

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ТРЕХМЕРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Прусов Е.С.

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, e-mail: eprusov@mail.ru*

Последние десятилетия характеризуются возрастающим интересом к использованию методов трехмерной компьютерной томографии в практике научных исследований в области материаловедения и заготовительных производств. В статье показаны аналитические возможности и основные направления использования томографии в материаловедении. Систематизированы различные методы сбора данных о пространственной структуре материалов и представлен инструментарий трехмерного материаловедения. Изложены физические основы рентгеновской компьютерной томографии и выделены параметры, определяющие возможность изучения образцов из различных материалов. Показаны преимущества использования томографии при решении материаловедческих задач. Приведены примеры применения томографических методов для исследования структуры образцов порошковых материалов и металломатричных композиционных сплавов. Представленные результаты свидетельствуют о перспективности использования компьютерной томографии для неразрушающего контроля и исследования структурно-морфологических характеристик материалов при разработке основных направлений совершенствования технологических процессов их получения.

Ключевые слова: трехмерное материаловедение, компьютерная томография, структура материалов, порошковые материалы, металломатричные композиционные сплавы

COMPUTED TOMOGRAPHY FOR TASKS OF 3D MATERIALS SCIENCE

Prusov E.S.

*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,
Vladimir, e-mail: eprusov@mail.ru*

Last decades are characterized by the increasing interest in use of methods of 3D computed tomography in practice of scientific researches in the field of materials science and blank production. Analytical opportunities and main directions of use of a tomography in materials science are shown in article. Various methods of data collection about spatial structure of materials are systematized and the tools of 3D materials science are presented. Physical bases of x-ray computed tomography are stated and the parameters defining possibility of studying of samples from various materials are allocated. Advantages of use of a tomography at the solution of materials research tasks are shown. Examples of application of tomographic methods for research of structure of samples of powder materials and metal matrix composite alloys are given. The received results show prospects of use of a computed tomography for nondestructive control and investigations of structural-morphological characteristics of materials at development of the main directions of improvement of technological processes of their manufacturing.

Keywords: 3D Materials Science, computed tomography, structure of materials, powder materials, metal matrix composite alloys

На современном этапе развития науки о материалах активно разрабатываются новые подходы к оценке структурно-морфологических характеристик материалов и изделий, основанные на изучении структуры в трех измерениях. Успехи последних лет, достигнутые в этой сфере, послужили основой для становления такого направления материаловедения, как «3D Materials Science», или «трехмерное материаловедение». Одним из наиболее значимых факторов, способствующих быстрому развитию этого нового научно-практического направления, стало использование методов компьютерной томографии для исследования объемной структуры материалов.

О растущем интересе к изучению материалов с применением компьютерной томографии свидетельствует проведение по этой

тематике конференций мирового уровня. Так, в европейских странах можно отметить проведение в 2012 году конференции по промышленной компьютерной томографии в Австрии, в рамках которой функционировала секция по неразрушающему контролю и трехмерному изучению материалов [4]. В 2013 году в Бельгии состоялась международная конференция по томографии материалов и структур, собравшая более 250 участников из 28 стран мира [10]. Но первой специализированной конференцией по трехмерному материаловедению следует считать 1st International Conference on 3D Materials Science (США, Seven Springs, 2012), на которой было показано, что появление возможностей для исследования материалов в трех измерениях открыло новую эру в науке о материалах.

В России это направление также привлекает возрастающее внимание исследователей и практикующих специалистов. В значительной степени этому способствуют проведенные в 2013–2015 гг. международные конференции по компьютерной томографии, организатором которых является компания «Остек-СМТ» (г. Москва). С каждым годом растет число участников и повышается научный уровень представленных докладов, что свидетельствует о расширении использования томографии для решения актуальных задач материаловедения, машиностроения и других областей науки и техники.

облучение образца пучком нейтронов, взаимодействующих с атомными ядрами вещества [13]. Это позволяет получить хороший контраст при изучении многокомпонентных материалов, состоящих из веществ с близкими характеристиками по поглощению рентгеновского излучения, а также исследовать материалы, поглощение рентгеновского излучения которыми незначительно. Атомно-зондовая томография позволяет визуализировать структуру материалов на атомно-масштабном уровне с определением химической природы регистрируемых атомов, реконструируя трехмерную химическую картину их распределения.

