



УДК 669.187.56.001.1

## О НЕКОТОРЫХ «СТАРЫХ— НОВЫХ» ЗАДАЧАХ ЭШП

Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко

Рассмотрены старые и новые проблемы получения больших слитков для крупных поковок, применяемых в тяжелом и энергетическом машиностроении. Показаны новые возможности современных технологических процессов ЭШП и ЭШС и их разновидностей для повышения металлургического качества крупнотоннажных слитков и кованосварных заготовок из легированных сталей и сплавов, которые используются в производстве сверхкрупных роторов газовых и паровых турбин энергетических установок.

Old and new problems in production of large ingots for large forgings used in heavy and power engineering sectors are considered. New capabilities of the advanced ESR and ESW processes and their modifications are shown, ensuring improvement of metallurgical quality of large-tonnage ingots and forged-welded billets of alloyed steels and alloys applied in production of super large rotors for gas and steam turbines of power plants.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; крупные кузнечные слитки; легированные стали и сплавы; никелевые суперсплавы; электрошлаковая сварка; ЭШС с применением присадочных кусковых материалов; электрошлаковая наплавка; ЭШН с жидким металлом; ЭШП по двухконтурной схеме; ЭШС с жидким металлом

Возврат к старым — в прямом временном смысле — вечным задачам характерен для многих областей науки и техники. В частности, в последнее время опять наблюдается повышенный интерес к крупному кузнечному слитку электрошлакового переплава (ЭШП) для нужд машиностроения.

Тяжелое и энергетическое машиностроение развивается по пути укрупнения машиностроительных изделий, их отдельных узлов и деталей, масса которых измеряется десятками и сотнями тонн. При этом одновременно с увеличением их габаритов и массы повышается уровень требований к качеству деталей и готовых изделий, а также к технико-экономическим показателям их производства, которые, прежде всего, зависят от принятой технологической схемы, в том числе способа сварки в случае кованосварных и литосварных изделий.

На прошедшей 15-й Международной конференции кузнецов IFM-2003, состоявшейся 26–29 октября 2003 г. в г. Кобе, Япония, был представлен ряд докладов, свидетельствующих об эффективности применения ЭШП для получения крупных слитков для поковок роторов и дисков мощных паровых и газовых турбин [1–3].

В докладе, представленном известным поставщиком турбинных поковок Saarschmiede (Германия), описывается опыт производства роторов цилиндров высокого и среднего давления паровых турбин из сталей 1 % CrMoV и 2 % CrMoWV (эти стали аналогичны сталям марок 25X1M1ФА и ЭИ415), предназначенных для работы при температуре пара до 585 °С, и цилиндров низкого давления из стали типа (23...27) % NiCrMoV (аналог сталей 25ХНЗМФА и 26ХНЗМФА). Важным достижением этой работы является комбинированный ротор из стали 2 % CrMoWV, в котором совмещены ступени высокого, среднего и низкого давления благодаря их термообработке на разные структуры (мартенсит, бейнит). На фирме Saarschmiede широко используют сверхчистую сталь, что позволяет поднять температуру рабочего тела в газовых турбинах и на ступенях низкого давления паровых турбин. Под сверхчистой понимается сталь с содержанием Cu, Si, Mn < 0,03 % каждого, As < 0,007 %; Sb < 0,0007 %; Sn < 0,0035 %. Фактическое содержание фосфора на уровне 0,007 %, серы — менее 0,005 %. Такое низкое содержание вредных примесей в металле — необходимое условие для обеспечения требований, предъявляемых к служебным характеристикам, в частности к длительной прочности. Для изготовления крупных роторов используют слитки ЭШП массой до 165 т.

