

DOI: 10.15593/2224-9400/2018.1.11

УДК 621.78.066; 669-154; 536-33

Н.П. Углев, В.З. Пойлов, С.А. СмирновПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**А.В. Шилов**

АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ СПЛАВОВ
АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОТЛИВКИ**

При изготовлении металлических деталей сложной формы методом прецизионного литья в керамические формы технологически важным параметром является равномерность распределения компонентов сплава в объеме отливки. Анализ результатов экспериментов с промышленными сплавами показал, что фактическое распределение компонентов вблизи стенки формы отличается от статистически равномерного с достаточно высокой степенью вероятности. Очевидно, что состав поверхностного слоя конструкционной детали оказывает определяющее влияние на химическую и коррозионную устойчивость изделия. Неравномерность распределения компонентов в объеме также нежелательна, поскольку связана с неравномерностью и анизотропностью механических свойств отливки. Это может привести к потере прочности детали при эксплуатации, а также к различным деформациям формы при изменении рабочей температуры.

Аналогичные результаты получены и для модельного сплава олова со свинцом, для которого характерно также и частичное расслоение по высоте отливки. Существенной особенностью этого сплава является отсутствие корреляции состава поверхностного слоя с поверхностными свойствами металлов. В настоящей работе показано, что и простое объяснение эффекта за счет особенностей кристаллизации двухкомпонентного расплава в двухфазной области также не в состоянии объяснить полученные результаты. Неравномерное распределение компонентов многокомпонентного высокотемпературного сплава по высоте было зафиксировано ранее. Анализ результатов экспериментов позволяет предполагать одинаковую причину обоих типов этих распределений. Результаты эксперимента имеют как практический, так и теоретический интерес.

Ключевые слова: прецизионное литье, керамическая форма, расплав, расслоение по высоте, поперечное распределение компонентов, сплав ВКНА 1ВР-ВИ, зональная ликвиционная полосчатость, поверхностная адсорбция.

N.P. Uglev, V.Z. Poilov, S.A. Smirnov

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

A.V. Shilov

JSC «UEC-Aviadvigatel», Perm, Russian Federation

DISTRIBUTION OF COMPONENTS OF AVIATION PURPOSE ALLOYS IN SURFACE LAYERS OF METAL CASTING

In the manufacture of metal parts of complex shape by the method of precision casting into ceramic forms, a technologically important parameter is the uniform distribution of alloy components in the casting volume. An analysis of the results of experiments with industrial alloys has shown that the actual distribution of components near the mold wall differs from the statistically uniform with a high degree of probability. It is obvious that the composition of the surface layer of the structural part has a determining effect on the chemical and corrosion resistance of the product. Uneven distribution of components in the volume is also undesirable, because it is associated with the unevenness and anisotropy of the mechanical properties of the casting. This can lead to loss of strength of the part during operation, as well as to various deformations of the mold when the operating temperature changes.

Similar results have been obtained for a model alloy of tin with lead, for which a partial bundle along the casting height is also characteristic. An essential feature of this alloy is the absence of correlation between the composition of the surface layer and the surface properties of metals. In this paper it is shown that a simple explanation of the effect due to the crystallization features of the two-component melt in the two-phase region is also not able to explain the results. The uneven distribution of the components of the multicomponent high-temperature alloy in height has also been recorded earlier. Analysis of the results of the experiments allows us to assume the same reason for both types of these distributions. The results of the experiment have both practical and theoretical interest.

