування перехідних шарів біметалевих виливків визначається процесами дифузії та фазових перетворень у зоні взаємодії рідкий – твердий (затверділий) метал. У біметалевих виливках "сталь 25ГСЛ – чавун 300Х16М2", отриманих способом заливки рідкого металу на попередньо нагріту тверду заготовку, перехідний шар характеризується наявністю двох зон (рис. 1).

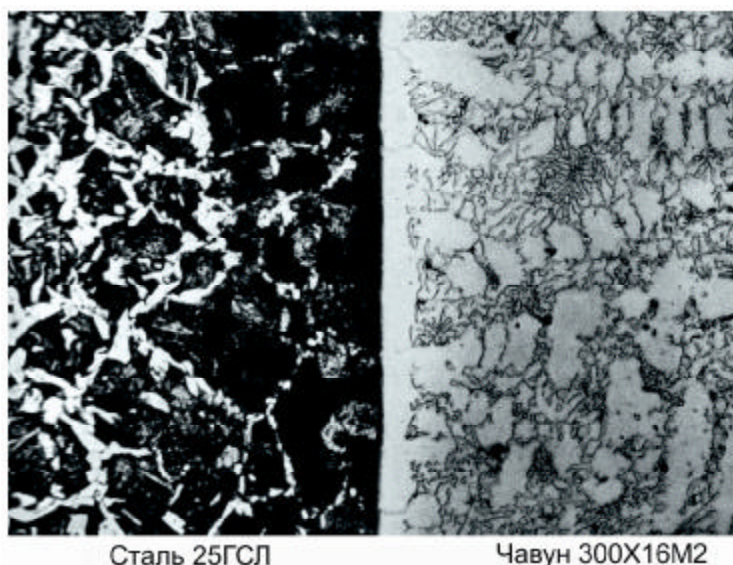


Рис. 1. Мікроструктура перехідного шару біметалевих виливків "сталь 25ГСЛ – чавун 300Х16М2". × 200.

Fig. 1. Microstructure of transition layers in bimetallic castings "steel 25GS – cast iron 300X16M2". × 200.

Перша зона зі сторони металу-основи має перлітну структуру з відстанню між пластинами цементиту до 0,8 мкм. Товщина цієї зони складає 0,18-0,24 мм, а розмір зерна порядку 0,60 мм. При переході до металу-основи відбувається поступове змінювання перлітної структури на структуру, яка

Фазові перетворення

є характерною для сталі 25ГСЛ. Рекристалізоване зерно ферито-перлітної матриці сталі має діаметр від 0,031 до 0,041 мм. З іншого боку перша зона стикається з безкарбідною областю матриці робочого шару. Друга зона помітно менше першої, її товщина знаходиться в межах 0,02-0,06 мм. Мікротвердість на границі між першою та другою зонами перехідного шару становить 2600 – 5280 МПа. Чавун 300Х16М2 характеризується дендритною структурою. В міжосьових просторах дендритів розташовуються пластинчаті довжиною 0,02 – 0,30 мм та більш дрібні (до 0,01 мм) частки карбідів типу Me_7C_3 .

Формування перехідних шарів у біметалевих виливках, отриманих послідовним заливанням розплавів у ливарну форму через автономні ливникові системи, має ряд особливостей. Так, у випадку заливання сталі на чавун, результати мікроструктурного аналізу біметалевої пари "чавун 300Х20М2 – сталь 30Л" засвідчили насичення сталі вуглецем чавуну на глибину до 600-800 мкм та утворення вздовж границі з'єднання сплавів зони із структурою пластинчатого перліту з відстанню між пластинами цементиту від 1,3 до 1,6 мкм, що характерно для сталі 50Л (рис. 2).

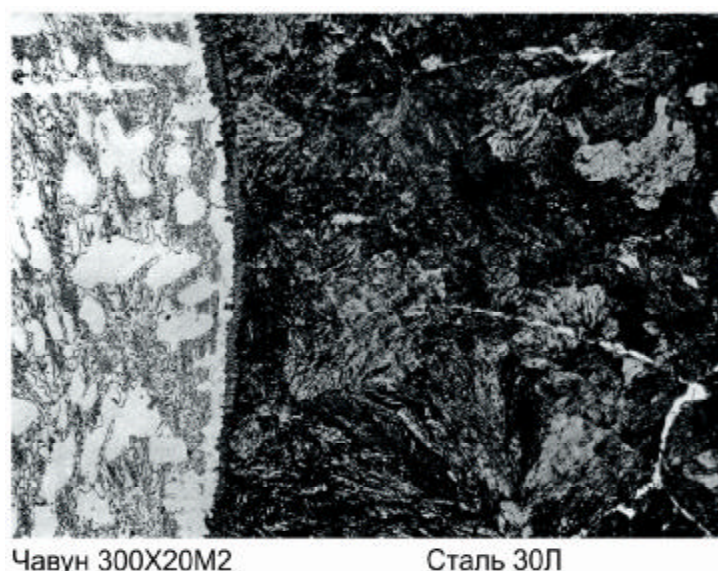


Рис. 2. Мікроструктура перехідного шару біметалевих виливків "чавун 300Х20М2 - сталь 30Л". $\times 125$.

