

Н. А. Федченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: dpta@iipr.com.ua

А. В. Иванов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА В ТЕХНОЛОГИЯХ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрены различные технологические схемы электрогидроимпульсной обработки расплавов. Показано, что наибольшую эффективность имеет технологическая схема с погружаемым в расплав волноводом. Экспериментально доказана эффективность электрогидроимпульсной обработки расплавов алюминиевых сплавов для формирования благоприятной структуры и свойств отливок.

Ключевые слова: расплав, электрогидроимпульсная обработка, технологическая схема, структура, свойства.

Rozглянуто різноманітні технологічні схеми електрогідроімпульсної обробки розплавів. Показано, що найбільшу ефективність має технологічна схема з хвилеводом, який занурюється у розплав. Експериментально доказано ефективність електрогідроімпульсної обробки розплавів алюмінієвих сплавів для формування сприятливої структури та властивостей виливків.

Ключові слова: розплав, електрогідроімпульсна обробка, технологічна схема, структура, властивості.

Various technological schemes of electrohydropulse treatment of melts are considered. It is shown that the technological scheme with the waveguide immersed in the melt is most effective. The efficiency of electrohydropulse treatment of aluminum alloy melts has been experimentally proven to form a favorable structure and properties of castings.

Keywords: melt, electrohydropulse treatment, technological scheme, structure, properties.

Методы внепечной обработки расплавов являются эффективным инструментом воздействия на расплав с целью повышения показателей качества литой металлопродукции. Однако, все методы такой обработки (электрогидроимпульсный, электротокковый, магнитно-импульсный, ультразвуковой и др.) хотя и являются многоцелевыми, но не являются универсальными. Поэтому в современных технологиях литейного производства одним из ключевых вопросов является целесообразность использования того или иного метода внепечной обработки расплава в конкретной технологии литейного производства [1]. В связи с этим знание функциональных возможностей и, в конечном счете, эффективности того или иного вида воздействия на расплав является важной научно-практической задачей.

Цель данной статьи – показать эффективность различных схем электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) расплава силумина.

В ИИПТ НАН Украины накоплен достаточный опыт по разработке и внедрению самых разнообразных электроимпульсных технологий. Одной из таких авторских разработок является ЭГИО расплавов черных и цветных металлов [2–6]. Суть метода заключается в генерировании повторяющихся импульсов давления, создаваемых при высоковольтном пробое жидкости в электроразрядном генераторе упругих колебаний (ЭРГУК), и передаче этих импульсов в расплав через волновод-но-излучательную систему. Характерные особенности ЭГИО – высокая мгновенная

мощность в импульсе (до 10^7 кВт) и достаточно широкий спектр частот единичного импульса – от 10 Гц до 100 кГц. Конструкция ЭРГУК отличается простотой, не имеет вращающихся элементов, достаточно легко встраивается в технологические схемы металлургического производства.

При такой импульсной обработке воздействие на расплав сводится к созданию в нем мощного нестационарного акустического поля, которое вызывает кавитацию, интенсификацию тепломассообменных процессов в объеме расплава и его гомогенизацию [1, 7, 8]. При этом растворенный в расплаве газ выделяется, происходит коалесценция газовых включений и их удаление, обеспечивающее рафинирование расплава от вредных примесей.

Существует гипотеза о том, что при действии волн давления, излучаемых волноводом в расплав, определяющим является эффект Бьеркенса [7]. Суть эффекта состоит в том, что при пульсации близко расположенных пузырьков между ними возникает взаимодействие. При этом синфазные колебания приводят к взаимному притяжению, а противофазные – к их отталкиванию. В результате пузырьки газа могут укрупняться и всплывать. Скорость всплывания пузырьков газа, в соответствии с формулой Стокса [6], пропорционально квадрату радиуса пузырька.

При нелинейных колебаниях газового пузырька в той фазе, которая соответствует минимальному радиусу пузырька, ускорение его стенок оказывается очень большим. Это приводит к излучению импульса давления малой длительности и большой амплитуды, которая может на два порядка превышать амплитуду падающей волны давления. Таким образом, в зоне нелинейных колебаний следует ожидать дроблений газовых пузырьков и увеличения их количества.

