

Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В. Термокинетический расчет фазового состава сварных швов алюминиевого сплава 1420 системы Al–Mg–Li. Часть 2. Термокинетический расчет фазового состава сварного шва, выполненного проволокой Св-АМГ-6 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 62–69. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.08

Fedoseeva E.M., Olshanskaya T.V. Thermokinetic analysis of phase composition of welds aluminum alloy 1420 system Al–Mg–Li. Part 2. Thermokinetic analysis of phase composition of the weld made with AMG-6 wire. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 62–69. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 2, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.08

УДК 621.79

Е.М. Федосеева, Т.В. Ольшанская

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФАЗОВОГО СОСТАВА СВАРНЫХ ШВОВ
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1420 СИСТЕМЫ AL–MG–LI.
ЧАСТЬ 2. ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФАЗОВОГО СОСТАВА
СВАРНОГО ШВА, ВЫПОЛНЕННОГО ПРОВОЛОКОЙ СВ-АМГ-6

Алюминиевые сплавы 1420 относятся к сложной системе легирования Al–Mg–Li. Применение сплавов данной группы не ограничивается авиационной промышленностью, эти сплавы используют и в других областях для создания сварных конструкций. Технологии сварки алюминиевых сплавов активно развиваются, несмотря на ряд возникающих трудностей. Для каждого способа сварки трудности, как правило, преодолимы при использовании разных технологических решений. Среди таких решений достаточно важную роль играет сварочный материал – сварочная проволока, обеспечивающая формирование сварного шва. Рассмотрены металлографические исследования и термокинетические расчеты фазового состава сварного шва алюминиевого сплава 1420, полученного аргонодуговой сваркой с применением сварочной проволоки Св-АМГ-6. Металлографические исследования выявили дендритное строение сварного шва алюминиевого сплава сложной системы легирования с выделением фаз, заметно меняющимся в областях от центра шва к линии сплавления. Термокинетические расчеты позволили установить, что температура начала кристаллизации алюминия в сварочной ванне $T_1 = 622$ °С и температура конца кристаллизации $T_3 = 551,5$ °С. Выявлено, что при температуре $T = 642$ °С из жидкости начинает образовываться фаза $Al_6(Mn, Fe)$, а к моменту начала кристаллизации Al в сварочной ванне его содержание в расплаве шва составляет 1,39 %. К моменту конца кристаллизации происходит выделение следующих фаз: Al_3Mg_2 – 14,29 %, $Al_6(Mn, Fe)$ – 4,64 %, $(Al-Mg-Zn-Cu)$ – 1,62 %, Mg_2Si – 1,09 %, $Al_3(Fe)$ – 0,05 %.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварка, сварные соединения, сварной шов, аргонодуговая сварка, механические свойства, термокинетические диаграммы, легирующие элементы, изотермические диаграммы, фазовый состав.

E.M. Fedoseeva, T.V. Olshanskaya

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THERMOKINETIC ANALYSIS OF PHASE COMPOSITION
OF WELDS ALUMINUM ALLOY 1420 SYSTEM AL–MG–LI.
PART 2. THERMOKINETIC ANALYSIS OF PHASE COMPOSITION
OF THE WELD MADE WITH AMG-6 WIRE

Aluminum alloys 1420 belong to the complex alloying system Al–Mg–Li. The use of alloys of this group is not limited to the aviation industry, and also finds in other areas to create welded structures. Welding technologies of aluminum alloys are actively developing, in spite of a number of difficulties arising in the welding of aluminum alloys. For each welding method, the difficulties are usually overcome by using different technological solutions. Among these solutions, the welding material – the welding wire, which provides the formation of the weld, plays a rather important role. The paper considers metallographic studies and thermokinetic calculations of the phase composition of a welded seam of aluminum alloy 1420 obtained by argon-arc welding with the use of welding wire Sv-Amg-6. Metallographic studies revealed the dendritic structure of the weld of aluminum alloyed complex alloying system with the separation of phases significantly changing in the areas from the center of the weld to the fusion line. Thermokinetic and kinetic calculations made it possible to establish that the start temperature of aluminum crystallization in the weld pool $T_1 = 622$ °C and the end temperature of crystallization $T_3 = 551.5$ °C. It has been revealed that at temperature $T = 642$ °C the phase $Al_6(Mn, Fe)$ starts to form from the liquid, and by the moment of the beginning of crystallization of Al in the weld pool its content in the weld melt is 1.39 %. By the end of crystallization the following phases are released: Al_3Mg_2 14.29 %, $Al_6(Mn, Fe)$ 4.64 %, $(Al-Mg-Zn-Cu)$ 1.62 %, Mg_2Si 1.09 %, $Al_3(Fe)$ 0.05 %.

Keywords: aluminum alloys, welding, welded joints, weld seam, argon arc welding, mechanical properties, thermokinetic diagrams, alloying elements, isothermic diagrams, phase composition.