Fig. 2. Microstructure of transition layers in bimetallic castings "cast iron 300X20M2 – steel 30L". $\times 125$.

Мікротвердість цієї зони складає 3580 МПа, розмір зерна – 150-200 мкм. В сталі 30Л поблизу границі з'єднання сплавів розмір зерна більше, ніж у середній частині шару та перевищує 0,25 мм. На відстані від поверхні шару більше 3 мм починається зменшення розміру зерна до 0,125 мм, характерного для усієї іншої частини сталі. Саме зерно поділяється на декілька перлітних субзерен меншого розміру. Структура чавуну 300Х20М2 ферито-карбідна з переважним виділенням в міжосьових просторах дендритів карбідів типу Me_7C_3 пластинчастої форми довжиною 110-150 мкм.

Перехідний шар між чавуном і сталлю складається з перліту у вигляді вузької смуги шириною 10-12 мкм з відстанню між пластинами цементиту до 0,3 мкм зі сторони сталі та зони хромистого фериту шириною 16-18 мкм зі сторони чавуну.

Мікротвердість перлітної та феритної структурних складових перехідного шару становить відповідно 3580 та 4400 МПа. У деяких перетинах біметалевих виливків процеси розчинення, переходу у рідкий (рідко-твердий) стан та повторного твердіння першого шару протікають достатньо швидко у часі і сталь, не встигаючи повністю перемішатися з чавуном, кристалізується в ньому у вигляді окремих ділянок, які мають перлітну структуру з відстанню між пластинами цементиту від 0,3 до 0,5 мкм та мікротвердістю 3580 МПа. Глибина проникнення сталі у чавун може досягати 700-900 мкм. Це свідчить про підплавлення чавуну на таку ж або можливо більшу глибину.

При заливанні чавуну 300X16M2 на затверділу сталь 25Л, що знаходиться в аустенітному стані та має схожу з ним температуру, головним визначальним фактором формування та структуроутворення перехідного шару є дифузія вуглецю та легуючих елементів із чавуну в сталь (рис. 3).

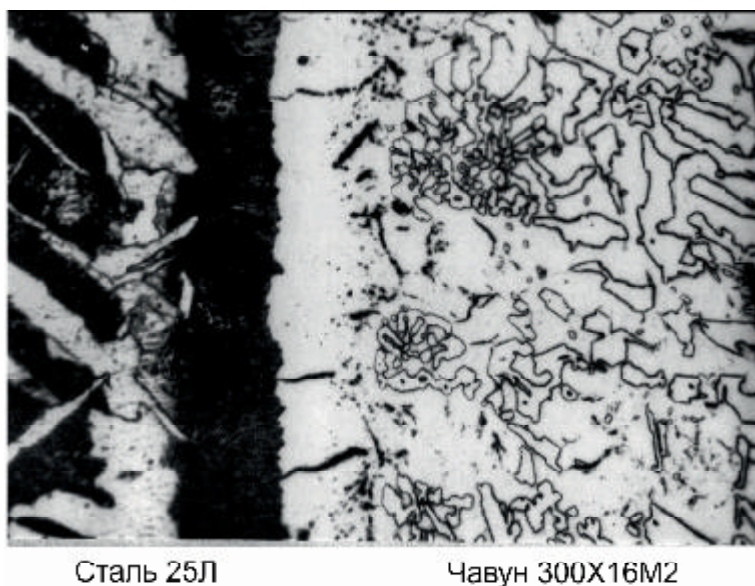


Рис. 3. Мікроструктура перехідного шару біметалевих виливків "сталь 25Л - чавун 300X16M2". $\times 200$.

Fig. 3. Microstructure of transition layers in bimetallic castings "steel 25Л – cast iron 300X16M2". $\times 200$.

Металографічні дослідження показали, що верхній шар сталі внаслідок $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення являє собою хромистий перліт з вмістом вуглецю від 0,8 % зі сторони сталі, відстанню між пластинами цементиту до 0,3 мкм і мікротвердістю 3620 МПа, до 1,2 % зі сторони чавуну (відстань між пластинами цементиту від 0,3 до 0,5 мкм; мікротвердість 6150 МПа).

