

УДК 621.74.046

І. А. Шалевська, канд. техн. наук, доц., заст. зав. відділу,
e-mail: innashalevska@gmail.com

Д. І. Мусбах*, викладач, e-mail: qwe_1918@yahoo.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

*Коледж техніки та науки, департамент механічної інженерії (Бені-Валід, Лівія)

ОТРИМАННЯ ЛИТИХ АРМОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ РІДКОФАЗНИМ СУМІЩЕННЯМ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ

Розглянуто варіанти одержання композитних литих матеріалів з функціональними властивостями. Проаналізовано методи армування матричних сплавів армуючою фазою. Доведено, що найбільш ефективним методом утворення матеріалів зі спеціальними функціональними властивостями з кольорових та залізовуглецевих сплавів є армування цих сплавів при рідкофазному поєднанні компонентів системи. При цьому використання методу лиття за моделями, що газифікуються, дозволяє знизити трудомісткість та складність операцій по розташуванню армуючої фази у порожнині форми, тому що є можливість встановлення її на етапі виготовлення моделі. Досліджено вплив армуючої фази на формування структури і властивостей литих армованих конструкцій на основі залізовуглецевих сплавів. На базі проведених металографічних досліджень встановлено, що при отриманні литих армованих конструкцій, де в якості матричного сплаву використовується сірий та високоміцний чавун, перехідна (дифузійна) зона – без чіткої поверхні розділу між різнорідними металами. При цьому мікроструктура перехідного шару відрізняється як від структури матричного сплаву, так і від структури армуючої фази. Наприклад, інтенсивне протікання тепломасообмінних процесів при взаємодії чавуну з перегородкою зі сталі Ст3 обумовлює значне підплавлення перегородки, при цьому утворюється велика ширина перехідної зони – 0,15–0,18 мм та відбувається інтенсивне насичення сталі вуглецем чавуну за рахунок локального скупчення рідкої вуглецевої фази деструкції моделі. При армуванні виливків із сірого чавуну і високоміцного чавуну з кулястою формою графіту стрижнями діаметром 2 і 5 мм зі сталі 20 виявлено досить глибоке науглецювання та значну дифузію вуглецю з чавуну в сталь, яка залежить від температури на поверхні контакту рідкої і твердої фази та швидкості затвердіння виливка. Загальна величина дифузійної зони (перехідної зони) складає 0,4–0,6 мм. Виявлено, що на формування мікроструктури і розмір перехідної зони впливають хімічний склад матричного сплаву і армуючої фази, температура рідкого матричного сплаву і швидкість охолодження виливка, яка пов'язана також з кількістю введеної армуючої фази.

Ключові слова: композитні виливки, литі армовані конструкції, армуюча фаза, лиття за моделями, що газифікуються, мікроструктура.

Потреба у виливках з високими функціональними властивостями виникає в залежності від умов експлуатації машин та механізмів, будь то висока зносостійкість робочого шару, поєднання м'якої серцевини з твердим зовнішнім шаром, підвищені окислостійкість, гідростійкість, гідроміцність, теплопровідність тощо. В останні десятиріччя широкого поширення набули композитні литі матеріали, які отримують за допомогою різноманітних методів рідкофазного з'єднання металеві матриці з високоміцним армуючим матеріалом у вигляді мікро- та макрочасток, а також стрижнів, дроту, волокон, пластин, фольги, сітки.

Основні технологічні схеми отримання композитних виливків представлені в монографії [1]. Авторами розглянуто загальні теоретичні положення процесів, що протікають у формі та дають змогу отримати композитні (армовані) виливки, наведено рекомендації матричні сплави та марки армуючої фази (АФ). При цьому сказано, що об'ємне армування, наприклад, металевими стрижнями, представляє технологічну складність. Тому отримання армованих виливків литтям за моделями, що газифікуються, вирішує цю проблему.

Питання армування сталевих і чавунних виливків та зміцнення їх поверхні розглядаються в роботах багатьох авторів, в яких відзначається підвищення службових характеристик виливків та їх поверхневих шарів у результаті армування.

