



УДК 669.117.56

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КРУПНЫХ СЛИТКОВ

**Ф. К. Биктагиров, В. А. Шаповалов, М. В. Ефимов,  
А. А. Селютин, В. Г. Падалка**

Выполнен анализ современных способов повышения качества крупных кузнечных слитков. Отмечено, что большинство из них основаны на электрошлаковых технологиях. Показано, что электрошлаковый обогрев прибыли в сочетании с подпиткой позволяет улучшить строение головной части, увеличить выход годного и повысить однородность слитка в целом.

Analysis of modern methods of improvement of quality of large forge ingots was made. It was noted that most of them are based on electroslag technologies. It is shown that the electroslag heating of crop part in combination with hot topping allows improving the structure of head part, increasing the yield of efficient metal and improving the homogeneity of ingot as a whole.

**Ключевые слова:** *стальной слиток; дефекты; электрошлаковые технологии; электрошлаковый обогрев; подпитка; качество*

Во многих отраслях промышленности для изготовления ответственных деталей и узлов (роторы турбин и генераторов, элементы корпусов атомных и химических реакторов и теплообменников, судовые валы, валки прокатных станов и др.) необходимы крупные стальные поковки, от качества которых зависит надежность и долговечность изготавливаемых из них изделий.

Качество крупных поковок во многом определяется качеством исходных слитков, масса которых может достигать несколько сотен тонн.

Производство крупных слитков сопряжено с весьма сложной проблемой как организационно, так и в плане обеспечения требуемого уровня качества металла. Последнее связано с тем, что продолжительное время затвердевания больших масс многокомпонентного жидкого металла сопровождается образованием в формирующемся слитке различных дефектов усадочного и ликвационного происхождения. Слиток получается неоднородным по химическому составу и плотности в различных его объемах, причем с увеличением массы слитка эта неоднородность усиливается.

Основными дефектами стальных слитков являются усадочная рыхлость и пористость; осевая (V-образная) и внецентренная (Λ-образная) ликвации; местные скопления газов и неметаллических включений.

Как свидетельствуют данные ультразвукового контроля слитков массой более 100 т производства Ижорского завода и фирмы «Japan Steel Work» [1], а также завода «Энергомашспецсталь», наиболее проблемной относительно этих видов дефектов является осевая зона слитков в их верхней половине. Помимо усадочной раковины и подприбыльной рыхлоты, здесь отмечено общее и локальное повышение концентрации ликвирующих примесей, неметаллических включений и газов.

С целью достижения максимально возможной физической плотности слитка, во многом определяющей его химическую однородность, следует в процессе его формирования исключить образование поперечных пережимов и «мостов», затрудняющих питание жидким металлом претерпевающих усадку нижележащих горизонтов.

Для выполнения этого требования необходимо поддерживать положительный градиент температур металла в направлении к головной части слитка. С этой целью на изложницу устанавливают прибыльную надставку с теплоизолированной боковой поверхностью, а также увеличивают конусность изложниц. При этом масса металла прибыли крупных слитков достигает 25 % и более массы всего залитого в изложницу (с прибыльной надставкой) жидкого металла. Повышению химической однородности и физической плотности слитка способствует также снижение содержания в металле нежелательных примесей и элементов, которые сильно ликвируют



и вызывают формирование грубой кристаллической структуры.

Улучшение строения головной части крупных слитков важно с точки зрения не только повышения качества слитка в целом, но и с экономической (сокращение расхода жидкого металла и увеличение выхода годного). Увеличение чистоты исходного жидкого металла, совершенствование конструкции изложниц и прибыльной надставки в определенной мере дает возможность улучшить строение крупных слитков [2–4].

Однако эти меры не всегда позволяют достичь высокого уровня сплошности и однородности слитков, особенно в условиях все повышающихся требований к качеству. Поэтому постоянно ведутся исследования, направленные на изучение природы образования различных дефектов и изыскание способов борьбы с ними.

Использование для этой цели традиционных приемов (усиление теплоизоляции боковой поверхности прибыльной надставки, утепление зеркала металла теплоизолирующими и экзотермическими смесями и т. д.) ввиду больших объемов металла в прибыльной части и длительного времени затвердевания не позволяют эффективно воздействовать на ход кристаллизации крупных слитков [5].

