

## ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА МЕДИ

Ф.К. Биктагиров, В.А. Шаповалов,

А.В. Гнатушенко, А.П. Игнатов, Т.И. Грищенко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей электрошлаковой наплавки медных заготовок (деталей) медью с целью их ремонта или восстановления. С учетом физико-химических свойств меди выбрана схема наплавки с горизонтальным расположением наплавляемой поверхности, осуществлением электрошлакового процесса нерасходуемыми графитированными электродами и использованием твердого (медная сечка, стружка, порошок) и жидкого (предварительно расплавленная медь) присадочного металла. Для электрошлаковой наплавки меди разработан борсодержащий шлак состава, мас. %:  $\text{CaF}_2$  — 38...40,5;  $\text{CaO}$  — 25,3...27,5;  $\text{SiO}_2$  — 20,7...23;  $\text{Na}_3\text{B}_4\text{O}_7$  — 10...15. Температура плавления шлака 980...1020 °С, а электропроводность при рабочих температурах 4,0...5,0  $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . Установлено, что для электрошлаковой наплавки меди предпочтительно использование жидкого присадочного металла, когда обеспечивается полное сплавление наплавляемого слоя с металлом основы при относительно небольшой глубине проплавления последнего (около 5 мм). Экспериментально определены технологические параметры наплавки, такие как температура нагрева поверхности наплавляемой заготовки, температура перегрева присадочной жидкой меди и электрические режимы электрошлакового процесса. Качество наплавленной меди по механическим свойствам соответствует уровню отожженной меди. Содержание кислорода благодаря электрошлаковой обработке в наплавленном металле существенно ниже, чем в меди марки М1 заводского производства. Наплавленная медь имеет плотную гомогенную структуру без неметаллических включений и газовых пор. Библиогр. 6, табл. 2, рис. 6.

**Ключевые слова:** медь; электрошлаковая наплавка; борсодержащий шлак; жидкий и твердый присадочный металл; качество; свойства

Электрошлаковая наплавка (ЭШН) представляет собой способ нанесения относительно тонкого слоя расплавленного металла на поверхность металлического изделия, при котором нагрев наплавляемой поверхности (основы) и наплавляемого (присадочного) металла происходит за счет тепла контактирующего с ними шлакового расплава. Нагрев самого шлака происходит за счет тепла, которое выделяется при прохождении через шлаковый расплав электрического тока.

Этот способ используется в промышленности для наплавки преимущественно стальных заготовок различных марок и назначений с целью получения биметаллических изделий (нанесение износостойкого, жаропрочного, антикоррозионного и других покрытий с особыми свойствами), а также ремонта деталей (восстановление их рабочей поверхности) [1, 2].

Одни из самых распространенных металлических материалов, используемых для изготовления различных деталей, является медь и сплавы на ее основе. Поэтому, учитывая успешный опыт ЭШН применительно к сталям, представляет интерес использование данного процесса и для наплавки меди, например, с целью решения актуальной на сегодняшний день задачи восстановления (ремон-

та) панелей кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Для реализации ЭШН меди необходимо оценить возможность использования существующих технологических схем наплавки и выбрать наиболее оптимальные; разработать и создать соответствующее оборудование и оснастку; провести эксперименты и определить основные технологические параметры процесса; исследовать качество наплавленных образцов.

При выборе технологических схем ЭШН меди, ввиду немногочисленных данных на этот счет, основывались на опыте ЭШН стальных заготовок, различные варианты которых приведены в литературе [1–3]. С учетом физико-химических свойств меди была принята схема наплавки с осуществлением электрошлакового процесса посредством нерасходуемых графитированных электродов при горизонтальном расположении наплавляемой поверхности и использованием дискретного (некомпактного) присадочного материала, аналогично тому, как производится электрошлаковая наплавка штампов [4].