Між перлітною смугою і чавуном розташовується шар металу, який має структуру хромистого фериту з мікротвердістю 5500 МПа та дисперсних карбідів, які виділяються вздовж перлітної зони як по границях зерен фериту, так і всередині них (рис. 3). За перлітною смугою розташована вузька смуга знеуглецьованої до фериту (мікротвердість 1910 МПа) сталі. За нею розташована науглецьована зона, що має відманштеттову структуру з співвідношенням фериту до перліту 50 % : 50 %. Структура відманштетту з'являється при насиченні сталі вуглецем до 0,5 % і скороченні інтервалу кристалізації сталі в області $\alpha + \gamma$. За цією зоною розташовується менш науглецьований шар сталі. Відманштетт зустрічається у вигляді невеликих ділянок. За зоною науглецювання розташована металева основа (сталь 25Л). Мікроструктура чавуну складається з феритної матриці (мікротвердість 5600 МПа), ледебуритної евтектики та великих карбідів типу $(Cr, Mo, Fe)_7C_3$ з мікротвердістю 18900 МПа, які розташовані по границях первинних зерен і в міждендритних просторах.

Мікроструктура перехідної зони біметалевої пари "чавун 350ХН2 – чавун СЧ20" складається з перліту низьколегованого чавуну робочого шару із прожилками цементиту, що частково розчинилися, цементитних голок, потрійної фосфідної евтектики і перліту сірого чавуну (рис. 4).

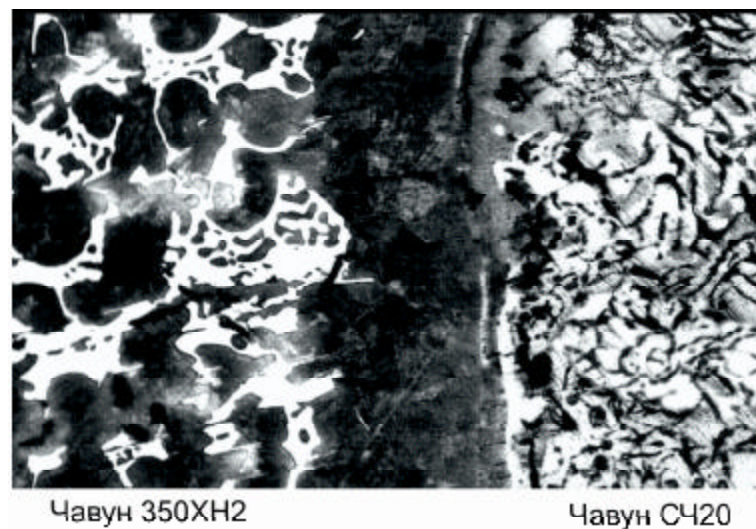


Рис. 4. Мікроструктура перехідного шару біметалевих виливків "чавун 350ХН2 – чавун СЧ20". $\times 200$.

Fig. 4. Microstructure of transition layers of bimetallic castings "cast iron 350ХН2 – cast iron СЧ20". $\times 200$.

Механізм формування структури перехідної зони полягає в наступному. Після заливання сірого чавуну внутрішня поверхня робочого шару розігрівається до температури 1150 - 1160 °С, що призводить до часткового розчинення вторинного цементиту і цементиту, що входить до складу ледебуриту. Одночасно, у прилеглому шарі сірого чавуну утворюються численні евтектичні аустеніто-графітні колонії, всередині і по

границях яких, в результаті евтектоїдного перетворення, утворюється перліт. Шар перліту зерна евтектики, формує перлітний шар перехідної зони з боку сірого чавуну. Утворення перліту з боку робочого шару обумовлене тим, що вуглець, який утворюється внаслідок розчинення цементиту, дифундує через твердий розчин аустеніту і виділяється на центрах графітизації (на пластинках графіту аустеніто-графітних колоній приграничного шару сірого чавуну). На границю перлітних (аустенітних) шарів перехідної зони ліквують домішки, особливо фосфор, тому кристалізація відбувається в останню чергу. При насиченні фосфором і кремнієм частина вуглецю відтісняється в аустеніт, а частина перетворюється в цементит фосфідної евтектики. Ширина такої перехідної зони складає приблизно 100 мкм.

Критерієм оцінки якості дифузійного з'єднання сплавів біметалевих пар при заливанні рідкого металу на тверду основу слугує рівноважна температура контактної поверхні ($t_{\text{кп}}$). Встановлено, що утворення надійного дифузійного зв'язку для біметалевих пар „вуглецева (низьколегована) сталь – високохромистий чавун” забезпечується за умови, якщо температура контактної поверхні перевищує температуру евтектичного перетворення чавуну. Результати дослідження впливу основних технологічних параметрів на рівноважну температуру контактної поверхні наведені на рис. 5.

