

УДК 621.791.927.5

Чигарев В. В., Зареченский Д. А., Белик А. Г.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ЛЕНТ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Одним из главных требований, предъявляемых к наплавочным материалам и процессу наплавки, является обеспечение химической однородности наплавленного металла, формирующего эксплуатационные свойства износостойкого слоя. При наплавке порошковой лентой происходит интенсивное перемешивание сварочной ванны дугой, блуждающей по торцу электрода, что снижает влияние доли минующего стадию капли наполнителя на химическую однородность наплавленного сплава [1–4].

Доля наполнителя порошковой ленты, поступающего в ванну, помимо прочих факторов, зависит от сварочно-технологических свойств электрода, формирующихся при изготовлении [5–7]. Увеличение коэффициента заполнения, силы обжата и скорости прокатки порошковой ленты при изготовлении, способствует стабилизации дугового процесса плавления электрода, за счет уплотнения наполнителя, повышения его плотности и контакта с оболочкой [7–9]. Установлено, степень уплотнения порошка наполнителя, можно регулировать его переход через стадию капли [9, 10]. В зависимости от температуры подогрева и объема, поступающих в ванну частиц сердечника, изменяется скорость тепло-массообменных процессов в сварочной ванне и однородность сплава [11–13]. Учитывая определенные технологические трудности в экспериментальном определении теплофизических параметров тепло-массообменных процессов, протекающих в сварочной ванне, недостаточную их освещенность в специальной литературе, актуальной стоит задача оценки тепловых условий расплавления частиц сердечника порошковых лент на стадии ванны, разработки технологически и экономически эффективных мер повышения однородности эксплуатационных свойств, качества наплавляемого металла.

Целью работы является экспериментальная оценка и анализ баланса тепловой энергии на стадии ванны при наплавке порошковыми лентами открытой дугой, изготовленными при различных параметрах прокатки; количественная оценка тепла, необходимого для расплавления частиц наполнителя, изыскание возможных путей повышения химической однородности износостойкого слоя.

При поступлении частиц сердечника в расплав ванны, как правило, их удельная плотность и температура ниже плотности и температуры жидкого металла ванны, что в начальный момент их совместного взаимодействия приводит к образованию на поверхности частиц закристаллизовавшегося слоя расплава и погружению их в глубь ванны [13]. При этом время контактирования частицы с дугой и находящимся под ней перегретым металлом ванны можно считать минимальным. Поступающий в ванну наполнитель, за счет поглощения тепла на его нагрев и плавление, приведет к снижению температуры расплава, что при дополнительном влиянии скорости массообменных процессов и интенсивности продвижения фронта кристаллизации в хвостовой части сварочной ванны, снижает химическую однородность наплавленного слоя.

Средняя по объему температура сварочной ванны после поступления в нее частиц наполнителя порошковой ленты, зависит от эффективных затрат тепла дуги на проплавление основного металла и количества тепла, затраченного ванной, на нагрев и плавление частиц наполнителя [14]:

$$V_n \times F_n \times c_{\text{сплава}} \times T_s = Q_{\text{эф}} - Q_{\text{нап.с}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{с}}$ – средняя температура сварочной ванны после поступления в нее частиц наполнителя, °С;

$Q_{\text{эф}}$ – эффективные затраты тепла на проплавление основного металла, Дж/сек [14];

$Q_{\text{нап. в}}$ – количество тепла, сообщенное частицам наполнителя в сварочной ванне, Дж/сек;

$V_{\text{н}}$ – скорость наплавки, см/сек;

$F_{\text{н}}$ – площадь поперечного сечения наплавленного металла, см²;

$c_{\text{сплава}}$ – объемная теплоемкость жидкого расплава ванны, Дж/см³ °С

($c_{\text{сплава}} \approx 5,14$ Дж/см³ °С [15]).

