

УДК 621.74:669.715

В.В. Левчук¹, А.В. Трапезников¹, С.И. Пентюхин¹, А.А. Леонов¹

СПОСОБЫ ЛИТЬЯ ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ТИПА СИЛУМИН (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-30-38

Рассмотрен процесс литья тонкостенной фасонной отливки из алюминиевого сплава АК7ч. с применением двух методов литья: в холоднотвердеющие смеси и по выплавляемым моделям. В обоих случаях использовалась пластиковая оснастка, полученная по технологии 3D-печати. Выявлены отличия методов литья, повлиявшие на качество детали. Проведен сравнительный анализ результатов эксперимента, по результатам которого подобран оптимальный метод литья тонкостенной отливки «Корпус» из алюминиевого сплава АК7ч.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, литье в холоднотвердеющие смеси, силумин, сплав АК7ч., отливка, альфа-сет процесс, модельный состав.

V.V. Levchuk¹, A.V. Trapeznikov¹, S.I. Pentyukhin¹, A.A. Leonov¹

CASTING METHODS FOR A THIN-WALLED PART FROM SILUMIN (review)

The process of casting of thin-walled shaped casting from the aluminum alloy AK7ch. with the use of two methods of casting: sand casting and investment casting was observed in this article. The plastic foundry pattern equipment got by 3D printing technology is used in both cases. The differences in the methods of casting were revealed, which affected the quality of the part. A comparative analysis of the experimental results was carried out. Based on the results of the experiment, an optimal method for casting a thin-walled casting «Housing» from the alloy AK7ch. was selected.

Keywords: investment casting, cold box process, silumin, alloy AK7h., casting, alpha-set process, model composition.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

На данном этапе развития машиностроения актуальна проблема выбора правильного метода литья деталей. Существует более 50 методов литья, которые отличаются друг от друга множеством факторов. Прежде чем определиться с методом литья, необходимо знать о предъявляемых требованиях по таким критериям, как:

- материал отливок – металлическое (черное и цветное) и неметаллическое литье;
- будущее применение отливок;
- точность параметров (степень шероховатости, толщина стенок и т. д.).

С учетом этих основных параметров, а также возможных дополнительных требований выбирается способ литья.

Основные виды технологии литья:

– *в песчаные формы* – один из дешевых, но наименее точных в плане размеров метод; самый широко используемый способ литья;

– *в кокиль* – более высокоточный метод литья, широко используется в производстве для выплавки крупных серий деталей;

– *по выплавляемым моделям* – метод используется для получения деталей сложной формы;

– *под давлением* – метод, подходящий для литья деталей сложной конфигурации; автоматизированный (менее трудоемкий) процесс, поэтому подходит для серийного производства; поверхность получаемой детали обладает высоким качеством и точностью размеров;

– *по газифицируемым моделям* – наиболее выгодный метод с точки зрения экономичности процесса производства;

– *в оболочковые формы* – способ получения фасонных отливок массой до 25 кг из термоактивных смесей;

– *центробежное* – используется для получения вращательных форм отливок – например втулки, трубы и др.; несомненные преимущества данного метода – высокие плотность и износостойкость металла.

Существуют также и другие способы литья, но они подходят для более конкретных назначений. Следует отметить, что при производстве не обязательно ограничиваться одним методом литья, их можно комбинировать. В этой статье авторы более подробно рассмотрят методы литья в холоднотвердеющие смеси (ХТС) и по выплавляемым моделям.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Задача исследования – выбрать оптимальный способ литья для детали «Корпус», которая представляет собой тонкостенную отливку с размерами 490×90×90 мм и толщиной стенки 3–5 мм.

Для эксперимента выбрали два способа литья: литье в песчаные формы и литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). Основные преимущества, недостатки и особенности выбранных способов литья представлены далее.

Литье в песчаные формы до сих пор является достаточно широко применяемым методом. Основными недостатками такого способа литья является большая трудоемкость, невысокая производительность, низкая точность размеров (точность отливок, полученных этим методом, соответствует 6–8 классу), повышенная шероховатость поверхности. К преимуществам можно отнести универсальность, а значит, получение отливок любой массы и сложности из литейных алюминиевых сплавов [2], а также относительно быстрый цикл производства. Этот способ является наиболее рентабельным в мелкосерийном и единичном производстве.

Для изготовления литейных форм используют специальные формовочные и стержневые смеси, которые способствуют повышению производительности труда и снижению трудоемкости за счет значительного сокращения продолжительности сушки, поэтому процесс возможно автоматизировать, а время производственного цикла уменьшить [3]. Наиболее часто применяют жидкоподвижные самотвердеющие смеси, ХТС и др. [4], благодаря применению которых улучшается качество отливок, так как

улучшается качество поверхности отливок и повышается точность по сравнению с традиционным литьем в песчано-глинистые смеси.

