ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ (ДО 9 ГПа) И ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАКАЛКИ НА ЗАТВЕРДЕВАНИЕ РАСПЛАВА $\text{Al}_{90}\text{Y}_{10}$

¹МЕНЬШИКОВА С. Г., ²БРАЖКИН В. В., ¹ЛАДЬЯНОВ В. И.

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

² Институт физики высоких давлений РАН,
108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, стр. 14

АННОТАЦИЯ. Методами рентгеноструктурного анализа, оптической и электронной микроскопии исследована микроструктура образцов сплава заэвтектического состава $\text{Al}_{90}\text{Y}_{10}$, полученных в зависимости от температуры закалки (до 1800 °С) и высокого давления (до 9 ГПа). Скорости охлаждения ~ 0.2 град/с и 1000 град/с. Полученные образцы однородные, плотные, структура мелкокристаллическая с высокими прочностью и твердостью. При давлениях выше 7 ГПа в сплаве отмечено формирование метастабильной фазы Al_3Y^* и аномально пересыщенного твердого раствора $\alpha\text{Al}(\text{Y})$.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сплав на основе алюминия, микроструктура, расплав, охлаждение, высокое давление, микротвердость, микроскопия высокого разрешения.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время достаточно активно исследуются метастабильные конденсированные системы, обладающие рядом уникальных физико-механических свойств, отличных от уровня свойств равновесных систем [1, 2]. С развитием новой техники и повышением качества продукции предъявляются особые требования к конструкционным материалам, в частности, к алюминиевым сплавам с переходными и редкоземельными металлами (ПМ и РЗМ соответственно). Алюминиевые сплавы широко используются в различных отраслях промышленности. Для сплавов на основе алюминия особое значение имеют малый удельный вес и высокие механические характеристики, что особенно важно в производстве продукции авиационного назначения. Алюминиевые сплавы, легированные иттрием, характеризуются высокой антикоррозионной стойкостью, используются как защитные покрытия жаропрочных материалов. РЗМ, введенные в небольших количествах (1 – 2 масс.%) в сплавы Al-ПМ, вследствие высокой химической активности, нейтрализуют вредное влияние примесей серы и кислорода, образуя с ними тугоплавкие химические соединения, а также позволяют уменьшить средний размер зерна, и, в большинстве случаев, сохранить нерекристаллизованную структуру. С другой стороны, РЗМ, как поверхностно-активные элементы, располагаются на поверхностях раздела фаз (границы зерен, границы блоков, межфазные границы), упрочняют эти поверхности и задерживают в них развитие диффузионных процессов.

Для повышения уровня физико-химических свойств сплавов совершенствуются способы их обработки в жидком и твердом состояниях. В частности, к первым можно отнести высокоскоростную кристаллизацию и температурно-временную обработку расплава [3], ко вторым – интенсивную пластическую деформацию и термическую обработку [4, 5] и др. Представляет интерес и перспективу идея температурно-временного воздействия на расплав при его затвердевании под высоким давлением (несколько ГПа).

Высокое давление занимает особое место по многообразию форм приложения и эффективности воздействия [6 – 9]. Применение давления в процессе первичной кристаллизации эффективно влияет на структуру металла и на улучшение его свойств благодаря увеличению центров кристаллизации, уменьшению микропор и лучшей растворимости компонентов в сплаве [10]. Давление способствует подавлению таких

дефектов, как усадочные раковины и мелкие трещины. В результате структура материала получается мелкозернистой, плотной, с минимальным количеством дефектов [11, 12]. Управляя параметрами кристаллизации, можно создавать структуры с разным размером зерна, равноосной и неравноосной формой кристаллов, содержащей стабильные и метастабильные фазы и, соответственно, с разными свойствами [2, 13]. Не смотря на то, что фазовые превращения под высоким давлением играют важную роль в поиске новых материалов, они изучены плохо. В работе [14] подробно рассмотрено текущее состояние проблемы в изучении фазовых превращений под высоким давлением и предложены возможные пути решения проблемы. Показано [14], что существует фундаментальное различие между процессами структурообразования, вызванными давлением в гидростатических условиях, деформацией во время пластического течения и др. Обзор о влиянии давления на затвердевание и литье с точки зрения термодинамических и кинетических аспектов представлен в работе [15]. Показано [15], что давление является универсальной переменной для синтезирования новых структур, исследования природы химической связи и атомных взаимодействий.