Большинство алюминиевых сплавов, применяемых в разных отраслях промышленности, представляют собой сложные системы. Помимо основных легирующих элементов различного рода они включают в себя такие компоненты, как кремний, литий, скандий и др. Алюминиевый сплав Al–Mg–Li относится к сложной системе легирования. Известно, что алюминиевые сплавы, легированные литием, обладают пониженной плотностью и повышенным модулем упругости [1–4]. Их применение в основном относится к авиационной промышленности, однако сплавы данной группы находят применение и в других областях. Достаточно активно разрабатываются технологии сварки алюминий-литиевых сплавов различными способами: сварка трением с перемешиванием, лазерная сварка, электронно-лучевая сварка, аргодуговая сварка [5–8]. Однако следует учитывать особенности сварки алюминиевых сплавов. Исследования свариваемости алюминиевых сплавов, в том числе сплавов сложной системы легирования, наиболее распространенным дуговым источником нагрева показали, что основные трудности их сварки заключаются в следующем: 1) склонность сплавов к образованию кристаллизационных трещин; 2) наличие пор и оксидных включений; 3) образование крупнозернистой структуры в шве, рекристаллизация и оплавление зерен в околошовной зоне; 4) возникновение высоких напряжений и деформаций [9–13]. Еще одним фактором, который следует учитывать при сварке алюминиевых сплавов, является теплопроводность. Теплопроводность характеризует скорость отвода теплоты от источника нагрева. Теплопроводность алюминиевых сплавов в 3–3,5 раза выше, чем стали. Однако легирующие и сопутствующие примеси снижают теплопроводность сплавов. При плавлении основного металла в процессе сварки этот показатель оказывается часто более важным, чем температура плавления.

Для каждого способа сварки трудности, как правило, преодолимы при использовании разных технологических решений. Среди таких решений достаточно важную роль играет сварочный материал – сварочная проволока, обеспечивающая формирование сварного шва. Как известно, требуемый для легирования состав проволоки выбирают с учетом химического состава материала и доли участия проволоки в образовании шва. Однако при воздействии высоких температур в процессе термического цикла сварки часть легирующих элементов улетучивается с поверхности металла шва и сварочной проволоки. Формирование фазовых составляющих будет разным при разных технологических условиях и условиях протекания

сварочного процесса, а также в зависимости от разного химического состава сварочных материалов. Выделение тех или иных фаз при формировании шва непосредственно влияет на его структуру и свойства [14–18].

Целью работы является определение фазового состава сварного шва при сварке алюминиевого сплава сложной системы Al–Mg–Li с применением сварочных проволок разного состава.

В работе рассмотрены сварные соединения сплава 1420 сложной системы легирования Al–Mg–Li, выполненные аргодуговой сваркой с использованием сварочной проволоки Св-АМг-6. Представлены металлографические исследования и термокинетические расчеты фазового состава сварного шва. Анализ проводился с помощью термодинамического расчета фазового состава сплава в программе JMatPro. Расчет производился в интервале значений температуры от 700 до 20 °С с шагом 5 °С.

Металлографические исследования полученных сварных соединений выполнены на микроскопе АЛТАМІ. Анализ металла проводили на шлифах, подготовленных для исследования микроструктуры. Перед проведением анализа микроструктуры сварных швов микрошлифы были обработаны реактивом Келлера.

Сплав 1420 имеет следующий состав:

магний (Mg) – 5,0–6,0 %; литий (Li) – 1,9–2,3 %; цирконий (Zr) – 0,09–0,15 %; кремний (Si) – 0,1–0,3 %. Примесей, не более: железо (Fe) – 0,3 %; титан (Ti) – 0,1 %; марганец (Mn) – 0,3 %; натрий (Na) – 0,05 %; остальное алюминий (Al).

Сварочная проволока АМг-6:

магний (Mg) – 5,8–6,8 %; медь (Cu) – 0,1 %, цинк (Zn) – 0,2 %; кремний (Si) – 0,4 %; железо (Fe) – 0,4 %; титан (Ti) – 0,1–0,2 %; марганец (Mn) – 0,5–0,8 %; бериллий (Be) – 0,002–0,005 %; остальное алюминий (Al) (ГОСТ 7871–2019 «Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов»).

Некоторые результаты металлографических исследований сварных соединений сплава 1420 представлены в источнике [19], однако следует отметить, что микроструктура сварных швов (рис. 1) в нетравленном виде представляет собой однородную дендритную структуру с выделением определенных фаз. При этом распределение и интенсивность данных фаз достаточно отличаются в разных областях шва, в направлении от центра к линии сплавления и в зоне термического влияния соответственно.

В некоторых участках сварного шва, ближе к линии сплавления обнаружены дефекты в виде пор (рис. 2). Их образование, возможно, обусловлено

наличием некоторых факторов, возникающих при сварке алюминиевых сплавов, в том числе сложной системой легирования, о чем говорилось выше.