Затраты тепла на нагрев и плавление поступающих в ванну частиц порошкового наполнителя, пренебрегая скрытой теплотой плавления и размерами частиц, а также теплом химических реакций, возможно ориентировочно оценить зная теплофизические свойства и температуру подогрева сердечника на вылете [11]:

$$Q_{\text{нап. в}} = (1 - e) \times m_{\text{нап}} \times c_{\text{нап}} \times (T_{\text{с}} - T_{\text{под. нап}}); \quad (2)$$

$$m_{\text{нап}} = \frac{\alpha_p \times I \times K_3}{3600}, \quad (3)$$

где $(1 - e)$ – доля наполнителя, поступившая в сварочную ванну;

$m_{\text{нап}}$ – массовая скорость поступления наполнителя в сварочную ванну, г/сек;

$c_{\text{нап}}$ – теплоемкость наполнителя при температуре плавления, Дж/г °С;

$T_{\text{под. нап}}$ – температура подогрева наполнителя на вылете электрода;

α_p – коэффициент расплавления порошковой ленты, г/А ч;

I – сила тока, А;

K_3 – коэффициент заполнения порошковой ленты.

После преобразований уравнение 1 примет вид:

$$T_{\text{с}} = \frac{\eta_{\text{пр}} \times I \times U + (1 - e) \times m_{\text{нап}} \times c_{\text{нап}} \times T_{\text{под. нап}}}{V_{\text{н}} \times F_{\text{н}} \times c_{\text{сплава}} + (1 - e) \times m_{\text{нап}} \times c_{\text{нап}}}, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{пр}}$ – эффективный КПД процесса проплавления основного металла дугой [14];

U – напряжение на дуге, В.

Количественная оценка тепловой энергии, которой недостаточно для полного расплавления поступивших в сварочную ванну частиц сердечника, рассчитана по разнице тепла, необходимого для расплавления всей массы просыпавшегося наполнителя и полученного наполнителем в сварочной ванне, при допущении, что частицы порошка нагреты в ванне до ее средней температуры:

$$Q_{\text{необх}} = (1 - e) \times m_{\text{нап}} \times c_{\text{нап}} \times T_{\text{пл}} - Q_{\text{нап. в}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{необх}}$ – количество тепла, необходимое для расплавления частиц наполнителя в сварочной ванне, Дж/сек;

$T_{\text{пл}}$ – температура плавления наполнителя порошковой ленты, °С.

При расчете использовали полученные экспериментальные данные и данные литературных источников. Среднюю температуру сердечника на вылете электрода для всех исследуемых лент принимали равной $T_{\text{под. нап}} \approx 500$ °С. Температура плавления порошка наполнителя (ПГ-Л101) определена при его расплавлении в печи Таммана и составила 1450–1600 °С. Удельная теплоемкость порошка при температуре плавления – $c_{\text{нап}} = 1,07$ Дж/г °С. Расчетные и экспериментальные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние режимов прокатки однозамковой порошковой ленты при изготовлении на параметры, формирующие свойства наплавленного слоя

F _{обж.} , кН	V _{прок.} , м/ч	K _з , %	α _р , г/А*ч	ε	F _{пр.1} , см ²	F _{н.2} , см ²	η _{пр}	Средняя температура ванны, °С		Q _{необх.} , Дж/сек
								T _в (расч.)	T _в (эксп)	
10	60	60	27,5	0,47	0,32	0,76	0,31	1198	1100	1171
30		59	26,7	0,37	0,39	0,85	0,38	1290	1240	1194
10	180	60	27,2	0,58	0,30	0,72	0,29	1223	1180	893
30		58	26,5	0,50	0,37	0,87	0,36	1260	1230	960

Экспериментальная проверка расчетных данных выполнялась с помощью математического планирования эксперимента и статистической обработки результатов. Изготавливалась порошковая лента однозамковой конструкции, с наполнителем из порошка ПГ-Л101 (фракция 0,315 мм) и коэффициентом заполнения (K_з) 40–60 %. Лента прокатывалась с силой 10–30 кН при скорости протяжки 60–180 м/ч. Наплавка велась открытой дугой на постоянном токе обратной полярности, при фиксированных режимах: сила тока – 500–550 А; напряжение на дуге – 28–30 В; скорость наплавки – 30 м/ч; вылет электрода – 40 мм, на пластины из стали 09Г2С в один слой. Формирование геометрических параметров наплавленного валика и его структурных составляющих оценивалось по трем темплетам, вырезанным из средней части пластин, наплавленных исследуемыми лентами.

