

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 7

ТВЕРЬ 2015

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145
ББК Ж36:Г5+В379
Ф50

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики
Тверского государственного технического университета

А.Н. Болотов

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики конденсированного
состояния Тверского государственного университета

Н.Н. Большакова

Рецензирование осуществляется на основании Положения об рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

**Официальный сайт издания в сети Интернет:
www.physchemaspects.ru**

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. – Вып. 7. – 588 с.

ISBN 978-5-7609-1071-4

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145
ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1071-4

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2015
© Тверской государственной
университет, 2015

УДК 669.25.36

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ
ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

Ю.Ф. Иванов^{1,2}, А.П. Ласковнев³, А.Д. Тересов^{1,2}, Н.Н. Черенда⁴, В.В. Углов⁴,
Е.А. Петрикова^{1,2}, М.В. Асташинская⁴, Н.Н. Коваль^{1,2}

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный
университет»

634050, Россия, Томск, пр-т Ленина, 36

²ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской
академии наук»

634055, Россия, Томск, пр-т Академический, 2/3

³Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси
220072, Республика Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 66

⁴Белорусский государственный университет
220030, Республика Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 4
yufi55@mail.ru

Аннотация: Представлены результаты анализа элементного и фазового состава, дефектной субструктуры, прочностных и трибологических характеристик силумина заэвтектического состава в литом состоянии и после облучения высокоинтенсивным электронным пучком. Продемонстрировано формирование в результате облучения модифицированного поверхностного слоя толщиной до 1000 мкм, обладающего повышенными прочностными и трибологическими характеристиками.

Ключевые слова: силумин заэвтектического состава; высокоинтенсивный импульсный электронный пучок, структура, свойства.

1. Введение

Ликвация кристаллов первичного кремния в заэвтектических силуминах приводит к ухудшению обрабатываемости отливок резанием, анизотропии свойств сплава по сечению отливок, относительно низкому уровню механических свойств и, в первую очередь, пластичности, снижению износостойкости изделий. В совокупности это приводит к существенному сужению области применения заэвтектических силуминов в промышленности. Для подавления первичной кристаллизации кремниевой фазы предлагается перегревать расплав выше купола распада метастабильного коллоида с получением квазиэвтектики [1], использовать вибрацию [2], обработку расплава периодическим (циклическим) однополярным импульсным электрическим током [3] и иные энергетические воздействия на расплав [4]. В [5] для получения из заэвтектического силумина отливок высокого качества с мелкими, менее 15 мкм, равномерно распределёнными в объёме кристаллами первичного кремния, предлагается обеспечить сочетание высокой скорости кристаллизации сплава с модифицированием фосфором, а при получении

заготовок для последующей пластической деформации – с дополнительной термической обработкой.

Целью настоящей работы является анализ результатов, полученных при исследовании структуры и свойств поверхностного слоя силумина заэвтектического состава, подвергнутого облучению высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия.

2. Материал и методика эксперимента

В качестве материала исследования использовали литые образцы сплава алюминий-кремний (силумин) заэвтектического состава. Средняя концентрация кремния, определенная методами микрорентгеноспектрального анализа литых образцов (усреднение по результатам элементного анализа пяти площадок размерами $1,2 \times 0,95 \text{ мм}^2$), составляет 28,5 вес. % (при изменении концентрации кремния в пределах от 22,1 вес.% до 35,5 вес.%). Модификацию поверхности образцов проводили высокоинтенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [6]; плотность энергии пучка электронов 40 Дж/см^2 , частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$, число импульсов облучения 20; длительность воздействия пучка электронов 200 мкс, энергия ускоренных электронов 18 кэВ. Исследования элементного и фазового состава, дефектной структуры поверхности модифицирования и поперечных шлифов проводили методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа. Прочностные свойства материала характеризовали микротвердостью. Исследования износостойкости силумина проводилось в геометрии диск-штифт при комнатной температуре (нагрузка на индентор 1 Н, скорость вращения 25 мм/с, длина трека 20 м). Объем износа материала определялся после проведения профилометрии образовавшегося трека.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Исследуемый сплав, как и следовало ожидать, в литом состоянии является весьма неоднородным материалом. Анализ структура шлифа, выполненный методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, позволил выявить грубые включения кремния, средние размеры которых могут достигать 50 мкм, и интерметаллидов (см. рис. 1).