Естественно предположить, что следующий за таким импульсом давления импульс разряжения приводит к локальным понижениям давления в расплаве вследствие больших скоростей течения – от 2,5 до 30 м/с на расстоянии до 0,5 м от оси волновода ЭРГУК – и возникновению акустической кавитации. Учитывая неоднородность обрабатываемой среды расплава, размеры образующихся пузырей будут различными. Кавитация будет определяться резонансными явлениями, которые в данном случае лимитируются шириной спектра частот, возмущающих среду колебаний. А большая ширина спектра этих колебаний как раз и является отличительной особенностью метода ЭГИО от метода ультразвуковой обработки и обработки низкочастотной вибрацией.

В данной статье на примере широко применяемого доэвтектического литейного алюминиевого сплава АК7 обосновывается целесообразность и эффективность применения метода ЭГИО для формирования благоприятной структуры литого металла. Показано возможность обработки расплава с помощью разных технологических схем и сочетаемость данного метода с традиционными методами внепечной обработки сплавов.

Химический состав сплава АК7 (в %мас.): 6–8 Si, 0,20–0,55 Mg, 0,2–0,6 Mn, до 1,0 Fe, до 1,5 Cu, до 0,5 Zn, до 0,3 Ni. Данный сплав изготавливают из вторичных шихтовых материалов. Он обладает удовлетворительными механическими и литейными свойствами, хорошей коррозионной стойкостью. Применяется в различных областях промышленности для литья тонкостенных деталей средней нагруженности сложной конфигурации: корпусные детали, радиаторы отопительных систем и т.д.

Методология исследований в данной статье была направлена на установление связи между параметрами ЭГИО и структурными изменениями в металле для выяснения физической сущности воздействия на него ЭГИО и выбора оптимальных параметров обработки. С этой целью при варьировании схем и параметров ЭГИО исследовали характер макро- и микроструктуры металла и его свойства. Для изучения структурных изменений и оценки растворимости элементов в матрице использовали методы металлографического, рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа. Для определения служебных характеристик проанализированы механические и технологические свойства сплавов.

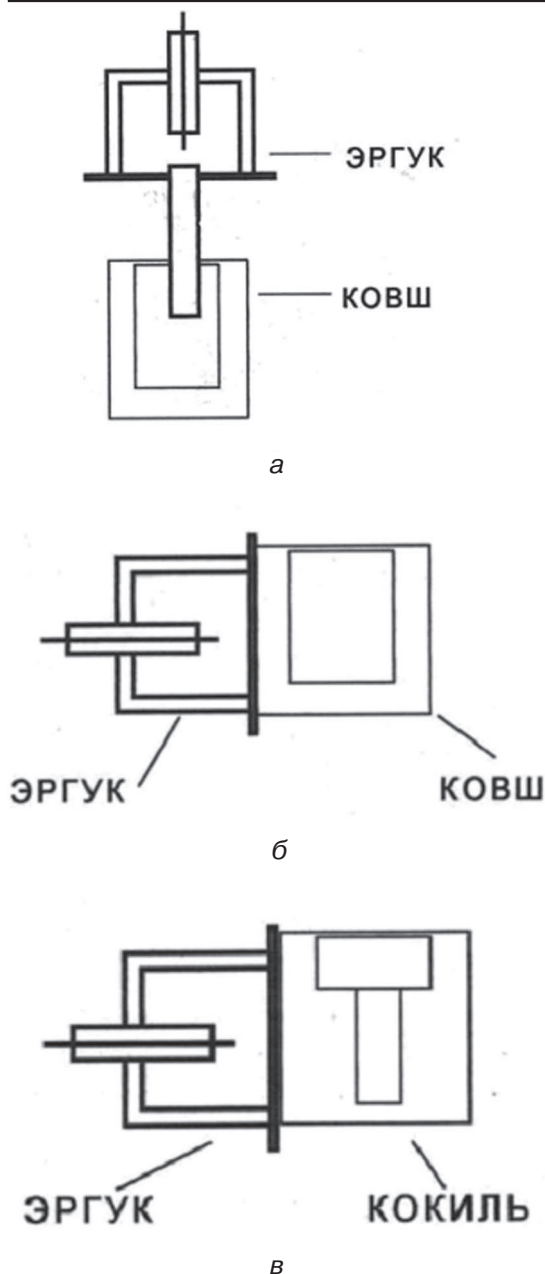


Рис. 1. Технологические схемы ЭГИО расплава: *а* – обработка расплавленного металла в ковше погружаемым волноводом ЭРГУК; *б* – обработка в ковше при воздействии на расплавленный металл через боковую стенку ковша; *в* – воздействие на металл отливки через боковую стенку кокиля

