УДК 669.13:669.26

Механізм дисперсного зміцнення міді при її легуванні чавунами

А. М. Степанчук, кандидат технічних наук, професор
О. С. Богатов, Д. В. Ведель

Національний технічний університет України "КПІ", Київ

Досліджено процеси структуроутворення сплавів міді при взаємодії їх розплавів з чавуном за температур нижче та вище його температури плавлення. Встановлено, що структура, фазовий та елементний склад сплавів міді залежить від температурних та кінетичних параметрів процесів взаємодії. Запропоновано механізм дисперсного зміцнення міді за рахунок дисперсних частинок карбідів хрому, джерелом яких є хромистий чавун.

Одним з методів дисперсного зміцнення металів , може бути їх легування дисперсними частинками іншої фази. Це можуть бути частинки карбідів, боридів або інших твердих сполук та їх сплавів [1 – 4]. При цьому, залежно від методу отримання дисперсно-зміцнених матеріалів частинки можуть бути введені у склад вихідного металу у вигляді дисперсних порошків.

В даній роботі вводили дисперсно-зміцнюючу фазу при отриманні порошків з розплавів за допомогою лігатури, яка містить дисперсні частинки твердої фази – карбідів та інших сполук. У цьому випадку обов'язковою умовою є розчинення матричної фази добавки в розплаві основного металу і нерозчинність або обмежена розчинність її карбідних включень. Як показано в роботах [4 – 6], такою легувальною добавкою при отриманні порошків дисперсно-зміцненої міді може бути високохромистий чавун. Але в цих роботах не розкривається механізм утворення кінцевої структури дисперсно-зміцненого матеріалу і вважається, що легувальна добавка (хромистий чавун), плавлячись, не розчиняється в основному розплаві, а утворює з ним емульсії. При кристалізації такого розплаву утворюються структури, в яких як дисперсно-зміцнюючою фазою слугують частинки закристалізованого хромистого чавуну.

Таке пояснення механізму зміцнення викликає сумнів, оскільки згідно діаграми стану Fe – Cu [7] в цій системі має місце взаємна розчинність до 8 % вже при температурі 800 °С. Тому слід очікувати, що при плавленні міді буде відбуватись розчинення матричної фази на основі заліза в міді і слабка розчинність або взагалі нерозчинність карбідних фаз, які входять до складу хромистого чавуну.

В даній роботі для з'ясування механізмів дисперсного зміцнення міді проводили дослідження взаємодії хромистого чавуну в розплавах міді.

Для дослідження процесів структуроутворення використовували зразки хромистого чавуну та електролітичної міді. Процес взаємодії вивчали за температур 1250 °С та 1450 °С, виходячи з того, що у першому випадку чавун буде знаходитись у твердому стані, а другому – у вигляді розплаву. Вивчався також вплив часу ізотермічної витримки на процес взаємодії чавуну з розплавом міді та структуру закристалізованих продуктів. Дослідження процесу взаємодії за температури 1250 °С проводили в печах опору на повітрі, а за температури 1450 °С – у вакуумній печі опору СШВЛ.

З отриманих зливків виготовляли зразки для вивчення структури, вмісту елементів фазових складових та проведення мікродюрометричних досліджень. Вивчення структури проводили за допомогою світлового мікроскопу «NEOPFOT» та електронного растрового мікроскопу РЕМ-106.

Мікродюрометричні дослідження проводили вимірюванням мікротвердості за стандартною методикою з використанням мікротвердоміра ПМТ-3 при навантаженні на індентор 20 г і часі витримки при навантаженні 5 с.

За результатами металографічних досліджень (рис. 1) встановлено, що при взаємодії твердого чавуну з розплавом міді при температурі 1250 °С і ізотермічній витримці 15 хв відбувається розчинення матричної фази чавуну (заліза) в розплаві міді. При цьому карбідна складова чавуну залишається нерозчиненою і переходить у розплав міді у вигляді твердих частинок і зберігає вихідну форму і розмір.