Более действенными являются различные способы дополнительного подвода тепла к прибыли. Это могут быть обогревы газовой, электродуговой, индукционный или электрошлаковый.

Из них наибольшее практическое применение нашли электрошлаковые технологии, что связано с рядом причин, основными из которых являются более равномерный и регулируемый обогрев зеркала металла по всей его поверхности и возможность одновременного рафинирования металла шлаком.

На основе электрошлакового процесса, когда расходуемая металлическая заготовка постепенно плавится в толще расплавленного шлака, создан способ электрошлакового переплава (ЭШП), зарекомендовавший себя одним из наиболее действенных способов производства качественной металлопродукции. Применяется ЭШП и для изготовления крупных слитков из среднелегированных сталей, в частности системы Cr–Ni–Mo.

Однако с увеличением массы слитка и его диаметра обеспечить направленную кристаллизацию (что является предпосылкой получения высококачественной заготовки) при классическом ЭШП становится затруднительным. Кроме того, производство слитков указанным способом энергоемко и требует значительных затрат как капитальных, так и текущих, в том числе на изготовление расходуемых электродов. На основе ЭШП разрабатываются другие, менее затратные, технологии, позволяющие воздействовать на кристаллизующийся металл [5]. Среди них наиболее известны (прошли практическое опробование и применение) электрошлаковый обогрев и подпитка, электрошлаковая разливка (отливка) [6–9], процессы BEST и TREST [10–13], спо-

собы МХКВ и порционной электрошлаковой отливки (ПЭШО) [14–16].

Основная цель электрошлакового обогрева — уменьшение усадочной раковины и увеличение выхода годного. Сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона данная технология успешно отработана на ряде металлургических и машиностроительных заводов еще в конце 1950-х — начале 1960-х гг.

Для ее реализации на чугунную изложницу устанавливают специальную водоохлаждаемую или футерованную надставку, в которой после заполнения жидким металлом с помощью нерасходуемых электродов расплавляется и поддерживается в перегретом состоянии шлак.

Состав шлака подбирают с учетом потребности в стабильном ведении электрошлакового процесса в заданных температурных условиях. По мере формирования слитка осуществляется электрошлаковый обогрев зеркала металла для обеспечения свободного питания жидким металлом затвердевающих областей и исключения образования закрытой и глубокой усадочной раковины [6, 8].

Электрошлаковый обогрев улучшает строение головной части слитка и служит преимущественно для предотвращения дефектов усадочного происхождения. Следует отметить, что при электрошлаковом обогреве обеспечивается рафинирование близлежащих к шлаку объемов металла и уменьшается зона отрицательной ликвации в донной части слитка.

По аналогичной схеме осуществляют электрошлаковую подпитку прибыли слитка, только в этом случае вместо нерасходуемых применяют металлические расходуемые электроды, т. е. плавящиеся в шлаке.

С точки зрения уплотнения головной части подпитка, по сравнению с обогревом, имеет как преимущества, так и недостатки. Основное преимущество заключается в том, что необходимый для компенсации усадки металл поступает от плавящегося электрода, что позволяет полностью вывести усадочную раковину и получить головную часть, макроплотную по всей ее высоте. Кроме того, химический состав электрода может быть выбран с учетом корректировки состава металла в головной части слитка.

К недостаткам следует отнести необходимость изготовления расходуемого электрода, подготовку и заливку жидкого шлака в стартовый период, более жесткие требования к составу шлака и его свойствам (электропроводность, вязкость), наличие донного токоподвода при однофазной одноэлектродной схеме питания, сложность регулирования массовой скорости плавки каждого электрода при бифилярной и трехфазной схемах токоподвода, усложнение оборудования.

Выбор технологии электрошлакового обогрева или электрошлаковой подпитки определяется в зависимости от конкретных условий и возможностей предприятия. Следует учитывать, что при электрошлаковом обогреве можно компенсировать усадку за счет подачи в шлаковую ванну металла в виде некомпактного фрагментированного материала



(стружка, сечка, пыль и т. д.) или плавящегося в шлаке бестокового электрода.