Видно, що підвищення температур металу-основи та рідкого чавуну, а також співвідношення маси розплаву до одиниці площі поверхні металу-основи призводить до зростання величини контактної температури.

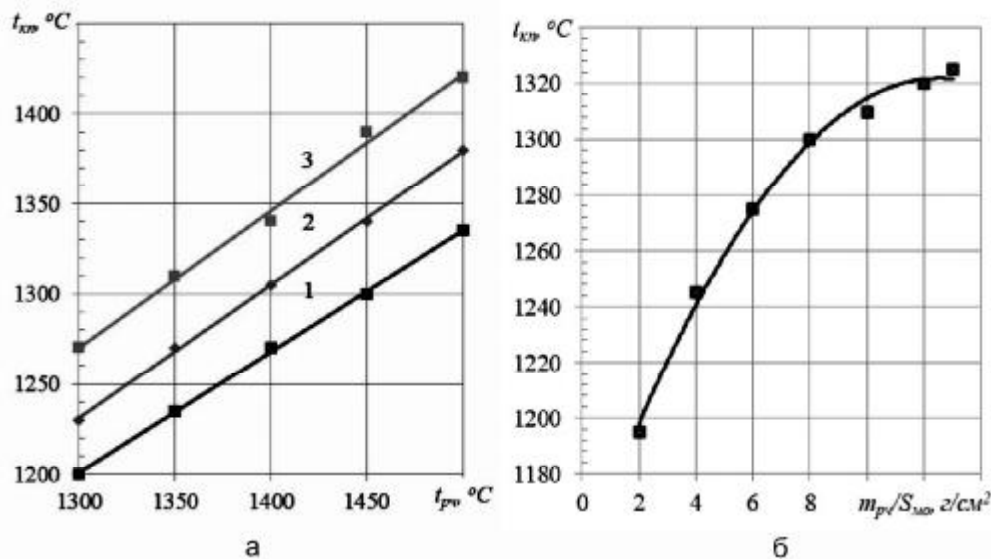


Рис. 5. Залежність температури контактної поверхні ($t_{\text{кп}}$) від температури металу-основи ($t_{\text{м-о}}$) та рідкого чавуну ($t_{\text{рч}}$) (а) і співвідношення маси рідкого чавуну ($m_{\text{рч}}$) до одиниці площі поверхні металу-основи ($S_{\text{м-о}}$) (б): а – 1 – $t_{\text{м-о}} = 900\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $t_{\text{м-о}} = 1000\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $t_{\text{м-о}} = 1100\text{ }^\circ\text{C}$.

Fig. 5. Dependence of the temperature of the contact surface ($t_{\text{кп}}$) on the temperature of the base metal ($t_{\text{м-о}}$) and liquid cast iron ($t_{\text{рч}}$) (a) and the ratio of the mass of liquid cast iron ($m_{\text{рч}}$) to the unit surface area of the base metal ($S_{\text{м-о}}$) (b): а – 1 – $t_{\text{м-о}} = 900\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $t_{\text{м-о}} = 1000\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $t_{\text{м-о}} = 1100\text{ }^\circ\text{C}$.

Це свідчить про те, що рівноважна температура на контактних поверхнях в основному залежить від теплофізичних особливостей сплавів біметалевих пар, а різниця в хімічному складі металу-основи і робочого шару не здійснює суттєвого впливу на характер її зміни.

Взаємозв'язок між рівноважною температурою контактної поверхні, співвідношенням маси рідкого чавуну до одиниці площі поверхні твердої заготовки та ступеню її розчинення у рідкому металі має велике практичне значення для розрахунку технологічних режимів отримання біметалевих виливків у виробничих умовах. Встановлено, що ступінь розчинення металу-основи у рідкому чавуні збільшується при підвищенні температури нагріву заготовки та температури розплаву (рис. 6).