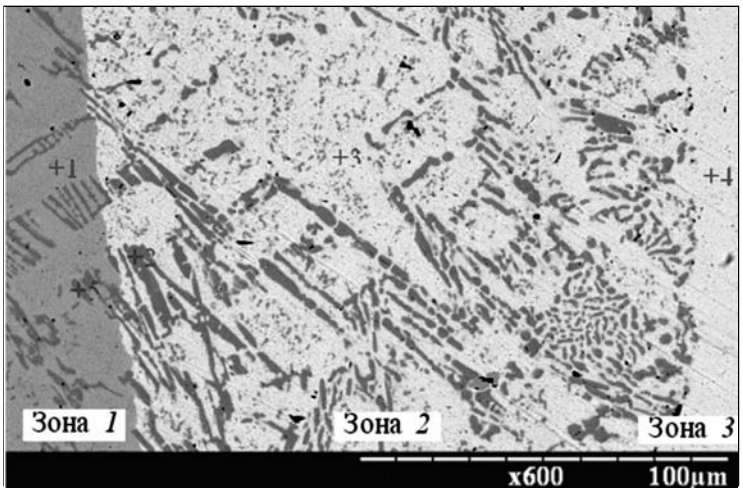

Рис. 1. Мікроструктура зони взаємодії хромистого чавуну з розплавом міді за температури 1250 °С при часі ізотермічної витримки 15 хв.

При збільшенні часу ізотермічної витримки відбувається збільшення ширини перехідної зони та подрібнення карбідної складової з утворенням структур, що складаються з матриці з міді з включеннями карбідних частинок за розміром значно меншим, ніж у структурі чавуну. При цьому, як показали дослідження на електронному растровому мікроскопі, мінімальний розмір частинок може досягати 0,1– 0,3 мкм. (рис. 2). При цьому також збільшується ширина перехідної зони. Розмір включень зменшується по мірі віддалення від межі розподілу чавун – мідь.

Як видно з рис. 1 в зоні *1*, яка складається з сірої та темно-сірої фаз, за результатами визначення елементного складу на електронному растровому мікроскопі переважно присутнє залізо та чавун. В зоні 2 , яка складається з світло-сірої та темно-сірої фаз, темно-сіра фаза також складається із заліза та хрому. Але вміст заліза в ній менший, а хрому більший. Світло-сіра фаза переважно складається з міді.

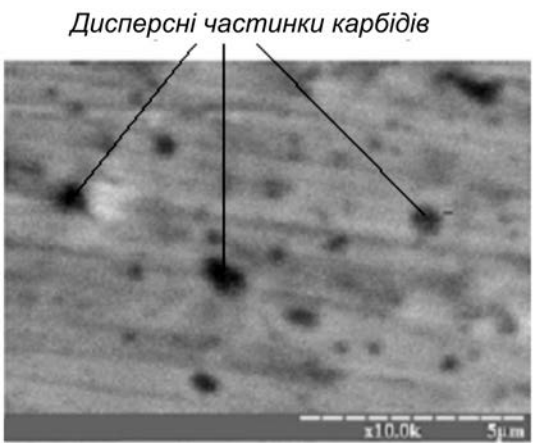

Рис. 2. Мікроструктура продукту взаємодії хромистого чавуну з розплавом міді (температура 1250 °С, час ізотермічної витримки 45 хв).

Вивчення складу окремих фаз, згідно рис. 1, показує, що сіра фаза (точка 1) переважно містить залізо (84,23 %) та хром (12,49 %), а також кремній, сірку, марганець та вуглець. Темно-сіра фаза (точка 5) переважно складається з хрому (62,26 %) та заліза (35,36 %) і теж вміщує кремній, сірку, марганець та вуглець. Темно-сіра фаза (точка 2) в перехідній зоні 2 по складу подібна до складу темно-сірої фази в зоні 1 і вміщує 62,6 % хрому, 34,86 % заліза і 1,22 % міді. Сіра фаза в зоні 2 та 3 переважно складається з міді (98,44 % в точці 3 і 98,75 % в точці 4) і також вміщує залізо та хром.

Мікротвердість зони взаємодії твердого чавуну з розплавом міді змінюється залежно від часу взаємодії . Мікротвердість чавуну не змінюється з часом взаємодії і складає у середньому 480 МПа. З віддаленням від межі поділу мікротвердість зменшується в межах від 410 – 560 МПа до 240 – 260 МПа залежно від структури, що утворилась унаслідок взаємодії (рис. 3).

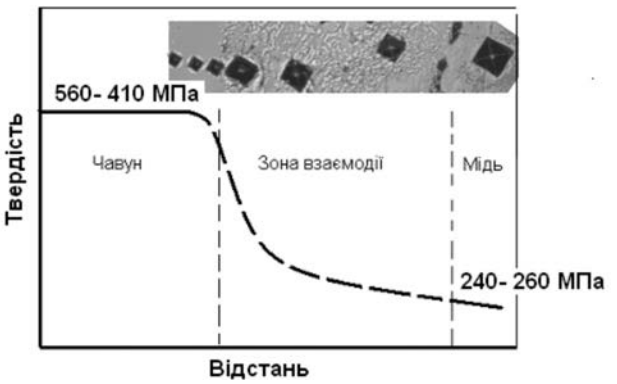

Рис. 3. Розподіл твердості в зоні взаємодії твердого чавуну з розплавом міді.