Методологический инструментарий трехмерного материаловедения

Направление работы	Методы и инструменты	Результаты и их представление
Сбор проекционных данных о структуре материала	Рентгеновская компьютерная томография	Набор проекций распределения линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения
	Электронная томография	Набор электронно-микроскопических изображений высокого разрешения, визуализирующих распределение электронной плотности
	Нейтронная томография	Набор проекций распределения интенсивности нейтронного пучка
	Атомно-зондовая томография	Набор двумерных изображений распределения атомов химических элементов
Обработка проекционных данных и получение объемных изображений	Томографическая реконструкция на основе математических алгоритмов с использованием встроенных программных модулей	Пространственное изображение структуры материала в трехмерном виде
Моделирование и анализ результатов	Специализированное программное обеспечение	Количественный анализ параметров структуры
		Оценка пространственно-временных характеристик структуры материала

Методы томографии, применяемые для сбора проекционных данных о структуре материала, систематизированы в таблицу в зависимости от воздействия на изучаемый образец. Область использования каждого из методов определяется характеристикой материала образцов и спецификой решаемых задач. К примеру, рентгеновская компьютерная томография применяется при изучении макро- и микрообъектов для получения трехмерных изображений внутренней структуры с пространственным разрешением, достигающим 1 мкм. По данным [7], электронная томография находит применение при получении трехмерных изображений нано- и субмикроструктур, изучении строения границ и зерен несовершенств кристаллической структуры, а также при решении задач трехмерной нанометрологии. В основе метода нейтронной томографии лежит

Рентгеновская компьютерная томография представляет собой неразрушающий метод исследования внутренней структуры объекта путем его многократного просвечивания рентгеновским излучением в различных направлениях с последующей компьютерной обработкой проекционных данных на основе математических методов и алгоритмов [6, 8, 9]. Применение метода томографии в материаловедении основано на построении трехмерного распределения степени ослабления падающего излучения в исследуемом объекте. На макроуровне ослабление рентгеновского излучения моделируется по закону Ламберта – Бера, составляющему физическую основу метода рентгеновской компьютерной томографии [9]. При прохождении монохроматических рентгеновских лучей с заданной энергией E и начальной интенсивностью I_0 через

однородный материал толщиной L , интенсивность падающего излучения I после прохождения через материал уменьшается по экспоненциальной зависимости:

$$I = I_0 e^{-\mu L},$$

где μ – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} . Регистрируемое значение линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей при их прохождении через материал определяется энергией излучения E , толщиной материала L , его плотностью ρ и атомным номером вещества Z [6], т.е.:

$$\mu = f(E, L, \rho, Z).$$

Эти параметры определяют возможность изучения образцов из различных материалов на рентгеновских томографах с разными техническими характеристиками, а также разрешение получаемых изображений.

Реконструкция пространственного распределения величины линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения в объеме образца из изучаемого материала позволяет визуализировать его внутреннюю структуру в виде трехмерной модели, построение которой осуществляется на основе программной реализации математических алгоритмов реконструкции проекционных данных и требует использования специализированного программного обеспечения.

Основной целью использования томографии в материаловедении является качественная и количественная оценка различных элементов внутреннего строения материалов и изделий, включающих как структурные составляющие, так и дефекты микро- и макроструктуры. Параметры, анализируемые с помощью компьютерной томографии, могут включать распределение, форму и размеры структурных элементов, их ориентацию, объемную долю и др. Привлекательность использования рентгеновской компьютерной томографии для решения различных материаловедческих задач заключается в оперативности проведения исследований, снижении трудозатрат при подготовке образцов, получении подробной информации об объемном строении исследуемых объектов.

К настоящему времени известен опыт использования рентгеновской томографии при исследовании структуры алюминиевых и титановых сплавов [5], магниевых сплавов [14], полимерных материалов [15], а также при изучении процессов кристаллизации алюминиевых сплавов в режиме реального времени [12]. Наряду с этим очевидна перспективность применения рентгеновской компьютерной томографии для изучения

новых функциональных и конструкционных материалов, большинство которых являются структурно-неоднородными. Примерами таких материалов являются композиционные материалы на основе различных матриц (металломатричные, полимерные, керамические и др.), пористые материалы (пенометаллы, аэрогели), порошковые материалы (псевдосплавы, металлокерамика), функционально-градиентные материалы, литейные сплавы на основе систем несмешивающихся компонентов и др.