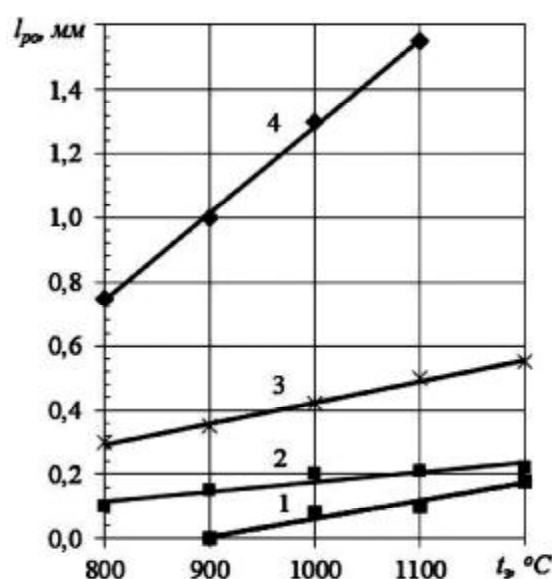


Рис. 6. Залежність ступеню розчинення металу-основи (l_{po}) від температури нагріву заготовки (t_3) та температури рідкого чавуну ($t_{рч}$) 1 – $t_{рч} = 1200$ °C; 2 – $t_{рч} = 1300$ °C; 3 – $t_{рч} = 1400$ °C; 4 – $t_{рч} = 1500$ °C.

Fig. 6. Dependence of the degree of dissolution of the base metal (l_{po}) on workpiece heating temperature (t_3) and liquid iron temperature ($t_{рч}$) 1 – $t_{рч} = 1200$ °C; 2 – $t_{рч} = 1300$ °C; 3 – $t_{рч} = 1400$ °C; 4 – $t_{рч} = 1500$ °C.

Зростання співвідношення маси рідкого чавуну до одиниці площі поверхні твердої заготовки здійснює аналогічний вплив на розчинення металу-основи (рис. 7).

Для всіх температурних режимів отримання біметалевих виливків після встановлення фізичного контакту між сталеву заготовку та рідким чавуном температура контактної поверхні перевищує температуру солідус розплаву.

В зоні взаємодії твердого і рідкого металу відбувається перерозподіл легуючих елементів, зокрема вуглецю. Насичення металу основи вуглецем призводить до зниження температури солідус сталі і, як наслідок, до її

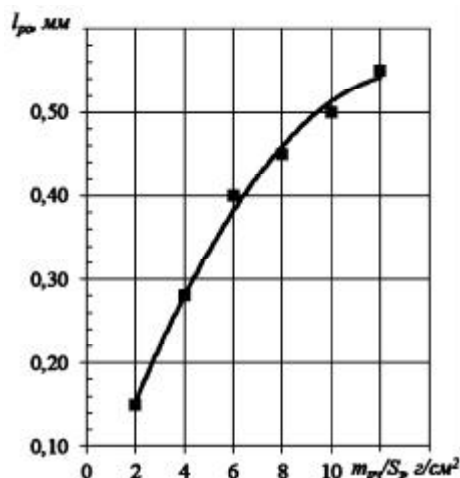


Рис. 7. Залежність ступеню розчинення металу-основи (l_{po}) від співвідношення маси рідкого чавуну (m_{pi}) до одиниці площі поверхні заготовки (S_3).

Fig. 7. Dependence of the degree of dissolution of the base metal (l_{po}) on the ratio of the mass of liquid iron (m_{pi}) to the unit surface area of the workpiece (S_3).

підплавлення та розчинення у рідкому чавуні. Ступінь розчинення буде тим вище, чим більше сталь насичується вуглецем.

При послідовному заливанні сталі на чавун, тобто у випадку, коли температури ліквідус та солідус першого шару ($t_{лс}^1$) менше температур ліквідус та солідус другого ($t_{лс}^2$), має місце інтенсивне підплавлення та розчинення затверділого металу першого шару рідким металом другого. Інтенсифікація тепломасообігових процесів обумовлена не тільки різницею між температурами рідкої сталі та ліквідус (солідус) чавуну, яка складає 270-330 °C, але і впливом співвідношення мас шарів.

При співвідношенні мас чавуну та сталі 1,00:1,25 величина підплавлення складає 8-10 %, а при співвідношенні мас 1,0:2,5 досягає 15-20 % об'ємної маси першого шару (чавуну). В процесі розчинення чавуну відбувається його перемішування із рідкою сталлю, наслідком чого є змінення вихідного хімічного складу приграничних областей сталі і чавуну. Товщина перехідної зони біметалевих виливків при дотриманні умови $t_{лс}^1 < t_{лс}^2$ залежно від співвідношення мас шарів становить від 0,7 до 5,0 мм, а у деяких випадках – до 8,0 мм.

При заливанні чавуну на сталь (температури ліквідус та солідус першого шару більше температур ліквідус та солідус другого), підплавлення затверділого першого шару не відбувається. Теплоти чавуну у цьому випадку недостатньо для підплавлення і розчинення сталі, навіть при співвідношенні мас сталі та чавуну 1:3. Результати досліджень показали, що формування перехідних шарів біметалевих виливків при виконанні умови $t_{лс}^1 > t_{лс}^2$ здійснюється по дифузійному механізму у відносно вузьких зонах і характеризується невисокою рухливістю атомів. Збільшення відношення маси другого шару, що заливається, до маси першого сприяє зростанню інтенсивності тепломасообігових процесів у перехідній зоні. Товщина

Фазові перетворення

перехідної зони біметалевих виливків для випадку $t_{\text{лс}}^1 > t_{\text{лс}}^2$ становить від 25 до 64 мкм.