Дослідження процесу взаємодії хромистого чавуну з розплавом міді при температурі 1450 °С показало, що взаємодія розплавів не супроводжується утворенням чіткої межі розподілу між розплавами чавуну та міді (рис. 4). Відбувається міграція окремих частин (глобул) його розплаву в розплав

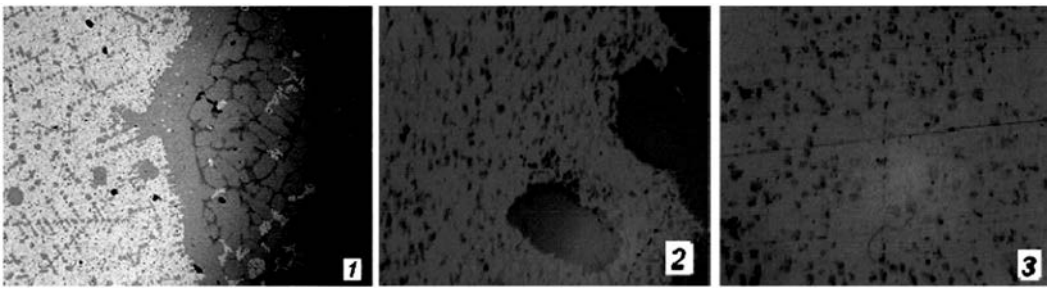

Рис. 4. Мікроструктура зони взаємодії розплавів чавуну та міді. 1 – 15 хв, 2 – 45 хв, 3 – 75 хв. 1 – х 60, 2, 3 – х 1000.

міді, які у подальшому взаємодіють з ним з утворенням вторинних структур, які вміщують дисперсні включення (рис. 4 б, в). При цьому з часом розмір глобул зменшується, а кількість дисперсних включень збільшується.

З наведених вище результатів видно, що на межі контакту твердого чавуну з розплавом утворюються нові структури в перехідній зоні (рис. 2 – 4). При цьому структура перехідної зони складається з матриці на основі міді з незначним вмістом заліза та хрому. Крім того, вона також містить фазову складову на основі хрому та заліза, яка по формі та вмісту елементів подібна до фазової складової в чавуні (рис. 1, точки *2* та *5*). По мірі віддалення відбувається подрібнення цієї складової до розмірів 0,1 – 0,3 мкм (рис. 2). Мікродюрометричні дослідження структури отриманих продуктів взаємодії показують, що інтегральна твердість матеріалу перехідної зони нижча ніж мікротвердість чавуну і знижується з віддаленням від межі поділу чавун – мідь і досягає значень міді для фазової складової, в якій відсутня фазова складова з вмістом хрому та заліза. Інтегральна мікротвердість перехідної зони залежить від кількості та розміру частинок фази на основі хрому та чавуну. Такий характер утворюваної структури перехідної зони та хімічний склад її фазових складових можна пояснити наступним. Як зазначалось вище, згідно діаграми стану Fe – Cu має місце їх взаємна розчинність до 8 % при температурах близьких до температур плавлення міді. Тому можна припустити, що процесі взаємодії відбувається розчинення заліза, яке є основою чавуну, в міді з утворенням розчинів з температурою плавлення меншою, ніж у чавуну.

В той же час включення карбідів хрому та складних карбідів $Fe_xCr_yC_z$, які є складовими хромистого чавуну, переходять у розплав у твердому стані, подрібнюються до розмірів частинок менших за 1 мкм. Такі частинки можуть відігравати роль дисперсно-зміцнюючої фази.

Можливе самоподрібнення частинок підтверджується дослідженнями взаємодії карбідів з розплавами металів. В роботах [4, 8] встановлено, що процес розчинення тугоплавких сполук (ТС) супроводжується проникненням розплавів в тугоплавкі сполуки. При цьому залежно від часу взаємодії процес починається з проникнення розплаву між зернами ТС з подальшим відокремленням зерна від основного масиву ТС. При значних витримках відбувається диспергування відокремлених зерен за рахунок міграції розплавів по субмежам кристалів.

Явища, що спостерігаються, можуть бути пояснені з точки зору уявлень, розроблених А. Ф. Лісовським і викладених в роботах [9, 10] відповідно до проникнення розплавів у сплави, які вміщують певну кількість сплаву, що мігрує в нього. Згідно цих уявлень рушійною силою цього процесу є прагнення системи до рівноваги за рахунок зменшення її енергії.