Для реализации электрошлаковой наплавки необходима организация плавильного пространства, в котором размещается наплавляемое изделие, на-

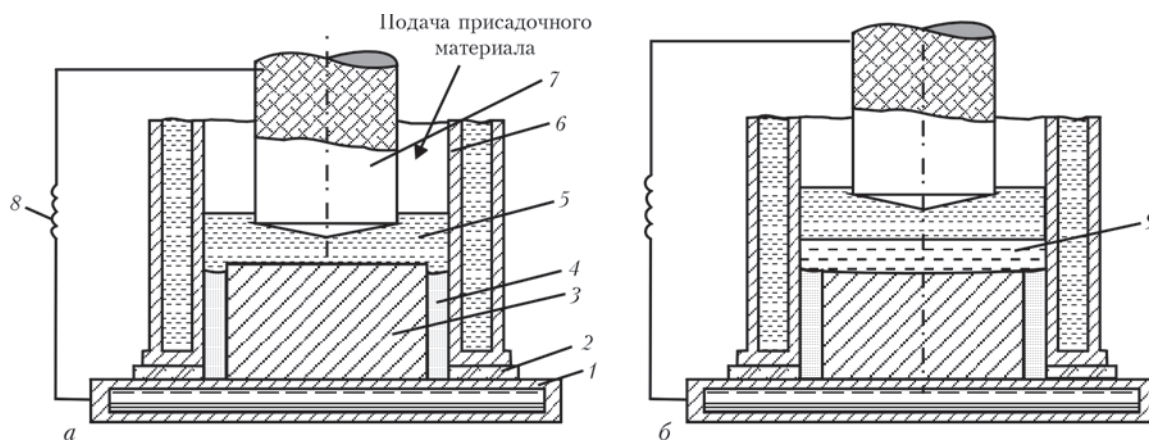


Рис. 1. Схема горизонтальной ЭШН: а — перед началом подачи присадочного материала; б — после подачи присадочного материала. 1 — водоохлаждаемый поддон; 2 — диэлектрическая подкладка; 3 — наплавляемая заготовка; 4 — засыпка (сухой флюс); 5 — шлаковая ванна; 6 — кристаллизатор; 7 — графитированный электрод; 8 — источник питания; 9 — наплавленный металл

водится шлаковая ванна, проводится нагрев наплавляемой поверхности и осуществляется сама наплавка подачей через шлак присадочного материала. На первом этапе работы с целью исследования закономерностей процесса и отработки технологических параметров в качестве плавильного пространства использовали кристаллизатор диаметром 170 мм, установленный на водоохлаждаемый поддон через диэлектрические подкладки (рис. 1).

Внутри кристаллизатора на поддон устанавливали наплавляемую заготовку в виде медной шайбы толщиной 50...70 мм и диаметром 140...150 мм. Зазор между стенкой кристаллизатора и шайбой заполняли сухим флюсом. Для подвода тока к шлаковой ванне использовали графитированный электрод диаметром 100 мм.

В качестве присадочного материала использовали медную сечку, медный порошок или дробленную медную стружку. Контроль температуры шлака осуществляли вольфрам-рениевой термопарой, а температуру наплавляемой заготовки — хромель-алюмелевыми термопарами, установленными в заготовке на различном расстоянии от наплавляемой поверхности.

Важное значение для успешной реализации любого электрошлакового процесса имеют физико-химические свойства используемого шлака, основными из которых являются электрическая проводимость и температура плавления, под которой понимается температура перехода его в полностью жидкое состояние. При электрошлаковой наплавке для исключения образования твердой шлаковой прослойки между наплавляемой заготовкой и слоем наплавленного металла температура плавления шлака должна быть ниже температуры плавления металла основы. Применительно к наплавке сталей стандартные шлаки, используемые в электрошлаковых технологиях, удовлетворяют этому требованию, т.к. обычно имеют темпе-

ратуру плавления в пределах 1150...1250 °С [1, 5, 6]. Однако для наплавки меди необходимо иметь температуру плавления шлака не более 1050 °С.

