

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НАНОСЕКУНДНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛИТЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2022 г. В.Б. Деев^{1,2}, Э.Х. Ри³, Е.С. Прусов⁴,
М.А. Ермаков³, Е.Д. Ким³

¹ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

³ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

⁴ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия

Статья поступила в редакцию 30.11.21 г., доработана 08.01.22 г., подписана в печать 11.01.22 г.

Аннотация: Работа направлена на установление влияния наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) с различной амплитудой на формирование структуры литых алюмоматричных композитов псевдобинарной системы Al–Mg₂Si с доэвтектическим (5 мас.% Mg₂Si) и заэвтектическим (15 мас.% Mg₂Si) составами. С повышением амплитуды генератора НЭМИ в композициях с 5 и 15 мас.% Mg₂Si происходит измельчение структурных составляющих матричного сплава (α -твердого раствора и эвтектики), при этом во всем диапазоне опробованных вариантов амплитуды генератора НЭМИ не наблюдали существенных различий в размерах и морфологии первичных кристаллов Mg₂Si в заэвтектической области составов. Предположительно, наблюдаемый характер влияния НЭМИ на структуру композитов в заэвтектической области составов связан с особенностями их кристаллизационного поведения. Температурный диапазон существования двухфазной области L + Mg₂Si значительно ниже температур облучения НЭМИ – по-видимому, в связи с этим НЭМИ не оказывает влияния на термодинамическое состояние границ «первичный кристалл Mg₂Si – расплав». Показано, что перспективным вариантом одновременного модифицирующего воздействия на все структурные составляющие алюмоматричных композитов Al–Mg₂Si (твердый раствор, эвтектика, первичные частицы Mg₂Si) является комбинирование термоскоростной обработки и облучения расплавов НЭМИ, а также дополнительная обработка расплавов НЭМИ в процессе кристаллизации.

Ключевые слова: литые алюмоматричные композиты, система Al–Mg₂Si, наносекундные электромагнитные импульсы, амплитуда генератора, кристаллизация, структурообразование, модифицирование структуры.

Деев В.Б. – докт. техн. наук, проф. факультета машиностроения и автоматизации Уханьского текстильного университета (Textile Road, 1, Hongshan District, Wuhan, 430073, P.R. China), гл. науч. сотр. лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы», проф. кафедры «Обработка металлов давлением» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4).
E-mail: deev.vb@mail.ru.

Ри Э.Х. – докт. техн. наук, проф., гл. науч. сотр., зав. кафедрой литейного производства и технологии металлов (ЛПИТМ) Тихоокеанского государственного университета (ТОГУ) (680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136).
E-mail: erikri999@mail.ru.

Прусов Е.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87).
E-mail: eprusov@mail.ru.

Ермаков М.А. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры ЛПИТМ, ТОГУ.
E-mail: ermakovma@yandex.ru.

Ким Е.Д. – канд. техн. наук, препод. кафедры ЛПИТМ, ТОГУ.

Для цитирования: Деев В.Б., Ри Э.Х., Прусов Е.С., Ермаков М.А., Ким Е.Д. Влияние параметров обработки расплава наносекундными электромагнитными импульсами на формирование структуры литых алюмоматричных композитов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 3. С. 30–37.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-30-37.

Influence of parameters used for melt processing by nanosecond electromagnetic pulses on the structure formation of cast aluminum matrix composites

V.B. Deev^{1,2}, E.Kh. Ri³, E.S. Prusov⁴, M.A. Ermakov³, E.D. Kim³

¹ Wuhan Textile University, Wuhan, China

² National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

³ Pacific National University, Khabarovsk, Russia

⁴ Vladimir State University n.a. A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russia

Received 30.11.2021, revised 08.01.2022, accepted for publication 11.01.2022

Abstract: The paper focuses on establishing the effect of nanosecond electromagnetic pulses (NEPs) with different amplitudes on the formation of the structure of cast aluminum matrix composites of the Al–Mg₂Si pseudo-binary system with hypoeutectic (5 wt.% Mg₂Si) and hypereutectic (15 wt.% Mg₂Si) compositions. As the NEP generator amplitude in composites containing 5 and 15 wt.% Mg₂Si increases, the matrix alloy structural components (α -solid solution and eutectic) are refined, while no significant differences in the sizes and morphology of Mg₂Si primary crystals were observed in the hypereutectic range of compositions. Presumably, the observed nature of the NEP effect on the structure of composites in the hypereutectic region of compositions is associated with the features of their crystallization behavior. The temperature range of the $L + \text{Mg}_2\text{Si}$ two-phase region presence is much lower than NEP irradiation temperatures. Apparently, this is the reason why NEPs have no effect on the thermodynamic state of Mg₂Si primary crystal/melt interfaces. It was shown that a promising option for the simultaneous modifying effect on all structural components of Al–Mg₂Si aluminum matrix composites (solid solution, eutectic, Mg₂Si primary particles) is a combination of thermal-rate treatment and irradiation of melts by NEPs, as well as additional melt processing by NEPs during crystallization.