Технология литья разрабатывается в зависимости от производственных условий литейного цеха и применяемых материалов [5]. В технических условиях содержится информация о плотности, точности, шероховатости и приемке отливок. Основными вопросами, решаемыми при разработке технологии, являются:

- способ изготовления формы (автоматизировано или вручную, всухую или всырую);
- расположение отливки и литниковой системы в форме;
- количество и расположение стержней, их форма и размеры, необходимость фиксаторов;
- места разъема модели, формы, стержней и стержневых ящиков;
- радиусы закруглений и величина формовочных уклонов;
- размеры и расположение технологических приливов, стяжек, ребер и т. п.

Рентабельность производства – это один из основных критериев при выборе способа изготовления формы.

Расположение отливки в форме определяется исходя из того, что неметаллические включения (такие как шлак, песчинки, флюсы и т. д.) всплывают, поэтому обрабатываемые поверхности отливок располагаются внизу, а сверху – тепловые узлы отливок, которые затвердевают в самом конце.

Правильный выбор литниковой системы облегчает механическую обработку полученных отливок [6]. Для того чтобы исключить возможные дефекты при сборке форм для литья, литейные поверхности должны образовываться одной половиной формы и одним стержнем. Усадка алюминиевых сплавов при литье изменяется в пределах от 0,9 до 1,3% и зависит от их химического состава. Для более легкого удаления модели из формы выбираются формовочные уклоны, размер которых зависит от высоты и материала модели. В отливках не должно быть резких переходов от толстых сечений к тонким, а также острых углов, для чего необходимо предусмотреть радиусы закруглений и галтелей.

Для увеличения прочности отливок, а также предотвращения трещин после затвердевания или термообработки необходимо введение технологического прилива, ребер жесткости, стяжек и др., которые будут удалены в дальнейшем при механической обработке. Эти меры применяют для сохранения твердости и правильной формы отливки, особенно тонкостенных моделей.

Один из важнейших этапов при разработке технологии изготовления литейной формы – определение типа литниковой системы [3], которая должна соответствовать определенным требованиям. Во-первых, обеспечивать плавное заполнение сплавом формы так, чтобы не происходило захвата воздуха в ходе заливки, а также обваливания стенок формы. Во-вторых, способствовать свободному удалению сгораемых газов из связующих материалов смеси. В-третьих, обеспечивать наиболее оптимальный тепловой режим формы для более благоприятной кристаллизации будущей отливки.

В зависимости от места, куда будет подаваться сплав в форму, различают нижние, верхние, ярусные, вертикально-щелевые и комбинированные конструкции литниковых систем, которые могут сочетать элементы нескольких систем [7].

Применение литья по выплавляемым моделям определяется исходя из технико-экономических показателей и имеет следующие характерные особенности [8]:

- для каждой отдельной отливки применяют модель, используемую однократно, и затем удаляют из форм выжиганием или выплавлением;
- в литейной форме отсутствуют разъемы, используемые при других способах изготовления отливок, для удаления отливок и установки стержней;
- литейные формы прокаливают и в горячем состоянии заливают жидкий металл;

– огнеупорный слой наносят не на рабочие поверхности форм и стержней, а на саму модель – в отличие от других способов литья.

Основными преимуществами ЛВМ являются:

- возможность использования любых сплавов для изготовления деталей;
- изготовление деталей с минимальными припусками на механическую обработку с высокой точностью и классом шероховатости поверхности;
- значительное сокращение трудоемкости изготовления заготовок;
- создание сложных деталей, а также объединение деталей в целые неразъемные литые узлы [3];
- процесс значительно проще, чем другие методы литья, поэтому использования труда высококвалифицированных рабочих не требуется;
- возможность автоматизации процесса.

Способ ЛВМ имеет определенные недостатки:

- необходимы дорогие вспомогательные материалы;
- длительный цикл получения заготовок;
- высокая энергоемкость процесса;
- ограничения по массе и размеру отливок.

Важным и обобщающим моментом того или иного технологического процесса является показатель себестоимости продукции. Себестоимость ЛВМ зависит от конкретных условий производства: самого технологического процесса, объема выпуска литья, серийности, насколько автоматизированным будет процесс, сложности и массы отливок. Поэтому способ ЛВМ используется в тех случаях, когда необходимо получить отливки с точными параметрами и размерами [9]. В таких случаях способ ЛВМ является оптимальным и единственно возможным.