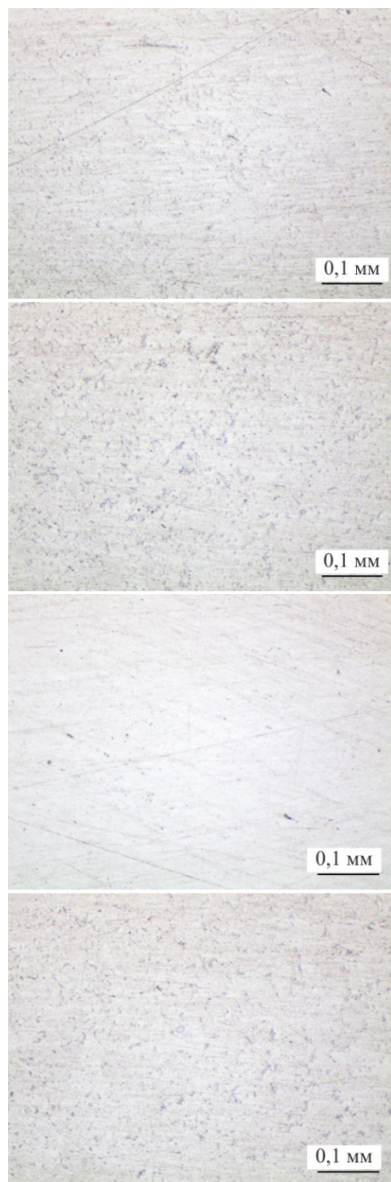
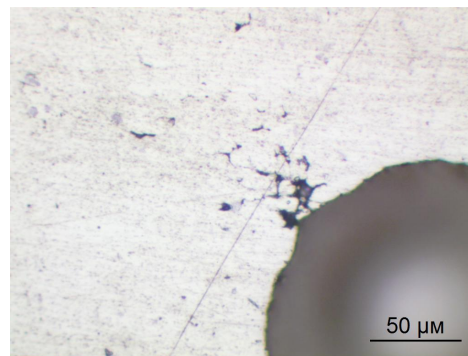


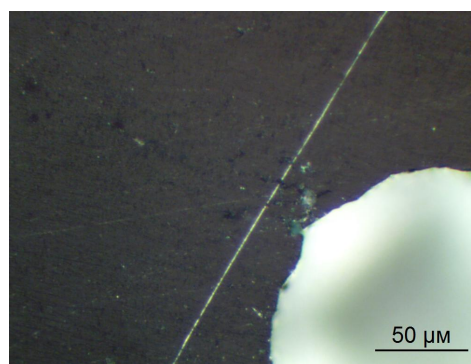
Рис. 1. Микроструктура металла шва сварного соединения сплава 1420, выполненного аргонодуговой сваркой проволокой АМг-6; нетравленое состояние, увеличение $\times 200$

Исследование проведено в светлом поле и в поляризованном свете, что дает возможность детально изучить структуру дефекта. Поскольку оптические свойства анизотропных микрообъектов различны в разных направлениях и проявляются по-разному в зависимости от ориентации этих объектов относительно оси объектива и плоскости поляризации света, падающего на них [20].

Анализ образования возможных фаз при равновесной кристаллизации в сварном шве сплава 1420 системы Al–Mg–Li при сварке проволоки Св-АМг6 показал следующие результаты.



а



б

Рис. 2. Дефект в виде поры в сварном шве, увеличение $\times 1000$: а – светлое поле; б – поляризованный свет

На рис. 3 представлена термокинетическая диаграмма фазового состава сплава сварного шва, на которой наблюдается выделение фаз при определенных значениях температуры, что характерно для процессов кристаллизации. Поскольку равновесная кристаллизация предполагает однородность состава фаз, которая достигается в жидкой фазе частично в результате перемешивания, а частично в результате диффузии. Выравнивание же концентраций в кристаллической фазе происходит только вследствие диффузии. Поскольку скорость последней в твердой фазе обычно мала, для достижения равновесного состояния требуется значительное время [21].

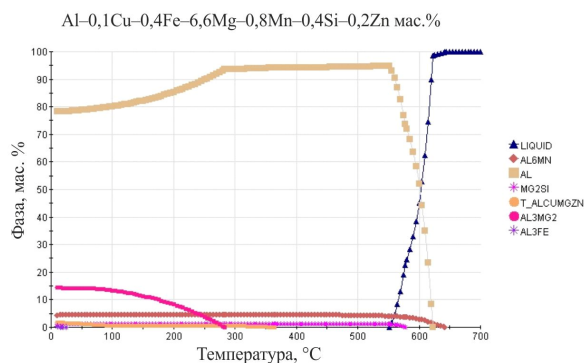


Рис. 3. Термокинетический расчет фазового состава сварного шва сплава 1420 в равновесном состоянии

Ниже представлена расшифровка фаз, указанных на термокинетической кривой по результатам расчета в программе JMatPro:

AL6MN	Al ₆ (Mn,Fe)
MG2SI	Mg ₂ Si
T_ALCUMGZN	(Al–Mg–Zn–Cu)
AL3MG2	Al ₃ Mg ₂
AL3FE	Al ₃ Fe

Установлено, что температура начала кристаллизации алюминия в сварочной ванне $T_L = 622$ °С, температура конца кристаллизации $T_S = 551,5$ °С.