Высокая степень гетерогенности структуры может приводить к появлению характерных дефектов, таких как например, смещение волокон, их неправильная ориентация или объемная доля, расслоение, пористость, неравномерность распределения структурных составляющих, трещины и повреждения в материале матрицы и др. Дефектоскопия изделий из таких материалов может представлять значительные сложности, поэтому разработка новых материалов и технологических процессов их получения неразрывно связана с необходимостью совершенствования методов количественного неразрушающего контроля. Применение традиционных качественных методик (визуальный контроль, рентгеновская радиография, ультразвук и др.) далеко не всегда позволяет полноценно охарактеризовать дефекты в изделиях из функциональных материалов. Использование компьютерной томографии для решения этих задач позволяет с прецизионной точностью определить размер и расположение пустот, инородных включений, области с пониженной плотностью, трещины и другие несплошности. Получаемая при этом информация необходима при разработке основных направлений совершенствования технологии производства материалов и изделий из них.

Аналитические возможности компьютерной томографии зарекомендовали ее как эффективное средство не только неразрушающего контроля новых материалов, но и трехмерной визуализации их структуры, что позволяет наряду с выявлением неоднородностей и других дефектов установить характер пространственного распределения, форму, размеры и другие морфологические характеристики различных структурных составляющих. Например, возможность достижения заданного уровня свойств в металломатричных композиционных сплавах зависит от таких структурно-морфологических факторов, как объемная доля, дисперсность, форма и распределение армирующей фазы [11]. Компьютерная томография позволяет наметить эффективные направления оптимизации структуры

металломатричных композитов на основе управления технологическими параметрами их получения, предоставляя необходимые данные для поиска решений по обеспечению минимальной пористости, заданного пространственного распределения и объемной доли армирующей фазы. В настоящее время исследования в этом направлении проводятся совместными усилиями специалистов компании «Остек-СМТ» и ученых кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Владимирского государственного университета.

Одним из примеров этого направления является применение компьютерной микрофотографии при разработке цинковых композиционных сплавов триботехнического назначения на основе системы Zn–Al–Ti. При отработке технологии получения литых композитов на цинковой основе были опробованы различные варианты ввода порошкообразного титана в матричный расплав. Хорошая степень усвоения армирующей фазы была достигнута при использовании метода композиционных лигатур [1].

Образцы сканировали при следующих режимах: напряжение 160 кВ, время экспозиции на одну проекцию 333 мс, сшивка из 1000 проекций, пространственное разрешение (размер вокселя) 10 мкм. Анализ и компьютерную обработку изображений проводили с помощью программного пакета VGStudio MAX 2.2 (Volume Graphics). Структура материалов представлена литой матрицей и распределенными в ней микроразмерными армирующими частицами. Априорная информация о химическом и фазовом составе изучаемых образцов позволяет судить о химической природе наблюдаемых элементов структуры. Так, структурные элементы с более высокой рентгеновской плотностью представляют собой алюминиды титана (на рис. 1 обозначены синим цветом).

Исследования особенностей структуры цинковых композиционных сплавов с применением рентгеновской компьютерной томографии показали, что изучаемые образцы характеризуются сравнительно высокой степенью макроплотности. Программная