Keywords: *precision casting, ceramic form, melt, stratification in height, transverse component distribution, alloy VKNA 1VR-VI, zonal liquefaction banding, surface adsorption.*

Основным способом изготовления деталей сложной формы из высокопрочных и высокотемпературных металлических сплавов является прецизионное литье в керамические формы. При этом априори считается, что при достаточной выдержке и перемешивании расплава в правильном тигле, а также выдержки его в жидком состоянии в форме, состав металла по всему объему отливки к моменту начала кристаллизации будет практически одинаков. Однако известно, что реальные отливки характеризуются заметной неоднородностью состава по сечению, которую связывают с условиями их получения. Смеси расплавленных металлов считаются наиболее простыми жидкими растворами, по-

сколькx являются смесью так называемых «простых жидкостей», к которым относятся одноатомные металлы. Однако даже в наиболее простых смесях – бинарных расплавах – наблюдаются различные эффекты, которые до сих пор не имеют надежного объяснения. Так, например, бинарные расплавы (в частности, Sn-Pb) склонны к значительному расслоению при выдержке их в вертикальных [1] и, в еще большей степени, в наклонных капиллярах из алунда или кварца [2]. При этом показано, что это функциональное расслоение протекает именно в жидкой фазе и не связано с процессами кристаллизации расплава. Проведенные нами эксперименты показали, что и сложные высокотемпературные конструкционные сплавы (ВЖЛ14-ВИ) также склонны к заметному расслоению по высоте отливки за сравнительно небольшое время от 2 до 15 мин выдержки в жидком состоянии [3]. С учетом экспериментального подтверждения неравномерного распределения концентрации сплава Sn-Pb, приобретенного в период нахождения смеси в жидком состоянии и в поперечном сечении капилляров [4, 5], вопрос об аналогичном распределении компонентов многокомпонентных высокотемпературных сплавов вблизи стенок литевой формы также представляет научный интерес, имеющий и прикладное значение.

Эксперимент

Исследование распределения компонентов вблизи стенки отливки проводили на сплавах авиационного назначения ВКНА 1ВР-ВИ (далее ВКНА) и ВХ4Л, в состав которых входят Al, Ti, Fe, Ni, Cr, Mo, Nb, W. Экспериментальный образец представлял собой прямоугольную пластину со скругленными углами и размером поверхности 28–34 мм, толщиной 8 мм, которые разрезали поперек посередине и проводили количественный анализ компонентов в зависимости от расстояния до поверхности отливки. Длительность нахождения сплава в жидком состоянии до застывания внутри керамической формы не превышала 10 мин. Анализ состава среза образца проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения S-3400N японской фирмы HITACHI с рентгенофлуоресцентной приставкой фирмы «Брукер» для рентгеноспектрального анализа нанодисперсных продуктов.

Пример определения состава в одной из точек замера сплава ВХ4Л представлен в таблице. В последнем столбце таблицы указаны стандартные погрешности количественного определения каждого элемента (1Sigma), практически одинаковые для всех исследованных сплавов. Распределение компонентов для вышеуказанных сплавов

вблизи поверхности детали представлено на рис. 1–4. Для сплава ВКНА эти зависимости построены как средние по 10 отдельным независимым плавкам и заливкам расплава в керамические формы 10 различных составов. Во всех случаях максимальные отклонения концентрации компонентов от средних значений существенно превышают стандартную погрешность (с учетом числа независимых экспериментов) их определения и, по-видимому, могут считаться достаточно надежно установленными.

Результаты замера состава в одной из точек поперечного среза детали из сплава ВХ4Л

El	AN	Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Al	13	K-series	7987	1,33	1,69	3,57
Ti	22	K-series	6299	0,84	1,07	1,27
Cr	24	K-series	164190	25,54	32,41	35,44
Ni	28	K-series	149099	45,76	58,09	56,27
Nb	41	L-series	8098	1,36	1,73	1,06
Mo	42	L-series	14629	2,36	3,00	1,78
W	74	L-series	2267	1,59	2,02	0,62
Total:			78,79	100,00	100,00	