Включения имеют разнообразную форму, распределены в объеме материала неравномерно. Выплавка образцов сопровождалась формированием многочисленных микропор, расположенных в объеме материала хаотически (см. рис. 1, микропоры указаны стрелками). Методами рентгенофазового анализа наряду с основными фазами (твердые

растворы на основе алюминия и кремния) выявлены интерметаллиды состава Al_9FeSi_3 и $FeAl_3Si_2$.

Облучение образцов силумина осуществляли, как показали выполненные ранее расчеты температурного поля [7-9], в режиме плавления всех присутствующих в материале фаз. Микрофотографии, демонстрирующие структуру поверхности образца, обработанного высокоинтенсивным электронным пучком, приведены на рис. 2. Отчетливо видно, что высокоскоростное плавление и последующая высокоскоростная кристаллизация приводят к формированию поверхностного слоя с минимальным количеством микропор (см. рис. 2 а). Структура модифицированного слоя представлена кристаллитами, размеры которых изменяются в пределах (0,4...0,5) мкм (см. рис. 2 б). Микрорентгеноспектральный анализ показывает, что концентрация кремния в поверхностном слое изменяется в пределах (10...12) ат. %, что соответствует составу эвтектики сплава алюминий-кремний [10].

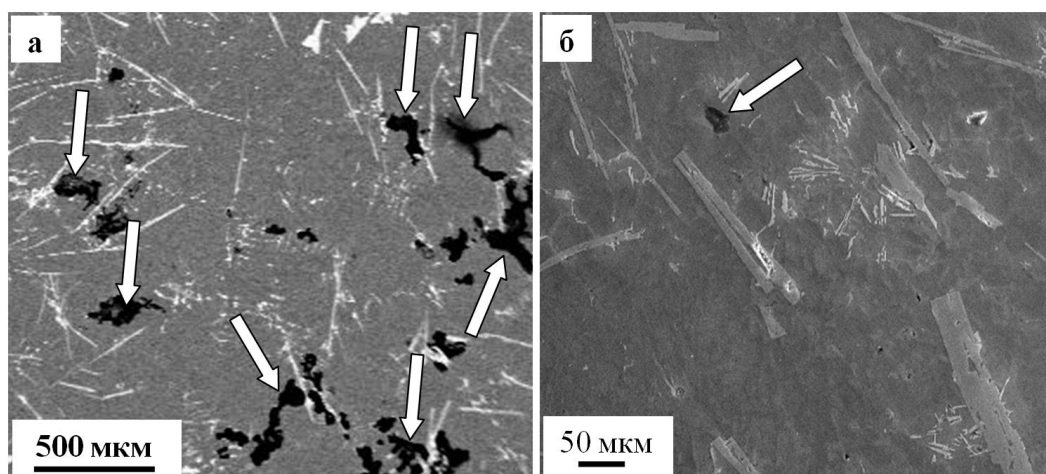


Рис. 1. Структура шлифа заэвтектического силумина в литом состоянии.