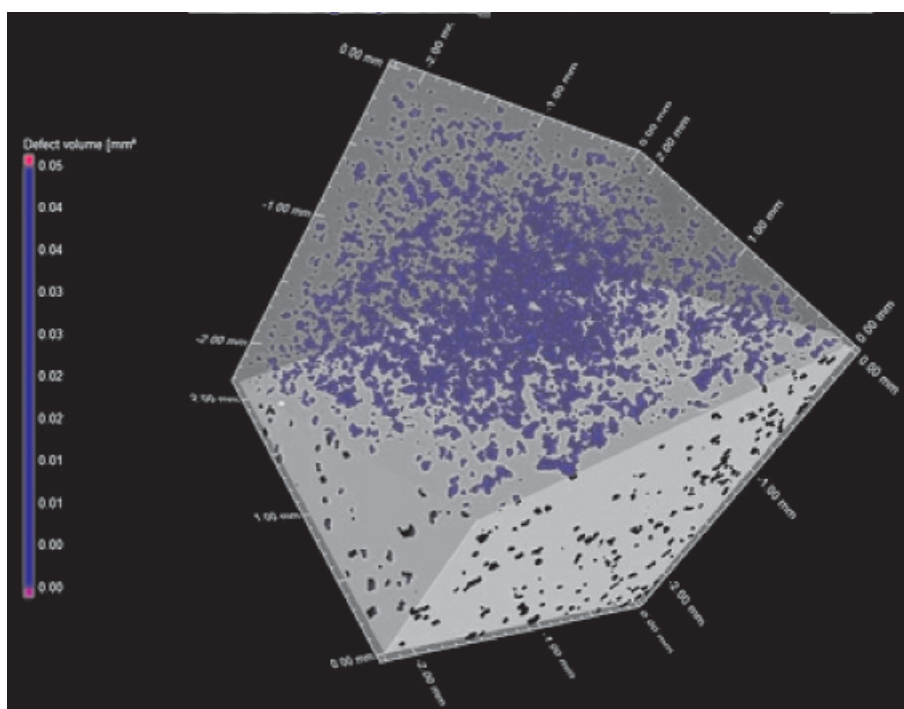


Рис. 1. Пространственное распределение армирующей фазы в композиционных сплавах Zn–Al–Ti

Представленные на рис. 1 результаты трехмерной визуализации структуры композиционного сплава получены в Центре рентгеновских технологий контроля ООО «Остек-СМТ» с помощью установки nanome|x с функцией томографии (GE Measurement & Control GmbH, Германия).

обработка полученных трехмерных данных позволяет выполнить количественный анализ заданных характеристик структуры. К примеру, при объеме представленной на рис. 1 локальной области 10,58 мм³ объемная доля включений алюминидных фаз составляет 4,98%. Видно, что применяемая

технология получения сплавов с применением концентрированных армирующих лигатур позволяет добиться гетерогенной структуры, отвечающей принципу Шарпи для триботехнических материалов, и обеспечивает высокую степень равномерности распределения армирующих частиц по объему литой заготовки.

Широкие возможности открываются при использовании методов рентгеновской томографии для изучения макростроения порошковых брикетов из реакционно-активных компонентов-прекурсоров, применяемых в качестве исходных шихтовых материалов при получении композиционных сплавов на алюминиевой основе методом жидкофазного реакционного синтеза. Теоретические и технологические основы этого метода подробно раскрыты в работах [2, 3]. Результаты сканирования брикетированных порошкообразных компонентов шихты для комплексно-армированного композиционного сплава системы $Al-TiO_2-B-Ti-SiC$ показаны на рис 2.

Для более детального изучения структурно-морфологических характеристик возможно выделение локальной области образца и ее количественный анализ (рис. 2, б). Распределенные в локальном объеме порошкового брикета частицы металлического титана выделены разным цветом в зависимости от их размеров.

Представленные результаты показывают значительные потенциальные возможности томографии при исследовании структурно-морфологических характеристик различных материалов и внутренних дефектов изделий из них. Очевидно, что расширение использования этого метода в практике научных исследований позволит достичь значительного прогресса в решении различных фундаментальных и прикладных задач современного материаловедения.

Автор считает своим долгом выразить благодарность и глубокую признательность В.А. Копытову, С.И. Румянцеву и Н.А. Федорову (ООО «Остек-СМТ») за