Keywords: cast aluminum matrix composites, Al–Mg₂Si system, nanosecond electromagnetic pulses, generator amplitude, crystallization, structure formation, structure modification.

Deev V.B. – Dr. Sci. (Eng.), prof. of the School of mechanical engineering and automation of Wuhan Textile University (Textile Road, 1, Hongshan District, Wuhan, 430073, P.R. China), chief researcher of the Laboratory «Ultrafine-grained metallic materials», prof. of the Department of metal forming, National University of Science and Technology «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.

Ri E.Kh. – Dr. Sci. (Eng.), prof., chief researcher, head of the Department of foundry and metal technology, Pacific National University (680035, Russia, Khabarovsk, Tikhookeanskaya str., 136). E-mail: erikri999@mail.ru.

Prusov E.S. – Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of functional and constructional materials technology, Vladimir State University n.a. A.G. and N.G. Stoletovs (600000, Russia, Vladimir, Gorkogo str., 87). E-mail: eprusov@mail.ru.

Ermakov M.A. – Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of foundry and metal technology, Pacific National University. E-mail: ermakovma@yandex.ru.

Kim E.D. – Cand. Sci. (Eng.), lecturer of the Department of foundry and metal technology, Pacific National University.

For citation: Deev V.B., Ri E.Kh., Prusov E.S., Ermakov M.A., Kim E.D. Influence of parameters used for melt processing by nanosecond electromagnetic pulses on the structure formation of cast aluminum matrix composites. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 3. P. 30–37 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-3-30-37.

Введение

В последние годы значительное внимание уделяется разработке и практическому освоению литых композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, представляющих собой гетерофазные материалы многофункционального назначения с введенными извне или синтезированными в расплаве дисперсными армирующими частицами высокомодульных тугоплавких соединений [1–3]. Перспективным вариантом для получения эндогенно-армированных композитов в условиях стандартных литейно-металлургических процессов является псевдобинарная система

Al–Mg₂Si, в которой возможно образование армирующих фаз непосредственно в расплаве в обычных условиях плавки и литья [4]. Формирование фазы Mg₂Si в виде первичных кристаллов происходит только при относительно высоких концентрациях магния и кремния (значительно превышающих таковые в промышленных сплавах системы Al–Mg–Si).

Литые алюмоматричные композиты на основе системы Al–Mg₂Si перспективны как альтернатива традиционно используемым алюминиевым сплавам — в частности, заэвтектическим

силуминам, что обусловлено их высокими трибологическими характеристиками [5]. Однако спектр конструкционных применений таких материалов пока ограничен. Сравнительно крупные размеры и грубая дендритная морфология фазы Mg_2Si в обычных условиях кристаллизации приводят к тому, что достигнутый уровень механических свойств и эффективность армирующего действия в целом оказываются значительно ниже ожидаемых [6]. В этой связи многочисленные исследования направлены на поиск способов модифицирования первичных кристаллов Mg_2Si для изменения их морфологии на равноосную полигональную (или полиэдрическую) и уменьшения средних размеров частиц. Традиционные решения по модифицирующей обработке расплавов композитов $Al-Mg_2Si$ связаны с добавлением различных химических элементов поверхностно-активного действия. В опубликованных работах приводятся сведения о достигнутых положительных эффектах при модифицировании композитов $Al-Mg_2Si$ малыми добавками Sr, Bi, Sb, Li, Ce, Nd и других металлов [7–10].

Другим вариантом модифицирующей обработки сплавов и композитов является наложение на них различных физических воздействий в жидком, кристаллизующемся и твердом состоянии [11–13]. Многочисленные исследования подтверждают, что такой подход позволяет получить мелкозернистую структуру без ввода модифицирующих добавок химического действия. Для управления размерами и морфологией частиц Mg_2Si в литых композиционных материалах опробован ограниченный спектр методов физической обработки расплавов; в частности, сообщается об успешном использовании для этой цели термовременной [14] и ультразвуковой обработки [15]. В этом контексте особый интерес представляют технологические решения, обеспечивающие комплексное модифицирующее воздействие на все элементы структуры композиционных материалов, включая как эндогенные армирующие фазы, так и структурные составляющие матричного сплава (зерна α -твердого раствора, эвтектика).