Материал детали «Корпус» – алюминиевый сплав марки АК7ч. (ГОСТ 1583–93). При выборе способа литья ориентировались на мелкосерийное производство. Особенностью детали является ее тонкостенность.

Способ литья по выплавляемым моделям наилучшим образом подходит для тонкостенных деталей [10]. Для изготовления модели детали «Корпус» изготовлена оснастка с помощью FDM технологии 3D-печати ABS пластика (рис. 1, а). Пластик ABS является более удобным в работе, чем пластик PLA, ввиду его большей прочности при более высокой температуре эксплуатации [11, 12]. В собранном состоянии в форму заливали восковой модельный состав марки ПС50-50 и отработанный модельный состав фирмы Freeman в процентном соотношении с парафином 70:30. В качестве разделительного покрытия [13] применяли льняное масло.

После застывания модельного состава готовую восковую модель вынимали из формы и механически устраняли видимые дефекты. Готовая восковая модель применялась для изготовления керамических форм. К восковой модели приплавливали дополнительные связующие стойки для образования литниковой части, форма которых должна полностью соответствовать керамической форме. Модельный блок окунали в керамическую обсыпку (на основе электрокорунда) со связующим. После нанесения каждого слоя проводили сушку. Затем из сформированной многослойной (10 слоев) формы выплавляли модельный состав. Для этого форму с модельным составом погружали в кипящую воду, при высокой температуре воск выплавлялся и оставался в воде, эту воду, смешанную с модельным составом (воском), сливали и извлекали готовую форму. После вытапливания модельного состава формы прокаливали при 1100°C для избавления от остатков воска.

Перед заливкой сплава блоки для фиксации керамической формы нагревали в печи до температуры 400°C для того, чтобы в процессе заливки керамическая форма не лопнула от перепада температур. Затем нагретый металл заливали в керамические формы, которые остывали на открытом воздухе. Литейный алюминиевый сплав АК7ч.

отлично подходит для изготовления фасонных отливок, потому что обладает наилучшими литейными свойствами по сравнению с алюминиевыми сплавами других систем, а также хорошей герметичностью. При плавке сплава в печи важно соблюдать температурный режим, потому что от этого зависят физико-механические свойства. После заливки сплава остывшую готовую керамическую форму погружали в воду для того, чтобы удаление готовой детали происходила с меньшими энергозатратами, так как выбивка производится механически. Форма впитывает в себя воду и проще отходит от отливки, отделение керамики от металла производится вручную (ударами по литниковой системе), чтобы не повредить отлитую деталь. Далее от отливки отрезают литниково-питающую систему.

Для того чтобы проконтролировать внутреннюю пористость в отливках, необходимо срезать литники вровень с поверхностью. Однако для увеличения обрабатываемости резанием лучше механически обрабатывать отливки после термической обработки. Поэтому после грубой обрезки литников отливки термообрабатывали по стандартному режиму Т6 (ГОСТ 1583–93) и направляли на механическую обработку. После этого производили контроль плотности на рентгеновском аппарате Экстравольт 450.

Литье в песчаные формы считается универсальным способом, который подходит для деталей средних и крупных габаритов [4]. К литью в землю относится литье в песчано-глинистые и холоднотвердеющие смеси. Отливки, полученные литьем в ХТС, могут иметь более высокий класс точности относительно полученных литьем в песчано-глинистые смеси, поэтому в работе использовали холоднотвердеющие смеси [14, 15].

Так же как и для литья по выплавляемым моделям, для изготовления детали «Корпус» изготовлена модельная оснастка с помощью технологии 3D-печати пластика (рис. 1, б). Модельная оснастка детали «Корпус» из-за своих крупных габаритов состоит из нескольких соединяющихся между собой частей, которые предварительно склеивают друг с другом.

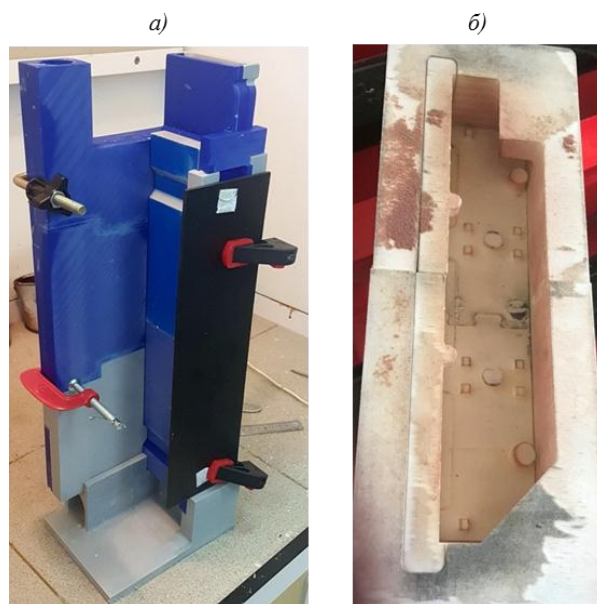


Рис. 1. Пресс-форма в сборе (а) и стержневой ящик для литья в холоднотвердеющую смесь (б)