Выбранная в настоящей работе бинарная система Al-Y, в частности, состав $\text{Al}_{90}\text{Y}_{10}$, используется для получения многокомпонентных аморфно-нанокристаллических сплавов и композитов типа Al-ПМ-РЗМ (80 – 90 ат.% Al) с уникальными свойствами [1, 2]. Цель работы – исследование влияния термобарических воздействий на затвердевание расплава $\text{Al}_{90}\text{Y}_{10}$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходный слиток $\text{Al}_{90}\text{Y}_{10}$ получали сплавлением металлов (алюминий 99.999, иттрий 99.99 (масс.%)) в корундовых тиглях в печи Таммана. Химический анализ слитка показал, что содержание основных компонентов соответствовало заданному составу, слиток содержал крупные поры.

Для создания высокого давления использовали две установки: камера типа «поршень-цилиндр» и камера типа «тороид» [16]. В камере «поршень-цилиндр» сжатие образцов в замкнутом объеме контейнера высокого давления производили за счет повышения осевого усилия прессы при нагружении одного подвижного и второго неподвижного поршней. Для создания надежного уплотнения и электроизоляции подвижного поршня применяли тепло-электроизолирующую оболочку из прессованного кальцита. После создания необходимого давления в контейнере, проводили разогрев зоны спекания до заданной температуры. Скорость охлаждения расплава в камере «поршень-цилиндр» ~ 0.2 град/с. В камере типа «тороид», представляющей собой запрессованные в стальные кольца плоские наковальни из твердого сплава, средой, передающей давление, являлся катленит. Такая среда создавала всестороннее сжатие исследуемого образца. Плавление проводили пропусканием переменного тока непосредственно через образец. Образец соприкасался с двумя пластинками-дисками диаметром и высотой $\sim 5 \times 3$ мм, выполненных из материала исследуемого образца (рис. 1). Исследуемый сплав в виде мелкой стружки погружали в цилиндрическую трубку из гексагонального нитрида бора. Скорость охлаждения расплава в камере «тороид» ~ 1000 град/с. Температуру в камерах измеряли с помощью хромель-алюмелевой термопары. Применение таких разных установок позволило варьировать значения теплофизических параметров кристаллизации сплавов в широких пределах. Значения температуры и давления при проведении опытов представлены в таблице. Фазовый состав образцов определяли методом рентгеноструктурного анализа на установке Bruker Advance в Cu-K_α излучении. Для определения химического состава, морфологии и размера структурных составляющих сплава использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ) «Phylips SEM 515» с приставкой EDAX. Дюраметрические измерения (твердость по Виккерсу, H_V) выполняли на микротвердомере ПМТ-3М, нагрузка 50 г, выдержка 10 с. Значения H_V усредняли по 20 измерениям.

Рис. 1. Образец после эксперимента

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 в сравнении представлены структуры исходного образца и образцов, полученных в камере «поршень-цилиндр» при давлении 1 ГПа, охлажденные от температуры 1100 °С со скоростью ~ 0.2 град/с. Согласно рентгеноструктурному и металлографическому анализам в структуре исходного образца присутствуют крупные первичные кристаллы-интерметаллиды Al_3Y и двойная эвтектика ($\alpha\text{Al}+\text{Al}_3\text{Y}$) (рис. 2, а).

Рис. 2. Микроструктура исходного образца (а) и образца, полученного под давлением (б) (1 ГПа, ~ 0.2 град/с, ~ 1100 °С) (камера «поршень-цилиндр»)

Как видно из рис. 2, б условия получения в камере «поршень-цилиндр» влияют на размер и форму структурных составляющих сплавов: наблюдается дробление и измельчение дендритообразных первичных интерметаллидов, их форма становится округлой размером

~ 3 – 5 мкм. Внутри кристаллов присутствуют дефекты и трещины. Нерегулярная изначально пластинчато-стерженьковая эвтектика становится дисперснее. Микротвердость эвтектики увеличивается ~ в 1.2 раза по сравнению с исходным образцом. Микротвердость первичных кристаллов, а также фазовый состав сплава не изменяется.