Целью настоящей работы являлось установление влияния наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) на формирование структуры литых алюмоматричных композитов псевдобинарной системы $Al-Mg_2Si$ с доэвтектическим и заэвтектическим составами.

Методика исследований

Для получения алюмоматричных композитов использовали чистые компоненты: алюминий ($\geq 99,99$ % Al), магний ($\geq 99,9$ % Mg), кремний ($\geq 99,0$ % Si). Плавку проводили в графитовых тиглях в электрической печи сопротивления типа GRAFICARBO (Италия). Предварительно печь была нагрета до температуры 900–910 °С. Загрузку алюминия осуществляли при температуре $t = 750 \pm 760$ °С. После расплавления алюминия в печь подавался чистый аргон до окончания разливки металла. Магний и кремний заворачивали в алюминиевую фольгу и вводили в жидкий алюминий при $t = 750 \pm 760$ °С. Все шихтовые материалы и инструменты предварительно подогревались в печи при $t = 150 \pm 155$ °С.

Источником электромагнитных волн служил генератор «FID Technology» (Германия) со следующими характеристиками: полярность импульсов положительная; изменяемая амплитуда импульсов — до 15 кВ; длительность импульсов — 0,5 нс; изменяемая частота следования генерируемых импульсов — до 1 кГц; задержка выходного импульса относительно фронта импульса запуска — 120 нс. Воздействие НЭМИ на алюминиевый расплав осуществляли путем погружения излучателей при $t = 750$ °С.

Данные экспериментов получены по схеме на рис. 1 при обработке расплава НЭМИ в графитовом тигле вместимостью 2 кг по меди. Масса обрабатываемого расплава составляла 140–170 г. Излучатели представляли собой электроды в виде пластин из нержавеющей стали шириной 10 мм и высотой 140 мм. Размеры электродов подбирали таким образом, чтобы расстояние между ними при обработке было около 20 мм. После обработки расплав перемешивали графитовым стержнем и разливали при $t = 720$ °С в стальную изложницу.

Образцы для сравнительных исследований были вырезаны из слитков на одинаковом расстоянии от торца. Исследование структуры проводили на растровом электронном микроскопе «SU-70 Hitachi» (Япония) с микрорентгеноспектральными энергодисперсионной (EDX) и волнодисперсионной (WDX) приставками. Фазовый анализ полученных образцов в литом состоянии осуществляли на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXS, Германия) в CuK_{α} -излучении с длиной волны 1,5406 Å при скорости вращения гониометра 4 град/мин с шагом 0,05° (2 θ) по методу

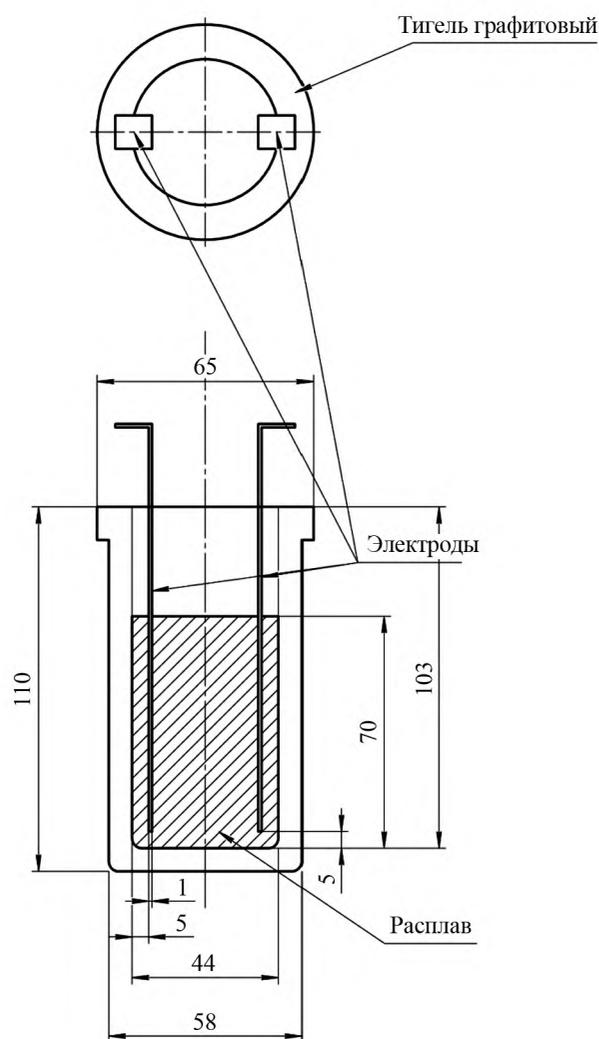


Рис. 1. Схема облучения расплава наносекундными электромагнитными импульсами

Fig. 1. Scheme of irradiation of a melt with nanosecond electromagnetic pulses

Брэгга—Брентано. Идентификацию фаз осуществляли в программном комплексе DiffraC.Suite на основе баз данных Crystallography Open Database.