На основе опыта электрошлакового обогрева прибыли слитков с целью более существенного воздействия на условия перехода металла из жидкого состояния в твердое разработан способ электрошлаковой отливки (ЭШО), сочетающий достоинства электрошлакового обогрева, рафинирования металла шлаком и разливки под шлаком [9]. Суть его заключается в следующем.

Первоначально в водоохлаждаемой форме с помощью нерасходуемых электродов наводят и разогревают до необходимой температуры шлаковую ванну. Затем в форму через шлак заливают жидкий металл, который впоследствии кристаллизуется при электрошлаковом обогреве в режиме выведения усадочной раковины с постепенным снижением подводимой к шлаковой ванне мощности. По завершении обогрева и полного затвердевания шлака и металла полученный слиток извлекают из формы.

При такой общей технологической схеме конкретная реализация этого способа может быть различной. Например, весь описанный процесс может осуществляться в водоохлаждаемом кристаллизаторе, установленном на плоском водоохлаждаемом поддоне, либо на водоохлаждаемом поддоне, вмещающем весь объем шлакового расплава, размещают обычную чугунную изложницу, а на нее устанавливают ту или иную прибыльную надставку. Разливку можно осуществлять как в подвижный кристаллизатор, когда уровень заливаемого металла поддерживается постоянным, так и в неподвижный. В последнем случае токоподводящие электроды по мере заполнения формы постепенно поднимаются вверх.

Шлак может расплавляться из исходных твердых компонентов непосредственно в кристаллизаторе или выплавляться в отдельной флюсоплавильной печи и заливаться в кристаллизатор перед разливкой металла. Электрическая схема ведения электрошлакового процесса может быть одно- или трехфазной. И в том, и другом случае могут использоваться различные способы подключения электродов к источнику питания.

В конце 1970-х гг. появилась информация о применении для повышения качества крупных слитков процессов BEST и TREST [10–13]. Они являются разновидностью рассмотренного способа электрошлаковой подпитки. При этом в первом случае на изложницу устанавливают прибыльную водоохлаждаемую надставку, а во втором, — футерованную.

Согласно приведенным данным, освоена технология и производство указанными способами кузнечных и листовых слитков массой до 55 т, качество которых, особенно верхней головной части, существенно выше, по сравнению со слитками обычного производства. Ведутся работы по увеличению массы и расширению номенклатуры слитков, получаемых процессами BEST и TREST, исследованию качества этих слитков и изготавливаемых из них поко-

вок, в том числе в сравнении с аналогичными изделиями из слитков ЭШП [14].

Другим направлением производства крупных слитков являются различные способы укрупнения, основанные на электрошлаковом процессе (электрошлаковая сварка и наплавка, способы МХКВ и ПЭШО).

Электрошлаковой сварке подвергают готовые поковки, которые по торцам сваривают между собой. Данный способ, в том числе с использованием пластинчатых электродов, был в свое время разработан в ИЭС им. Е. О. Патона и успешно реализован при изготовлении роторов турбогенераторов [15]. В последнее время возрождается интерес к такому способу электрошлаковой сварки как возможному пути получения сверхкрупных заготовок из нескольких слитков меньшего развеса.

Среди различных вариантов электрошлаковой наплавки и укрупнения для производства слитков большого сечения наиболее перспективным является способ кольцевой электрошлаковой наплавки жидким присадочным материалом (ЭШН ЖМ), при котором металл наращивают на заготовку полой по диаметру [16, 17].

Вследствие сравнительно небольших размеров таких слоев и объемов металлической ванны имеется возможность получать слиток однородный по высоте и диаметру. Данная технология наиболее оправдана при производстве слитков из сложнолегированных, склонных к ликвации, сталей и сплавов.

Суть способа МХКВ заключается в следующем [18]. Из слитка обычного производства на кузнечном прессе трепанируется по всей его высоте сердцевина, т. е. удаляется основная дефектная зона. Образовавшаяся полость затем заправляется способом электрошлаковой плавки расходуемого электрода. Помимо сложности и дороговизны, при такой технологии возникают проблемы с обеспечением равномерного и бездефектного сплавления наплавляемого металла с телом слитка и компенсации неизбежно возникающих при этом термических напряжений.