Зміцнення литих алюмінієвих сплавів дисперсними частинками і волокнами призводить до збільшення твердості і міцності матеріалів. У роботі [2] автори досліджують алюмінієві матричні композити, які зміцнені цирконом та виготовлені методом лиття під тиском з перемішуванням для підвищення зносостійкості. Також є результати досліджень мікроармування алюмінієвих сплавів карбідами кремнію та титану для підвищення корозійної стійкості та механічних властивостей [3]. При цьому процес лиття був двостадійним із забезпеченням перемішування.

Відомі варіанти виготовлення композитного чавуну (евтектика) [4], локально армованого керамікою для підвищення абразивної зносостійкості. При цьому встановлено, що для забезпечення рівномірного розподілу частинок у виливку необхідно в порожнині форми закріпляти керамічну вставку. Це призводить до збільшення трудомісткості при виготовленні виливків.

Більш придатною для виготовлення армованих виливків є технологія лиття за моделями, що газифікуються. Існує методика локального зміцнення литих матеріалів шляхом введення зносостійких вставок на основі тугоплавких карбідів у модель пінополістиролу [5]. Запропонована методика може бути використана для створення локально укріплених областей при виготовленні виливків.

Є результати дослідження впливу макроармуючої фази на зняття температури перегріву сплаву та на швидкість охолодження [6], але в роботі не розглядаються фізико-хімічні процеси, що відбуваються на межі армуючого матеріалу та матричного сплаву. При отриманні армованих виливків з макроімплантатами, які розміщені в порожнині ливарної форми або в пінополістироловій моделі, виникають нові для теорії ливарних процесів багатокомпонентні системи: «метал – модель – імплантат – форма» та «метал – армуюча фаза – форма» [7].

Найбільш ефективним методом утворення матеріалів зі спеціальними функціональними властивостями з кольорових та залізобуглецевих сплавів є армування цих сплавів при рідкофазному поєднанні компонентів системи.

Тому, в першу чергу, слід розглянути основні схеми отримання такого класу матеріалів, а також визначити технологічні передумови і параметри лиття при отриманні литих армованих конструкцій (ЛАК).

Структура матеріалів повинна бути гетерогенною і складатися з твердих зерен, рівномірно розподілених у пружно-пластичній матриці, а між складовими повинен зберігатися адгезійний зв'язок. Таким вимогам можуть відповідати тільки литі армовані матеріали.

Технологічний процес виготовлення армованих виливків методом лиття за моделями, що газифікуються, здійснюється за наступною схемою: підготовка компонентів (калібрування, очищення і плакування поверхні, надання армуючій конструкції необхідної форми і конфігурації); виготовлення пінополістиролових моделей з армуючими елементами; збірка форми; заливка матричним сплавом, просочення; витримка для затвердіння рідкої фази; вибивка з форми; термічна або механічна обробка армованих виробів.

Даний процес отримання ЛАК характеризується простотою, легкістю реалізації в стандартних умовах виробництва, дешевизною підготовки матеріалів і технологічного оснащення, можливістю автоматизації, низькими капіталовкладеннями на освоєння виробництва. До недоліків слід віднести неможливість отримання армованих виливків складної форми, наявність деяких дефектів газоусадкового характеру і формування недосконалої структури при отриманні ЛАК з високим рівнем вимог по експлуатаційним можливостям.

Для досягнення досконалих результатів щодо суміщення компонентів армованих систем необхідно чітко розуміння технологічних основ такого суміщення, перш за все з точки зору утворення макрогетерогенних структур, виникнення простого зв'язку

між різними елементами системи і, як наслідок, виникнення процесу фізико-хімічної взаємодії на межах їх контакту. Цього можна досягнути підвищенням змочуваності, попередженням утворення нестабільних хімічних сполук або їх шарів надмірної товщини, запобіганням хімічної ерозії, запобіганням крихкості АФ на поверхні контакту з матричним сплавом.

Таким чином, тільки в результаті застосування оптимальних технологічних схем виробництва при чітко заданих параметрах процесу суміщення (у т. ч. підготовчих операцій) можливе отримання ЛАК з високими експлуатаційними властивостями, що відповідають вимогам, які висуваються в даний час до матеріалів такого класу.

При вивченні властивостей армованих матеріалів також важливою є задача про знаходження макроскопічних величин, в яких передбачаються фізико-хімічні властивості компонентів, співвідношення їх обмінних концентрацій, вид армування.