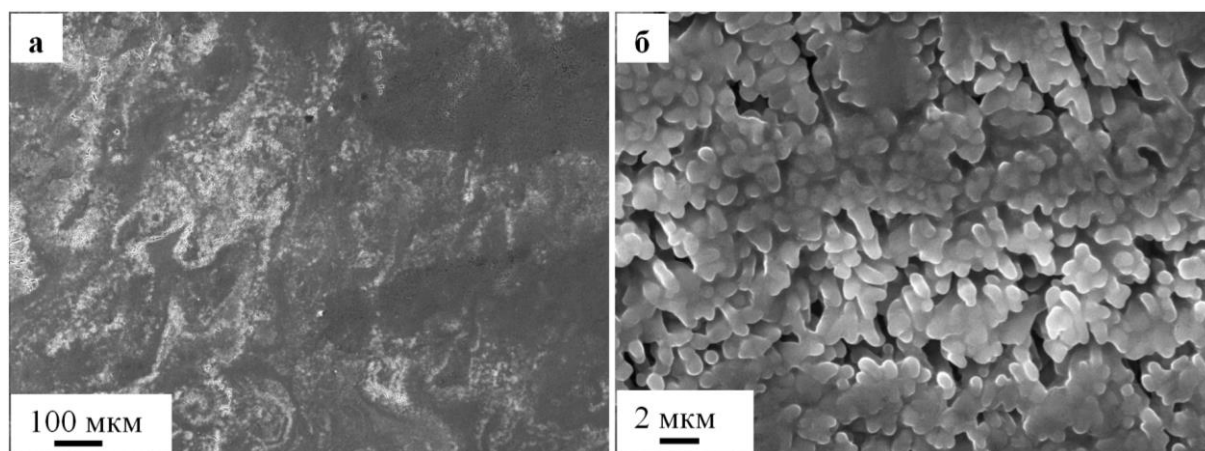


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности литого силумина, облученного высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Рентгеноструктурный анализ модифицированного образца показал, что воздействие электронного пучка приводит к кратному (в 2...3 раза) уменьшению размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) и алюминия, и кремния. Параметр кристаллической решётки алюминия и кремния увеличивается, что, очевидно, связано с растворением интерметаллидов и легированием кристаллической решетки алюминия и кремния примесными атомами (*Mg, Fe, Cu*). Это предположение подтверждается отсутствием на рентгенограмме облученного образца дифракционных линий соответствующих интерметаллидных фаз.

Структуру объема материала изучали, исследуя строение поперечного шлифа. Характерное изображение структуры поперечного шлифа представлено на рис. 3. Отчетливо видно, что облучение силумина электронным пучком приводит к формированию многослойной структуры, представленной поверхностным слоем (рис. 3 б, слой 1), образованным в результате плавления всех фаз и скоростной кристаллизации всех фаз материала; промежуточным слоем (рис. 3 б, слой 2), содержащим не полностью растворившиеся включения интерметаллидов и кремния; переходным слоем (рис. 3 б, слой 3), содержащим не полностью растворившиеся включения кремния и включения интерметаллидов. Общая толщина модифицированного слоя достигает 1000 мкм (рис. 3 а, слой выделен двойной стрелкой). Отметим, что модифицированный электронным пучком слой силумина является плотным, содержит минимальное количество микропор и микротрещин. Этот результат позволяет рекомендовать облучение силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в качестве метода, позволяющего удалять из сравнительно толстого поверхностного слоя микропоры, формирующиеся в процессе выплавки материала. Структура поверхностного слоя, сформировавшегося в результате высокоскоростной кристаллизации, представлена кристаллитами (очевидно, твердый раствор на основе алюминия), окруженными сравнительно тонкими прослойками второй фазы (очевидно, кремний) (рис. 3 в). Размеры кристаллитов изменяются в пределах от 2 мкм до 3 мкм. Поперечные размеры прослоек составляют десятые доли микрометра. Толщина поверхностного слоя достигает 100 мкм. Промежуточный слой характеризуется наличием большого количества включений кремния и интерметаллидов, количество которых на единицу поверхности шлифа превышает подобную характеристику исходного материала (рис. 3 б). Данное обстоятельство позволяет предположить, что промежуточный слой обогатился интерметаллидной фазой, ранее располагавшейся в поверхностном слое и переместившейся в промежуточный слой под действием сил гравитации при плавлении материала электронным пучком. Толщина промежуточного

слоя превышает 400 мкм. Переходный слой является самым протяженным, толщина его достигает 500 мкм. Данный слой характеризуется наличием сравнительно мелких включений кремния и интерметаллидов, размеры которых не превышают 5 мкм (рис. 3 г). Отметим, что размеры включений второй фазы, расположенные в промежуточном и переходном слоях, значительно меньше размеров включений литого силумина (рис. 3 а).