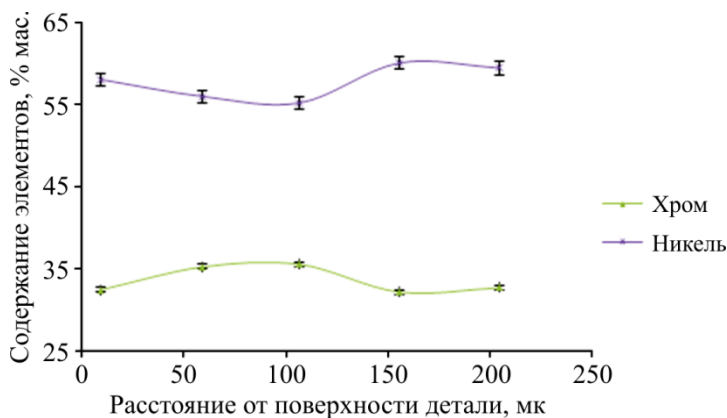


Рис. 1. Распределение хрома и никеля вблизи поверхности отливки из сплава ВХ4Л

Данные по алюминию и хрому (см. рис. 4) приподняты на 70 и 75 % соответственно для приведения их к шкале содержания никеля, что облегчает сравнение вида этих зависимостей.

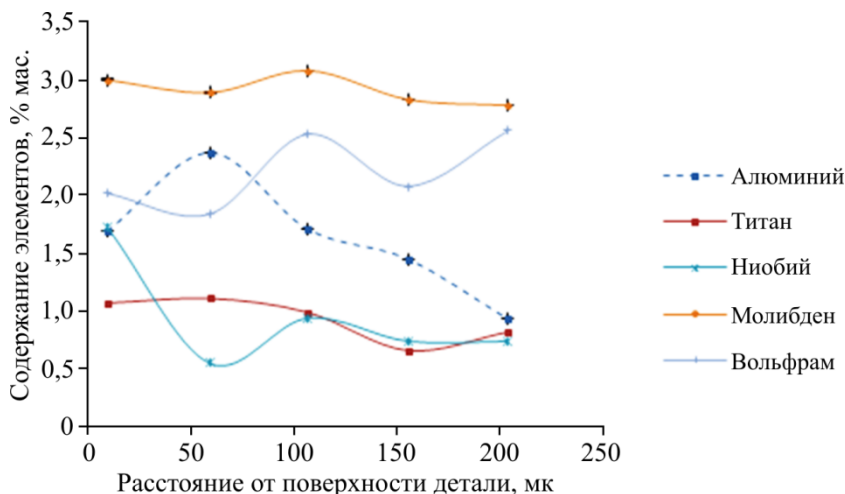


Рис. 2. Распределение легирующих компонентов вблизи поверхности отливки из сплава VX4Л

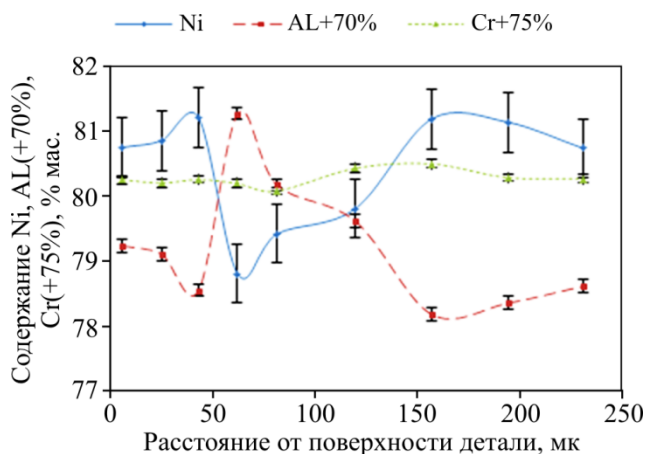


Рис. 3. Распределение никеля, алюминия и хрома вблизи поверхности отливки из сплава VKNA

Симметричный (зеркальный) характер кривых (см. рис. 1, 3) объясняется линейной связью наиболее массовых компонентов из-за нормирования суммы на 100 %. Однако легирующие компоненты (см. рис. 2, 4) не модулируются основной зависимостью и имеют собственный характер распределения вблизи поверхности детали.