Результаты и их обсуждение

Дифрактограммы образцов алюмоматричных композитов Al + 5 % Mg₂Si и Al + 15 % Mg₂Si в литом состоянии свидетельствуют о присутствии в обоих образцах фазы алюминиевого твердого раствора и соединения Mg₂Si (рис. 2). При качественно схожем характере дифрактограмм повышение доли силицида магния сопровождается значительным ростом интенсивности дифракционных максимумов, соответствующих этой фазе.

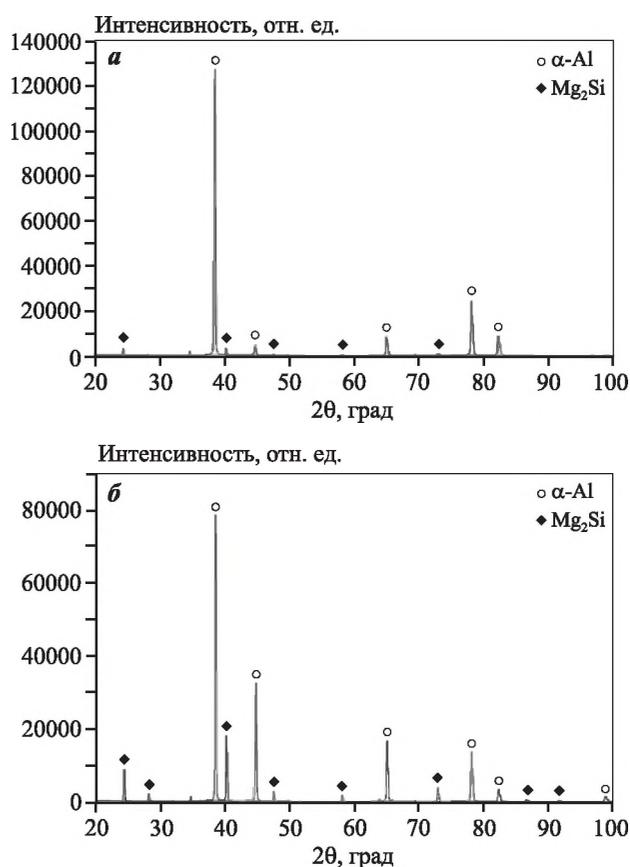


Рис. 2. Дифрактограммы образцов алюмоматричных композитов Al + 5 мас.% Mg₂Si (а) и Al + 15 мас.% Mg₂Si (б) в исходном состоянии

Fig. 2. XRD patterns of samples of aluminum matrix composites Al + 5 wt.% Mg₂Si (a) and Al + 15 wt.% Mg₂Si (b) in the initial state

Микроструктуры литых образцов алюмоматричных композитов при различных режимах облучения расплавов НЭМИ, в сравнении с необработанным состоянием, приведены на рис. 3 и 4.

Видно, что с повышением амплитуды генератора НЭМИ в сплавах с 5 и 15 мас.% Mg₂Si происходит измельчение структурных составляющих матричного сплава, в частности α-твердого раствора и эвтектики. Наибольший модифицирующий эффект был зафиксирован при амплитуде 15 кВ (см. рис. 3, з). При этом во всем диапазоне опробованных вариантов амплитуды генератора НЭМИ не наблюдали существенных различий в размерах и морфологии первичных кристаллов Mg₂Si. Размеры образовавшихся частиц во всех случаях находились в интервале 20—30 мкм. Характер воздействия НЭМИ на изменение морфологии и дисперсности структурных составляющих матрицы