Из опыта электрошлакового передела (ЭШП) известно, что для осуществления стабильного электрошлакового процесса и эффективного тепловыделения в шлаковом расплаве значение электрической проводимости шлака при рабочих температурах должно быть в пределах 1...6 Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

С учетом вышесказанного для электрошлаковой наплавки меди разработан шлак с добавками обезвоженной буры следующего химического состава, мас. %: CaF<sub>2</sub> — 38,0...40,5; CaO — 25,5...27,0; SiO<sub>2</sub> — 21,0...22,5; Na<sub>2</sub>O — 4,7...7,0; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 5,3...8,0. Он имеет температуру плавления 980...1020 °С, а электропроводность при температурах 1300...1400 °С в пределах 4,0...5,0 Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

Процесс электрошлаковой наплавки начинается с наведения шлаковой ванны и последующего нагрева шлаком наплавляемой поверхности. В нашем случае «твердый старт» из-за вероятности местного проплавления заготовки возникающими под электродом дугами был неприемлем. Поэтому использовали метод «жидкого старта», когда выплавленный в флюсоплавильной печи, представляющей собой переносной тигель-ковш, жидкий шлак заливали в кристаллизатор. Это позволило быстро и надежно сформировать в плавильном пространстве шлаковую ванну заданного объема.

После заливки шлака осуществляли нагрев наплавляемой поверхности медной заготовки. Экспериментально было установлено, что при нагреве поверхности медной заготовки до температуры плавления меди (1080 °С) из-за высокой теплопроводности этого металла невозможно обеспечить равномерную и контролируруемую глубину проплавления верхней части заготовки. Поэтому наплавку (подача присадочного металла) необ-

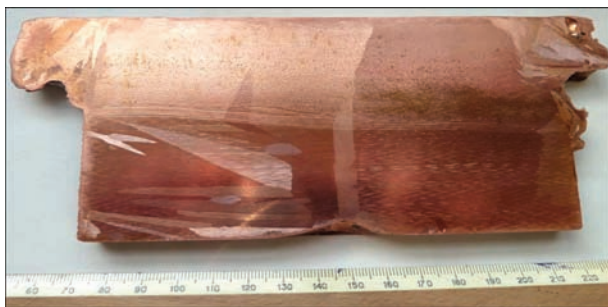


Рис. 2. Вид осевого темплета образца, наплавленного с использованием твердого присадочного материала

ходимо начинать при температуре наплавляемой поверхности несколько ниже температуры плавления меди. При этом наплавка, т.е. сплавление основного и наплавляемого металла, должно обеспечиваться за счет перегрева присадочного металла и подплавления им основного металла.

В результате выполненных исследований определено, что надежное сплавление основы с наплавленным слоем обеспечивается при нагреве наплавляемой поверхности до температуры 1030...1050 °С, т.е. близкой к температуре плавления меди. При достижении указанной температуры, контролируемой энергетически-временными показателями электрошлакового нагрева, которые устанавливаются в процессе отработки технологии, начинали процесс наплавки путем подачи в кристаллизатор присадочного металла отдельными порциями со скоростью 0,4...0,5 кг/мин. Температуру шлаковой ванны на данном этапе поддерживали на уровне 1350...1400 °С, что обеспечивало расплавление присадочного металла и достаточный его перегрев для подплавления наплавляемой поверхности. Количество присадочного металла подавали из расчета получения наплавленного слоя толщиной 20 мм.

Анализ полученных по такой технологии образцов показал, что электрошлаковая наплавка в принципе обеспечивает надежное сплавление наплавленного металла с металлом основы (рис. 2).

В то же время вследствие высокой теплопроводности меди глубина проплавления исходной заготовки составляет 30...40 мм. Попытки уменьшить глубину проплавления изменением технологических параметров процесса путем снижения температуры шлаковой ванны или увеличением скорости подачи присадочного металла приводили к нестабильным результатам вплоть до частич-

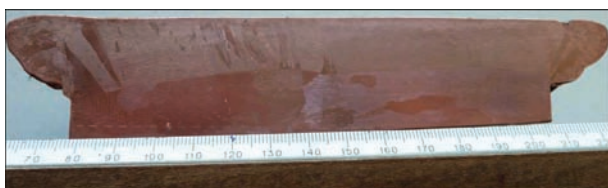


Рис. 3. Вид осевого темплета образца, наплавленного с использованием жидкого присадочного материала

ного или полного несплавления основы и присадки. Еще одной сложностью рассматриваемого способа электрошлаковой наплавки меди была необходимость корректировки технологических параметров при изменении вида и гранулометрического состава присадки.