Качество отливок напрямую зависит от качества формовочной смеси, поэтому для смеси самые важные качества – это текучесть, чтобы заполнять труднодоступные места формы; пластичность, чтобы повторять форму модели; газопроницаемость, огнеупорность, минимальная газотворность; смесь должна иметь достаточные твердость, прочность и долговечность, а также легко удаляться из формы.

Формовочный песок – основной компонент смеси, от типа его зерна зависит поверхность будущей отливки. Смола – второй компонент смеси, от которой зависит твердость и осыпаемость будущей формы. Отвердитель (катализатор) необходим для сокращения времени застывания смеси.

Формование происходило по альфа-сет процессу. Смесь состояла из трех составляющих: кварцевого песка марки 2К2О102 (ГОСТ 2138–91), смолы ФС-01 и отвердителя марки А-20. Данный песок имеет количество глинистой составляющей от 0,2 до 0,5%, что благоприятно влияет не только на прочность при формовке, но и на снижение прочности при выбивке отливки из песчаной формы. Коэффициент однородности песка составляет 80%, что благоприятно влияет на газопроницаемость, которая является важной характеристикой при литье алюминиевых сплавов. Размер песчинок от 0,19 до 0,23 мм позволяет смеси иметь сбалансированное сочетание высокого качества поверхности и высокой газопроницаемости (рис. 2). Альфа-сет процесс широко применяется в настоящее время в литейных цехах как у нас, так и за рубежом. Смола марки ФС-01 обладает следующими характеристиками: достаточной прочностью и низкой осыпаемостью при манипуляциях со стержнями; разупрочнением после заливки металла, т. е. способствует хорошей удаляемости стержней; смола не имеет неприятного запаха.



Рис. 2. Часть формы детали «Корпус» из холоднотвердеющей смеси

От количества отвердителя зависит живучесть смеси. Живучесть смеси – характеристика, показывающая в течение какого времени можно производить операции со смесью. При малой живучести смесь становится очень вязкой и тягучей, что затрудняет получение качественной поверхности формы. Следовательно, продолжительность затвердевания смеси должна быть от 10 до 30 мин, более – нецелесообразно.

Перед формовкой модели посыпали тальком для того, чтобы они легче вынимались из формы. В ходе формовки тщательно распределяли смесь, чтобы она смогла попасть во все труднодоступные участки моделей. После извлечения моделей из затвердевшей формы и выдержки в течение 2–3 ч для набирания прочности проводили притирание стержня с формой.

Для предотвращения негативного взаимодействия расплава с компонентами смеси и придания поверхности большей гладкости, поверхность покрывали антипригарной краской.

Плавка и заливка сплава АК7ч. происходила при тех же условиях и терморежиме, что и при литье по выплавляемым моделям. Остывание и охлаждение происходило также на открытом воздухе, а изъятие отливки из формы – с помощью механического выбивания, т. е. этот способ литья является трудоемким.

Результаты и обсуждение

Для того чтобы определить, какая технология литья больше подходит для изготовления детали «Корпус», необходимо сравнить полученные отливки и их свойства.

Модельный состав ПС50-50 обладает ощутимой хрупкостью в остывшем состоянии, поэтому при работе с пластиковой оснасткой отливки «Корпус» годных моделей не получилось. Низ модели в пресс-форме был слишком холодным для извлечения, в то время как верх и литниково-питающая система еще не приобрели достаточную прочность, чтобы не деформироваться при извлечении.

Отработанный модельный состав фирмы Freeman в процентном соотношении с парафином 70:30 более технологичный, чем состав ПС50-50. Он не такой хрупкий в холодном состоянии, более пластичный и гораздо меньше прилипает к пластиковой оснастке. Модели извлекали в неостывшем состоянии – только таким образом модельный состав отлипал от оснастки. Но извлечение неостывшей модели приводило к ее короблению (рис. 3). Для выравнивания модели нагревали в теплой воде и правили. Полученные по таким моделям отливки имели дефекты геометрической формы, выходящие за рамки допусков.