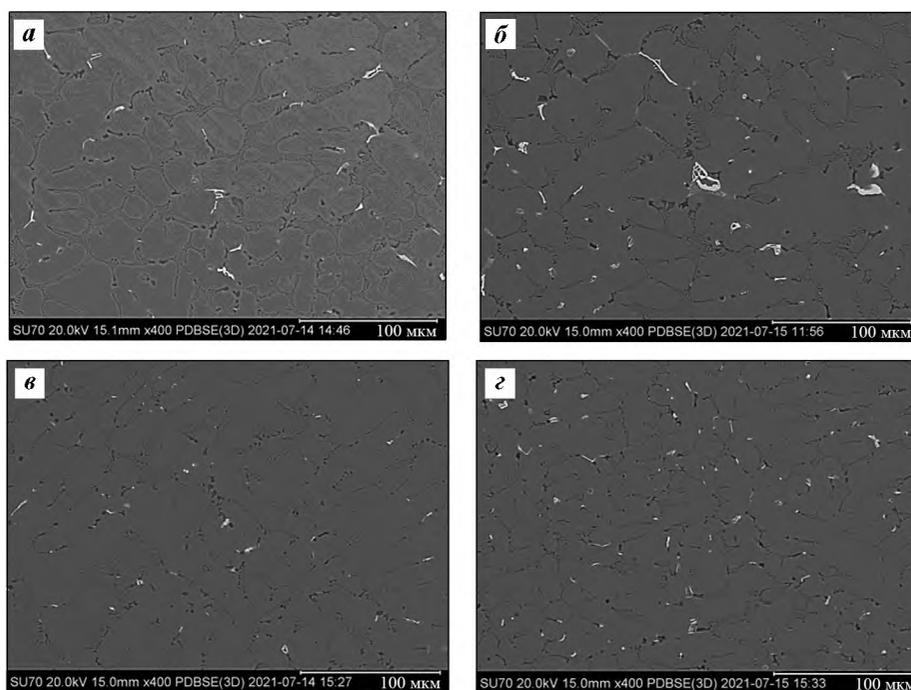


Рис. 3. Репрезентативные снимки структуры алюмоматричного композита Al + 5 мас.% Mg₂Si в исходном состоянии (а) и после обработки расплавов НЭМИ с амплитудой 5 кВ (б), 10 кВ (в) и 15 кВ (г)

Fig. 3. Representative images of the structure of the aluminum matrix composite Al + 5 wt.% Mg₂Si in the initial state (a) and after treatment of the melts by NEPs with an amplitude of 5 kV (б), 10 kV (в), and 15 kV (г)

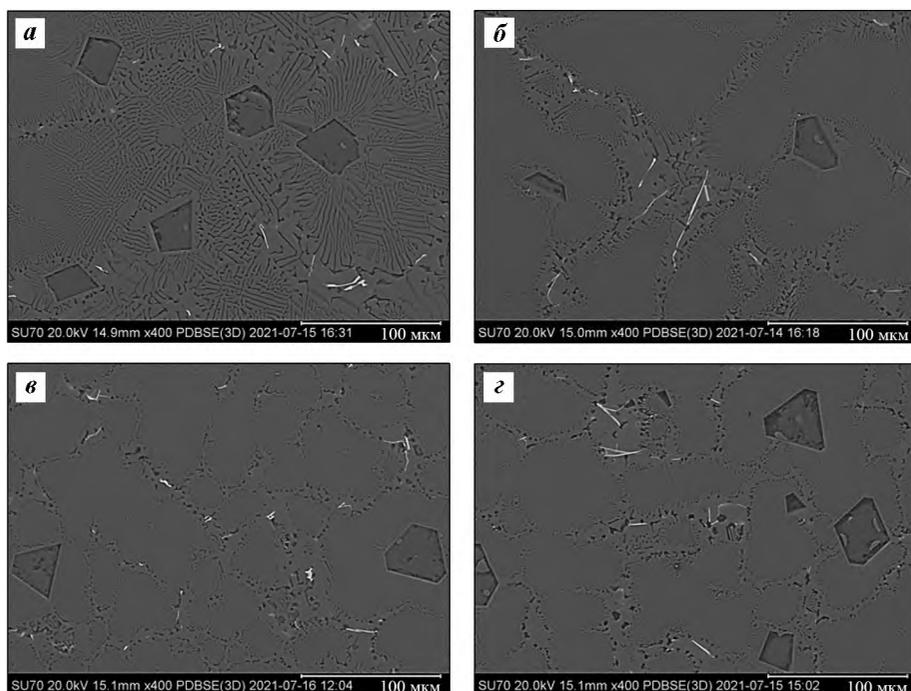


Рис. 4. Репрезентативные снимки структуры алюмоматричного композита Al + 15 мас.% Mg₂Si в исходном состоянии (а) и после обработки расплавов НЭМИ с амплитудой 5 кВ (б), 10 кВ (в) и 15 кВ (г)

Fig. 4. Representative images of the structure of the aluminum matrix composite Al + 15 wt.% Mg₂Si in the initial state (a) and after treatment of the melts by NEPs with an amplitude of 5 kV (б), 10 kV (в), and 15 kV (г)

качественно схож с результатами, полученными ранее при облучении расплава низколегированного алюминиевого сплава AA511 [16].