Известно два варианта физического воздействия на расплав: обработка расплава в плавильном агрегате или в ковше; обработка кристаллизующегося металла в технологических емкостях, формирующих деталь или полуфабрикат.

Для оценки возможностей использования ЭГИО и ее эффективности при производстве алюминиевых сплавов были выбраны схемы, наиболее приемлемые по технологическим соображениям: обработка расплавленного металла в ковше погружаемым волноводом ЭРГУК (рис. 1, *а*); обработка в ковше при воздействии на расплавленный металл через боковую стенку ковша (рис. 1, *б*); воздействие на металл отливки через боковую стенку кокиля (рис. 1, *в*).

Лучшие результаты по параметрам структуры и свойствам были получены при обработке расплава погружаемым волноводом (рис. 1, *а*). В ходе проведения экспериментов было установлено, что обработка в ковше при воздействии на расплавленный металл через боковую стенку ковша практически не дает результатов. По-видимому, это связано с трудностью обеспечения плотного прилегания мембраны к шероховатой стенке ковша. При воздействии на металл отливки через боковую стенку кокиля обработка дает результаты, близкие к полученным при обработке погружаемым волноводом. Однако недостатками этой схемы являются обработка каждой отливки отдельно и необходимость обеспечения плотного контакта между вибратором и стенкой кокиля. Первое удорожает производство отливок, второе может приводить к нестабильности результатов. Таким образом, была определена оптимальная схема обработки расплавленного металла в ковше погружаемым волноводом ЭРГУК. Дальнейшие исследования

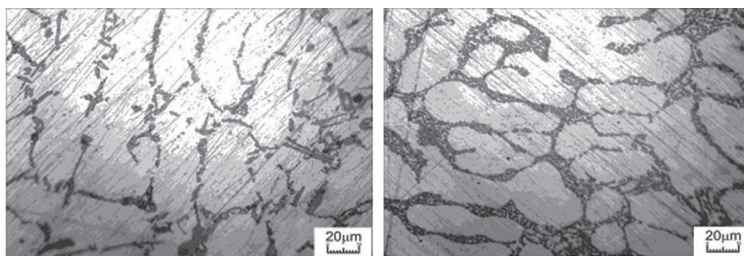
подтвердили правильность выбора схемы обработки.

Далее были определены оптимальные параметры обработки и на многочисленных опытах доказана правильность выбора схемы обработки и ее параметров.

ЭГИО расплава погружаемым волноводом приводит к повышению его жидкотекучести и равномерности распределения элементов, уменьшению газонасыщенности и пористости на 20–40 %, измельчению макрозерна практически вдвое,

Получение и обработка расплавов

микрзерна на 30–50 %, более однородному распределению зерен, увеличению дисперсности эвтектики и ее выделению в коралловидной форме (рис. 2). Это приводит к улучшению механических свойств. Так, предел прочности увеличивается на 10 %, относительное удлинение на 20–40 %, то есть обработка позволяет получить в сплавах свойства, превышающие требования ДСТУ.

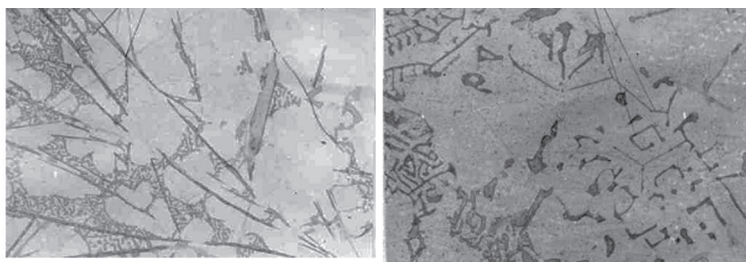


Без ЭГИО

После ЭГИО

Рис. 2. Микроструктура образцов сплава АК7 до и после ЭГИО

ЭГИО повышает однородность распределения элементов в расплаве и благоприятно влияет на морфологию интерметаллидов, увеличивая количество включений компактной формы и уменьшая объем игольчатых фаз, оказывающих охрупчивающее действие на сплав (рис. 3).