Своеобразным способом укрупнения является ПЭШО, при которой металл в кристаллизатор поступает в несколько приемов [19, 20]. Первоначально через жидкий шлак заливается первая порция, заполняющая лишь часть объема кристаллизатора. Затем осуществляют электрошлаковый обогрев зеркала металла по режиму, обеспечивающему жидкое состояние верха порции. При этом залитый металл постепенно затвердевает снизу вверх.

Через некоторое время, когда под слоем шлака остается небольшое количество жидкого металла, в кристаллизатор заливают вторую порцию, также выдерживаемую при электрошлаковом обогреве и затвердевающую в осевом направлении.

Подобная заливка металла небольшими порциями повторяется до заполнения всей формы. На заключительном этапе формирования слитка ПЭШО производится постепенное снижение подводимой к



шлаковой ванне мощности с целью выведения усадочной раковины.

На установке ЭШО-200И1, пущенной в эксплуатацию на заводе «Энергомашспецсталь», этим способом получены слитки массой 75 т (диаметр 1600 мм) и массой 200 т (диаметр 2500 мм). В целом технология ПЭШО работоспособна, что показали исследования качества слитков [13]. По стоимости оборудования установка ПЭШО дешевле, чем аналогичные для ЭШП. Однако главным ее преимуществом является отсутствие расходуемых электродов, затраты на изготовление которых составляют значительную долю в общей себестоимости слитков ЭШП.

Таким образом, для повышения качества крупных стальных слитков можно использовать различные из рассмотренных процессов. Они прошли промышленную или опытно-промышленную проверку и имеют прикладное значение для предприятий, специализирующихся на производстве крупнотоннажных заготовок.

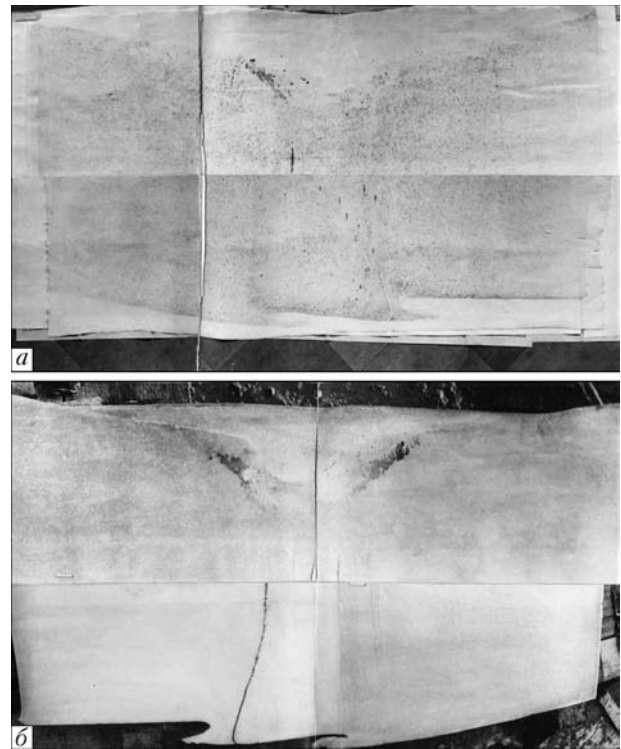
В Украине ведущим заводом такого профиля является ОАО «Энергомашспецсталь» (г. Краматорск). Наряду со сравнительно небольшими слитками (3... 90 т) завод стабильно производит продукцию ответственного назначения из слитков массой от 100 до 250 т. В 2010 г. на заводе «Энергомашспецсталь» впервые в Украине отлиты три слитка массой 355 т. Металл для них выплавляли в электродуговых печах с последующей обработкой на установке ковш-печь, вакуумированием в ковше с продувкой аргоном и разливкой в изложницы, установленные в вакуумные камеры.

Учитывая проблемы получения крупного слитка, на заводе рассматривают возможность повышения их качества за счет использования одного из упомянутых способов.

В перспективе планируют начать отливку на ОАО «Энергомашспецсталь» слитков массой 420... 450 т. При производстве таких слитков весьма актуальной является проблема увеличения выхода годного, поскольку уменьшение массы прибыли на 10 % эквивалентно отливке слитка массой около 500 т. Имеющееся на заводе оборудование позволит отковать заготовки из слитков такой массы и произвести их механическую обработку.

