



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-96-100>  
УДК 621.79

Поступила 20.06.2022  
Received 20.06.2022

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ «МАТРИЧНЫЙ СПЛАВ – УПРОЧНЯЮЩИЕ ГРАНУЛЫ» В ПРОЦЕССЕ ТВЕРДОЖИДКОГО СИНТЕЗА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

*А. С. КАЛИНИЧЕНКО*, Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: ask0708@mail.ru  
*В. А. КАЛИНИЧЕНКО*, Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65  
*В. Г. ЛУГИН*, Белорусский государственный технологический университет,  
г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а

*В работе рассматриваются особенности формирования переходной зоны между матричным сплавом и упрочняющей фазой (чугунными гранулами) при синтезе композиционных литейных материалов. Приведены результаты по изменению концентрации основных элементов (кремния, меди и железа). Показано, что формирование переходной зоны происходит в процессе инфильтрации с последующим ее ростом при выдержке при температуре синтеза, результатом чего становится разрушение и растворение гранул упрочняющей фазы.*

**Ключевые слова.** Синтез литейных композиционных материалов, переходная зона, распределение элементов, растворение гранул.

**Для цитирования.** Калининченко, А. С. Формирование переходной зоны «матричный сплав – упрочняющие гранулы» в процессе твердожидкого синтеза композиционного материала / А. С. Калининченко, В. А. Калининченко, В. Г. Лугин // *Литье и металлургия*. 2022. № 3. С. 96–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-96-100>.

## FORMATION OF THE TRANSITION ZONE “MATRIX ALLOY – REINFORCING GRANULES” IN THE PROCESS OF SOLID–LIQUID SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIAL

*A. S. KALINICHENKO*, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.  
E-mail: ask0708@mail.ru  
*V. A. KALINICHENKO*, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.  
*V. G. LUHIN*, Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str.

*The paper is devoted to the formation of transition zone between matrix alloy and reinforcing phase (cast iron granules) during the synthesis of composite casted materials. Results on concentration distribution of main elements (Si, Fe, Cu) are presented. It is shown that the formation of transition zone starts during the infiltration process with further its growth during the exposition at synthesis temperature. As the result dissolution and distraction of granules take place.*

**Keywords.** Synthesis of casted composite materials, transition zone, elements' distribution, dissolution of granules.

**For citation.** Kalinichenko A. S., Kalinichenko V. A., Luhin V. G. Formation of the transition zone «matrix alloy – reinforcing granules» in the process of solid-liquid synthesis of composite material. *Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 96–100. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-96-100>.

Литые композиционные материалы (ЛКМ) в последнее время широко применяются для изделий различного назначения благодаря более низкой стоимости и возможности изготовления деталей различной геометрии, практически без ограничения по размерам. Большая доля в производстве литых композиционных материалов приходится на матрицы на основе алюминиевых и медных сплавов [1]. При выборе состава композиционных материалов, как и при выборе металлического и неметаллического материала, следует руководствоваться некоторыми общими положениями, которые могут быть сформулированы следующим образом: материал должен наилучшим образом отвечать эксплуатационной надежности, технологичности и экономичности. Однако в связи с неоднородной гетерогенной природой литых

композиционных материалов возникают определенные проблемы при их получении и обработке, приводящие к дефектам, специфичным именно для этих материалов. Свойства композиционных материалов нельзя определить только по свойствам компонентов без учета их взаимодействия [2]. Смачивание армирующих элементов (упрочняющего каркаса) расплавом – вторым компонентом композиционного материала, предопределяет их взаимодействие в процессе синтеза и последующей выдержки. Принципиальным вопросом создания литых композиционных материалов является возможность контроля процессов физико-химического взаимодействия на границе «матрица – упрочняющая фаза». Без решения этой проблемы нельзя рассчитывать на достижение желаемого уровня физико-механических и эксплуатационных свойств. Необходимо отметить, что процессы на межфазных границах характеризуются строением вещества, что требует детального изучения этих процессов для определения способов, препятствующих развитию нежелательного взаимодействия компонентов композита с формированием непредсказуемого фазового состава [3].

Целью настоящей работы было исследование влияния времени синтеза и выдержки на формирование переходной зоны на границе «матричный сплав – чугунные гранулы».