Без ЭГИО

Без ЭГИО

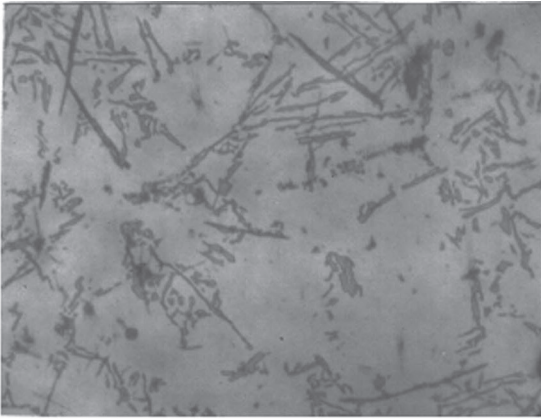
Рис. 3. Вид железосодержащей фазы в образцах сплава АК7 до и после ЭГИО, $\times 250$

Причем следует отметить, что данное изменение морфологии железосодержащей фазы получают при модифицировании дорогостоящими модификаторами.

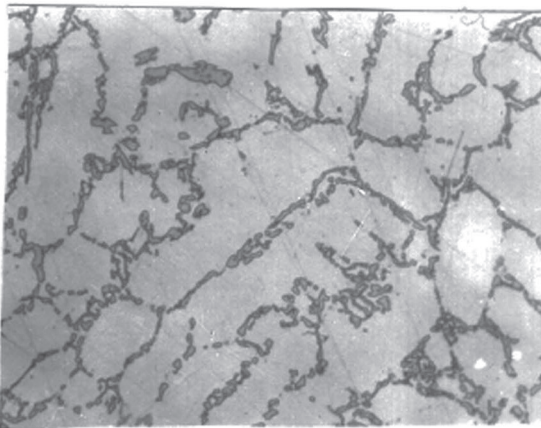
Как отмечалось в ряде работ, ЭГИО приводит к увеличению топологического беспорядка в расположении атомов компонентов, входящих в сплав, и более однородному их распределению [7, 9, 10]. Таким образом, можно считать, что применение ЭГИО качественно аналогично повышению температуры расплава.

Проводился эксперимент для выяснения влияния ЭГИО на структуру и свойства металла, разлитого ниже рекомендуемой температуры заливки для сплава АК7. Без ЭГИО такой металл обладает пониженной жидкотекучестью и не обеспечивает хорошего формозаполнения и необходимых свойств. Применение ЭГИО повысило жидкотекучесть и позволило получить металл со структурой и свойствами, не отличающимися при заливке от рекомендуемых температур. Возможность снижения температуры заливки можно рассматривать как еще один положительный аспект воздействия ЭГИО, поскольку он связан с уменьшением энергозатрат.

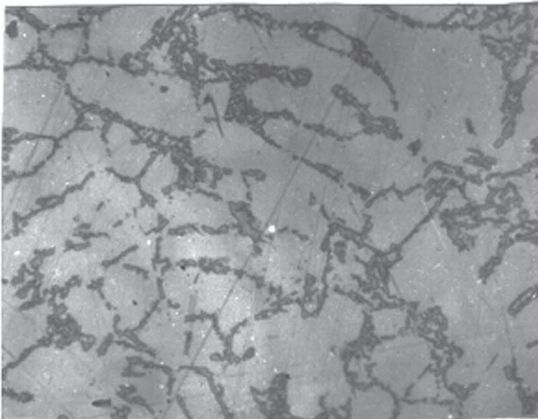
Также исследовалась сочетаемость метода ЭГИО с традиционными методами внепечной обработки. Так, в частности, проверялась совместимость метода ЭГИО с обработкой флюсом (NaCl – 33, KCl – 40, Na_3AlF_6 – 15, NaF – 12 %). Образец, который получен без обработки флюсом и без ЭГИО, представлен на рис. 4, а. По-