В докладе, представленном фирмой Japan Casting and Forging Corp. (Япония), отмечается, что

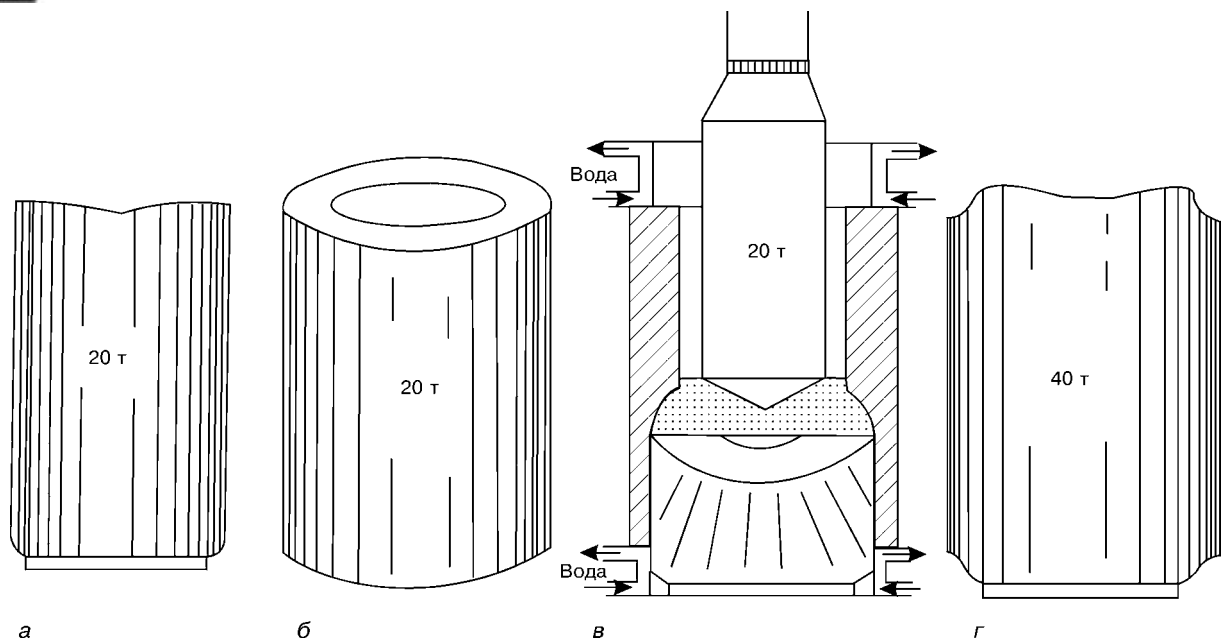


Рис. 1 Схема укрупнения слитков способом ЭШП в расходоуемых кристаллизаторах: а — слиток массой 20 т; б — расходоуемый кристаллизатор; в — ЭШП в расходоуемом кристаллизаторе; г — укрупненный слиток массой 40 т

при выплавке крупных слитков из высокохромистой стали с бором необходимо определить соотношение между  $B_2O_3$  в шлаке и бором в металле при ЭШП или электрошлаковой подпитке крупного слитка, отлитого сифонным способом. В футерованную прибыль такого слитка заливают специальный шлак и погружают графитовые и расходоуемые электроды. По такой технологии отливают слитки массой от 62 до 106 т.

В докладе, подготовленном японскими специалистами Daldo Steel и Mitsubishi Heavy Industries, подчеркивается, что вакуумный электрошлаковый переплав электрода вакуумной индукционной плавки позволил при низком вводе элементов-раскислителей получить заданное содержание бора и азота в кобальтсодержащей стали для лопаток и болтов роторов паровых турбин, работающих при 650 °С. В сверхчистой стали содержится, %: Cr 10; Mo 0,7; W 1,7; V 0,23; (Nb + Ta) 0,08; Co 3,3; B 0,07; N 0,022.