Исследования образцов, полученных в камере «тороид», показали, что в интервале давлений 2 – 5 ГПа при охлаждении от 1500 °С со скоростью 1000 град/с сплав кристаллизуется в две стадии. Первоначально выделяется нормальная низкотемпературная фаза Al_3Y в виде компактных кубов размером ~ 5 мкм без дефектов и трещин, далее формируется регулярная эвтектика ($\alpha\text{Al}+\text{Al}_3\text{Y}$) (рис. 3, б). Размер эвтектических кристаллов Al_3Y ~ 300 нм. Повышение давления до 7 ГПа при тех же температуре и скорости охлаждения приводит к формированию двух первичных фаз: метастабильной в форме шестиконечных звезд высокотемпературной фазы Al_3Y^* с уменьшенным параметром решетки по сравнению с известной высокотемпературной фазой данного состава и низкотемпературной фазы Al_3Y в форме пластин (рис. 3, в). При этом в состав эвтектики входит низкотемпературная фаза Al_3Y . Увеличение давления до 9 ГПа и температуры до 1800 °С при той же скорости охлаждения приводит к изменению характера кристаллизации сплава. Сплав кристаллизуется по доэвтектическому механизму: формируется структура с аномально пересыщенным αAl твердым раствором (первичные кристаллы) и дисперсными алюминиды иттрия высокотемпературной фазы Al_3Y^* в метастабильной эвтектике ($\alpha\text{Al}+\text{Al}_3\text{Y}^*$) (рис. 3, г). Последний случай подробно рассмотрен нами в работе [17]. В таблице представлены результаты измерения микротвердости структурных составляющих образцов сплава $\text{Al}_{90}\text{Y}_{10}$, полученных при различных условиях в камере «тороид».

Рис. 3. Исходный слиток (а), образец 2 (б), образец 3 (в), образец 4 (г, [17]) (см. таблицу) (камера «тороид»)

Результаты фазового анализа и измерения микротвердости структурных составляющих образцов сплава $Al_{90}Y_{10}$, полученных в различных условиях (камера «торонд»)

Образец	Условия получения	Фазовый состав	Микротвердость H_v (± 50 МПа)
1	Исходный образец, получен сплавлением металлов в корундовых тиглях в печи Таммана с выпуском в чугунную форму при атмосферном давлении	Al_3Y +эвтектика ($\alpha Al+Al_3Y$)	$H_v(\alpha Al+Al_3Y) = 530$ $H_v(Al_3Y) = 4600$
2	2 – 5 ГПа, 5 с, 1500 °С	Al_3Y + эвтектика ($\alpha Al+Al_3Y$)	$H_v(\alpha Al+Al_3Y)=2000$
3	7 ГПа, 5 с, 1500 °С	Al_3Y^* , Al_3Y +эвтектика ($\alpha Al+Al_3Y$)	$H_v(\alpha Al+Al_3Y) = 1800$
4	9 ГПа, 5 с, 1800 °С	$\alpha Al(Y)$ твердый раствор+эвтектика ($\alpha Al+Al_3Y^*$)	$H_v(\alpha Al+Al_3Y^*)=2500$ $H_v(\alpha Al)=730$

Al_3Y – низкотемпературная фаза, Al_3Y^* 1 – высокотемпературная метастабильная фаза.

Можно полагать, что наблюдаемое поведение сплава $Al_{90}Y_{10}$ заэвтектического состава, аналогичное доэвтектическому, указывает на неравновесный характер затвердевания твердой фазы в условиях высокого переохлаждения на фронте кристаллизации.

Таким образом, при выбранных условиях затвердевания все полученные образцы имеют однородную, плотную, мелкокристаллическую структуру с высокими механическими свойствами. При высоких давлениях (выше 7 ГПа) и температурах (~ 1800 °С) отмечено формирование метастабильной фазы Al_3Y^* и аномально пересыщенного твердого раствора $\alpha Al(Y)$ в сплаве. Высокие механические свойства обусловлены твердорастворным, зернограничным и дисперсионным упрочнением.

Повышение давления в расплаве, аналогично увеличению переохлаждения, увеличивает скорость зарождения центров кристаллизации. Процесс кристаллизации начинается с возникновения в жидкой фазе центров кристаллизации и последующего их роста. Уменьшение размеров критического зародыша может быть достигнуто не только за счет снижения поверхностного (межфазного) натяжения и увеличения переохлаждения ΔT , но и за счет повышения внешнего давления. Повышение давления приводит к увеличению числа центров кристаллизации и снижению линейной скорости их роста, что приводит к измельчению структуры, оказывая на нее модифицирующее влияние. С повышением температуры максимум числа центров кристаллизации смещается в сторону более высоких давлений. Формообразование при кристаллизации под давлением можно квалифицировать как осадку, т.е. перемещение, соприкосновение и надавливание частиц друг на друга при кристаллизации или, другими словами, течение расплава в тигле в стороны, перпендикулярные направлению усилия, что должно сопровождается уширением металла. Данный процесс ограничивается стенками тигля, в результате этого сплав тесно прижимается к стенкам без образования воздушной прослойки при усадке. Роль давления на затвердевающий расплав заключается в том, что оно механически затрудняет продвижение фронта кристаллизации. Сочетание высокой скорости затвердевания и механического уплотнения дало возможность получить сплавы с измельченной структурой и высокой плотностью.