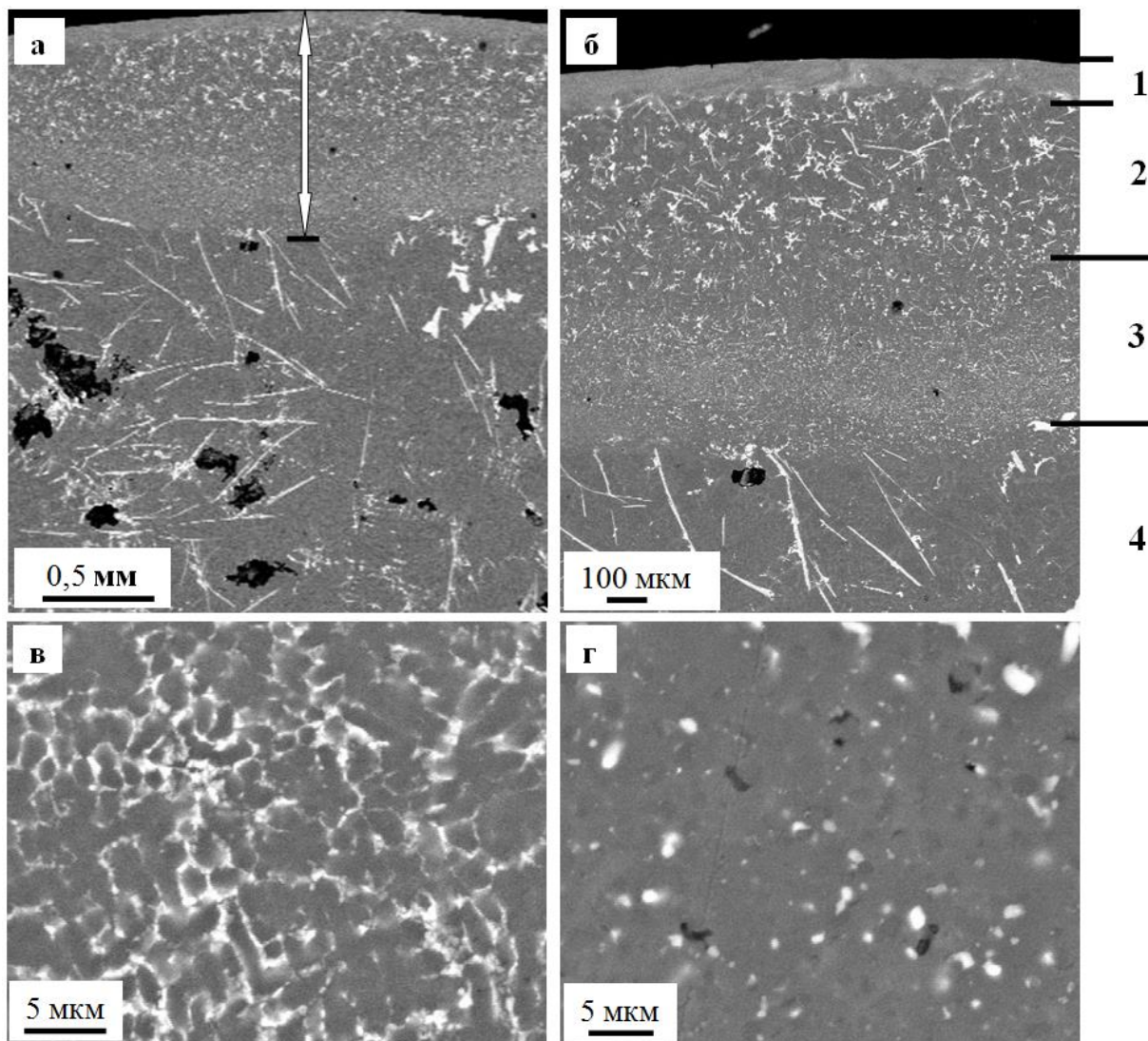


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного шлифа образца литого силумина, облученного высокоинтенсивным электронным пучком.

Механические свойства силумина характеризовали величиной микротвердости. Выполненные исследования показали, что значение микротвёрдости исходного материала составляет $\approx 0,8$ ГПа. После обработки электронным пучком микротвердость поверхности облучения достигла $\approx 1,9$ ГПа. Используя поперечный шлиф, была измерена микротвердость выявленных слоев облученного материала. Выполненные

исследования показали, что микротвёрдость поверхностного слоя модифицированного электронным пучком силумина составляет $\approx 1,6$ ГПа, промежуточного $\approx 1,08$ ГПа, переходного $\approx 0,97$ ГПа. Следовательно, облучение силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя приводит к формированию многослойной структуры, твердость которой снижается по мере удаления от поверхности модифицирования к центру образца. Микротвердость поверхности облучения превышает микротвердость исходного материала более чем в 2 раза.