В настоящее время наилучшего качества слитков достигают при ЭШП, однако создание сверхкрупной установки ЭШП — дорогостоящее мероприятие, которое может быть оправдано при полной ее загрузке на длительный период. Тем не менее на ряде зарубежных предприятий ведутся работы по созданию печей ЭШП, позволяющих производить слитки массой до 450 т [21].

В определенной мере это относится и к технологиям электрошлаковой наплавки и ПЭШО, хотя затраты на их реализацию несколько меньше. Поэтому металлургические предприятия, специализирующиеся на производстве крупных слитков, могут направить усилия на разработку и внедрение про-



Вид серного отпечатка (а) и макроструктуры (б) осевого темплетта головной части 75-тонного слитка ЭШО

цессов, сочетающих современные технологии выплавки и подготовки высококачественной жидкой стали, а также технологий, позволяющих улучшить условия формирования слитков, отливаемых в изложницы. Это могут быть различные варианты ЭШО, электрошлакового обогрева и подпитки.

В частности, для производства слитков массой 50 т и крупнее представляется наиболее рациональным применение электрошлакового обогрева прибыльной части с помощью нерасходуемых электродов. Подобная технология реализована при обогреве прибыли крупных (массой до 50 т) чугуновых слитков-отливок, что позволило не только уменьшить массу прибыли, но и улучшить качество литых валков [22].

В литературе имеются сведения (преимущественно без каких-либо подробностей) о применении в Японии при производстве стальных слитков процесса ESHT-J (electroslag hot topping-Japan) [23]. Здесь речь идет об электрошлаковом обогреве металла в футерованной прибыльной надставке тремя графитированными электродами. Скорее всего, для слитков большого диаметра подобная схема наиболее рациональна.

Многочисленные данные, в том числе непосредственные исследования макроструктуры, подтверждают, что воздействие на затвердевание металла при обогреве и подпитке прибыли обеспечивает, в сравнении с полученными по традиционной технологии слитками, не только экономию металла за счет уменьшения прибыли, но и повышение плотности в осевой зоне, а также уменьшение общей и локальной химической неоднородности.



На рисунке приведены серный отпечаток и макроструктура продольного осевого темплета головной части 75-тонного слитка ЭШО стали 10ГН2МФА, полученного на установке ЭШО-200И1. В отличие от слитков обычного производства, здесь отсутствуют грубые скопления серы и сульфидных включений. Имеющиеся «усы» внеосевой неоднородности немногочисленны и непротяженны. Полностью отсутствует осевая пористость и V-образная ликвация. Усадочная раковина (открытая и неглубокая) по оси слитка простирается на глубину всего 200... 230 мм, что свидетельствует о правильном выборе режима электрошлакового обогрева и его эффективности. Положительное влияние электрошлаковой обогривки оказало и на строение донной части слитка, где отсутствует ярко выраженный отрицательный ликвационный фронт с пониженной плотностью металла.

### Выводы

1. Электрошлаковая обогривка головной части слитка, в том числе в сочетании с подпиткой, является перспективным направлением повышения качества крупных стальных слитков.

2. При этом, по сравнению с обычной разливкой, улучшается строение верхней и донной областей слитка и значительно повышается выход годного.

3. Данный способ повышения качества слитков является эффективным при производстве крупного стального литья, электрошлаковая обогривка прибыли которых гарантирует отсутствие дефектов усадочного происхождения и дает возможность существенного снижения объема прибыли [24].

1. Межкристаллитные трещины в поковках из крупных слитков. Ч. 1 / С. Ю. Афанасьев, Ю. М. Батов, В. Г. Жигаревский и др. // Электротехнология. — 2006. — № 7. — С. 37–39.
2. Дуб В. С., Макарычева Е. В., Макаров И. И. Крупный слиток — настоящее и будущее // Там же. — 1999. — № 5. — С. 22–29.
3. Слитки для крупных поковок / С. И. Жульев, А. П. Фоменко, К. Е. Титов и др. // Сталь. — 2005. — № 11. — С. 41–44.
4. Influence of mould on the solidification and soundness of heavy forging ingots / K. Tashiro, S. Watanabe, I. Kitagawa, I. Tamura // Transactions ISIJ. — 1983. — V. 23. — P. 312–321.
5. Митчелл А. Об изготовлении крупных поковок из сплавов, чувствительных к сегрегации // Современ. электротехнология. — 2005. — № 2. — С. 3–8.
6. Тягун-Белоус Г. С., Дудко Д. А. Электрошлаковая обогривка неплавящимися электродами головной части слитков и фасонных отливок // Автомат. сварка. — 1958. — № 10. — С. 36–43.
7. Бакуменко С. П., Гуляев Б. Б., Верховцев Э. В. Снижение отходов стального слитка. — М.: Металлургия, 1967. — 220 с.
8. Марченко И. К. Улучшение качества металла путем электрошлакового обогрева головной части слитка // Прог-