Определение температуры сварочной ванны осуществлялось при наплавке открытой дугой по двум методикам: путем погружения в ванну термопары ВР 5/20 на расстоянии 20 ± 2 мм от оси электрода по линии поверхности основного металла [16], и сливом расплава ванны в технологическое отверстие, расположенное в пластине (по оси наплавляемого валика), с закрепленной в нем термопарой ПР 30/6 (рис. 1). Температуру фиксировали с помощью оттарированных самопишущих приборов КСП-3. Погрешность измерения температуры ванны по первому методу составила ± 40 °С, по второму – ± 10 °С. Результаты экспериментальных и расчетных данных по определению средней температуры сварочной ванны, представлены в табл. 1 и на рис. 2.

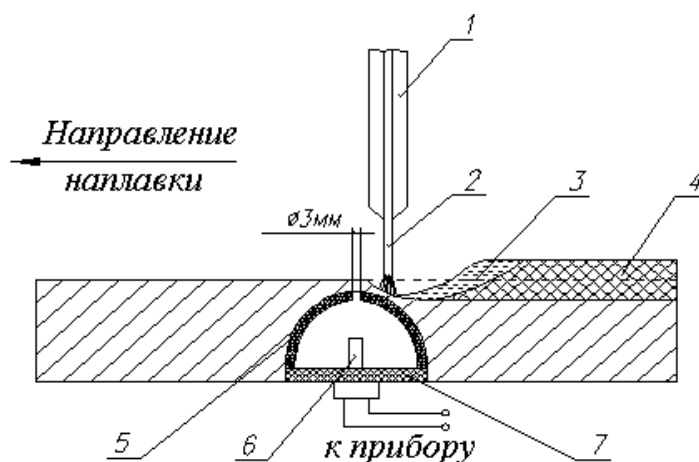


Рис. 1. Технологическая схема измерения средней температуры сварочной ванны при наплавке:

1 – мундштук; 2 – порошковая лента; 3 – сварочная ванна; 4 – наплавленный металл; 5 – защитный кожух термопары; 6 – спай термопары; 7 – керамическая втулка

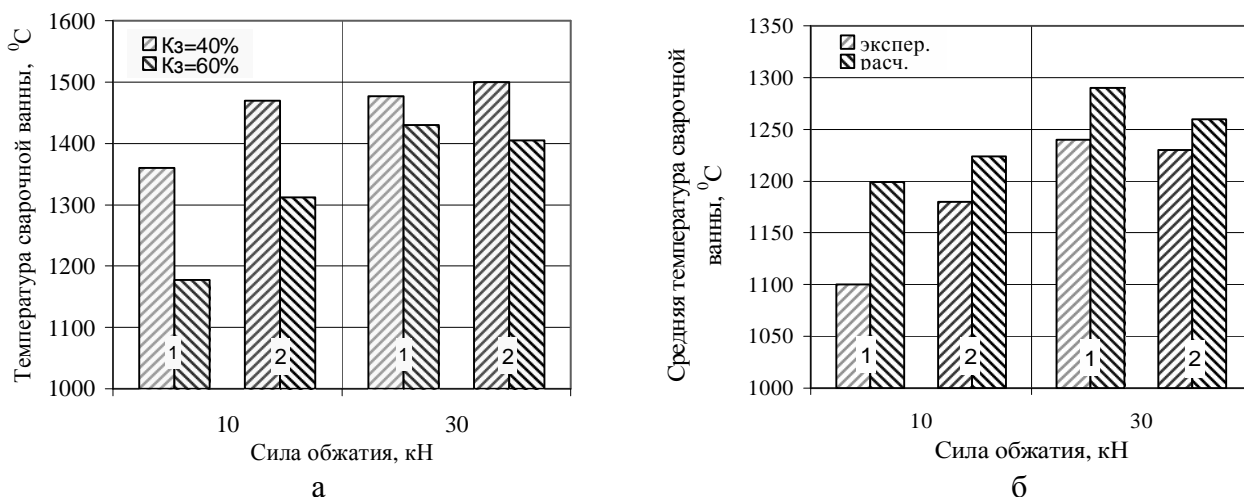


Рис. 2. Влияние технологических параметров изготовления порошковой ленты:

1 – скорость прокатки 60 м/ч; 2 – скорость прокатки 180 м/ч; а – на температуру сварочной ванны при наплавке открытой дугой (на расстоянии 20 ± 2 мм) от оси электрода; б – на среднюю по объему температуру ванны (при наплавке лентой с $K_3 \sim 60\%$)

Обработка и анализ полученных результатов показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных по характеру изменения средней температуры сварочной ванны. Установлено влияние K_3 на температуру сварочной ванны, измеренную на расстоянии 20 ± 2 от оси электрода. Как видно из рис. 2, а, с увеличением K_3 порошковой ленты снижается температура ванны, что, очевидно, связано с увеличением доли поступающего в ванну наполнителя, охлаждающего расплав. Увеличение силы обжатия порошковой ленты при прокатке способствует росту средней температуры сварочной ванны, глубины проплавления и площади наплавленного металла. Это обусловлено большей эффективностью использования тепла дуги основным металлом и снижением потерь тепла, за счет стабилизации процесса плавления электрода, и концентрации теплового потока.

Просыпавшиеся в сварочную ванну частицы сердечника порошковой ленты не полностью в ней расплавляются, что подтверждается результатами оценки химической и структурной неоднородности наплавленного металла. Исследуемые образцы анализировались на растровом электронном микроскопе РЭМ-100У с волновым рентгеновским спектрометром через каждые 3 мм, в поперечном и продольном разрезах (пятно исследования 250–300 мкм).

Установлено, что во всех изучаемых случаях химическая неоднородность связана со структурной неоднородностью. На поле шлифов выявлены включения, расположенные в основном по границам аустенитных зерен и в эвтектической составляющей сплава, концентрация и размер которых различен для каждого слоя, наплавленного исследуемыми лентами (рис. 3).

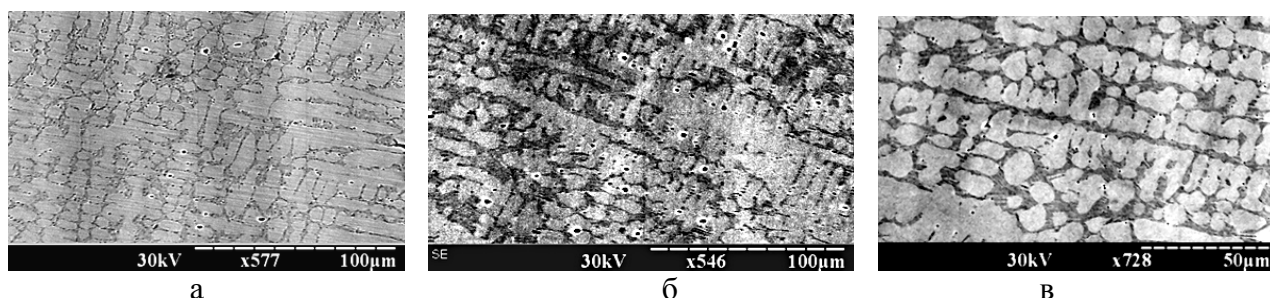


Рис. 3. Характер микроструктуры металла с выявленными включениями, наплавленного открытой дугой в один слой порошковой лентой (с наполнителем ПГ-Л101):

а – лента изготовлена с силой обжатия 10 кН и скоростью прокатки 60 м/ч; б – лента изготовлена с силой обжатия 30 кН и скоростью прокатки 60 м/ч; в – лента изготовлена с силой обжатия 30 кН и скоростью прокатки 180 м/ч

Влияние параметров прокатки порошковых лент на размеры и количество включений представлены в табл. 2. Рентгеноспектральный анализ выявленных включений (рис. 4), показал повышенную концентрацию в них хрома и железа, что свидетельствует о неполном расплавлении частиц порошка наполнителя в сварочной ванне. Установлено, что чем сильнее уплотнен наполнитель в порошковой ленте, тем крупнее размер включений и выше их концентрация в наплавленном слое.