Процесс кристаллизации под сверхвысоким давлением указывает пути получения новых высокостойких и прочных сплавов на основе алюминия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Проект №18-02-00643а), в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (Проект №АААА-А17-117022250039-4).

Авторы выражают искреннюю признательность г-же С.А. Терешкиной, г-же М.И. Мокрушиной, г-ну Б.Е. Пушкарёву за помощь в проведении рентгенофазового и структурного анализов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Судзуки К., Худзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / под ред. Ц. Масумото, пер. с япон. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
2. Абросимова Г. Е. Эволюция структуры аморфных сплавов // Успехи физических наук. 2011. Т. 181, вып. 12. С. 1265-1281.
3. Бродова И. Г., Гундеров Д. В., Чердынцев В. В., Калошкин С. Д., Валдохин Ю. В., Яблонских Т. И., Башлыков Д. В., Столяров В. В. Эволюция структуры и фазового состава быстрозакаленных лент из Al-Fe сплавов в процессе интенсивной пластической деформации // Физика металлов и металловедение. 2003. Т. 95, № 5. С. 96-103.
4. Ширинкина И. Г., Бродова И. Г. Структурно-фазовые превращения при отжиге Al-Zn-Mg-FeNi-сплава после кручения при высоком давлении // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 4. С. 388-395.
5. Brodova I. G., Bashlikov D. V., Polents I. V. Influence of Heat Time Melt Treatment on the Structure and the Properties of Rapidly Solidified Aluminum Alloys with Transition Metals // Materials Science Forum, 1998, vol. 269-272, pp. 589-594.
6. Myint P. C., Belof J. L. Corrigendum: Rapid freezing of water under dynamic compression // Journal of Physics: Condensed Matter, 2018, vol. 30, no. 27, pp. 279501(1-5).
7. Батышев К. А. Литье с кристаллизацией под давлением алюминиевых сплавов. Часть 1 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 10. С. 3-11.
8. Arifin R., Malyadi M., Munaji, Buntoro G. A., Darminto. Pressure dependence of the structure of liquid NiTi: a molecular dynamics study // Journal of Physics: Condensed Matter, 2019, vol. 31, pp. 1-8.
9. Khromova L., Korostylev V. Влияние кристаллизации под давлением на теплофизические свойства деформируемых алюминиевых сплавов // Scientific Proceedings XII International Congress "Machines, Technologies, Materials", 2015, vol. 2, pp. 88-91.
10. Menshikova S. G., Shirinkina I. G., Brodova I. G., Brazhkin V. V., Lad'yanov V. I., Pushkarev B. E. Morphological features of crystal growth in the Al87Ni8Y5 alloy on rapid cooling of the melt under high pressure // Journal of Crystal Growth, 2019, vol. 525, no. 1, pp. 125206(1-4).
11. Zhang H., Han Y., Chen F. and Wen J. Effect of Solidification Pressure on Secondary Dendrite Arm Spacing of Aluminum Alloy // Applied Mechanics and Materials, 2012, vol. 117-119, pp. 1522-1525.
12. Duanwei He, He M., Kiminami C. S., Zhang F. X. Effects of pressure on the solidification of Al-Mn alloy // Journal of Materials Research, 2001, vol. 16, no. 4, pp. 910-913.
13. Бродова И. Г., Попель П. С., Барбин Н. М., Ватолин Н. А. Исходные расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. Екатеринбург: НИО УрО РАН, 2005. 369 с.
14. Levitas V. I. High pressure phase transformations revisited // Journal of Physics: Condensed Matter, 2018, vol. 30, no. 16, pp. 1-15.
15. Sobczak J. J., Drenchev L., Asthana R. Effect of pressure on solidification of metallic materials // International Journal of Cast Metals Research, 2012, vol. 25, no. 1, pp. 1-14.
16. Бражкин В. В. Фазовые превращения в неупорядоченных конденсированных средах при высоком давлении: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1996. 256 с.
17. Menshikova S. G., Brazhkin V. V., Lad'yanov V. I., Pushkarev B. E. Features of the Al90Y10 alloy structure during solidification under high pressure // Journal of Crystal Growth, 2019, vol. 524, pp. 125164(1-3).