З метою підтвердження даних про вплив АФ на формування структури і властивостей литих армованих конструкцій були встановлені структурні зміни в литих армованих матеріалах на основі залізобуглецевих сплавів (сірий і висококомічний чавун з кулястою формою графіту), де в якості АФ було використано металеві стрижні (діаметром 2 та 5 мм) зі сталі 20 та сталеві пластини Ст3 товщиною 0,7 мм.

Металографічному дослідженню піддавалися зразки виливків із залізобуглецевих сплавів, отриманих за моделями, що газифікуються, із введеної в них АФ. Дослідження проводилися на оптичному мікроскопі МІМ8-М. Мікроструктура оцінювалася відповідно до ГОСТ 3443-87 і ГОСТ 5639-82. Для травлення мікрошліфів використовували 2%-й розчин HNO_3 в етиловому спирті.

При використанні для чавунних виливків сталевих перегородок дотримується умова, коли температури солідус та ліквідус чавуну менші, ніж у сталі. На інтенсифікацію тепломасообмінних процесів впливатиме співвідношення мас: маса чавуну набагато перевищує масу перегородки. Теплоти чавуну досить для підплавлення та розчинення сталі. Значна перевага маси чавуну над сталлю сприяє збільшенню інтенсивності тепломасообмінних процесів у перехідній зоні і підвищенню значень ефективних коефіцієнтів дифузії хімічних елементів. Відомо, що чим вищий ступінь легування сплавів, які з'єднуються, тим менше значення ефективних коефіцієнтів дифузії внаслідок меншої рухливості атомів легуючих елементів у перехідній зоні.

Візуальне дослідження макротемплета з діафрагмою 0,3 мм показало, що вона згинається і деформується під дією газодинамічних потоків у формі і в місці підведення металу. Верхня частина діафрагми, яка розташована ближче до центру виливка, проплавилась в декількох місцях. Нижня половина діафрагми збереглась повністю з огляду на прискорену кристалізацію металу. Хороші результати показало використання сталеві (Ст3) пластини товщиною 0,7 мм. Кілька розрізів по перетину виливка підтвердили повне збереження діафрагми (рис. 1).

Якість дифузійного з'єднання і міцність перехідного шару визначаються температурними умовами та фізико-хімічними процесами на міжфазних межах. Інтенсивне протікання тепломасообмінних процесів при взаємодії чавуну з перегородкою зі сталі Ст3 обумовлює значне підплавлення перегородки. Про це говорить достатньо велика ширина перехідної зони – (0,15–0,18) мм (рис. 1). У процесі взаємодії відбулося інтенсивне насичення сталі вуглецем чавуну і утворення уздовж межі з'єднання зони зі структурою пластинчастого перліту (Пг1; Пд0,5), характерної для сталі Ст5. Мікроструктура чавуну являє собою перлітну основу з карбідними і графітними включеннями.

Для умов отримання багат шарових виливків характерною особливістю є миттєве утворення окисної плівки на поверхні рідкого сплаву, яка істотно змінює процеси на міжфазній межі, перешкоджає дифузійній взаємодії двох сплавів. У процесі з'єднання двох металів має місце проникнення атомів кисню рідкого металу через тонку окисну плівку твердого металу вглиб її з подальшим частковим зниженням вмісту вуглецю в поверхневому шарі твердого металу. Швидкість цього процесу залежить від термодинамічних умов: температури, тиску, складу газової фази.



Рис. 1. Мікроструктура двошарового виливку з чавуну з діафрагмою зі сталеві пластиною Ст3 товщиною 0,7 мм: 1 – діафрагма; 2 – перехідний шар; 3 – чавун

На межі міжфазної поверхні рідкий метал – тверда перегородка відбуваються численні окислювально-відновні реакції. Хімізм процесу взаємодії рідкого чавуну зі сталевію пластинію відрізняється великими швидкостями і досить глибоким проникненням елементів вглиб сталевію пластинію з огляду на велику різницю хімічних потенціалів і маси чавуну порівняно з діафрагмою.

Активному протіканню високотемпературних окисно-відновних процесів сприяє і тривале перебування чавуну в рідкому стані в місці підведення металу.

Навуглецювання поверхневого шару сталевію діафрагми відбувається також і за рахунок локального скупчення рідкої вуглецевої фази деструкції моделі, що залежить від гідродинамічних і конвективних потоків у розплаві в процесі заповнення форми металом.