Одним из основных условий формирования ЛКМ является смачивание армирующих элементов расплавом матрицы и заполнение им пор, капилляров и пустот. Смачивание расплавом приводит к тесному контакту фаз, которое является необходимым условием для развития процессов химического взаимодействия на границе раздела. Считается обязательным присутствие диффузионной зоны для прочного соединения двух металлов. Это обусловлено тем, что при наличии только механического сцепления трудно обеспечить высокую прочность соединения, следствием чего является появление трещин при высоких нагрузках. Кроме того, особенностью синтеза литых композиционных материалов является растворение элементов упрочняющей фазы при взаимодействии с расплавленным матричным сплавом, описываемое уравнением А. Н. Щукарева:

$$\frac{dM}{d\tau} = KS(C_o^* - C^*),$$

где  $\frac{dM}{d\tau}$  – скорость растворения;  $C_o^*$  – предельная концентрация насыщения жидкой фазы по твердому компоненту;  $C^*$  – текущая концентрация раствора;  $S$  – поверхность контакта;  $K$  – константа скорости растворения.

Однако в уравнение входят величины ( $K$ ,  $C^*$ ), которые необходимо определить экспериментально. Для этого проводили исследования с композитами, полученные инфильтрацией бронзы БрКЗМц в каркас, образованный чугунными гранулами, и которые были успешно использованы в тяжело нагруженных узлах трения паровых турбин.

Процесс синтеза композиционного материала осуществляли при температуре 1080 °С. Сразу после завершения инфильтрации первые образцы удаляли из печи и охлаждали в воде для фиксирования микроструктуры. Последующие образцы извлекали с интервалом 20 мин и также охлаждали в воде. Максимальное время выдержки составило 100 мин.

Исследования проводили с использованием электронной микроскопии. Исследовали химический состав в точках начиная с расположенной в грануле на расстоянии 50 мкм от поверхности (точка 1) и затем через каждые 25 мкм до точки, расположенной в матрице на расстоянии 50 мкм от переходной зоны (точка 6).

Анализ микроструктур показал, что растворение гранул и формирование переходной зоны происходит уже в ходе инфильтрации (процесс заполнения формы).

Причем неожиданным был факт высокой концентрации кремния на границе «переходная зона – матрица» (рис. 1).

Максимальное количество кремния (5,14%) было зафиксировано сразу после окончания процесса заполнения формы. При дальнейшей выдержке происходило перераспределение кремния, но и после 100 мин выдержки концентрация кремния в переходной зоне (3,7%) была выше, чем в гранулах и матрице.

Содержание меди в переходной зоне было самым высоким в конце процесса инфильтрации (7,24%), которое снижалось до 5,55% после выдержки в течение 100 мин. На границе раздела фаз «переходная зона – матрица» содержание меди снизилось с 36,37 до 13,02% (рис. 2).

Анализ показал рост содержания меди в грануле в точке 1 (на расстоянии 50 мкм от поверхности) с увеличением времени выдержки от 3,3 до 4,11%. Рост содержания меди свидетельствует о нарушении сплошности гранулы, что приводит к ее растворению в матричном расплаве.

Другая ситуация наблюдалась для железа. В ходе выдержки образцов при температуре синтеза содержание железа в центре переходной зоны выросло от 85,78 до 91,24%. Содержание железа на границе раздела фаз «переходная зона – матрица» также увеличилось от 56,5 до 80,28% (рис. 3).

Рост содержания железа в переходной зоне свидетельствует о растворении гранулы и расширении переходной зоны, что подтверждается существенным снижением концентрации меди в переходной зоне (см. рис. 2).

Распределение железа подтверждает формирование переходной зоны в период инфильтрации матричного сплава. Для уменьшения толщины переходной зоны в период синтеза композиционного материала необходимо сократить время инфильтрации. Это можно достичь путем применения избыточного давления на матричный расплав.

Зная изменения концентрации раствора в определенные моменты времени  $C^*$ , возможно определить константу растворения и соответственно время, необходимое для формирования переходной зоны без разрушения гранул.