рессивные способы получения стальных слитков. — Киев: Ин-т проблем литья, 1980. — С. 107–109.

9. Электрошлаковая разливка стали / Н. Ф. Бастратов, Н. А. Тулин, В. П. Немченко и др. — М.: Металлургия, 1978. — 56 с.
10. Поковки повышенного качества, изготовленные методами ЭШП и БЭСТ / П. Махнер, Т. Кюнелт, Г. Егер, Е. Плекингер // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1979. — Вып. 5. — С. 259–266.
11. Махнер П. Опыт производства крупных кузнечных слитков с помощью БЭСТ-процесса и состояние технологии электрошлаковой подпитки // Там же. — Киев: Наук. думка, 1983. — Вып. 6. — С. 306–316.
12. Базеву С., Скети М., Ренетто Е. Способ ТРЭСТ для производства валов роторов высокого давления из хромомolibденованадиевой стали // Там же. — Киев: Наук. думка, 1983. — Вып. 6. — С. 317–321.
13. Усовершенствованный процесс БЭСТ — разработка и результаты / В. Майер, В. Миттер, П. Махнер и др. // Там же. — Киев: Наук. думка, 1987. — Вып. 9. — С. 159–163.
14. Kern T.-U., Scariln B., Donth B., Zeiler G., Diganfrancesco A. The European cost536 project for the development of new high temperature rotor materials // 17th Intern. forgemasters meeting (3–7 Nov. 2008, Santander, Spain). — Santander, 2008. — P. 316–310.
15. Новый способ укрупнения слитков и поковок на основе электрошлакового процесса / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Д. А. Дудко и др. // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1973. — Вып. 1. — С. 234–243.
16. Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШП ЖМ / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Современ. электротехнология. — 2007. — № 1. — С. 3–7.
17. Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков / Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. П. Стовпченко и др. // Там же. — 2010. — № 3. — С. 5–10.
18. Аустель В., Хейман Г., Майдорн Х. Производство крупных МХКВ-поковок и их свойства // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1983. — Вып. 6. — С. 301–305.
19. Порционная электрошлаковая отливка слитков / Б. Е. Патон, Ю. В. Латаш, А. Е. Воронин и др. // Спец. электротехнология. — 1973. — Вып. 19. — С. 24–29.
20. Крупные кузнечные слитки порционной электрошлаковой отливки / Ю. В. Латаш, А. Е. Воронин, Ф. К. Биктагиров и др. // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1987. — Вып. 9. — С. 78–84.
21. Концепция универсальной печи ЭШП производства крупных слитков / Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, В. Я. Саенко и др. // Электротехнология. — 2010. — № 11. — С. 12–18.
22. Улучшение качества и увеличение выхода годного чугунов прокатных валков при отливке с электрошлаковым обогревом / В. Е. Хричиков, Н. П. Котешов, А. Е. Кривошеев и др. // Экономия металла за счет расширения сортамента и улучшение качества металлопродукции: Тез. докл. всесоюз. семинара (Москва, сентябрь 1979 г.). — М.: Черметинформация, 1979. — 29–30.
23. Кюнелт Г., Махнер П. Специальные способы производства крупных кузнечных слитков // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1983. — Вып. 7. — С. 50–61.
24. Новый способ электрошлакового уплотнения слитков и отливок / В. И. Нагаевский, Б. И. Медовар, А. К. Цыкулenco, А. Д. Чепурной // Спец. электротехнология. — 1984. — Вып. 57. — С. 38–40.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
ОАО «Энергомашспецсталь», Краматорск

Поступила 23.11.2010