Research of the influence of ultra high pressures (up to 9 GPa) and quenching temperature on the Al₉₀Y₁₀ melt solidification

¹Menshikova S. G., ²Brazhkin V. V., ¹Ladyanov V. I.

¹Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

²Institute for High Pressure Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SUMMARY. Using the methods of X-ray diffraction analysis, optical and electron microscopy, we studied the microstructure of alloy samples of a hypereutectic composition Al₉₀Y₁₀ obtained depending on the quenching temperature (up to 1800 °C) and high pressure (up to 9 GPa). Cooling rates are ~ 0.2 deg/s and 1000 deg/s. At pressures above 7 GPa, the formation of a metastable Al₃Y* phase and an anomalously supersaturated solid solution

$\alpha\text{Al}(\text{Y})$ is observed in the alloy. The resulting samples are homogeneous, dense, a fine crystalline structure with high strength and hardness. High mechanical properties are due to solid solution, grain boundary and dispersion hardening. According to X-ray diffraction and metallographic analyzes, the structure of the initial sample contains large primary Al_3Y intermetallic crystals and double eutectic ($\alpha\text{Al}+\text{Al}_3\text{Y}$). The production conditions (pressure of 1 GPa, temperature of 1100 °C, cooling rate of 0.2 deg/s) in the piston-cylinder chamber affect the size and shape of the structural components of the alloy. The crushing of dendritic primary intermetallic compounds of 5 times is observed, their shape becomes round. Inside the crystals, defects and cracks are present. The initially irregular lamellar-rod eutectic becomes more dispersed. The microhardness of the eutectic increases ~ 1.2 times in comparison with the initial sample. The microhardness of the primary crystals, as well as the phase composition of the alloy, does not change. Studies of samples obtained in the toroid chamber showed that in the pressure range of 2-5 GPa when cooled from 1500 °C at a rate of 1000 deg/s, the alloy crystallizes in two stages. Initially, the normal low-temperature Al_3Y phase is distinguished in the form of compact cubes $\sim 5 \mu\text{m}$ in size without defects and cracks, then a regular eutectic ($\alpha\text{Al}+\text{Al}_3\text{Y}$) is formed. The size of eutectic crystals Al_3Y is 300 nm. An increase in pressure to 7 GPa at the same temperature and cooling rate leads to the formation of two primary phases: metastable in the form of six-pointed stars of the high-temperature phase Al_3Y^* with a reduced lattice parameter in comparison with the known high-temperature phase of this composition and the low-temperature phase Al_3Y in the form of plates. In this case, the low-temperature Al_3Y phase is included in the eutectic. An increase in pressure up to 9 GPa and temperature up to 1800 °C at the same cooling rate leads to a change in the nature of crystallization of the alloy. The alloy crystallizes by a hypoeutectic mechanism: a structure is formed with an abnormally supersaturated αAl solid solution (this is the primary phase) and dispersed yttrium aluminides of the high-temperature phase Al_3Y^* in a metastable eutectic ($\alpha\text{Al} + \text{Al}_3\text{Y}^*$).

KEYWORDS: aluminum-based alloy, microstructure, melt, cooling, high pressure, microhardness, high resolution microscopy.