В докладе известного специалиста А. Митчелла (Канада) [3] рассмотрены способы ЭШП, ВДП, ЭШ подпитка и ЭШС как технологии производства роторов и валов из сталей и сплавов, склонных к сегрегации. Показано, что для получения крупнотоннажных слитков приемлемого качества из сталей NiCrMoV и CrMoV важен правильный выбор технологии их выплавки, обеспечивающей получение сверхчистого металла, применение при разливке оптимальных по геометрическим параметрам изложниц, а также соответствующей технологии при их ковке. При выплавке крупных слитков из сплавов на основе никеля, в частности из сплава Инконель 718, требуются другие подходы для обеспечения высокого качества металла из-за склонности этих сплавов к сегрегации и образованию дефектов типа «фреклс», которые не устраняются при термической обработке.

Отмечено, что применение переплавных процессов также не решает всех проблем изготовления крупных слитков из сплавов на никелевой основе при увеличении их диаметра: в случае ВДП — более 1000 мм, для существующих схем ЭШП — более 700 мм. В качестве альтернативы А. Митчелл рассматривает метод укрупнения слитков на основе ЭШС и ЭШП порошкообразных материалов с расходоуемым электродом, которые в разные годы впервые были разработаны в ИЭС им. Е. О. Патона [4–6].

Следует отметить, что проблема получения качественного крупного кузнечного слитка периодически обостряется. Попытки решить или обойти проблему подавления структурных дефектов ликвационного происхождения предпринимались неоднократно. Ибо даже без ясной картины природы образования этих дефектов достаточно давно было известно, что они проявляются тем резче, чем больше сечение и масса слитка и соответственно больше размер двухфазной зоны в затвердевающем слитке и дольше время его затвердевания.

Основным недостатком канонических схем ЭШП и ВДП является жесткая связь между электрическим (тепловым) режимом и скоростью плавления металла, что обуславливает сравнительно большой объем металлической ванны и неблагоприятную с точки зрения условий кристаллизации ее форму.

Одним из возможных решений проблемы получения бездефектных крупнотоннажных слитков ЭШП из никелевых суперсплавов является применение разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона нового процесса электрошлакового переплава расходоуемого электрода в токоподводящем кристаллизаторе по двухконтурной схеме (ЭШП ДС) [7]. При использовании ЭШП ДС может быть получена любая наперед заданная производительность процесса и форма металлической ванны, независимо от диаметра слитка. Если при канонической схеме ЭШП



или ВДП глубина металлической ванны в ее центральной части составляет обычно величину, равную радиусу слитка, то при ЭШП ДС металлическая ванна может быть существенно меньше и иметь практически плоскую форму. Важным достоинством процесса ЭШП ДС является надлежащее формирование поверхности слитка.

Вполне очевидно, что решить указанную проблему практически можно также путем получения крупного слитка требуемого размера из меньших слитков, свободных от структурных дефектов, путем соединения их в единый моноблок. Такие подходы были реализованы на основании электрошлакового сварочного процесса.

Еще в начале 70-х годов для укрупнения кузнечных слитков без снижения их качества в ИЭС им. Е. О. Патона был разработан способ ЭШП в расходуемом кристаллизаторе [4]. Так называемый расходуемый кристаллизатор получают прошивкой и раскаткой слитка либо используют литой полый слиток. Затем в этом кристаллизаторе переплавляют электрод из металла, химический состав которого идентичен металлу расходуемого кристаллизатора. Массу слитка при этом можно увеличить в 1,5–3 раза (рис. 1) без повышения мощности трансформатора электрошлаковой печи. В случае, если расходуемый электрод и кристаллизатор изготавливают из разных марок сталей или сплавов, описанный способ позволяет получать биметаллические заготовки, которые при необходимости могут быть использованы в производстве биметаллического сортового проката или биметаллических труб.