Причины возникновения неоднородностей состава отливок из многокомпонентных сплавов изучены достаточно хорошо. Считается, что их причиной является сложная комбинация эффектов диффузии, ликвации компонентов с различающейся плотностью, термической

усадки, термогравитационной конвекции и седиментации образующихся при застывании микрокристаллов. Одним из проявлений этих эффектов является так называемая «зональная ликвационная полосчатость», приводящая, в частности, к накоплению на поверхности отливки элементов с малой плотностью. Следует заметить, что большинство этих механизмов могут эффективно реализовываться лишь при достаточно больших объемах жидкого или двухфазного расплава и при существенной длительности процесса формирования отливки.

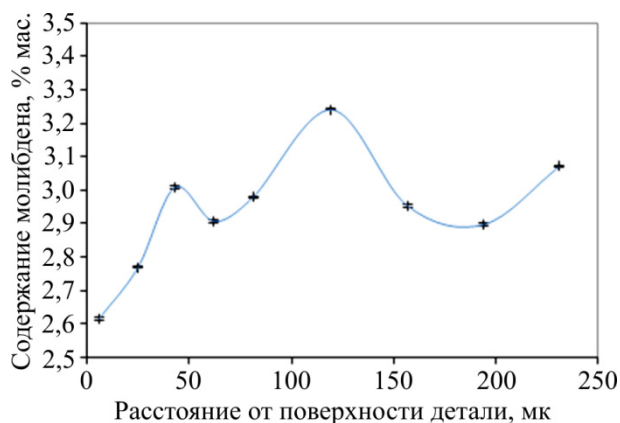


Рис. 4. Распределение молибдена вблизи поверхности отливки из сплава ВКНА 1ВР-ВИ

Очевидно, что наличие большого количества компонентов в сплавах авиационного назначения типа ВКНА сильно затрудняет интерпретацию полученных результатов, поэтому исследование эффекта поперечной неоднородности было нами проведено на простом двухкомпонентном модельном сплаве олова со свинцом. Олово образует со свинцом диаграмму состояния простого эвтектического типа. Для исследования нами были выбраны два сплава: 70 % (высота капилляра 98 мм) и 55 % мас. олова (высота капилляра 117 мм) – справа и слева от эвтектического состава (62 % мас. олова).

Поперечное распределение компонентов модельного сплава изучали после выдержки образцов в вертикальных капиллярах в жидком состоянии и быстрой закалке отливки. При *медленном* охлаждении таких составов из жидкого состояния в двухфазную область ниже линии ликвидуса следует ожидать выпадения на стенке капилляра либо кристаллов, обогащенных оловом, либо свинцом. Далее, при росте дендритов в направлении к центру капилляра такой сплав должен изменять

свой состав до эвтектического, при достижении которого при температуре солидуса он будет охлаждаться как твердое тело. При росте дендритов ликвирующие компоненты будут оттесняться от периферии к центру капилляра. Для вышеуказанных составов образцов Sn-Pb ликвирующий компонент определяется положением сплава относительно эвтектической концентрации. Однако при резком охлаждении (закалке) тонкого капилляра (диаметр образцов $d = 1,15 \dots 1,16$ мм, толщина стеклянной стенки около 0,2 мм) за 2–3 с диффузионный механизм, обеспечивающий процесс изменения состава за счет роста кристаллов, практически не успевает развиться и фактически *фиксируется* стационарное неравновесное состояние расплава, достигнутое за время выдержки капилляра в печи в вертикальном положении.