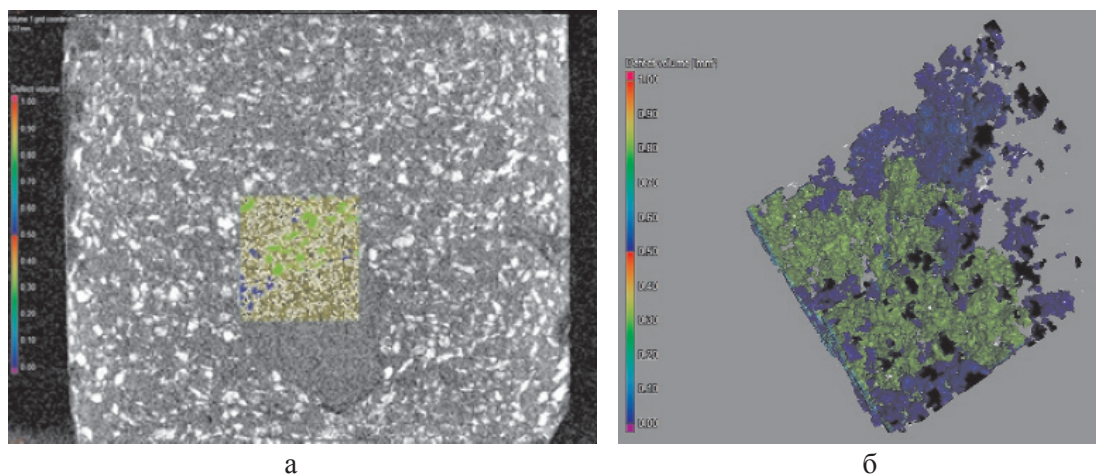


Рис. 2. Томографический срез порошкового композиционного брикета (а) и распределение порошкообразных частиц титана в микрообъеме (б)

Анализируя полученные изображения, можно судить о наличии локальных неоднородностей макроструктуры в объеме порошкового брикета, что свидетельствует о необходимости оптимизации режимов механической активации порошкообразных компонентов шихты. Важно отметить, что традиционные разрушающие методы изучения структуры для таких брикетов непригодны, поскольку они обладают низкой прочностью и попросту рассыпаются при попытке их разрезать. В этой связи рентгеновская томография представляется эффективным инструментом контроля качества порошковых композиционных брикетов.

предоставленную возможность работы на установке napote|x и помощь в проведении исследований.

Список литературы

1. Прусов Е.С., Коробков М.Б., Кечин В.А. Повышение триботехнических характеристик литых заготовок из цинковых сплавов // Литейщик России. – 2014. – № 12. – С. 30–36.
2. Прусов Е.С., Панфилов А.А. Исследование свойств литых композиционных сплавов на основе алюминия, армированных эндогенными и экзогенными фазами // Металлы. – 2011. – № 4. – С. 79–84.
3. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. Современные методы получения литых композиционных сплавов // Литейщик России. – 2011. – № 12. – С. 35–39.