До начала кристаллизации Al при температуре $T = 642$ °С из жидкости начинает образовываться фаза Al₆(Mn, Fe). К моменту начала кристаллизации Al (622 °С) в сварочной ванне его содержание в расплаве шва составляет 1,39 %.

При температуре $T = 577$ °С, когда основная доля Al (около 74 %) уже находится в твердом состоянии, начинает образовываться фаза составляющая Mg₂Si, а содержание Al₆(Mn, Fe) увеличивается до 3,71 %.

К моменту конца кристаллизации Al (551 °С) содержание Al₆(Mn, Fe) в сплаве составляет 4,13 %, а Mg₂Si – 1,04 %.

Выделение фазы (Al–Mg–Zn–Cu) из твердого раствора начинается при температуре $T = 364$ °С, при этом содержание Al₆(Mn, Fe) в сплаве составляет 4,69 %, а Mg₂Si – 1,09 %.

При температуре $T = 283$ °С начинается выделение Al₃Mg₂, содержание образованных ранее фаз: Al₆(Mn, Fe) – 4,71 %, Mg₂Si – 1,09 %, (Al–Mg–Zn–Cu) – 0,63 %.

Выделение фазы Al₃(Fe) возможно при $T = 24$ °С.

При комнатной температуре получено следующее расчетное соотношение фаз: Al₃Mg₂ – 14,29 %, Al₆(Mn,Fe) – 4,64 %, (Al–Mg–Zn–Cu) – 1,62 %, Mg₂Si – 1,09 %, Al₃(Fe) – 0,05 % (рис. 4).

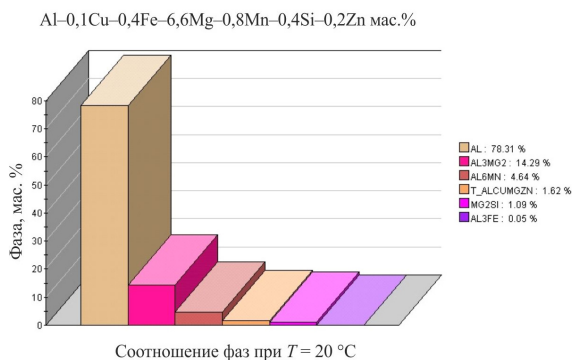


Рис. 4. Расчетное соотношение фаз в сплаве 1420 при $T = 20$ °С

Таким образом, после равновесной кристаллизации в сплаве будут присутствовать: Al₃Mg₂ около 15 %, Al₆(Mn, Fe) около 5 %, более 1 % фазы (Al–Mg–Zn–Cu) и фазы Mg₂Si.

Расчетное содержание элементов в образующихся фазах при температуре 20 °С представлено на рис. 5 листинга программы.

Summary of data at T= 20.0 C							
Weight %	AL	CU	FE	MG	MN	SI	ZN
AL6MN	74.56	<0.01	8.21	<0.01	17.23	-	-
AL	99.68	<0.01	<0.01	0.32	<0.01	<0.01	<0.01
MG2SI	-	-	-	63.38	-	36.62	-
T_ALCUMGZN	51.9	6.17	-	31.74	-	-	10.18
AL3MG2	63.75	<0.01	-	36.01	-	-	0.24
AL3FE	59.17	<0.01	40.69	-	0.13	<0.01	-
Values have been rounded ... , to see more digits mouse over the values							
Mu	-8305.53	-84322.29	-109262.66	-14465.99	-109063.26	-58616.09	-33282.16
Activity	0.0331	9.45E-16	3.4E-20	0.00265	3.69E-20	3.59E-11	1.17E-6
Enthalpy H: -44.33448 J/g				Entropy S: 1.06246 J/(g K)			
Total Gibbs Energy G: -355.79488 J/g				Heat Capacity Cp: 0.92840 J/(g K)			

Рис. 5. Листинг программы расчета содержания элементов в фазах сварных швов сплава 1420

В связи с тем, что ускоренная кристаллизация рассматривается как перспективный путь повышения ряда свойств, таких как прочность, жаропрочность, коррозионная стойкость и ряд других характеристик алюминиевых сплавов [21], выполнен анализ образования возможных фаз при ускоренной кристаллизации сплава.

С использованием модуля построения CCT и TTT (термокинетических и изотермических) диаграмм в программе JMatPro произведены расчет и построение диаграмм (рис. 6 и 7) с температуры несколько ниже конца кристаллизации – 550 °С.