Одним з шляхів зменшення енергії системи може бути утворення нових поверхонь з меншою поверхневою енергією. При цьому умовою проникнення розплаву між зернами твердої фази є нерівність

$$\sigma_{mp} \leq \sigma_{mm},$$

де σ_{mp} – міжфазна енергія на межі між твердою і рідкою фазами, σ_{mm} – міжфазна енергія на межі між двома зернами твердої фази.

Результати, отримані при дослідженні процесів взаємодії хромистого чавуну з розплавом міді підтверджуються результатами дослідження процесів отримання та властивостей порошків дисперсно-зміненої міді з її розплавів легованих хромистим чавуном [11]. Вивчення процесу диспергування таких розплавів у порівнянні з порошками чистої міді показало, що ступінь диспергування, розмір, форма частинок порошку залежить від складу вихідного розплаву та його властивостей, у першу чергу, при інших рівних умовах, від його в'язкості.

У нашому випадку роль твердої фази відіграють дисперсні частинки карбідів, які утворюються при взаємодії хромистого чавуну з розплавом міді.

Висновки Досліджені процеси структуроутворення при взаємодії розплавів міді з хромистим чавуном за різних температур. Показано, що при розчиненні чавунів у розплавах міді вони є джерелом дисперсних карбідів в кінцевому сплаві, які відіграють роль дисперсно-зміцнюючої фази в ньому. Механізм утворення дисперсних частинок карбідів полягає у взаємному розчиненні міді та матриці чавуну на основі заліза з наступним проникненням розплаву між зернами та субзернами карбідної складової чавуну з наступним її диспергуванням.

Література

1. Данелия Е.П., Розенберг В.М., Солопов В.И. Новые дисперсно-упрочненные материалы на основе меди // Металловедение сплавов на основе цветных металлов. Научн. Труды Гипроцветметобработка. – М.: Металлургия, 1983. – С. 48 – 56.
2. Степанчук А. Н., Билык И. И., Бойко П. А. Технология порошковой металлургии. – Киев: Выща школа, 1989. – 415 с.
3. Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсноупрочненные материалы. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
4. Степанчук А.М., Богатов О.С., Шевчук М.Б. Одержання порошків дисперсно-зміцненої міді // Наукові нотатки. – 2010. – № 29. – С. 188 – 195.
5. Кириевский Б.А., Трубаченко Л.Н. Новые дисперсно-упрочненные бронзы и технология получения // Процессы литья . – 2004. – № 4. – С. 61 – 65.

6. Кириевский Б.А., Трубаченко Л.Н. Влияние технологических параметров на формирование структуры в сплавах системы Cu – Cr – Fe – C, характеризующихся наличием двухфазной области жидкого состояния // Процессы литья. – 2001. – № 4. – С. 52 – 56.
7. Банных О.А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. – М.: Металлургия, 1986. – 440 с.
8. Степанчук А.Н., Шевчук М.Б., Демиденко А.А. Отримання зносостійких композиційних матеріалів за участю самофлюсівних сплавів просочуванням // Цветные металлы. – 2014. – № 1. – С. 63 – 68.
9. Лисовский А.Ф. Формирование структуры композиционных материалов при обработке металлическими расплавами. – Киев: Наук. думка, 2008. – 198 с.
10. Лисовский А. Ф., Ткаченко Н.В. Создание градиентных структур в спеченных твердых сплавах // Сверхтвердые материалы. – 1995. – № 1. – С. 27 – 33.

Одержано 04.03.16

А. Н. Степанчук, А. С. Богатов, Д. В. Ведель

Механизм дисперсного упрочнения меди при ее легировании чугунами

Резюме

Исследованы процессы структурообразования сплавов меди при взаимодействии их расплавов с чугуном при температурах ниже и выше его температуры плавления. Установлено, что структура, фазовый и элементный состав сплавов меди зависит от температурных и кинетических параметров процесса взаимодействия. Предложен механизм дисперсного упрочнения меди за счет дисперсных частиц карбидов хрома, источником которых является хромистый чугун.

A. N. Stepanchuk, A. S. Bogatov, D. V. Wedel

The mechanism of the dispersion strengthening of copper alloyed with cast iron

Summary

The processes of structure formation of copper alloys, by their reacting in liquid state with cast iron at temperatures below and above the melting temperature of cast iron. It is found that the structure, phase composition and elemental composition of copper alloys depend on the temperature and the kinetic parameters of the process.

Mechanism of dispersion strengthening of copper by dispersed particles of chromium carbide, the source of which is chromium cast iron, is proposed.