Как известно [1], при выдержке капилляра с подобным расплавом в вертикальном положении, наблюдается заметное (до 10–12 % мас.) расслоение расплава по высоте: низ капилляра обогащается свинцом, а верх – оловом. В связи с этим для анализа нами были отобраны образцы с низа капилляра, в котором был сплав, заведомо обогащенный свинцом, и образец с верха капилляра, в котором был сплав, обогащенный оловом. Схема поперечного сечения металлической отливки и расположения площадок для исследования состава в сечениях представлена на рис. 5. Усредненный состав определяли на поперечных сечениях образцов в пределах площадок 100×100 мк, расположенных вдоль двух случайно выбранных примерно ортогональных направлений.

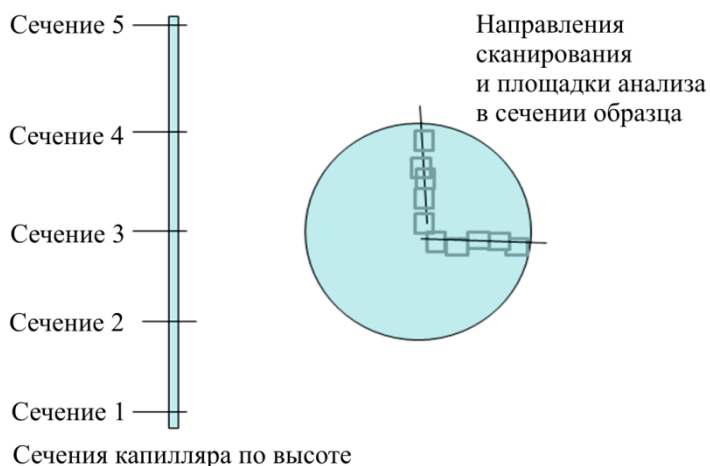


Рис. 5. Схема расположения площадок для исследования состава отливки по высоте и радиусу капилляра

На рис. 6 представлено распределение олова по двум направлениям радиуса капилляров. Температура и длительность выдержки расплавов в печи составляли 280 °С и 2 ч соответственно. Методика эксперимента подробно описана в работе [7].

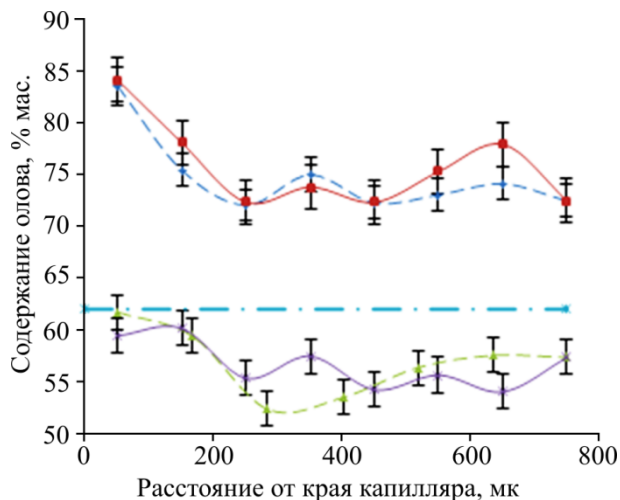


Рис. 6. Распределение олова по сечению капилляров (штрихпунктирная линия – эвтектический состав)

Обращают на себя внимание результаты, полученные для сплава, содержащего олово в концентрации ниже эвтектического состава (нижние кривые на рис. 6). Очевидно, что они противоречат ожидаемому виду: в зоне, прилегающей к стенке капилляра, вместо свинца содержится избыточное количество олова. Ранее аналогичные результаты были нами получены для всех пяти (по рис. 5) сечений капилляра в эксперименте со сплавом олово+40 % мас. свинца [5]. Эти результаты позволили выявить круговую симметрию распределения компонентов по радиусу при закалке капилляров с жидким металлом, а также волновой характер их распределения, подтверждающийся параллельностью волнообразных кривых распределения по двум случайно выбранным направлениям радиусов для всех сечений капилляра. Во всех случаях на границе металла со стенкой капилляра доминирует олово.