Учитывая трудности, возникающие в процессах контроля глубины проплавления заготовки и выбора оптимальных технологических параметров при электрошлаковой наплавке с использованием твердого присадочного материала, в дальнейшем решено было использовать жидкий присадочный материал. Такой способ наплавки требует дополнительного оборудования для подготовки жидкой меди. Но ввиду сравнительно небольшого количества металла, используемого на наплавку, в качестве плавильного устройства может использоваться та же флюсоплавильная печь, в которой готовится шлак для «жидкого старта». То есть в этом случае методом электрошлаковой плавки в тигель-ковше под слоем шлака выплавляется медь и затем заливается в плавильную емкость, где осуществляется электрошлаковая наплавка.

Важной особенностью использования жидкого присадочного материала является то, что за счет контроля температуры нагрева наплавляемой поверхности, температуры и массы подаваемого на наплавку металла при известном градиенте температуры вблизи наплавляемой поверхности можно с достаточной для практического применения точностью рассчитать глубину проплавления заготовки.

Например, в случае нагрева наплавляемой поверхности до температуры 1050 °С, градиенте температур вблизи наплавляемой поверхности 5 град/мм (определена экспериментально) и толщине наплавляемого слоя 20 мм расчетная глубина проплавления при температуре подаваемой на наплавку меди 1300 °С составляет 5,4 мм. А при температуре подаваемой на наплавку меди 1350 °С глубина проплавления увеличивается до 7,5 мм.

Эксперименты по электрошлаковой наплавке с жидким присадочным материалом показали, что при соблюдении заданных технологических режимов обеспечивается полное сплавление наплавленного металла с металлом основы (рис. 3). Получены образцы с наплавленным слоем около 20 мм и глубиной проплавления наплавляемой заготовки в среднем около 5 мм. Наплавленный слой плотный, без пор и неметаллических включений, что свидетельствует о его хорошем качестве.

Исследования способа ЭШН меди были продолжены экспериментами по наплавке плоской медной прямоугольной заготовки размерами 300×160×50 мм. Наплавляемую заготовку устанавливали на водоохлаждаемый поддон и по периметру ограничивали огнеупорными кирпичами, которые при-

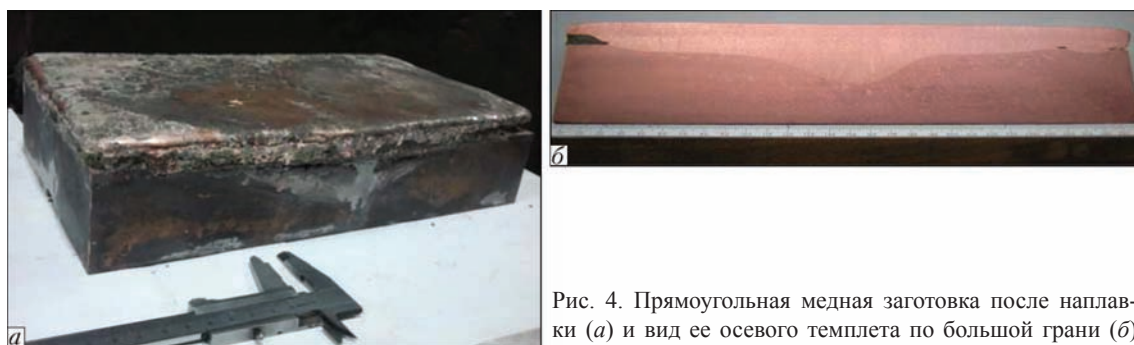


Рис. 4. Прямоугольная медная заготовка после наплавки (а) и вид ее осевого темплета по большой грани (б)

жимались к заготовке металлическим биндажом. Для подвода тока к шлаковой ванне использовались два графитированных электрода диаметром 100 мм, подсоединенных к одному из выходов силового трансформатора. Наплавку медного слоя, как и в предыдущем случае, осуществляли жидким металлом.