Таблица 2

Свойства металла, наплавленного порошковыми лентами, в зависимости от параметров прокатки при их изготовлении

F _{обж.} , кН	V _{прок.} , м/ч	Включения в наплавленном металле		Свойства	
		Средний размер, мкм	Относит. концен- трация, шт/мкм ²	Относительная износостойкость	Коэффициент вариаций, %
10	60	0,5	0,03	1,0	3,0
30		2,0	0,04	1,5	6,9
10	180	1,0	0,02	0,96	2,6
30		1,5	0,02	1,3	6,0

Для изучения влияния параметров прокатки порошковых лент на эксплуатационные свойства наплавленного ими слоя, были выполнены сравнительные испытания на абразивный износ (абразив – кварцевый песок). Результаты показали (табл. 2), что с ростом обжатия порошковой ленты при изготовлении увеличивается износостойкость наплавленного металла. Это обусловлено повышением однородности распределения структурных составляющих сплава и увеличением процентного содержания карбидной эвтектики (рис. 3) за счет повышения температуры сварочной ванны и времени ее пребывания в жидком состоянии.

При статистической обработке результатов установлен отрицательный фактор увеличения обжатия порошковой ленты при изготовлении – сравнительно низкая однородность свойств наплавленного металла по высоте слоя. Чем выше размер и концентрация выявленных при рентгеноспектральном анализе включений (рис. 4), тем выше вариационный коэффициент относительной износостойкости. Увеличение скорости прокатки порошковой ленты при изготовлении позволяет улучшить показатели однородности в ущерб относительной износостойкости, за счет меньшего количества поступающих в ванну нерасплавленных частиц сердечника.

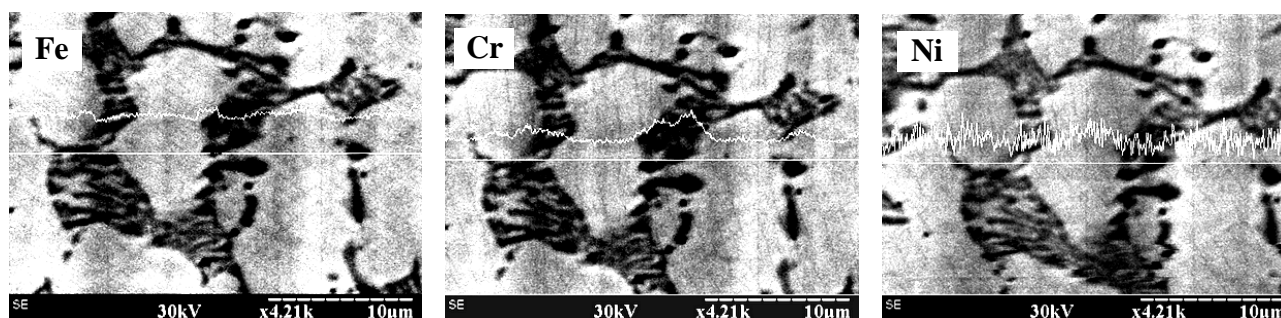


Рис. 4. Рентгеновские спектрограммы распределения легирующих элементов по линии сканирования в металле, наплавленном в один слой порошковой лентой

Полученные экспериментальные и расчетные данные позволяют заключить, что регулирование концентрации тепловложения в основной металл за счет изменения параметров прокатки порошковых лент при изготовлении не обеспечивает в полной мере расплавления порошкового наполнителя в сварочной ванне, что требует изыскания дополнительного источника теплоты для расплавления частиц наполнителя.

Перспективным направлением в получении дополнительного тепла для нагрева и плавления частиц наполнителя, является использование тепловой энергии, выделяющейся

в процессе протекания окислительно-восстановительных реакций за счет введения в состав сердечника порошкового электрода экзотермических смесей [17]. Применение экзосмесей совместно с обжатию электрода позволит улучшить сварочно-технологические свойства порошковых электродов и повысит однородность наплавленного слоя со специальными эксплуатационными свойствами.

ВЫВОДЫ

1. Уплотнение сердечника порошковой ленты при прокатке и увеличение коэффициента заполнения снижает температуру сварочной ванны за счет перехода в нее частиц наполнителя, минуя стадию капли, что способствует снижению однородности наплавленного сплава.