4. Conference on Industrial Computed Tomography: Proceedings. 19–21 Sept., 2012. University of Applied Sciences Upper Austria. Ed. by J. Kastner. Shaker Verlag GmbH. 428 p.
5. Ludwig W., King A., Reischig P. et al. New Opportunities for 3D Materials Science of Polycrystalline Materials at the Micrometre Lengthscale by Combined Use of X-ray Diffraction and X-ray Imaging // *Materials Science and Engineering: A*. 524. – 2009. – P. 69–76.
6. Maire E. et al. On the Application of X-ray Microtomography in the Field of Materials Science // *Advanced Engineering Materials*. – 2001. – Vol. 3. – Iss. 8. – P. 539–546.
7. Midgley P.A., Dunin-Borkowski R.E. Electron Tomography and Holography in Materials Science // *Nature Materials*. – 2009. – Vol. 8. – P. 271–280.
8. Ohser J., Schladitz K. 3D Images of Materials Structures: Processing and Analysis. – 2009. Wiley-VCH Verlag GmbH. Berlin. – 341 p.
9. Peyrin F., Engelke K. CT Imaging: Basics and New Trends. In: *Handbook of Particle Detection and Imaging*. – Springer-Verlag, Berlin, 2012. – P. 883–915.
10. 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures: Book of Abstracts. 1–5 July, 2013. Ed. by Veerle Cnudde. University of Ghent, Belgium. – 374 p.
11. Prusov E.S. Modern Methods of Metal Matrix Composite Alloys Production and New Approaches to Realization of Reinforcing Scheme // *Machines, Technologies, Materials*. – 2014. – Iss.1. – P. 11–13.
12. Tolnai D., Townsend P., Requena G. et al. In situ synchrotron tomographic investigation of the solidification of an AlMg4.7Si8 alloy // *Acta Materialia*. – 2012. – 60. 6–7. – P. 2568–2577.
13. Vontobel P., Lehmann E.H., Hassanein R., Frei G. Neutron Tomography: Method and Applications // *Physica B: Condensed Matter*. – Vol. 385–386. – Part 1. – 2006. – P. 475–480.
14. Wang M.Y., Williams J.J., Jiang L. et al. Three Dimensional (3D) Microstructural Characterization and Quantitative Analysis of Solidified Microstructures in Magnesium-Based Alloys // *Metallography, Microstructure and Analysis*. – 2012. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 7–13.
15. Wismans J.G.F., Van Dommelen J.A.W. et al. Computed Tomography-based Modeling of Structured Polymers // *Journal of Cellular Plastics*. – 2009. – Vol. 45. – № 2. – P. 157–179.
4. Conference on Industrial Computed Tomography: Proceedings. 19–21 Sept., 2012. University of Applied Sciences Upper Austria. Ed. by J. Kastner. Shaker Verlag GmbH. 428 p.
5. Ludwig W., King A., Reischig P. et al. New Opportunities for 3D Materials Science of Polycrystalline Materials at the Micrometre Lengthscale by Combined Use of X-ray Diffraction and X-ray Imaging // *Materials Science and Engineering: A*. 524. 2009. pp. 69–76.
6. Maire E. et al. On the Application of X-ray Microtomography in the Field of Materials Science // *Advanced Engineering Materials*. 2001. Vol.3. Iss. 8. pp. 539–546.
7. Midgley P.A., Dunin-Borkowski R.E. Electron Tomography and Holography in Materials Science // *Nature Materials*. Vol. 8. 2009. pp. 271–280.
8. Ohser J., Schladitz K. 3D Images of Materials Structures: Processing and Analysis. Wiley-VCH Verlag GmbH, Berlin, 2009. 341 p.
9. Peyrin F., Engelke K. CT Imaging: Basics and New Trends. In: *Handbook of Particle Detection and Imaging*. Springer-Verlag, Berlin, 2012. pp. 883–915.
10. 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures: Book of Abstracts. 1-5 July, 2013. Ed. by Veerle Cnudde. University of Ghent, Belgium. 374 p.
11. Prusov E.S. Modern Methods of Metal Matrix Composite Alloys Production and New Approaches to Realization of Reinforcing Scheme // *Machines, Technologies, Materials*. 2014. Iss.1. pp. 11–13.
12. Tolnai D., Townsend P., Requena G. et al. In situ synchrotron tomographic investigation of the solidification of an AlMg4.7Si8 alloy // *Acta Materialia*. 2012. 60. 6-7. pp. 2568–2577.
13. Vontobel P., Lehmann E.H., Hassanein R., Frei G. Neutron Tomography: Method and Applications // *Physica B: Condensed Matter*. Vol. 385–386. Part 1. 2006. pp. 475–480.
14. Wang M.Y., Williams J.J., Jiang L. et al. Three Dimensional (3D) Microstructural Characterization and Quantitative Analysis of Solidified Microstructures in Magnesium-Based Alloys // *Metallography, Microstructure and Analysis*. 2012. Vol. 1. Iss. 1. pp. 7–13.
15. Wismans J.G.F., Van Dommelen J.A.W. et al. Computed Tomography-based Modeling of Structured Polymers // *Journal of Cellular Plastics*. 2009. Vol. 45. no. 2. pp. 157–179.

References

1. Prusov E.S., Korobkov M.B., Kechin V.A. Povyshenie tribotekhnicheskikh harakteristik lityh zagotovok iz cinkovyh splavov // *Litejshhik Rossii*. 2014. no. 12. pp. 30–36.
2. Prusov E.S., Panfilov A.A. Issledovanie svojstv lityh kompozicionnyh splavov na osnove aljuminija, armirovannyh jendogennymi i jekzogennymi fazami // *Metally*. 2011. no. 4. pp. 79–84.
3. Prusov E.S., Panfilov A.A., Kechin V.A. Sovremennye metody poluchenija lityh kompozicionnyh splavov // *Litejshhik Rossii*. 2011. no. 12. pp. 35–39.

Рецензенты:

Христофоров А.И., д.т.н., профессор кафедры химических технологий, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир;
 Батышев К.А., д.т.н., профессор кафедры «Машины и технологии литейного производства», Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г. Москва.