Анализ наплавленного образца показал, что при общем надежном сплавлении наплавленного слоя толщиной 15 мм с основой имеются небольшие местные участки несплавления по краям заготовки и увеличение глубины проплавления в зоне между токоподводящими электродами (рис. 4). Связано это с недостаточным нагревом периферийных зон и перегревом центра заготовки при примененной схеме токоподвода, когда основное тепловыделение происходило под электродами и между ними, а также плотным примыканием кирпичей, формирующих плавильное пространство, к боковой поверхности наплаваемого изделия. В случае использования многоэлектродной схемы токоподвода с равномерным нагревом наплаваемой поверхности и организации технологических зазоров между заготовкой и ограничивающей ее по периметру формой, как имело место при наплавке круглых заготовок, причины возможного неравномерного сплавления по сечению плоской заготовки будут устранены.

Для более детального исследования качества получаемого в процессе наплавки металла из наплавленной прямоугольной заготовки вырезали образцы для испытаний (рис. 5).

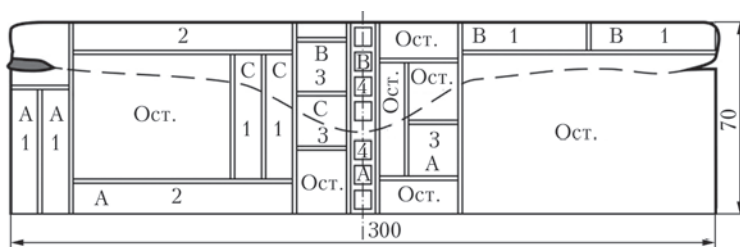


Рис. 5. Схема вырезки образцов: зона А — основной металл; В — наплавленный металл; С — переходной слой

Данные механических испытаний, определения твердости и электросопротивления приведены в табл. 1.

Видно, что электросопротивление наплавленного металла несколько выше, чем основного металла. Связано это с тем, что в экспериментах в качестве жидкого присадочного металла использовались отходы меди с повышенным содержанием примесей, в частности железа, а электросопротивление и прямо с ней связанная теплопроводность меди чувствительны к наличию таковых. При использовании чистой от примесей меди, например марки М1, проблем по электросопротивлению и, соответственно, по теплопроводности меди после электрошлаковой наплавки быть не должно.

Показатели механических свойств и твердости в наплавленном образце находятся на уровне, характерном для отожженной меди. Можно лишь отметить повышенные значения пластичности металла ( $\sigma_{0,2}$  и  $\delta$ ) и несколько пониженные прочности ( $\sigma_B$ ).

Содержание кислорода в наплавленном металле и металле основы существенно ниже, чем в меди марки М1 заводского производства (табл. 2). Это результат электрошлакового рафинирования

Таблица 1. Свойства меди электрошлаковой наплавки

| Место вырезки образца (зона)* | Предел прочности $\sigma_B$ , МПа | Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа | Относительное удлинение $\delta$ , % | Относительное сужение $\psi$ , % | Ударная вязкость $a_n$ , МДж/м <sup>2</sup> | Твердость, HRB | Удельное электросопротивление $\rho$ , мкОм·м |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---|----------------|---|
| A                             | 183,6                             | 104,8                                 | 68,4                                 | 70,6                             | 1,69...1,73                                 | 44...45        | 0,0186  |
| B                             | 186,5                             | 105,7                                 | 60,1                                 | 67,8                             | 1,53...1,58                                 | 43...45        | 0,0256  |
| C                             | 196,0                             | 104,5                                 | 68,0                                 | 71,4                             | 1,49...1,55                                 | 44...45        | 0,0180  |
| Медь М1                       | 215,7...235,3                     | 58,8                                  | 45-55                                | 65...80                          | 1,55...1,76                                 | 35...55        | 0,0172  |

\*Зоны А, В, С соответствуют металлу основы, наплавленного и переходного слоев.



Рис. 6. Макроструктура металла образцов электрошлаковой наплавки

меди (заготовка для наплавки изготовлена из слитка электрошлаковой выплавки).

Исследование макроструктуры металла образцов наплавленной пластины показало, что медь имеет плотное строение без неметаллических включений и газовых пор при надежном качественном сплавлении присадочного и основного металлов (рис. 6).