а



б



в

Рис. 4. Микроструктура образцов сплава АК7: а – без флюса и без ЭГИО; б – после обработки флюсом; в – после комплексной обработки (флюс+ЭГИО)

• Сопоставление ЭГИО с существующими методами обработки алюминиевых сплавов (применение флюсов, вакуумирование, воздействие ультразвуком и т. д.) показало, что ЭГИО является достаточно эффективным методом внепечной

сле обработки флюсом происходит увеличение размера микрозерна, уменьшение объема микропор приблизительно на 50 %. Эвтектика выделяется в модифицированной форме (рис. 4, б). После ЭГИО размер микрозерна уменьшается не только по сравнению с традиционной технологией выплавки, но и по отношению к обработке флюсом. Размер частиц кремния в эвтектике уменьшается, как и при обработке флюсом, примерно в 2 раза. При комплексной обработке (флюс + ЭГИО) размер зерна по сравнению с ЭГИО не изменяется, а пористость дополнительно уменьшается приблизительно на 30 %. При этом происходит существенное измельчение частиц кремния в эвтектике, причем сохраняется ее модифицированная форма (рис. 4, в).

Все эти изменения в структуре приводят к повышению механических и служебных свойств отливок. Так, временное сопротивление после обработки флюсом, по сравнению с традиционной технологией, практически не изменяется. Пластичность же возрастает на 40 %. После ЭГИО σ_b увеличивается на 15 % по сравнению с традиционной технологией, а пластичность на 45 %. Комплексная обработка, мало изменяя прочность по сравнению с полученной после ЭГИО, дополнительно повышает пластичность на 15–20 %. При комплексной обработке наблюдается дополнительное улучшение структурных характеристик сплава и повышение его свойств. Такую обработку можно рекомендовать для изготовления изделий, от которых требуется более высокая конструкционная прочность.

Выводы

• Наиболее рационально проводить ЭГИО расплава в надликвидусной зоне погружаемым волноводом.

обработки, обеспечивающим уровень свойств, сопоставимый с вышеперечисленными методами и при этом экологически чистым.

Промышленная апробация полностью подтвердила результаты экспериментальных исследований. Об этом свидетельствуют многочисленные внедрения установок по ЭГИО расплава, как в Украине, так и за рубежом.

Таким образом, применение метода ЭГИО для обработки алюминиевых сплавов полностью оправдано, как в плане повышения свойств, так и в плане стоимости и энергозатрат.



Список литературы

1. Цуркин В. Н. Принципы системного подхода к выбору методов внепечной обработки расплава / В. Н. Цуркин // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 7–8. – С. 12–16.
2. Пилипенко В. А. Оптимизация выбора технологической схемы виброимпульсной обработки для повышения качества промышленных слитков и заготовок / В. А. Пилипенко, А. А. Смирнов // *Металл и литье Украины*. – 1997. – № 1. – С. 8–13.
3. Гулый Г. А. Научные основы разрядноимпульсных технологий.: К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
4. Поздеев П. И. Электроразрядные генераторы упругих колебаний / П. И. Поздеев, Б. И. Царенко, Б. И. Бутаков, П. П. Малюшевский. – К.: Наукова думка, 1985. – 172 с.
5. Кобытов В. А. Формирование отливки из алюминиевых сплавов при наложении виброимпульсных нагрузок. Оборудование и технология высоковольтного разряда в жидкости.– К.: Наукова думка, 1987. – С. 79–83.
6. Ефимов В. А. Технологии современной металлургии / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
7. Дорофеев С. А. Определение эффективности ударного воздействия, создаваемого электрогидравлическим вибратором, с помощью крешерных датчиков / С. А. Дорофеев, К. П. Фоменко. Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл: Сб. научных трудов. – К.: ИПЛ АН УССР, 1983. – С. 87–90.
8. Базин Ю. А. Высокотемпературная рентгеновская камера для измерения структурных характеристик жидких металлов / Ю. А. Базин, А. В. Емельянов, Е. А. Клименко // *Заводская лаборатория*, 1988. – № 10. – С. 34–35
9. Федченко Н. А. Повышение качества сплавов на основе алюминия путем использования электрогидроимпульсной обработки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХНАДУ, 2001. – 19 с.
10. Дьяченко С. С. Механізм впливу параметрів електрогідроімпульсної обробки розплаву на структурні зміни в металі / С. С. Дьяченко, Н. А. Федченко // *Металознавство та обробка металів*. – 2005. – № 2. – С. 29–31.