Обсуждение результатов эксперимента

Наверное, самым простым способом объяснения концентрирования олова вблизи стенки капилляра (см. рис. 6) могла бы быть ссылка на адсорбцию элемента с меньшей поверхностной энергией (σ) в этой об-

ласти, однако σ олова при температуре эксперимента (571 мДж/м^2) значительно выше, чем у свинца (492 мДж/м^2) [7]. Оценки вклада этого фактора в процесс расслоения расплавов Sn-Pb в вертикальных капиллярах приведены в работах [2, 8]. Показано, что разница поверхностных энергий компонентов не может оказать заметного влияния на расслоение металлов. Результаты представленного, а также и ранее проведенного эксперимента [5] указывают на то, что при резком охлаждении капилляра фиксируется именно текущее стационарное состояние расплава. При этом на основании существующих представлений о структуре и свойствах металлических расплавов в настоящее время невозможно объяснить *волнообразный* характер распределения компонентов и диффузионную устойчивость этого состояния, которая за 2 ч эксперимента должна была привести систему в состояние термодинамического равновесия, характеризующегося статистически равномерным распределением компонентов в объеме капилляра. Не ясна также и причина конвекционной устойчивости системы: слои расплава, прилегающие к внутренней стенке капилляра и имеющие меньшую плотность из-за повышенного содержания олова, по сравнению со слоями, расположенными ближе к центру капилляра, должны непрерывно течь вверх под действием гидростатических сил, а внутренние слои должны непрерывно опускаться вниз. Однако известно, что равновесное барометрическое распределение компонентов по высоте практически достигается в капиллярах за значительно меньшее время, чем в эксперименте по рис. 6 [9]. Сложно представить, что развитие продольной и поперечной неоднородности состава сплава Sn-Pb в капиллярах являются следствием действия двух различных механизмов. Скорее всего, оба этих эффекта связаны с единой причиной, в основе которой лежат собственные свойства жидкости, поскольку, как было указано выше, имеются прямые доказательства, что продольное расслоение протекает именно в жидком состоянии [8, 9] и не связано с процессами кристаллизации.

Результаты исследования независимых отливок из сплава ВКНА (см. рис. 3, 4) указывают на устойчивость характера поперечного распределения компонентов для данного состава. Они существенно отличаются от данных по сплаву ВХ4Л, однако имеют и некоторые черты сходства. Так, например, никель в обоих металлах имеет локальный минимум концентрации при расстоянии от поверхности детали 50–100 мк, сменяющийся локальным максимумом при дальнейшем увеличении расстояния от стенки. Некоторая аналогия проявляется и для алюми-

ния. Таким образом, сложные многокомпонентные сплавы (ВКНА, ВХ4Л) склонны к формированию поперечной неоднородности состава, а также и к частичному продольному расслоению (ВЖЛ14-ВИ), аналогично простым сплавам Sn-Pb. Как и в последнем случае, можно предположить, что оба этих типа неоднородности связаны со свойствами самого жидкого расплава, а не с процессами кристаллизации, ликвации и седиментации [10–15]. В этом случае особенности процесса кристаллизации сложных сплавов обусловлены *следствием* структуры, сформировавшейся в жидком состоянии, и являются вторичными по отношению к свойствам исходной жидкости. Безусловно, следует отметить, что причина неравномерного поперечного и продольного распределения компонентов металлических сплавов остается непонятной. Можно лишь высказать предположение, что это стационарное состояние поддерживается за счет существования непрерывных макроскопических потоков атомов компонентов в объеме жидкого металла [8].

Выводы

1. Компоненты металлических сплавов распределяются вблизи границы отливки неравномерно. Отклонения от среднего статистического значения подтверждаются с достаточно высокой степенью вероятности.

2. Для бинарного сплава олова со свинцом при концентрациях, близких к эвтектическому составу, вблизи границы отливки, полученной в вертикальном капилляре, доминирующим элементом является олово.