2. Увеличение степени обжатия порошковой ленты при изготовлении способствует повышению абразивной износостойкости наплавленного сплава за счет более равномерного распределения структурных составляющих.

3. Для повышения однородности металла, наплавленного порошковой лентой, целесообразно использовать тепловой эффект экзотермических реакций совместно с регулированием параметров прокатки при изготовлении электрода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пацкевич И. Р. Особенности горения дуги при наплавке порошковой лентой / И. Р. Пацкевич, А. М. Рыков, В. М. Соловский // Сварочное производство. – 1971. – №4. – С. 27–28.
2. Николаенко М. Р. Перенос электродного металла и однородность свойств наплавленного слоя при наплавке порошковым ленточным электродом на форсированных режимах / М. Р. Николаенко, Л. Д. Кузнецов, Г. А. Кортелев // Сварочное производство. – 1976. – № 6. – С. 33–35.
3. Опарин Л. И. Исследование распределения легирующих элементов в наплавленном слое / Л. И. Опарин, И. И. Фрумин // Автоматическая сварка. – 1969. – № 5. – С. 21–23.
4. О химической неоднородности металла, наплавленного электродной лентой / Л. К. Лецинский, П. Ф. Лаврик, В. В. Тарасов, В. Х. Мацука, В. А. Бесхлебный // Сварочное производство. – 1971. – № 1. – С. 28–29.
5. Юзвенко Ю. А. Химическая макронеоднородность наплавленного слоя / Ю. А. Юзвенко, Б. Н. Горпелюк, В. Л. Корбут // Автоматическая сварка. – 1978. – № 3. – С. 22–26.
6. Чigareв В. В. Стабилизация сварочно-технологических свойств порошковых лент, применительно к наплавке деталей доменного оборудования, путем оптимизации параметров прокатки при их изготовлении / В. В. Чigareв, В. В. Воробьев, Д. А. Зареченский // Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции : НКМЗ, 2007. – С. 108–109.
7. Чigareв В. В. Влияние степени деформации порошковой ленты при прокатке на показатели ее плавления / В. В. Чigareв, П. Ф. Лаврик // Сварочное производство. – 1980. – № 6. – С. 17–18.
8. Кириллюк Г. А. Особенности нагрева и плавления сердечника порошковой проволоки при различных конструкциях ее оболочки / Г. А. Кириллюк // Автоматическая сварка. – 1989. – № 7. – С. 74–75.
9. Чigareв В. В. Влияние режимов прокатки однозамковой порошковой ленты на сварочно-технологические свойства и характер ее плавления / В. В. Чigareв, Д. А. Зареченский // Вестник ПГТУ. – 2008. – № 18. – С. 166–169.
10. Чigareв В. В. Особенности нагрева и плавления оболочки с наполнителем порошковой ленты при наплавке открытой дугой, в зависимости от технологических параметров ее изготовления / В. В. Чigareв, Д. А. Зареченский // Вестник ПГТУ. – 2009. – № 19.
11. Ерохин А. А. Основные параметры электродов, определяющие степень химической макронеоднородности наплавленного металла при легировании через покрытие / А. А. Ерохин, Г. Н. Котов // Физика и химия обработки материалов. – 1968. – № 1. – С. 54–61.
12. Петров Г. Л. Теория сварочных процессов / Г. Л. Петров, А. С. Тумарев. – М. : Высшая школа, 1967. – 507 с.
13. Жучков В. И. Растворение ферросплавов в жидком металле / В. И. Жучков, А. С. Носков, А. Л. Завьялов. – Свердловск, 1990. – 133 с.
14. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением : физико-химические закономерности / А. А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1973. – 447 с.
15. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. – Киев : Наукова думка, 1972. – 221 с.
16. Черныш В. П. Измерение температурного состояния сварочной ванны при электромагнитном перемешивании / В. П. Черныш, В. Д. Кузнецов // Автоматическая сварка. – 1976. – № 7. – С. 5–8.
17. Чigareв В. В. Особенности плавления порошковых лент с экзотермическими смесями в наполнителе / В. В. Чigareв, Д. А. Зареченский, А. Г. Белик // Автоматическая сварка. – 2007. – № 2. – С. 53–55.