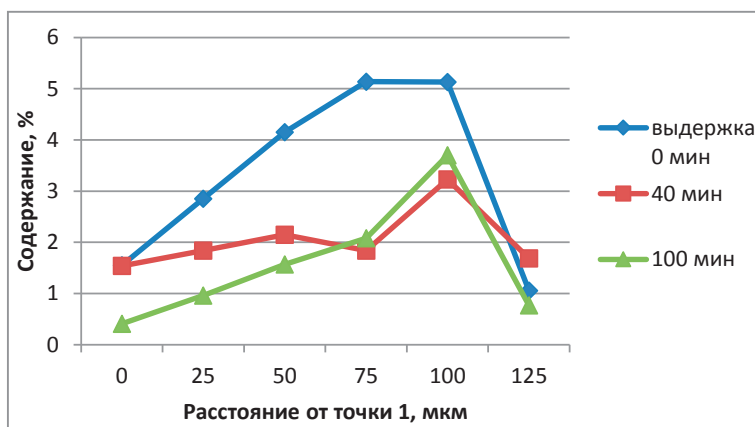


Рис. 1. Распределение кремния в различные времена синтеза

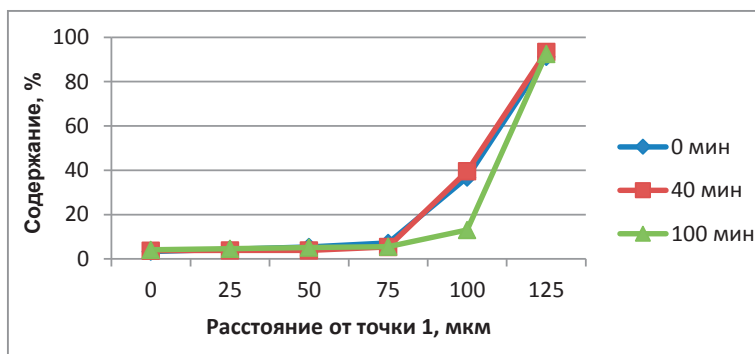


Рис. 2. Распределение меди в различные времена синтеза

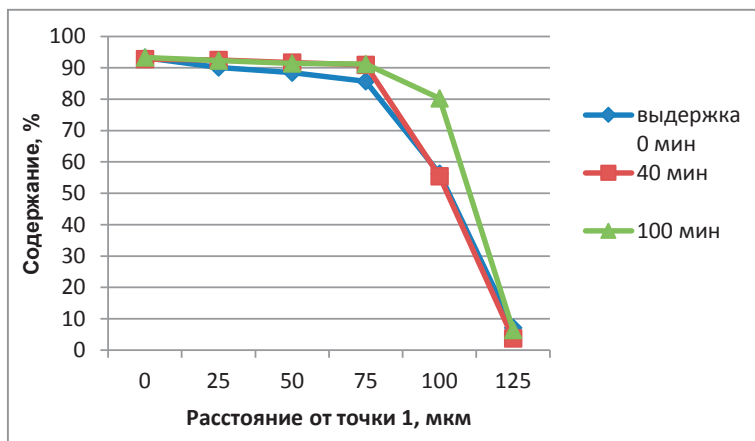


Рис. 3. Распределение железа в различные времена синтеза

Влияние времени выдержки на структуру композита подтверждается спектрами в точке 1 для момента завершения процесса инфильтрации и после выдержки при температуре синтеза в течение 100 мин (рис. 4). Из рисунка видно снижение интенсивности линий железа и рост интенсивности линий других элементов.

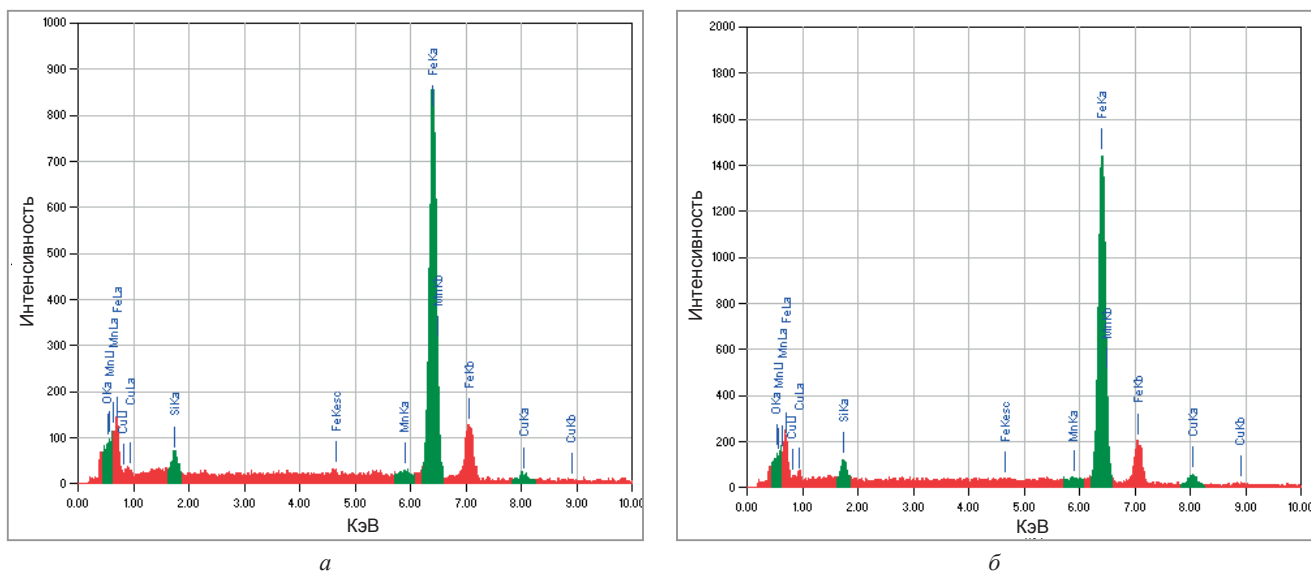


Рис. 4. Спектры в точке 1 для момента завершения процесса инфильтрации (а) и через 100 мин выдержки в жидком состоянии (б)