Систему Al—Mg₂Si принято термодинамически описывать как бинарную псевдоэвтектическую систему с точкой псевдоэвтектики при 13,9 мас.% Mg₂Si (рис. 5). При превышении этой концентрации кристаллы Mg₂Si выпадают в переходной двухфазной области как первичная фаза. В области доэвтектических составов псевдобинарной системы Al—Mg₂Si (5 мас.% Mg₂Si) кристаллизация начинается в двухфазной области $L + \alpha$ -Al.

При 15 мас.% фазы Mg₂Si композит находится в заэвтектической области, при этом начало кристаллизации происходит в двухфазной области $L + Mg_2Si$, существующей в интервале температур 594—578 °С. Первичная фаза Mg₂Si в алюмоматричных композитах Al—Mg₂Si может быть представлена широким многообразием характерных морфологий, включая октаэдры, дендриты, нерегулярные многогранники и др., что обусловлено особенностями роста кристаллов [17—19]. При относительно низких концентрациях магния и кремния в заэвтектическом композите Al—Mg₂Si фаза Mg₂Si имеет форму правильных многогранников и небольшие размеры. При повышении содержания Mg и Si (суммарная концентрация — около 18 мас.% и выше) кристаллы Mg₂Si вырастают до

весьма крупных размеров, а их форма изменяется на грубую дендритную с острыми краями [20]. Такая форма приводит к концентрации напряжений и инициирует зарождение трещин, снижая механические свойства композитов и ограничивая их потенциальные области применения. Переход морфологии первичной фазы Mg₂Si от дендритной к нерегулярным или регулярным формам многогранников может быть обусловлен термодинамической неустойчивостью границ раздела твердой и жидкой фаз при различных условиях теплоотвода. Изменение концентрационного переохлаждения приводит к изменению формы, в которой развивается граница раздела фаз, что и обуславливает морфологические переходы первичных кристаллов Mg₂Si.

Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на металлические расплавы описывается с позиций квазикристаллической модели, причем предполагается, что в результате облучения возникают флуктуации энергии, меняется структура ближнего порядка в расположении атомов и сокращается продолжительность их существования, снижается температура разупорядочения структуры [21—24]. При этом увеличение степени переохлаждения расплава приводит к повышению скорости образования центров зарождения твердой фазы в единице объема расплава. Предположительно, наблюдаемый характер влияния НЭМИ на структуру композитов в заэвтектической области составов связан с особенностями их кристаллизационного поведения. Температурный диапазон существования двухфазной области $L + Mg_2Si$ значительно ниже температур облучения НЭМИ — по-видимому, в связи с этим НЭМИ не оказывает влияния на термодинамическое состояние границ «первичный кристалл Mg₂Si — расплав».

Таким образом, при температурных режимах плавки, используемых для промышленных сплавов системы Al—Mg—Si, облучение расплавов наносекундными электромагнитными импульсами в опробованном диапазоне амплитуд генератора оказывает модифицирующее воздействие только на элементы структуры матричного сплава, но практически не отражается на изменении размеров и морфологии первичных кристаллов фазы Mg₂Si. В то же время ранее полученные результаты [25] по температурно-временной обработке расплавов алюмоматричных композитов системы Al—Mg₂Si показали высокую эффективность тепловых воздействий на композиционные распла-

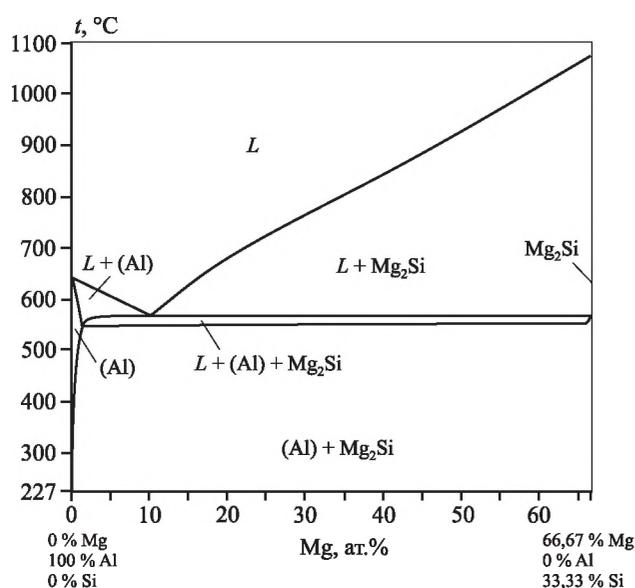


Рис. 5. Псевдобинарная диаграмма Al—Mg₂Si (по данным базы MSI Eureka)