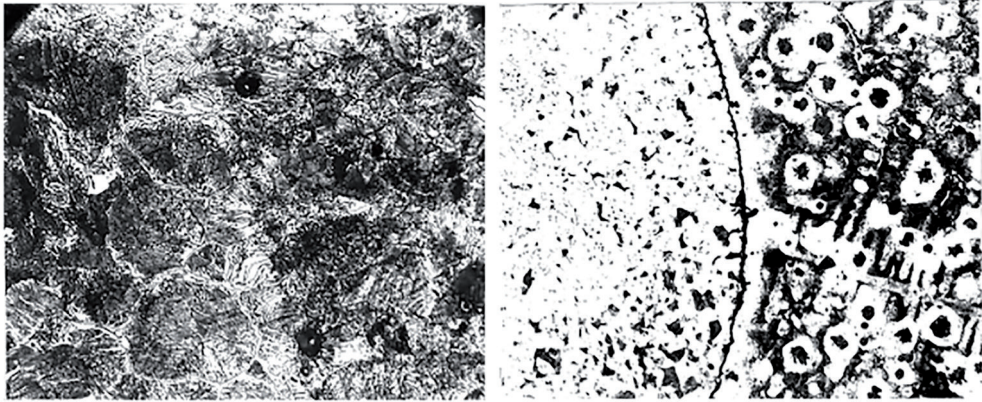
Проведений металографічний аналіз мікрошліфів армованих виливків із сірого чавуну (ЧПГ) і високоміцного чавуну з кулястою формію графіту (ВЧШГ) з АФ у вигляді стрижнів діаметром 2 і 5 мм зі сталі 20 свідчить про наявність значної дифузії вуглецю з чавуну в сталевію АФ і досить глибоке її навуглецювання. Насичення АФ вуглецем забезпечується істотною різницею концентрацій цього елементу в хімічному складі чавуну (матричний сплав) та сталі 20 (АФ), а величина дифузії залежить від температури на поверхні контакту рідкої і твердої фази та тривалості затвердіння виливка. Загальна величина дифузійної зони (перехідної зони) складає 0,4–0,6 мм (рис. 2).

При цьому дифузійна зона з боку чавуну являє собою шар товщиною 0,1–0,16 мм з перлітною структурію (П100), а дифузійна зона з боку АФ становить 0,3–0,4 мм і складається з 3-х приблизно однакових за розміром шарів (рис. 2, а, б).

Між двома дифузійними зонами немає різкої поверхні розділу, проте досить чітко проявляється лінія поверхні контакту між основним металом і АФ, що можна пояснити різним орієнтуванням зерен і неоднаковою дисперсністю перліту в мікроструктурі з боку чавуну і АФ, що може свідчити про відсутність або дуже незначне підплавлення АФ (рис. 2, а, б).

Структурні складові в дифузійних зонах всіх зразків не змінюються і свідчать про те, що насичення вуглецем у дифузійної зони АФ зі сталі 20 відбувається до заевтектоїдного та евтектоїдного складу. Структура, характерна для заевтектоїдної сталі, плавно переходить в структуру евтектоїдної і далі плавно в основну структуру АФ.

У зразку з виливка (рис. 2, б) (ВЧШГ – сталь 20 з АФ у вигляді стрижня діаметром



а

б

Рис. 2. Мікроструктура поверхні контакту зразка виливка з сірого (2, а) та високоміцного чавуну (2, б), армуюча фаза сталь 20 (а – стрижень \varnothing 5мм, б – стрижень \varnothing 2мм), \times 400

2 мм) по всій поверхні сплаву спостерігається суцільна графітна облямівка товщиною до 0,02 мм. Дифузійної зони в АФ практично немає, в чавуні це феритна смуга товщиною до 0,05 мм. У цьому випадку, мабуть, відсутній будь-який металевий зв'язок між матричним сплавом і АФ, виділення графітної фази на поверхні контакту МС-АФ відбувається як на підкладці.

Висновки

На основі проведених металографічних досліджень встановлено:

- При отриманні литих армованих конструкцій, де в якості матричного сплаву використовується ЧПГ, ВЧШГ, перехідна зона (дифузійна зона) – без чіткої поверхні розділу між різнорідними металами.
- Мікроструктура перехідного шару відрізняється як від структури матричного сплаву, так і від структури АФ.
- На формування мікроструктури і розмір перехідної зони впливають хімічний склад матричного сплаву і АФ, температура рідкого МС і швидкість охолодження виливки, яка пов'язана також з кількістю введеної АФ.