При расчете в программе учитывается, что при данной температуре уже присутствуют фазы: Al – 95,29 %, Al₆(Mn, Fe) – 3,6 %, Mg₂Si – 1,11 %.

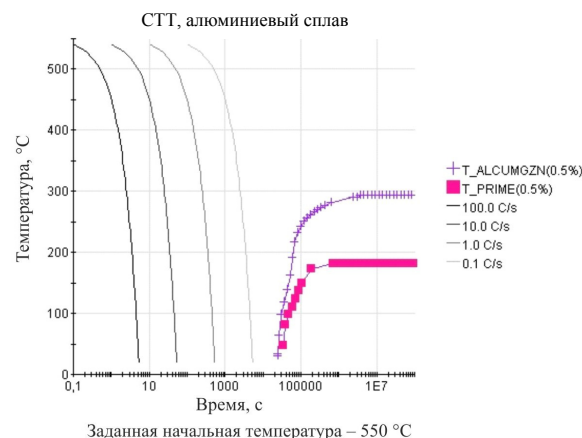


Рис. 6. Термокинетическая диаграмма сварного шва сплава 1420 проволокой АМг-6 при ускоренном охлаждении

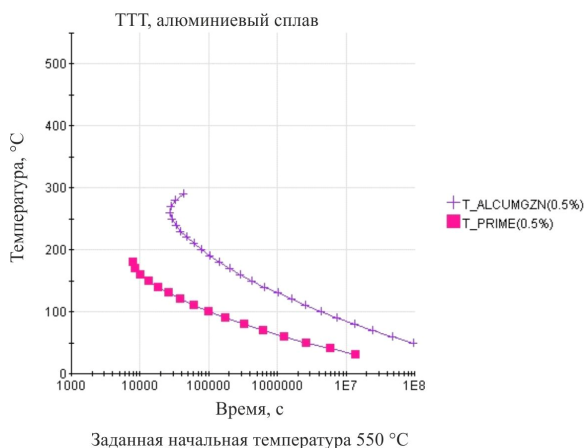


Рис. 7. Изотермическая диаграмма сварного шва сплава 1420 при ускоренной кристаллизации

Расчет показал, что при непрерывном охлаждении могут выделяться следующие фазы, при их содержании более 0,5 %: T_ALCUMGZN (Al–Mg–Zn–Cu) и T_PRIME (Al₂Mg₃Zn₃). Их образование возможно при очень медленных скоростях охлаждения – ниже 0,1 °C/с.

Результаты металлографических исследований микроструктуры сварных швов после травления представлены на рис. 8. Анализ при разном освещении (в светлом поле и в поляризованном свете) позволяет

выявить границы зерен металла шва, выделить разные фазы внутри зерен, а также по границе зерна.

Таким образом, при ускоренном охлаждении (ускоренной кристаллизации) сплава в структуре будут присутствовать фазы, образовавшиеся выше температуры конца кристаллизации: Al₆(Mn, Fe), Mg₂Si.

Проведенные расчеты позволили также оценить изменение механических свойств в зависимости от скорости охлаждения (рис. 9).

Сравнение полученных значений твердости (Hardness) и напряжения при растяжении (Tensile Stress) с допустимым напряжением при возрастании скорости охлаждения (Initial Cooling Rate) показывает абсолютно экспоненциальное их увеличение.

Аналогичные результаты получены и для расчета значений механических характеристик в основном сплаве 1420 [22]. Это, возможно, связано с тем, что при установленных скоростях охлаждения твердый раствор остается насыщенным магнием. Как известно [23], при медленном охлаждении магний на начальном этапе переходит в твердый раствор (при растворении эвтектики). Кроме того, выделенные интерметаллидные фазы металла шва, составляющими которых являются описанные выше элементы, могут являться так называемыми упрочняющими фазами.