Стосовно до випадку, коли температури ліквідус та солідус сплавів мають близькі значення ($t_{\text{лс}}^1 \approx t_{\text{лс}}^2$), величина підплавлення першого шару залежить, передусім, від температурних режимів заливання розплавів та співвідношення мас шарів і може досягати 30 % його об'ємної маси. Підвищення температури заливання розплавів та співвідношення мас другого і першого шарів обумовлює більш інтенсивне протікання тепломасообігових процесів при формуванні перехідних шарів біметалевих виливків. Товщина перехідного шару при цьому збільшується до 300-450 мкм.

В заключенні слід зазначити, що формування перехідних шарів біметалевих виливків визначається процесами дифузії та структурно-фазових перетворень в зоні взаємодії "твердий (затверділий) – рідкий метал". Характер протікання цих процесів значною мірою залежить від хімічного складу біметалевих пар, температурних параметрів та співвідношення мас шарів.

Визначено, що у біметалевих виливках, отриманих способом заливки рідкого металу на попередньо нагріту тверду заготовку, перехідний шар характеризується наявністю двох зон – перлітної, зі сторони металу-основи і без карбідної області матриці робочого шару.

Встановлено, що формування перехідних шарів у біметалевих виливках, отриманих послідовним заливанням розплавів у ливарну форму через автономні ливникові системи супроводжується насиченням сталі вуглецем чавуну на глибину до 600-800 мкм та утворенням вздовж границі з'єднання сплавів зони із структурою пластинчатого перліту, а перехідний шар між чавуном і сталлю складається з перліту у вигляді вузької смуги та зони хромистого фериту зі сторони чавуну.

В результаті дослідження особливостей формування перехідних шарів біметалевих виливків при заливанні рідкого металу на тверду заготовку встановлено, що ступінь розчинення металу-основи у рідкому чавуні збільшується при підвищенні температури попереднього нагріву заготовки та температури розплаву, а також співвідношення маси рідкого чавуну до одиниці площі поверхні металу-основи. При цьому швидкість розчинення пропорційна градієнту між температурами контактної поверхні та солідус чавуну.

Встановлено, що утворення надійного дифузійного зв'язку для біметалевих пар „вуглецева (низьколегована) сталь – високохромистий чавун” забезпечується за умови, якщо температура контактної поверхні перевищує температуру евтектичного перетворення чавуну.

Розкрито механізм формування структури перехідної зони.

Література

1. Афтандіянц Є.Г. Перспективні металеві матеріали та технології їх отримання // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2018. – Вип. 282. – С. 22-35.

2. Poletskov P.P., Yakovleva I.L., Koptseva N.V. Study of the structure and properties of novel cold-resistant high-strength steel for operation under conditions of intense wear // *A. Metal Science and Heat Treatment*. – 2022. – Vol. 63. – P. 606-611. <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00736-7>
3. Lotta J., Hannula S.-P. Microstructural comparison of spray-formed and conventionally cast 2.5C–19Cr high-chromium white iron // *Metallography, Microstructure and Analysis*. – 2015. – Vol. 4. – P. 261-272. <https://doi.org/10.1007/s13632-015-0209-1>
4. Rubin P., Larker R., Navara E., Antti M.-L. Graphite formation and dissolution in ductile irons and steels having high silicon contents: solid-state transformations // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. – 2018. – Vol. 7. – P. 587-595 <https://doi.org/10.1007/s13632-018-0478-6>
5. Pagounis E., Lindroos V. K., Talvitie M. Influence of matrix structure on the abrasion wear resistance and toughness of a hot isostatic pressed white iron matrix composite // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 1996. – Vol. 27, – P. 4183-4191 <https://doi.org/10.1007/BF02595666>
6. Kim K. C., Lee S., Jung Jae-Y. Effects of heat treatment on wear resistance and fracture toughness of duo-cast materials composed of high-chromium white cast iron and low-chromium steel // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2006. – Vol. 37. – P. 633-643 <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0035-9>
7. Wan J., Qing J., Xu M. Microstructural characterization and failure analysis of a wear-resistant, high molybdenum and chromium white iron used for metal-to-metal wear systems // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2021. – Vol. 52. – P. 1019-1030 <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06136-5>
8. Wang Y., Zhang Y., Song R., Huang L., Pei Y. Effect of the austenitizing temperature on microstructure evolution and impact toughness of a novel bainite ductile iron // *Metals and Materials International*. – 2021. – Vol. 27. – P. 4014-4022 <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00893-5>
9. Pei Y., Song R., Li Y., Zhao Z., Zhang Y. Role of subordinate phases on the dry impact-abrasion behavior of low chromium cast iron // *Metals and Materials International*. – 2020. – Vol. 26. – P. 1797-1805 <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00423-y>
10. Pavankumar B., Sondar R., Hegde S.R. Effect of spheroidization of cementite in ductile cast iron // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2021. – Vol. 28. – P. 404-411 <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2041-0>
11. Oh H., Lee S., Jung J., Ahn S. *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2001. – Vol. 32. – P. 515-524 <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0068-z>
12. Gasan H., Erturk F. Effects of a Destabilization Heat Treatment on the Microstructure and Abrasive Wear Behavior of High-Chromium White Cast Iron Investigated Using Different Characterization Techniques // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2013. – Vol. 44. – P. 4993-5005 <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1851-3>
13. Anameric B., Rundman K.B., Kawatra S.K. Carburization effects on pig iron nugget making // *Mining, Metallurgy and Exploration*. – 2006. – Vol. 23. – P.139-150 <https://doi.org/10.1007/BF03403201>
14. Kostina M. V., Polomoshnov P. Yu., Blinov V. M., Muradyan S. O., Kostina V. S. Cold resistance of new casting Cr–Mn–Ni–Co steel with 0.5% of N. Part One // *Steel in Translation*. – 2019. – Vol. 49. – P. 761-770 <https://doi.org/10.3103/S0967091219110081>