Fig. 5. Pseudo-binary diagram Al—Mg₂Si (according to MSI Eureka database)

вы с позиций управления структурно-морфологическими параметрами эндогенных армирующих частиц. Основываясь на полученных данных, целесообразно применение комплексных воздействий на композиционные расплавы температурно-временной (термоскоростной) обработкой и облучением наносекундными электромагнитными импульсами, что позволит влиять на дисперсность и морфологию всех фазовых составляющих алюмоматричных композитов Al—Mg₂Si. Другим вариантом, требующим дополнительных исследований и выходящим за рамки данной работы, может быть облучение расплавов НЭМИ в процессе кристаллизации.

Заключение

Исследовано влияние обработки расплавов НЭМИ на процессы структурообразования алюмоматричных композитов системы Al—Mg₂Si. При этом облучение расплавов НЭМИ проводили в диапазоне амплитуд генератора от 5 до 15 кВ.

Показано, что облучение расплавов НЭМИ приводит к измельчению структурных составляющих матричного сплава, но практически не влияет на изменение размеров и морфологии первично кристаллизующихся частиц Mg₂Si. Это объясняется особенностями кристаллизационного поведения композитов — так как температурный диапазон существования двухфазной области L + Mg₂Si значительно ниже температур облучения, НЭМИ не оказало влияния на термодинамическое состояние границ «первичный кристалл Mg₂Si — расплав».

Показано, что перспективным вариантом одновременного модифицирующего воздействия на все структурные составляющие алюмоматричных композитов Al—Mg₂Si (твердый раствор, эвтектика, первичные частицы Mg₂Si) является комбинирование термоскоростной обработки и облучения расплавов НЭМИ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00687).

Acknowledgments: *This research was funded by the Russian Science Foundation (Project № 20-19-00687).*

Литература/References

1. Mortensen A., Llorca J. Metal matrix composites. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2010. Vol. 40. Iss. 1. P. 243—270. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070909-104511.
2. Rohatgi P.K., Ajay Kumar P., Chelliah N.M., Rajan T.P.D. Solidification processing of cast metal matrix composites over the last 50 years and opportunities for the future. *JOM.* 2020. Vol. 72. No. 8. P. 2912—2926. DOI: 10.1007/s11837-020-04253-x.
3. Mavhungu S.T., Akinlabi E.T., Onitiri M.A., Varachia F.M. Aluminum matrix composites for industrial use: Advances and trends. *Procedia Manuf.* 2017. Vol. 7. P. 178—182. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.045.
4. Georgatis E., Lekatou A., Karantzalis A.E., Petropoulos H., Katsamakis S., Poulia A. Development of a cast Al—Mg₂Si—Si in situ composite: Microstructure, heat treatment, and mechanical properties. *J. Mater. Eng. Perform.* 2013. Vol. 22. P. 729—741.
5. Moharami A., Razaghian A., Babaei B. Role of Mg₂Si particles on mechanical, wear, and corrosion behaviors of friction stir welding of AA6061-T6 and Al—Mg₂Si composite. DOI: 10.1177/0021998320925528.
6. Liu Z., Xie M., Liu X.M. Microstructure and properties of in-situ Al—Si—Mg₂Si composite prepared by melt superheating. *Appl. Mech. Mater.* 2011. Vol. 52. P. 750—754. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.750.
7. Nordin N.A., Farahany S., Ourdjini A., Abu Bakar T.A., Hamzah E. Refinement of Mg₂Si reinforcement in a commercial Al—20%Mg₂Si in-situ composite with bismuth, antimony and strontium. *Mater. Charact.* 2013. Vol. 86. P. 97—107.
8. Si Y., Kevluzov D.S. Research on the long-lasting and remelting properties of Nd modification effect on cast Al—Mg₂Si metal matrix composite. *Mater. Sci. Forum.* 2020. Vol. 1001. P. 196—201. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1001.196.
9. Khorshidi R., Honarbakhsh Raouf A., Emamy M., Campbell J. The study of Li on the microstructure and tensile properties of cast Al—Mg₂Si metal matrix composite. *J. Alloys Compd.* 2011. Vol. 509. P. 9026—9033.
10. Zhao Y.G., Qin Q.D., Zhou W., Liang Y.H. Microstructure of the Ce-modified in situ Mg₂Si/Al—Si—Cu composite. *J. Alloys Compd.* 2005. Vol. 389. P. L1—L4.
11. Deev V.B., Prusov E.S., Kutsenko A.I. Theoretical and experimental evaluation of the effectiveness of aluminum melt treatment by physical methods. *Metall. Ital.* 2018. No. 2. P. 16—24.
12. Konovalov S.V., Danilov V.I., Zuev L.B., Filip'ev R.A., Gromov V.E. On the influence of the electrical potential on the creep rate of aluminum. *Phys. Solid State.* 2007. Vol. 49 (8). P. 1457—1459. DOI: 10.1134/S1063783407080094.
13. Aryshenskii E., Hirsch J., Yashin V., Konovalov S., Kawalla R. Influence of local inhomogeneity of thermomechanical treatment conditions on microstructure evolution in aluminum alloys. *J. Mater. Eng. Perform.* 2018.