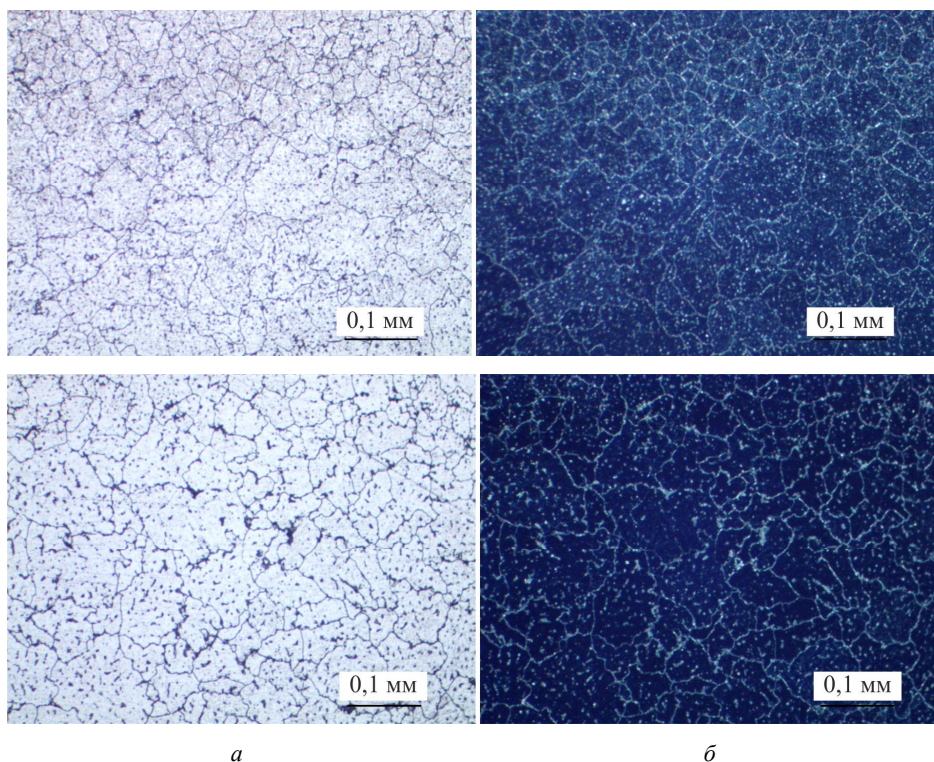


Рис. 8. Микроструктура сварного шва алюминиевого сплава системы Al–Mg–Li, увеличение ×200; а – светлое поле; б – поляризованный свет

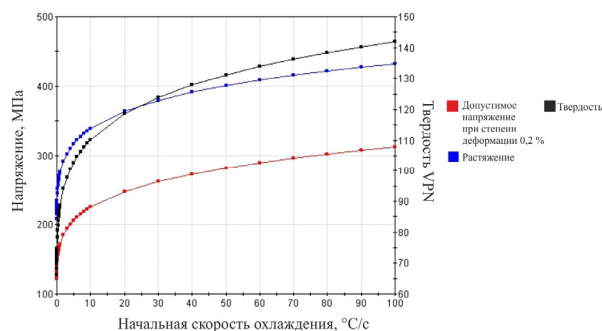


Рис. 9. Изменение механических свойств в зависимости от скорости охлаждения

Выводы

По результатам металлографических исследований и термокинетических расчетов в равновесном состоянии установлено, что структура металла швов сплава 1420, полученных при сварке проволокой АМг-6, имеет дендритное строение с выделением фаз, заметно меняющимся в областях от центра шва к линии сплавления. Определена температура начала кристаллизации алюминия в сварочной ванне $T_L = 622$ °С и температура конца кристаллизации $T_S = 551,5$ °С. Выявлено, что при температуре $T = 642$ °С из жидкости начинает образовываться фаза $Al_6(Mn, Fe)$, а к моменту начала кристаллизации Al в сварочной ванне его содержание в расплаве шва составляет 1,39 %. К моменту конца кристаллизации происходит выделение следующих фаз: Al_3Mg_2 – 14,29 %, $Al_6(Mn, Fe)$ – 4,64 %, $(Al-Mg-Zn-Cu)$ – 1,62 %, Mg_2Si – 1,09 %, $Al_3(Fe)$ – 0,05 %.

Отмечено возрастание механических характеристик при увеличении скорости охлаждения по экспоненциальной зависимости.

Список литературы

1. Исследование формирования текстуры, микроструктуры и анизотропии свойств в процессе прокатки листов из алюминий-литиевого сплава 1420 / Ф.В. Гречников, Я.А. Ерисов, С.В. Сурудин, М.С. Оглодков // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2017. – № 6. – С. 45–52.
2. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства / И.Н. Фридляндер, К.В. Чуисов, А.Л. Березина [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1992. – 192 с.
3. Исследование структурно-фазового состава сварных соединений листов алюминий-литиевого сплава В-1469, полученных лазерной сваркой, в зависимости от термообработки / Н.В. Булина, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, Г.Г. Клочков // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 2 (55). – С. 31–39.
4. The study of MIG weldability of heat-treated aluminum alloys / Ibrahim Sevim, Fatih Hayat, Yakup Kaya, Nizamettin Kahraman, Sadettin Şahin // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2013. – No. 66. – P. 1825–1834.

5. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 3. – С. 27–41.

6. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // МИТОМ. – 2001. – № 1. – С. 5–9.

7. Oladimeji O.O., Taban E. Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys // Welding in the World. – 2016. – Vol. 60. – P. 415–457.

8. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Изд-во МИСИС, 1999. – 416 с.

9. Шиганов И.Н., Шахов С.В., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. – № 6. – С. 34–50.

10. Рабкин Д.М., Игнатъев В.Г., Довбищенко И.В. Дуговая сварка алюминия и его сплавов. – М.: Машиностроение, 1982. – 95 с.

11. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

12. Лукин В.И., Грушко О.Е. Особенности влияния металлургических факторов производства сплава 1420 на качество сварных соединений // Сварочное производство. – 1998. – № 1. – С. 8–9.