Выполнены трибологические испытания силумина в литом состоянии и после облучения высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Установлено, что износостойкость силумина, обработанного высокоинтенсивным электронным пучком, в $\approx 1,2$ раз превышает износостойкость литого материала; коэффициент трения облученного силумина снижается в $\approx 1,5$ раза по сравнению с литым материалом.

4. Заключение

Анализ результатов, полученных при исследовании элементного и фазового состава, дефектной субструктуры, прочностных и трибологических свойств сплава алюминий-кремний заэвтектического состава в литом состоянии и после облучения высокоинтенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия (установка СОЛО, ИСЭ СО РАН) позволяет сделать следующие выводы:

- 1) характерной особенностью силумина заэвтектического состава в литом состоянии является присутствие большого количества крупных (до 50 мкм толщиной) частиц избыточного кремния, а также включений интерметаллидов (Al_9FeSi_3 или $FeAl_3Si_2$), наличие микропор;
- 2) облучение силумина электронным пучком в режиме интенсивного плавления позволяет сформировать в объеме толщиной до 1000 мкм беспористую многослойную структуру. Поверхностный слой толщиной до 100 мкм, образуется в результате плавления всех имеющихся в сплаве фаз и последующей высокоскоростной кристаллизации. Нижележащие подслои содержат как частично растворившиеся включения исходных фаз, так и выделения, образовавшиеся при высокоскоростной кристаллизации;
- 3) твердость поверхностного слоя более чем в два раза превышает твердость литого силумина и снижается по мере удаления от поверхности облучения. Износостойкость силумина, обработанного высокоинтенсивным электронным пучком, в $\approx 1,2$ раз превышает

износостойкость литого материала; при этом коэффициент трения снижается в $\approx 1,5$ раза.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-08-00416-а) и проекта № 33 фундаментальных исследований Национальной академии наук Беларуси и Сибирского отделения РАН на 2015 - 2017 годы.

Библиографический список:

1. **Коржавина, О.А.** Вязкость и электросопротивление расплавов $Al-Si$ и влияние их структурного состояния на строение литого металла / О.А. Коржавина, П.С. Попель, И.Г. Бродова и др. // Расплавы. – 1991. – № 1. – С. 10-17.
2. **Иванов, А.А.** Приготовление алюминиево-кремниевой лигатуры с помощью вибрации / А.А. Иванов, Г.Г. Крушенко // Литейное производство. – 1991. – № 3. – С. 7-8.
3. **Петров, С.С.** Модифицирование заэвтектических силуминов обработкой расплава импульсным электрическим током / С.С. Петров, А.Г. Пригунова, С.В. Пригунов, Д.Н. Ключник // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37. – № 3. – С. 367-378.
4. **Белов, М.В.** Некоторые особенности затвердевания отливок из заэвтектических силуминов при литье с кристаллизацией под давлением / М.В. Белов, Э.Б. Тен, К.А. Батышев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2007. – №5. – С. 42-44.
5. **Бродова, И.Г.** Расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов / И.Г. Бродова, П.С. Попель, Н.М. Барбин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 369 с.
6. **Коваль, Н.Н.** Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке / Н.Н. Коваль, Ю.Ф. Иванов // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – №5. – С. 60-70.
7. **Ivanov, Yu.F.** The structure of the surface alloy formed as a result of high-speed melting of the film ($TiCu$)/substrate (Al) system / Yu.F. Ivanov, N.N. Koval, V.I. Vlasov et al. // High Temperature Material Processes. – 2013. – V. 17. – I. 4. – P. 241-256.
8. **Ivanov, Yu.F.** Structure and properties of a coating ($TiCuN$) – substrate (Al) system modified with a high-intensity electron beam/ Yu.F. Ivanov, E.A. Petrikova, O.V. Ivanova et al. // Russian Physics Journal. – 2015. – V. 58. – I. 3. – P. 373-379.
9. **Иванов, Ю.Ф.** Численное моделирование температурного поля силумина, облученного интенсивным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова, О.В. Иванова, И.А. Иконникова, А.В. Ткаченко // Известия ВУЗов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 4. – С. 46-51.
10. **Ласковнев, А.П.** Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др.; под ред. А.П. Ласковнева. – Минск: «Беларуская навука», 2013. – 287 с.