REFERENCES

1. Sudzuki K., Khudzimori Kh., Khasimoto K. *Amorfnye metally* [Amorphous metals]. Pod red. Ts. Masumoto, per. s yapon. Moscow: Metallurgiya Publ., 1987. 328 p.
2. Abrosimova G. E. The evolution of the structure of amorphous alloys. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2011, vol. 181, iss. 12, pp. 1265-1281. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0181.201112b.1265>
3. Brodova I. G., Yablonskikh T. I., Bashlykov D. V., Gunderov D. V., Stolyarov V. V., Cherdynstev V. V., Kaloshkin S. D., Valdokhin Yu. V. Evolution of the structure and phase composition of rapidly quenched ribbons of Al-Fe alloys during severe plastic deformation. *The Physics of Metals and Metallography*, 2003, vol. 95, no. 5, pp. 493-500.
4. Shirinkina I. G., Brodova I. G. Strukturno-fazovye prevrashcheniya pri otzhige Al-Zn-Mg-FeNi-splava posle krucheniya pri vysokom davlenii [Structural-phase transformations during annealing of an Al-Zn-Mg-Fe-Ni alloy after torsion at high pressure]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallurgy], 2020, vol. 121, no. 4, pp. 388-395. <https://doi.org/10.31857/S0015323020040130>
5. Brodova I. G., Bashlikov D. V., Polents I. V. Influence of Heat Time Melt Treatment on the Structure and the Properties of Rapidly Solidified Aluminum Alloys with Transition Metals. *Materials Science Forum*, 1998, vol. 269-272, pp. 589-594. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.269-272.589>
6. Myint P. C., Belof J. L. Corrigendum: Rapid freezing of water under dynamic compression. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018, vol. 30, no. 27, pp. 279501(1-5). <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aac798>
7. Batyshev K. A. Lit'e s kristallizatsiey pod davleniem aluminievykh splavov. Chast' 1 [Pressure crystallization casting of aluminum alloys (Part 1)]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2011, no. 10, pp. 3-11.
8. Arifin R., Malyadi M., Munaji, Buntoro G. A., Darminto. Pressure dependence of the structure of liquid NiTi: a molecular dynamics study. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2019, vol. 31, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab25b4>
9. Khromova L., Korostylev V. Vliyanie kristallizatsii pod davleniem na teplofizicheskie svoystva deformiruemyykh aluminievykh splavov [Effect of Crystallization under pressure on thermal properties of wrought aluminum alloys]. *Scientific Proceedings XII International Congress "Machines, Technologies, Materials"*, 2015, vol. 2, pp. 88-91.
10. Menshikova S. G., Shirinkina I. G., Brodova I. G., Brazhkin V. V., Lad'yanov V. I., Pushkarev B. E. Morphological features of crystal growth in the Al87Ni8Y5 alloy on rapid cooling of the melt under high pressure. *Journal of Crystal Growth*, 2019, vol. 525, no. 1, pp. 125206(1-4). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125206>
11. Zhang H., Han Y., Chen F. and Wen J. Effect of Solidification Pressure on Secondary Dendrite Arm Spacing of Aluminum Alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 117-119, pp. 1522-1525. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1522>
12. Duanwei He, He M., Kiminami C. S., Zhang F. X. Effects of pressure on the solidification of Al-Mn alloy. *Journal of Materials Research*, 2001, vol. 16, no. 4, pp. 910-913. <https://doi.org/10.1557/JMR.2001.0129>

13. Brodova I. G., Popel' P. S., Barbin N. M., Vatolin N. A. *Iskhodnye rasplavy kak osnova formirovaniya struktury i svoystv alyuminiyevykh splavov* [Initial melts as the basis for the formation of the structure and properties of aluminum alloys]. Yekaterinburg: NISO UrO RAN Publ., 2005. 369 p.
14. Levitas V. I. High pressure phase transformations revisited. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2018, vol. 30, no. 16, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aab4b0>
15. Sobczak J. J., Drenchev L., Asthana R. Effect of pressure on solidification of metallic materials. *International Journal of Cast Metals Research*, 2012, vol. 25, no. 1. pp. 1-14. <https://doi.org/10.1179/1743133611Y.0000000016>
16. Brazhkin V. V. *Fazovye prevrashcheniya v neuporyadochennykh kondensirovannykh sredakh pri vysokom davlenii: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk* [Phase transformations in disordered condensed media at high pressure: Dr. phys.-mat. sci. diss.]. Moscow, 1996. 256 p.
17. Menshikova S. G., Brazhkin V. V., Lad'yanov V. I., Pushkarev B. E. Features of the Al90Y10 alloy structure during solidification under high pressure. *Journal of Crystal Growth*, 2019, vol. 524, pp. 125164(1-3). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125164>

Меньшикова Светлана Геннадьевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник НЦ МФМ УдмФИЦ УрО РАН, тел. +7(3412)21-65-66, e-mail: svetlmensh@mail.ru

Бразжкин Вадим Вениаминович, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор ИФВД РАН, тел. +7(495) 851-00-11, brazhkin@hppi.troitsk.ru

Ладьянов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, руководитель НЦ МФМ УдмФИЦ УрО РАН, тел. +7(3412)21-65-77, e-mail: las@ftiudm.ru