3. Характер и причины неравномерного распределения компонентов сплавов вблизи границы отливки в настоящее время не могут быть объяснены на основе существующих представлений о структуре и свойствах металлических расплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № А 16-01-00662.

Список литературы

1. Гаврилин И.В. Седиментационный эксперимент при изучении жидких сплавов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1985. – № 2. – С. 66–73.

2. Углев Н.П. Анализ возможных механизмов частичного расслоения металлических расплавов в капиллярах // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Изд-во Твер. гос. ун-та, – 2013. – Вып. 5. – С. 333–342.

3. Концентрационная неоднородность при литье многокомпонентных высокотемпературных сплавов / Н.П. Углев, В.З. Пойлов, И.А. Колыхматов, В.Л. Звездин, А.В. Шилов // *Металлургия машиностроения*. – 2015. – № 1. – С. 14–16.

4. Углев Н.П. Механизм расслоения бинарных металлических расплавов в капиллярах // *Синтез знаний в естественных науках: материалы междунар. науч. конф.* / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2011. – Т. 2. – С. 564–569.

5. Углев Н.П., Дубровина Е.И. Радиальное распределение компонентов при расслоении металлических расплавов в капиллярах // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. – 2015. – № 1. – С. 49–58.

6. Углев Н.П. Исследование механизма расслоения металлических расплавов в капиллярах специальной формы // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. – 2012. – № 13. – С. 7–10.

7. Вилсон Д.Р. Структура жидких металлов и сплавов: пер. с англ. – М.: *Металлургия*, 1972. – 247 с.

8. Углев Н.П., Углев С.Н. Сверхтекучесть на межфазной границе жидкого металла и твердого тела // *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2014. – Т. 16. – С. 508–512.

9. Гаврилин И.В., Фролова Т.Б., Захаров В.П. О ликвации в жидких эвтектических сплавах // *Изв. АН СССР. Металлы*. – 1984. – № 3. – С. 191–193.

10. Гаврилин И.В., Углев Н.П. Межфазное течение на границе жидкости и твердого тела // *Металлургия машиностроения*. – 2006. – № 6. – С. 20–23.

11. Андронов В.Н., Чекин Б.В., Нестеренко С.В. Жидкие металлы и шлаки: справ. – М.: *Металлургия*, 1977. – 128 с.

12. Бунин К. П. К вопросу о строении металлических эвтектических расплавов // *Изв. АН СССР. Metallургия и топливо*. – 1946. – № 2. – С. 305–307.

13. Воздвиженский В.М. Прогноз двойных диаграмм состояния. – М.: *Металлургия*, 1975. – 224 с.

14. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – 5-е изд., перераб. – М.: *Наука*, 1978. – 736 с.

15. Новохатский И.А., Архаров В.И. Количественная оценка структурной микронеоднородности жидких металлов // *Докл. АН СССР, Химия*. – 1971. – Т. 201, № 4. – С. 905–908.

References

1. Gavrilin I.V. Sedimentacionnyj jeksperiment pri izuchenii zhidkih splavov [The research of liquid alloys by sedimentation experiment]. *Izvestiya Akademii nauk USSR. Metally*, 1985, no. 2, pp. 66-73.

2. Uglev N.P. Analiz vozmozhnyh mehanizmov chastichnogo rassloenija metallicheskih rasplavov v kapilljarah [Analysis of possible mechanisms of partial stratification of metallic

melts in capillaries]. *Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov: mezhvuzovskij sbornik nauchnyh tr.* Tver: Tverskoj gosudarstvennyj universitet, 2013, vol.41, pp. 333-342.

3. Uglev N.P., Pojlov V.Z., Kolykhmatov I.A., Zvezdin V.L., Shilov A.V. Koncentracionnaja neodnorodnost' pri lit'e mnogokomponentnyh vysokotemperaturnyh splavov [Concentration inhomogeneity in the casting of multicomponent high-temperature alloys]. *Metallurgija machinostroenija*, 2015, no. 1, pp. 14-16.