Рис. 3. Модель отливки до правки

Для определения свойств образцов при технологии литья по выплавляемым моделям проведены испытания образцов при растяжении. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства образцов из сплава АК7ч.-Т6, полученных литьем по выплавляемым моделям

Условный номер образца	Предел прочности при растяжении	Предел текучести	Относительное удлинение, %
	МПа		
1	270	255	0,5
2	245	245	0,2
3	280	190	1,4
4	270	240	0,9
5	270	165	1,6
6	225	225	0,2
7	260	235	0,8
8	260	240	0,7

Образцы (тип III, №6 по ГОСТ 1497–84) вырезали из прилитой к стояку заготовки $\varnothing 15$ мм, образцы 3 и 5 (табл. 1) – из прилитого прутка $\varnothing 10$ мм. Как видно из результатов проведенных испытаний, свойства сплава зависят от толщины заготовки. Все образцы имеют прочность, удовлетворяющую требованиям ГОСТ 1583–93, но только

образцы, вырезанные из более тонких заготовок, имеют удовлетворительные свойства по относительному удлинению. Данный результат свидетельствует о том, что ЛВМ более предпочтительно для тонкостенного и не крупного литья.

Для определения свойств образцов при технологии литья в песчаные формы проведены испытания образцов при растяжении. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства образцов из сплава АК7ч.-Т6, полученных литьем в холоднотвердеющие смеси

Условный номер образца	Предел прочности при растяжении	Предел текучести	Относительное удлинение, %
	МПа		
1	240	190	2,2
2	250	195	3,5
3	265	200	4,1
4	265	190	7,1
5	255	195	3,1
6	265	190	4,8
7	265	190	4,8
8	255	195	3,1
9	270	195	4,7

Свойства получены на отдельно отлитых образцах $\varnothing 12$ мм.

Результат рентгеновского просвечивания показал, что пористость контрольных зон отливок, полученных обоими видами литья, не превышает 3 балла.

При визуальном осмотре выявлено, что поверхность отливок, полученных ЛВМ, более гладкая, чем у отлитых в ХТС.

Заключения

В результате экспериментов, проведенных по технологиям литья для заданной детали «Корпус» из сплава АК7ч., а также проведенного сравнительного анализа получены следующие результаты.

1. Деталь «Корпус» с габаритами 490×90×90 мм не относится к деталям с малыми размерами, вследствие чего технология литья по выплавляемым моделям для нее менее удобна.

2. Геометрическая форма отливки «Корпус», полученной методом ЛВМ, не соответствует чертежу отливки.

3. Свойства сплава АК7ч.-Т6, полученного методом ЛВМ, хуже свойств, полученных на образцах, отлитых в ХТС.

4. Качество поверхности отливок лучше при способе литья по выплавляемым моделям.

В результате всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что для детали «Корпус» из алюминиевого сплава АК7ч. более предпочтителен способ литья в песчаные формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Могилев В.К., Лев О.И. Справочник литейщика. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
3. Фасонное литье алюминиевых сплавов: учеб. пособие / Г.Б. Строганов, М.Б. Альтман, А.В. Мельников и др. М.: Машиностроение, 1980. 296 с.

4. Технология литейного производства: литье в песчаные формы: учеб. для вузов / под ред. А.П. Трухова, Ю.А. Сорокина, М.Ю. Ершова и др. М.: Академия, 2005. 582 с.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. Производство точных отливок / И. Дошкарж, Я. Габриель, М. Гоушть, М. Павелка. М.: Машиностроение, 1979. 296 с.
7. Балабин В.В. Изготовление деревянных модельных комплектов в литейном производстве. М.: Высшая школа, 1971. 285 с.
8. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю.П. Солнцева. СПб.: Профессионал, Мир и семья. 2003. 1066 с.
9. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
10. Власова К.А., Клюквина Т.Д., Леонов А.А., Ларионов С.А. Взаимодействие модельных составов с пластиковой оснасткой, изготовленной с помощью технологии 3D-печати // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №2. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-7-7.
11. Петрова Г.Н., Сапего Ю.А., Ларионов С.А., Платонов М.М., Лаптев А.Б. Пожаробезопасные термопластичные материалы для 3D-технологии // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №9. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-7-7.
12. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. №2 (11). С. 52–55.
13. Оспенникова О.Г. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 18–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-18-21.
14. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
15. Дуюнова В.А., Козлов И.А. Холоднотвердеющие формовочные смеси: перспективы использования при литье магниевых сплавов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №1. С. 41–43.