Металл в зоне В (наплавка) характеризуется столбчатой структурой с вертикальным направлением роста кристаллов в сторону теплового центра (шлаковой ванны). Зона А (основной металл) отличается мелкозернистой структурой, что характерно для меди, подвергшейся обработке давлением (заготовка для горизонтальной ЭШН была получена путем прокатки медного слитка). Зона С (переходная) имеет ширину около 2...3 мм

The present work is devoted to the investigation of peculiarities of electroslag surfacing of copper billets (parts) for the aim of their repair or restoration. Taking into account the physical-chemical properties of copper the scheme of surfacing with a horizontal arrangement of surface being surfaced, realizing the electroslag process with non-consumable graphitized electrodes and using the solid (copper chop, chips, powder) and molten (preliminary melted copper) filler metal, was selected. For the electroslag surfacing of copper the boron-containing slag, wt.%:  $\text{CaF}_2$  — 38...40.5;  $\text{CaO}$  — 25.3...27.5;  $\text{SiO}_2$  — 20.7...23;  $\text{Na}_3\text{B}_4\text{O}_7$  — 10...15 was developed. Temperature of slag melting was 980...1020 °C, and electric conductivity at operating temperatures was 4.0...5.0  $\text{Ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ . It was found that it is preferable to apply the molten filler metal for the electroslag surfacing of copper, when the complete fusion of a layer being surfaced with a base metal is provided at relatively small depth of the latter penetration (about 5 mm). The technological parameters of surfacing, such as temperature of heating the surface of the billet being surfaced, temperature of overheating of filler molten copper and electric parameters of the electroslag process, were determined experimentally. The quality of the surfaced copper corresponds to the level of the annealed copper by mechanical properties. The oxygen content is significantly lower than in copper of grade M1 of the factory production due to electroslag treatment of the surfaced metal. The surfaced steel has a dense homogeneous structure without non-metallic inclusions and gas pores. 6 Ref., 2 Tables, 6 Figures.

**Key words:** copper; electroslag surfacing; boron-containing slag; molten and solid filler metal; quality; properties

Поступила 02.02.2016

Т а б л и ц а 2. Содержание кислорода в металле

| Место отбора образца | Содержание кислорода в пробах, % |        |        | Среднее содержание [O], мас. % |
|----------------------|----------------------------------|--------|--------|--------------------------------|
|                      | 1                                | 2      | 3      |                                |
| Зона А               | 0,0038                           | 0,0044 | 0,0042 | 0,0041                         |
| Зона В               | 0,0091                           | 0,0070 | 0,0065 | 0,0075                         |
| Медь М1              | 0,0252                           | 0,0271 | 0,0282 | 0,0268                         |

и характеризуется в месте сплавления резким переходом от равноосной к столбчатой структуре без наличия каких либо структурных дефектов в месте перехода.

На основании выполненных исследований можно сделать вывод о принципиальной возможности электрошлаковой наплавки медных заготовок медью с целью их восстановления и ремонта. Показано, что такая наплавка обеспечивает бездефектное сплавление основы с присадочным материалом при высоком качестве металла наплавленного слоя.

1. *Электрошлаковая сварка и наплавка* / Под ред. Б.Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
2. *Электрошлаковая наплавка* / Ю.М. Кусков, В.Н. Скороходов, И.А. Рябцев, И.С. Сарычев // Под ред. А.Ф. Пименова. — М.: ООО «Наука и технологии», 2001. — 180 с.
3. *Илюшенко В.М., Лукьяненко Е.П.* Сварка и наплавка меди и сплавов на ее основе. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 396 с.
4. *Носатов В.А., Стеренбоген Ю.А., Кузьменко О.Г.* Восстановление штампов с применением электрошлакового обогрева // Кузнечно-штамповое производство. — 1987. — № 3. — С. 11–12.
5. *Каленский В.К., Панчишин Ю.А., Максимчук А.М.* О стабильности процесса электрошлаковой наплавки электродными лентами // Современные способы наплавки и их применение. — Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1982. — С. 92–97.
6. *Степанов В.В., Лопав Б.Е., Штенгельмейер С.В.* Вязкость флюсов, применяемых для электрошлакового переплава и подогрева // Автомат. сварка. — 1965. — № 11. — С. 28–30.