4. Uglev N.P. Mekhanizm rassloeniya binarnykh metallicheskich rasplavov v kapillyarakh [Foliating mechanism of binary metallic melts in capillaries]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii "Sintez znanij v estestvennykh naukakh"*. Permskij gosudarstvennyj natsionalnyj issledovatel'skij universitet, 2011, vol. 2, pp. 564-569.

5. Uglev N.P., Dubrovina E.I. Radial'noe raspredelenie komponentov pri rassloenii metallicheskich rasplavov v kapilljarah [Radial distribution of components in the stratification of metallic melts in capillaries]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologija i biotekhnologija*, 2015, no. 1, pp. 49-58.

6. Uglev N.P., Dubrovina E.I. Issledovanie mehanizma rassloeniya metallicheskich rasplavov v kapilljarah special'noj formy [Investigation of the mechanism of stratification of metallic melts in capillaries of special shape]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologija i biotekhnologija*, 2012, no. 13, pp. 7-10.

7. Vilson D.R. Struktura zhidkih metallov i splavov. [Structure of liquid metals and alloys]. Moscow: Metallurgija, 1972, 247 p.

8. Uglev N.P., Uglev S.N. Sverhtekuchest' na mezhfaznoj granice zhidkogo metalla i tvjordogo tela [Superfluidity at the interphase boundary of a liquid metal and a solid]. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy*, 2014, vol. 16, pp. 508-512.

9. Gavrilin I.V., Frolova T.B., Zaharov V.P. O likvacii v zhidkih jevtekticheskikh splavah [On liquation in liquid eutectic alloys]. *Izvestiya Akademii nauk USSR. Metally*, 1984, no. 3, pp. 66-73.

10. Gavrilin I. V., Uglev N.P. Mezhfaznoe techenie na granice zhidkosti i tvjordogo tela [Interphase flow at the interface between a liquid and a solid]. *Metallurgija machinostroenija*, 2006, no. 6, pp.20-23.

11. Andronov V.N., Chekin B.V., Nesterenko S.V. Zhidkie metally i shlaki. [Liquid metals and slags.]. *Izvestiya Akademii nauk USSR. Metally*, 1984, no. 3, pp. 66-73.

12. Bunin K.P. K voprosu o stroenii metallicheskich evtekticheskikh rasplavov [For the problem about metallic eutectic melts structure]. Moscow: Metallurgija, 1977, 128 p.

13. Vozdvizhenskij V.M. Prognoz dvojnnyh diagramm sostojanija [Forecast of double state diagrams]. Moscow: Metallurgija, 1975, 224 p.

14. Lojczanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas]. Moscow: Nauka, 1978, 736 p.

15. Novohatskij I.A., Arharov V.I. Kolichestvennaja ocenka strukturnoj mikroneodnorodnosti zhidkih metallov [Quantitative estimation of structural microinhomogeneity of liquid metals]. *Dokl. Akademii nauk USSR. Khimiya*, 1971, vol. 201, no. 4, pp. 905-908.

Получено 06.02.2018

Об авторах

Углев Николай Павлович (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, email: ouglev@mail.ru).

Пойлов Владимир Зотович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

Смирнов Сергей Александрович (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: po4tamoia@mail.ru).

Шилов Александр Владимирович (Пермь, Россия) – начальник бюро литья ОГМ АО «ОДК Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: shilov@mail.ru).

About the authors

Nikolaj P. Uglev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: ouglev@mail.ru).

Vladimir Z. Poilov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical sciences, Professor, Head of Department of Chemical technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

Sergey A. Smirnov (Perm, Russian Federation) – Junior Research Fellow of Department of Chemical technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: po4tamoia@mail.ru).

Aleksandr V. Shilov (Perm, Russian Federation) – Head of the Bureau of OGM Casting JSC «UEC-Aviadvigatel» (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: shilov@mail.ru).