13. Microstructure and mechanical properties of the welding joint filled with microalloying 5183 aluminum welding wires / Zhen Xu, Zhi-hao Zhao, Gao-song Wang, Chao Zhang, Jian-zhong Cui // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – June 2014. – Vol. 21, no. 6. – P. 577. DOI: 10.1007/s12613-014-0944-3

14. Study on the burning loss of magnesium in fiber laser welding of an Al-Mg alloy by optical emission spectroscopy / Li Zhou, Mingjun Zhang, Xiangzhong Jin, Honggui Zhang, Cong Mao // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 88. – P. 1373–1381.

15. Способы сварки и их влияние на свойства сварных соединений алюминиевого сплава 1420 / В.И. Лукин, В.М. Лоскутов, Ю.П. Арбузов [и др.] // Автоматическая сварка. – 1993. – № 6. – С. 35–37.

16. Фридляндер И.Н., Братухин А.Г., Давыдов В.Г. Алюминиево-литиевые сплавы для сварных авиационных конструкций // Металлы. – 1992. – № 3. – С. 117–119.

17. Портной К.И., Богданов В.И., Фукс Д.Л. Расчет взаимодействия и стабильности фаз. – М.: Металлургия, 1981. – Гл. IV. – 214 с.

18. Теоретические методы исследования межатомного взаимодействия и их применение для разработки конструкционных материалов / С.Т. Кишкин, К.И. Портной, А.В. Логунов, В.И. Богданов, Е.А. Кулешова, А.В. Рубан // Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. Методы исследования конструкционных материалов / ВИАМ. – М., 1987. – С. 123.

19. Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В., Прохоров П.В. Металлографические исследования сварных швов алюминиевого сплава системы Al-Mg-Li, подвергнутого термовакуумной обработке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, мате-

риаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 40–53. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.05

20. Анисович А.Г. Применение поляризованного света в анализе металлов и сплавов // Литые и металлы. – 2012. – № 3(67). – С. 146–151.

21. Гельперин Н.И., Носов Г.А. Основы техники фракционной кристаллизации. – М.: Химия, 1986. – 304 с.

22. Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В. Термокинетический расчет фазового состава сварных швов алюминиевого сплава 1420 системы Al–Mg–Li. Часть 1. Термокинетический расчет фазового состава сплава 1420 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 48–55. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.07

23. Вальтер А.И., Шамордин М.В. Влияние параметров охлаждения при кристаллизации на структуру и свойства алюминиевых сплавов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 1. – С. 166–170.

References

1. Grechnikov F.V., Erisov Ia.A., Surudin S.V., Ogloodokov M.S. Issledovanie formirovaniia tekstury, mikrostruktury i anizotropii svoistv v protsesse prokatki listov iz aliuminii-litievogo splava 1420 [Study of texture formation, microstructure and anisotropy of properties during rolling of sheets of lithium aluminum alloy 1420]. *Izvestiia vuzov. Tsvetnaia metallurgii*, 2017, no. 6, pp. 45–52.

2. Fridliander I.N., Chuisov K.V., Berezina A.L. et al/ Aliuminii-litievye splavy. Struktura i svoistva [Lithium-aluminum alloys. Structure and properties]. Kiev: Naukova dumka, 1992, 192 p.

3. Bulina N.V., Malikov A.G., Orishich A.M., Klochkov G.G. Issledovanie strukturno-fazovogo sostava svarynykh soedinenii listov aliuminii-litievogo splava V-1469, poluchennykh lazernoii svarkoi, v zavisimosti ot termoobrabotki [Study of structural-phase composition of welded joints of aluminum-lithium alloy B-1469 sheets, obtained by laser welding, depending on heat treatment]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 31–39.

4. Ibrahim Sevim, Fatih Hayat, Yakup Kaya, Nizamettin Kahraman et al. The study of MIG weldability of heat-treated aluminum alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2013, no. 66, pp. 1825–1834.

5. Gureeva M.A., Grushko O.E., Ovchinnikov V.V. Svarivaemye aliuminievye splavy v konstruktsiakh transportnykh sredstv [Welded Aluminum Alloys in Vehicle Structures]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroyeni*, 2009, no. 3, pp. 27–41.

6. Fridliander I.N. Aliuminievye splavy v leta-tel'nykh apparatakh v periody 1970–2000 i 2001–2015 gg. [Aluminum alloys in aircraft between 1970-2000 and 2001-2015]. *MiTOM*, 2001, no. 1, pp. 5–9.

7. Oladimeji O.O., Taban E. Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys. *Welding in the World*, 2016, vol. 60, pp. 415–457.

8. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. Metallovedenie i termicheskaia obrabotka tsvetnykh metallov i spлавov [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Izdatelstvo MISIS, 1999, 416 p.