Разновидность указанного процесса на Западе получила название МХКВ (МНКW) по наименованиям фирм, осуществлявших его реализацию (Midvale Herpenstal / Klockner-Werke). Центральная зона обычного слитка, в наибольшей степени подверженная дефектам, выбивается с помощью кузнечного прессы, образуя отверстие, заполняемое соответствующим материалом с помощью ЭШП. К началу 80-х годов прошлого столетия на заводах в Оснабрюкке (ФРГ) таким процессом были получены ~ 30 слитков массой до 210 т. В ряде случаев наблюдались дефекты в переходной зоне между основным металлом и выплавляемой сердцевиной. Причиной этому явились усадочные явления, усугубленные жестким термометформационным циклом, имеющим место при заплавлении осевой зоны. Вследствие этого процесс МХКВ не нашел широкого применения для производства высоконагруженных роторов.

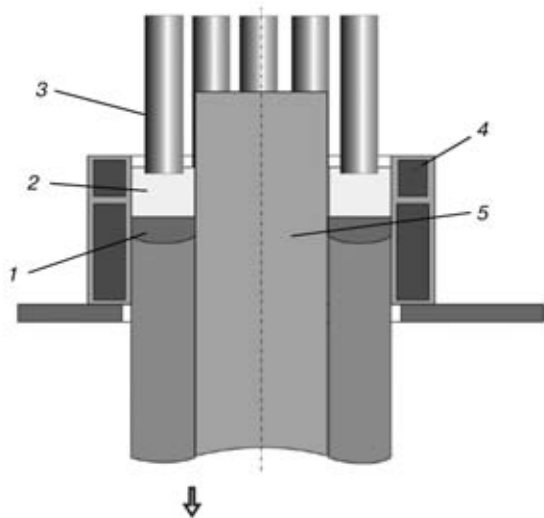


Рис. 2. Схема укрупнения слитков способом ЭШНу в подвижном коротком кристаллизаторе: 1 — металлическая ванна; 2 — шлаковая ванна; 3 — расходуемые электроды; 4 — кристаллизатор; 5 — слиток

Более благоприятные термометформационные условия могут быть обеспечены при кольцевой электрошлаковой наплавке металла на центральный осевой слиток. В этом случае металлическая ванна наплавляемого металла имеет минимальный объем, а двухфазная зона твердожидкого состояния — минимальную протяженность, что позволяет избежать образования кристаллизационных дефектов.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона технологическая схема укрупнения тяжелых кузнечных слитков способом кольцевой электрошлаковой наплавки (ЭШНу) включает установление центрального слитка с заданным зазором в охватывающий его короткий кристаллизатор, ограничение зазора снизу с помощью кольцевого поддона с затравкой, которые входят в формирующую часть кристаллизатора. В процессе ЭШНу при относительном

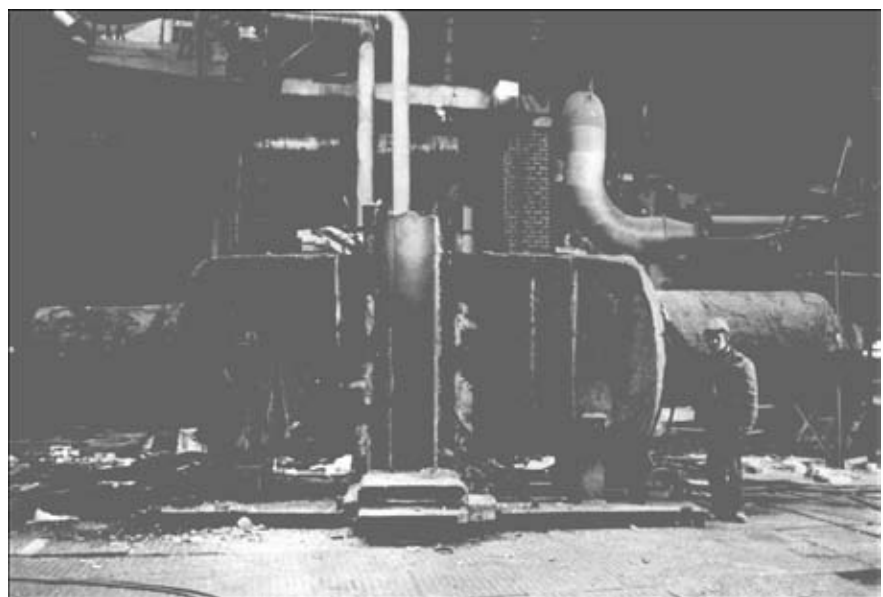


Рис. 3. Укрупненная способом ЭШС КПКМ кованосварная заготовка рабочего вала из стали 50ХН массой 103 т для стана ЛП04500