Изменения строения гранул упрочняющей фазы при различной выдержке в твердо-жидком состоянии подтверждаются фотографиями микроструктур (рис. 5). Видно разрушение поверхностного слоя за счет проникания меди и растворения поверхностного слоя. Увеличивается толщина переходной зоны, что подтверждается ростом содержания в ней железа.

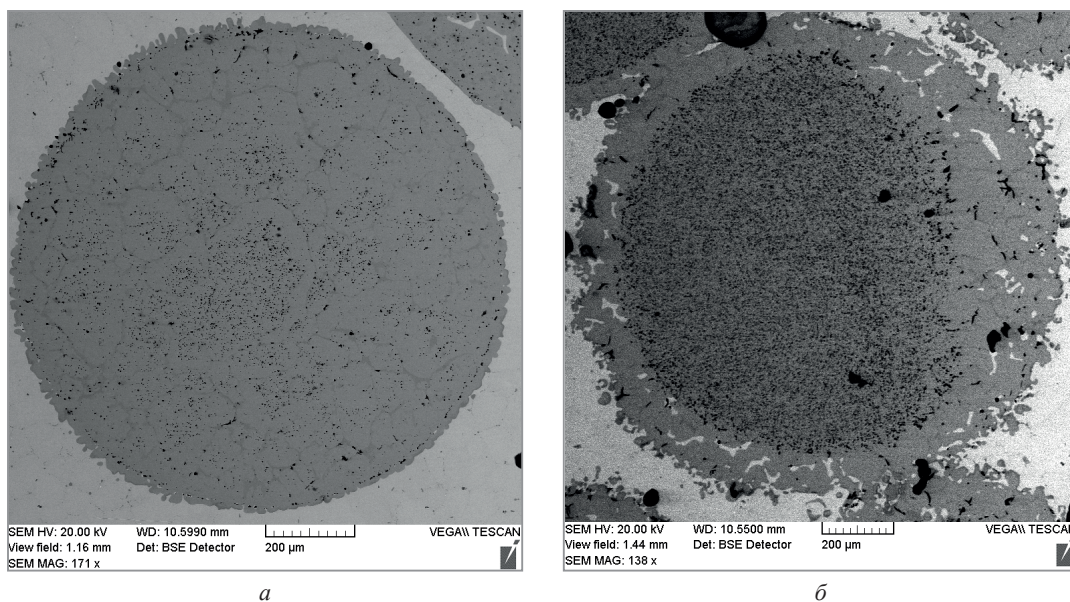


Рис. 5. Микроструктура гранулы сразу после завершения процесса инфильтрации (а) и через 100 мин выдержки при температуре синтеза (б)

Проведенные исследования позволили определить некоторые особенности формирования переходной зоны «гранула – матричный сплав» и установить характер распределения основных элементов в переходной зоне после выдержки при температуре синтеза. Установлено, что для достижения прогнозируемых свойств необходимо максимально точно соблюдать температурно-временные параметры синтеза литых композиционных сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Мальцева Л. А., Шарапова В. А.** Жидкофазные технологии получения композиционных материалов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 120 с.
2. Теория и практика литых композиционных материалов: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. 140 с.
3. **Картонова, Л. В.** О проблеме выбора композиционных материалов для заданных условий эксплуатации / Л. В. Картонова // Теория и практика литых композиционных материалов. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. С. 104–107.

## REFERENCES

1. **Mal'ceva L. A., Sharapova V. A.** *Zhidkofaznye tehnologii poluchenija kompozicionnyh materialov* [Liquid-phase technologies for the production of composite materials]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta Publ., 2013, 120 p.
2. *Teorija i praktika lityh kompozicionnyh materialov* [Theory and practice of cast composite materials]. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii [Collection of proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Vladimir, Izdatel'stvo VIGU Publ., 2019, 140 p.
3. **Kartonova L. V.** O probleme vybora kompozicionnyh materialov dlja zadannyh uslovij jekspluatacii [On the problem of choosing composite materials for given operating conditions]. *Teorija i praktika lityh kompozicionnyh materialov = Theory and practice of cast composite materials*. Vladimir, Izdatel'stvo VIGU Publ., 2019, pp. 104–107.