References

1. Tsurkin, V. N. (2009) Printsipy sistemnogo podkhoda k vyboru metodov vnepechnoy obrabotki rasplava [*Principles of the system approach to the choice of methods for secondary processing of melt*]. *Metall i lite Ukrainy*, no. 7–8, pp. 12–16 [in Russian].
2. Pilipenko, V. A., Smirnov, A. A. (1997) Optimizatsiya vybora tekhnologicheskoy skhemy vibroimpulsnoy obrabotki dlya povysheniya kachestva promyshlennykh slitkov i zagotovok [*Optimi-*

- zation of the choice of the technological scheme of vibration treatment to improve the quality of industrial ingots and blanks]. Metall i lite Ukrainy, no. 1, pp. 8–13 [in Russian].
3. Gulyy, G. A. (1990) Nauchnye osnovy razryadnoimpul'snykh tekhnologiy [Scientific foundations of discharge impulse technologies]. K.: Naukova dumka, 208 p. [in Russian].
 4. Pozdeev, P. I., Tsarenko, B. I., Butakov, B. I., Malyushevskiy, P. P. (1985) Elektrorazryadnye generatory uprugikh kolebaniy [Electric discharge oscillators of elastic oscillations]. K.: Naukova dumka, 172 p. [in Russian].
 5. Korytov, V. A. (1987) Formirovaniye otlivki iz alyuminiyevykh splavov pri nalozhenii vibroimpul'snykh nagruzok. Oborudovaniye i tekhnologiya vysokovolt'nogo razryada v zhidkosti [Formation of casting from aluminum alloys when applying vibroimpulse loads. Equipment and technology of high-voltage discharge in a liquid]. K.: Naukova dumka, pp. 79–83. [in Russian].
 6. Yefimov, V. A., Eldarkhanov, A. S. (2004) Tekhnologii sovremennoy metallurgii [Technologies of modern metallurgy]. Moscow: Novye tekhnologii, 784 p. [in Russian].
 7. Dorofeev, S. A., Fomenko, K. P. (1983) Opredeleniye effektivnosti udarnogo vozdeystviya, sozdavaemogo elektrogidravlicheskim vibratorom, s pomoshchyu kreshernykh datchikov [Determination of the effectiveness of the shock impact produced by the electrohydraulic vibrator, using cross sensors]. Vliyaniye vneshnikh vozdeystviy na zhidkiy i kristallizuyushchiysya metall: Sb. nauchnykh trudov. K.: IPL AN USSR, pp. 87–90. [in Russian].
 8. Bazin, Yu. A., Yemelyanov, A. V., Klimenko, Ye. A. (1988) Vysokotemperaturnaya rentgenovskaya kamera dlya izmereniya strukturnykh kharakteristik zhidkikh metallov [High-temperature X-ray chamber for measuring the structural characteristics of liquid metals]. Zavodskaya laboratoriya, no. 10, pp. 34–35 [in Russian].
 9. Fedchenko, N. A. (2001) Povysheniye kachestva splavov na osnove alyuminiya putem ispolzovaniya elektrogidroiimpulsnoy obrabotki [Improving the quality of aluminum-based alloys by using electrohydropulse treatment]: Extended abstract of candidate's thesis. Kharkov: KhNADU, 19 p. [in Russian].
 10. Dyachenko, S. S., Fedchenko, N. A. (2005) Mekhanizm vplyvu parametrov elektrogidroiimpulsnoy obrabotki rozplavu na strukturni zminy v metali [Mechanism of influence of parameters of electrohydropneumatic impulse claddings on a structure in metal]. Metaloznavstvo ta obrabotka metaliv, no. 2, pp. 29–31. [in Russian].

Поступила 19.02.2018