9. Shiganov I.N., Shakhov S.V., Kholopov A.A. Lazernaia svarka aliuminievykh spлавov aviatsionnogo naznacheniia [Laser welding of aluminum alloys for aircraft applications]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeni*, 2012, no. 6, pp. 34–50.

10. Rabkin D.M., Ignat'ev V.G., Dovbishchenko I.V. Dugovaia svarka aliuminii i ego spлавov [Arc welding of aluminum and its alloys]. Moscow: Mashinostroyeni, 1982, 95 p.

11. Mondol'fo L.F. Struktura i svoistva aliuminievykh spлавov [Structure and properties of aluminum alloys]. Moscow: Metallurgii, 1979, 640 p.

12. Lukin V.I., Grushko O.E. Osobennosti vliianiia metallurgicheskikh faktorov proizvodstva splava 1420 na kachestvo svarynykh soedinenii [Peculiarities of the influence of metallurgical factors of alloy 1420 production on the quality of welded joints]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1998, no. 1, pp. 8–9.

13. Zhen Xu, Zhi-hao Zhao, Gao-song Wang et al. Microstructure and mechanical properties of the welding joint filled with microalloying 5183 aluminum welding wires. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2014, vol. 21, no. 6, p. 577. DOI: 10.1007/s12613-014-0944-3

14. Li Zhou, Mingjun Zhang, Xiangzhong Jin et al. Study on the burning loss of magnesium in fiber laser welding of an Al-Mg alloy by optical emission spectroscopy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 88, pp. 1373–1381.

15. Lukin V.I., Loskutov V.M., Arbuzov Iu.P. et al. Sposoby svarki i ikh vliianie na svoistva svarynykh soedinenii aliuminieвого splava 1420 [Welding methods and their influence on the properties of welded joints of aluminum alloy 1420]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 1993, no. 6, pp. 35–37.

16. Fridliander I.N., Bratukhin A.G., Davydov V.G. Aliuminievo-litievye splavy dlia svarynykh aviatsionnykh konstruktsii [Lithium-aluminum alloys for welded aircraft structures]. *Metally*, 1992, no. 3, pp. 117–119.

17. Portnoi K.I., Bogdanov V.I., Fuks D.L. Raschet vzaimodeistviia i stabil'nosti faz [Calculation of phase interaction and stability]. Moscow: Metallurgii, 1981, Gl. IV, 214 p.

18. Kishkin S.T., Portnoi K.I., Logunov A.V., Bogdanov V.I., Kuleshova E.A., Ruban A.V. Teoreticheskie metody issledovaniia mezhatomnogo vzaimodeistviia i ikh primeneniie dlia razrabotki konstruktsionnykh materialov [Theoretical methods for studying interatomic interaction and their application to the development of structural materials]. *Voprosy aviatsionnoi nauki i tekhniki. Aviatsionnye materialy. Metody issledovaniia konstruktsionnykh materialov. VIAM*, 1987, p. 123.

19. Fedoseeva E.M., Ol'shanskaia T.V., Prokhorov P.V. Metallograficheskie issledovaniia svarynykh shvov aliuminieвого splava sistemy Al–Mg–Li, pod-vergnutogo termovakuumnoi obrabotke [Metallographic examination of welds of aluminum alloy of Al-Mg-Li system subjected to thermo-vacuum treatment]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeni, materialovedeniie* 2020, vol. 22, no. 1, pp. 40–53. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.05

20. Anisovich A.G. Primeneniie poliarizovannogo sveta v analize metallov i spлавov [Application of polarized light in the

analysis of metals and alloys]. *Lit'e i metally*, 2012, no. 3(67), pp. 146–151.

21. Gel'perin N.I., Nosov G.A. *Osnovy tekhniki fraktsionnoi kristallizatsii* [Fundamentals of fractional crystallization technique]. Moscow: Khimiia, 1986, 304 p.

22. Fedoseeva E.M., Ol'shanskaia T.V. *Termokineticheskiĭ raschet fazovogo sostava svarykh shvov aliuminievogo splava 1420 sistemy Al–Mg–Li. Chast' 1. Termokineticheskiĭ raschet fazovogo sostava splava 1420* [Thermokinetic calculation of the phase composition of welds of aluminum alloy 1420 of Al–Mg–Li system. Part 1. Thermokinetic calculation of the phase composition of alloy 1420]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 48–55. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.4.07

23. Val'ter A.I., Shamordin M.V. *Vliianie parametrov okhlazhdeniia pri kristallizatsii na strukturu i svoistva aliuminievykh splavov* [Influence of crystallization cooling parameters on structure and properties of aluminum alloys]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2017, iss. 1, pp. 166–170.

Получено 22.04.2021

Опубликовано 25.06.2021

Сведения об авторах

Федосеева Елена Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: emfedoseeva@pstu.ru.

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: tv066@rambler.ru.

About the authors

Elena M. Fedoseeva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: fedoseeva.pstu@mail.ru.

Tatyana V. Olshanskaya (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: tv066@rambler.ru.