- Vol. 27 (12). P. 6780—6799. DOI: 10.1007/s11665-018-3733-8.
14. *Nordin N.A., Abubakar T., Hamzeh E., Farahany S., Ourdjini A.* Effect of superheating melt treatment on Mg₂Si particulate reinforcement in Al—Mg₂Si—Cu in situ composite. *Procedia Eng.* 2017. Vol. 184. P. 595—603.
 15. *Zhang J.T., Zhao Y.G., Xu X.F., Liu X.B.* Effect of ultrasonic on morphology of primary Mg₂Si in in-situ Mg₂Si/Al composite. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.* 2013. Vol. 23. P. 2852—2856.
 16. *Деев В.Б., Ри Э.Х., Прусов Е.С., Ермаков М.А., Гончаров А.В.* Модифицирование литейных алюминиевых сплавов системы Al—Mg—Si обработкой жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2021. Т. 27. No. 4. С. 32—41.
Deev V.B., Ri E.H., Prusov E.S., Ermakov M.A., Goncharov A.V. Grain refinement of casting aluminum alloys of the Al—Mg—Si system by processing the liquid phase using nanosecond electromagnetic pulses. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2021. Vol. 62. No. 5. P. 522—530.
 17. *Li J., An Q., Wu S., Li F., Lü S., Guo W.* Relationship of Mg₂Si morphology with Mg₂Si content and its effect on properties of in-situ Mg₂Si/Al—Cu composites. *J. Alloy Compd.* 2019. Vol. 808. Paper 151771.
 18. *Li C., Wu Y.Y., Li H., Liu X.F.* Morphological evolution and growth mechanism of primary Mg₂Si phase in Al—Mg₂Si alloys. *Acta Mater.* 2011. Vol. 59. P. 1058—1067. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.10.036.
 19. *Li C., Wang C., Ju H., Xue X., Zha M., Wang H.* Prediction of modified morphology for primary Mg₂Si induced by trace-element adsorption: A first-principles study. *Materialia.* 2020. Vol. 14. Paper 100875. DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100875.
 20. *Bhandari R., Mallik M., Mondal M.K.* Microstructure evolution and mechanical properties of in situ hypereutectic Al—Mg₂Si composites. *AIP Conf. Proc.* 2019. Vol. 2162. Paper 020145. DOI: 10.1063/1.5130355.
 21. *Deev V., Ri E., Prusov E.* Effect of aluminum melt treatment by nanosecond electromagnetic pulses on structure and properties of castings. In: *Proc. 73-rd World foundry congress «Creative Foundry» (WFC 2018)* (Polish Foundrymen's Association). 2018. P. 155—156.
 22. *Krymsky V., Shaburova N.* Applying of pulsed electromagnetic processing of melts in laboratory and industrial conditions. *Materials.* 2018. Vol. 11. No. 6. Paper 954.
 23. *Ri E.K., Hosen R., Ermakov M.A., Knyazev G.A., Dzhou B.L., Ri V.E.* Solidification of low-silicon iron under the action of nanosecond electromagnetic pulses. *Steel Trans.* 2013. Vol. 43. No. 8. P. 471—473.
 24. *Krymsky V.V., Shaburova N.A., Litvinova E.V.* Microstructure and properties of cast metal treated with electromagnetic pulses while in molten state. *Mater. Sci. Forum.* 2016. Vol. 843. P. 106—110.
 25. *Deev V., Prusov E., Rakhuba E.* Physical methods of melt processing at production of aluminum alloys and composites: Opportunities and prospects of application. *Mater. Sci. Forum.* 2019. Vol. 946. P. 655—660. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.655.