15. Hou R., Wu M., Li Q., Li W., Chen D. L., Li D. Y. Effects of Mo and B additives on hardness and the resistance of Cu–Ni alloy to wear, corrosion and corrosive wear // *Metals and Materials International*. – 2021. – Vol. 27. – P. 4911-4921 <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00801-x>
16. Mandal S. S., Ghosh K. S., Mondal D. K. Microstructure, mechanical and abrasive wear behavior of 8.0 wt pct Cr white iron subjected to continuous and cyclic annealing treatment // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2017. – Vol. 48. – P. 3432-3444 <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00801-x>
17. Wan J., Qing J., Xu M. Designing a novel graphitic white iron for metal-to-metal wear systems // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2019. Vol. 50. – P. 1162-1174 <https://doi.org/10.1007/s11661-018-5068-3>
18. Lu J., Zhao J., Li Y., Luo F. Effects of niobium on the strength and toughness of low-chromium high-boron cast iron // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2022. – Vol. 53. – P. 2977-2985 <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06718-x>
19. Dwivedi P. K., Vinjamuri R., Sahoo S. K., Dutta K. Investigation on the effect of asymmetric cyclic loading on ratcheting deformation and bulk texture development in HSLA steel // *Metals and Materials International*. – 2022. – Vol. 28. – P. 1836-1850 <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01107-2>
20. Aftandilants Y., Gnyloskurenko S. Development of advanced alloy steels for machinery. Proceedings of 20th International scientific conference “Engineering for rural development”. Latvia University of Life Sciences and Technologies Faculty of Engineering. – 2021. Vol. 20. – P. 706-712.

References

1. Aftandilants Ye. H., *Naukovyy visnyk Natsional'noho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrayiny*, 2018, Vol. 282, pp. 22-35 [in Ukrainian].
2. Poletskov P.P., Yakovleva I.L., Koptseva N.V., A. *Metal Science and Heat Treatment*, 2022, Vol. 63, pp. 606-611 [in English] <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00736-7>
3. Lotta J., Hannula S.-P., *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2015, Vol. 4, pp. 261-272 [in English] <https://doi.org/10.1007/s13632-015-0209-1>
4. Rubin P., Larker R., Navara E., Antti M.-L., *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2018, Vol. 7, pp. 587-595 [in English] <https://doi.org/10.1007/s13632-018-0478-6>
5. Pagounis E., Lindroos V. K., Talvitie M., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, Vol. 27, pp. 4183-4191 [in English] <https://doi.org/10.1007/BF02595666>
6. Kim K. C., Lee S., Jung Jae-Y., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, Vol. 37, pp. 633-643 [in English] <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0035-9>
7. Wan J., Qing J., Xu M., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2021, Vol. 52, pp. 1019-1030 [in English] <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06136-5>
8. Wang Y., Zhang Y., Song R., Huang L., Pei Y., *Metals and Materials International*, 2021, Vol. 27, pp. 4014-4022 [in English] <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00893-5>
9. Pei Y., Song R., Li Y., Zhao Z., Zhang Y., *Metals and Materials International*, 2020, Vol. 26, pp. 1797-1805 [in English] <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00423-y>