Список літератури

1. Лысенко Т. В., Ясюков В. В., Прокопович И. В. (2019) Концепции управления формообразованием отливок: монография. – Одесса: Экология.
2. Sakthivelu S., Meignanamoorthy M., Ravichandran M., Sethusundaram P. P. Tribological behavior of AA7050-ZrSiO₄ composites synthesized by stir casting technique // *Mechanics and Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 23. – pp. 198–201. – DOI: 10.2478/mme-2019-0026.
3. Sambathkumar M., Navaneethakrishnan P., Ponappa K., Sasikumar K.S.K. Mechanical and corrosion behavior of Al7075 (hybrid) metal matrix composites by two step stir casting process // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2017. – Vol. 14 (2). – pp. 243–255. – DOI: [http:// dx.doi.org/10.1590/1679-78253132](http://dx.doi.org/10.1590/1679-78253132).
4. Dulcka A., Studnicki A., Szajnar J. Reinforcing cast iron with composite insert // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2017. – Vol. 62 (1). – pp. 355–357. – DOI: 10.1515/amm-2017-0055.
5. Anikeev A. N., Chumanov I. V. Microstructure and hardness of a dispersion-reinforced casting // *Russ. Metall*. – 2018. – pp. 1161–1164. – DOI: 10.1134/S0036029518120030.
6. Шалевская И. А. Исследование теплообменных процессов в литейной форме с армирующей фазой // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 54–59. – DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59>.
7. Shinsky I., Shalevska I., Musbah J. Efficiency of influence of a metal macroreinforcing phase on process of solidification of large-sized castings // *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. – 2015. – Vol. 15 (2). – pp. 51–58.

Поступила 11.02.2020

References

1. Lysenko, T. V., Jasjukov, V. V., Prokopovich, I. V. (2019) Casting formation management concepts: Monograph. Odessa: Ekologija [in Russian].
2. Sakthivelu, S., Meignanamoorthy, M., Ravichandran, M., Sethusundaram, P. P. (2019) Tribological behavior of AA7050-ZrSiO₄ composites synthesized by stir casting technique. Mechanics and mechanical engineering, Vol. 23, pp. 198-201. DOI: 10.2478/mme-2019-0026 [in English].
3. Sambathkumar, M., Navaneethkrishnan, P., Ponappa, K., Sasikumar, K.S.K. (2017) Mechanical and corrosion behavior of Al7075 (hybrid) metal matrix composites by two step stir casting process. Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 14 (2), pp. 243-255. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78253132> [in English].
4. Dulaska, A., Studnicki, A. & Szajnar, J. (2017) Reinforcing cast iron with composite insert. Archives of metallurgy and materials, Vol. 62 (1), pp. 355-357. DOI: 10.1515/amm-2017-0055 [in English].
5. Anikeev, A.N., Chumanov, I.V. (2018) Microstructure and hardness of a dispersion-reinforced casting. Russian metallurgy (metally), pp.1161-1164. DOI: 10.1134/S0036029518120030 [in English].
6. Shalevskaja, I. A. (2019) Investigation of heat transfer processes in a mold with a reinforcing phase. Lit'e i metallurgija, no. 3, pp. 54-59. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-3-54-59> [in Russian].
7. Shinsky, I., Shalevska, I., Musbah, J. (2015) Efficiency of influence of a metal macroreinforcing phase on process of solidification of large-sized castings. TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol. 15 (2), pp. 51-58 [in English].

Received 08.02.2020

И. А. Шалевская, канд. техн. наук, доц., зам. зав. отдела,
e-mail: innashalevska@gmail.com

Д. И. Мусбах*, преподаватель, e-mail: qwe_1918@yahoo.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

* Колледж техники и науки, департамент механической инженерии (Бени-Валид, Ливия)

ПОЛУЧЕНИЕ ЛИТЫХ АРМИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЖИДКОФАЗНЫМ СОВМЕЩЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ

Рассмотрены варианты получения композитных литых материалов с функциональными свойствами. Проанализированы методы армирования матричных сплавов армирующей фазой. Доказано, что наиболее эффективным методом образования материалов со специальными функциональными свойствами из цветных и железоуглеродистых сплавов является армирование этих сплавов при жидкофазном сочетании компонентов системы. При этом использование метода литья по газифицируемым моделям позволяет снизить трудоемкость и сложность операций по расположению армирующей фазы в полости формы, потому что есть возможность установки ее на этапе изготовления модели. Исследовано влияние армирующей фазы на формирование структуры и свойств литых армированных конструкций на основе железоуглеродистых сплавов. На основе проведенных металлографических исследований установлено, что при получении литых армированных конструкций, где в качестве матричного сплава используется серый и высокопрочный чугуны, переходная (диффузная) зона – без четкой поверхности раздела между разнородными металлами. При этом микроструктура переходного слоя отличается как от структуры матричного сплава, так и от структуры армирующей фазы. Например, интенсивное протекание теплообменных процессов при взаимодействии чугуна с перегородкой из стали Ст3 обуславливает значительное подплавление перегородки, при этом образуется большая ширина переходной зоны – 0,15–0,18 мм и происходит интенсивное насыщение стали углеродом чугуна за счет локального скопления жидкой углеродистой фазы деструкции модели. При армировании отливок из серого чугуна и высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита стержнями диаметром 2 и 5 мм из стали 20 обнаружено достаточно глубокое науглероживание и значительную диффузию углерода из чугуна в сталь, которая зависит от температуры на поверхности контакта жидкой и твердой фазы и скорости отверждения отливки. Общая величина диффузионной зоны (переходной зоны) составляет 0,4–0,6 мм. Выявлено, что на формирование микроструктуры

и размер переходной зоны влияют химический состав матричного сплава и армирующей фазы, температура жидкого матричного сплава и скорость охлаждения отливки, которая связана также с количеством введенной армирующей фазы.

Ключевые слова: композитные отливки, литые армированные конструкции, армирующая фаза, литье по газифицируемым моделям, микроструктура.

I. A. Shalevska, PhD (Engin.), Associate Professor, Deputy Head of Department,
e-mail: innashalevska@gmail.com

J. I. Musbah*, Teacher, e-mail: qwe_1918@yahoo.com

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine).

*Department of Mechanical Engineering College of Technical and Sciences (Bani Walid, Libya).

OBTAINING CAST REINFORCED STRUCTURES BY LIQUID PHASE COMBINATION OF SYSTEM COMPONENTS

Options for obtaining composite cast materials with functional properties are considered. The methods of matrix alloys reinforcement by the reinforcing phase are analyzed. It is proved that the most effective method of formation of materials with special functional properties from non-ferrous and iron-carbon alloys is the reinforcement of these alloys at the liquid-phase coupling of system components. In this case, the use of the method of casting on gasified models, reduces the complexity and complexity of operations for the location of the reinforcing phase in the cavity of the form, because it is possible to install it at the stage of model making. The influence of the reinforcing phase on the formation of the structure and properties of cast reinforced structures based on iron carbon alloys has been investigated. Based on the conducted metallographic studies, it was found that upon receipt of cast reinforced structures, where the gray and high-strength cast iron is used as a matrix alloy there is transition (diffusion) zone without a clear interface between heterogeneous metals. The microstructure of the transition layer differs both from the structure of the matrix alloy and from the structure of the reinforcing phase. For example, the intense flow of heat and mass transfer processes in the interaction of pig iron with a partition of C₁₃ steel causes a significant melting of the partition, thus forming a large width of the transition zone – 0,15–0,18 mm and there is an intense saturation of the steel with iron carbon and due to the local carbon accumulation of the liquid due to destruction of the model. In the reinforcement of cast iron castings and high strength cast iron with spherical graphite with 2 and 5 mm diameter rods of steel 20, sufficiently deep carbonization and considerable diffusion of carbon from iron into steel is revealed, which depends on the temperature at the contact surface of the liquid and solid phase and solidification speed of the casting. The total value of the diffusion zone (transition zone) is 0.4–0.6 mm. It has been found that the formation of the microstructure and the size of the transition zone are influenced by the chemical composition of the matrix alloy and the reinforcing phase, the temperature of the liquid matrix alloy and the cooling rate of the casting, which is also related to the amount of reinforcement phase introduced.

Keywords: composite castings, cast reinforced structures, reinforcing phase, lost foam casting, microstructure.