10. Pavankumar B., Sondar R., Hegde S. R., *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, Vol. 28, pp. 404-411 [in English] <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2041-0>
11. Oh H., Lee S., Jung J., Ahn S., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, Vol. 32, pp. 515-524 [in English] <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0068-z>
12. Gasan H., Erturk F., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, Vol. 44, pp. 4993-5005 [in English] <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1851-3>
13. Anameric B., Rundman K.B., Kawatra S.K., *Mining, Metallurgy and Exploration*, 2006, Vol. 23, pp. 139-150 [in English]
14. Kostina M. V., Polomoshnov P. Yu., Blinov V. M., Muradyan S. O., *Steel in Translation*, 2019, Vol. 49, pp. 761-770 [in English] <https://doi.org/10.3103/S0967091219110081>
15. Hou R., Wu M., Li Q., Li W., Chen D. L., Li D. Y., *Metals and Materials International*, 2021, Vol. 27, pp. 4911-4921 [in English] <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00801-x>
16. Mandal S. S., Ghosh K. S., Mondal D. K., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, Vol. 48, pp. 3432-3444 [in English] <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00801-x>
17. Wan J., Qing J., Xu M., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, Vol. 50, pp. 1162-1174 [in English] <https://doi.org/10.1007/s11661-018-5068-3>
18. Lu J., Zhao J., Li Y., Luo F., *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2022, Vol. 53, pp. 2977-2985 [in English] <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06718-x>
19. Dwivedi P. K., Vinjamuri R., Sahoo S. K., Dutta K., *Metals and Materials International*, 2022, Vol. 28, pp. 1836-1850 [in English] <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01107-2>
20. Aftandilants Y., Gnyloskurenko S. *Proceedings of 20th International scientific conference "Engineering for rural development". Latvia University of Life Sciences and Technologies Faculty of Engineering*, 2021, Vol. 20, pp. 706-712 [in English].

Одержано 18.12.22

Ye. G. Aftandilants

Investigation of the process of bimetallic castings formation for crushing and grinding equipment

Summary

The analysis of the state of production of wear-resistant materials showed that one of the promising directions for improving their quality is the use of bimetallic castings, which have a complex of properties differentiated by the volume and surfaces of the products. However, the problem of obtaining a high-quality connection of the base and the working layer has not been solved until now.

The article examines the influence of the chemical composition, temperature parameters, and mass ratio of alloys of bimetallic pairs on the process of bimetallic castings formation.

The purpose of the study was to study the growth kinetics and structural-phase composition of the transition diffusion layers of bimetallic castings depending on the

chemical composition, temperature parameters and the ratio of the masses of the alloys of the bimetallic pairs.

As a research result, it was established that the formation of transition layers of bimetallic castings is determined by the processes of diffusion and structural-phase transformations in the interaction zone - "solid - liquid metal". The processes largely depends on the chemical composition of bimetallic pairs, temperature parameters, and the mass ratio of the layers.

It was determined that in bimetallic castings obtained by pouring liquid metal onto a preheated solid billet, the transition layer is characterized by the presence of two zones - pearlitic, from the side of the base metal and without the carbide region of the matrix of the working layer.

It has been established that the formation of transition layers in bimetallic castings obtained by successive pouring of melts into the mold through autonomous pouring systems is accompanied by the saturation of steel by carbon from cast iron to a depth of 600-800 microns and the formation of a zone with a lamellar pearlite structure along the border of the alloy junction, and the transition layer between cast iron and steel consists of pearlite in the form of a narrow strip and a zone of chromic ferrite from the side of cast iron.

As a result of the study of the peculiarities of the formation of transitional layers of bimetallic castings when liquid metal is poured onto a solid billet, it was established that the degree of dissolution of the base metal in liquid cast iron increases with an increase of the billet preheating temperature and the temperature of the melt, as well as the ratio of the mass of liquid cast iron to a unit surface area of the metal base. At the same time, the rate of dissolution is proportional to the gradient between the temperatures of the contact surface and the cast iron solidus.

It was established that the formation of a reliable diffusion bond for bimetallic pairs "carbon (low-alloy) steel - high-chromium cast iron" is ensured if the temperature of the contact surface exceeds the temperature of the eutectic transformation of cast iron.

The mechanism is revealed of formation of the transition zone structure.

The materials of the article can be used by scientists for further research and practitioners in the selection of materials for work in extreme conditions.

Keywords: steel, cast iron, temperature, transitional layer, solidus, liquidus, melt, solidification.