встречном перемещении слитка и кристаллизатора путем частичного оплавления центрального слитка и плавления одного или нескольких расходуемых электродов формируется слиток, диаметр которого больше, чем диаметр исходного центрального слитка на величину, равную удвоенному заданному зазору (рис. 2).

В качестве исходного может быть слиток, предварительно наплавленный по указанной технологии. Для ЭШНу могут быть использованы кусковые присадочные материалы или жидкий металл в сочетании с расходуемыми (или нерасходуемыми) электродами, или без них — в случае применения токоподводящего кристаллизатора.

Идея получения качественного кованосварного изделия из двух или более слитков (поковок) сравнительно малого размера с гарантированным отсутствием структурных дефектов ликвационного происхождения весьма плодотворна и сегодня может быть реализована на основе применения способов электрошлаковой сварки, например, по бифилярной схеме (ЭШСб).

В промышленных условиях реализовано несколько разновидностей способов ЭШСб, в том числе ЭШС КППМ — электрошлаковая сварка двумя неподвижными электродами с подачей в сварочный зазор кусковых присадочных материалов в виде дробы или сечки (рис. 3). Разрабатываемая в настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона технология электрошлаковой сварки с применением жидкого металла (ЭШС ЖМ) вместо кусковых присадочных материалов существенно расширяет возможности ЭШС и обеспечивает получение высококачественных сварных соединений с однородными физико-механическими свойствами из сталей и сплавов практически любого химического состава [9,10].

Таким образом, плодотворные идеи, в свое время заложенные в создание электрошлаковой технологии и многих ее разновидностей (ЭШП в расхо-

дуемом кристаллизаторе, ЭШСб, ЭШС КППМ, ЭШН ЖМ и др.), не утратили своего значения и сегодня. На их основе могут успешно решаться задачи повышения качества и служебных характеристик металла крупных кузнечных слитков и сварных заготовок как старые — для легированных высокопрочных сталей, так и новые — для никелевых суперсплавов.

1. Колтишон Э. Ю. Проблема получения большого слитка для крупных поковок ответственного назначения // *Электрометаллургия*. — 2004. — № 3. — С. 43–47.
2. Колтишон Э. Ю., Уточкин Ю. И. Производство крупных изделий ответственного назначения для энергомашиностроения // Там же. — № 5. — С. 43–46.
3. Mitchell A. The prospects for large forgings of segregation-sensitive alloys // IFM-2003. 26–29 October 2003. Kobe, Japan. — Proceeding VDEh. — P. 57–63.
4. Некоторые особенности ЭШП металла в расходуемых кристаллизаторах / Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко, Д. А. Козлитин и др. // *Рафинирующие перепавы*. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 96–100.
5. Новые способы сварки заготовок сверхкрупных сечений — электрошлаковая сварка неподвижным электродом с добавками кусковых материалов (ЭШС КППМ) / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. П. Андреев и др. // *Проблемы электрошлаковой технологии*. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 41–47.
6. *Электрошлаковая технология в машиностроении* / Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, И. Д. Нагаевский, А. Д. Чепурной. — Киев: Техніка, 1984. — 215 с.
7. К вопросу об электрошлаковой выплавке крупнотоннажных заготовок из высоколегированных сталей и сплавов / Б. И. Медовар, Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко и др. // *Пробл. спец. электрометаллургии*. — 1999. — № 2. — С. 26–30.
8. Кюонельт Г., Махнер П. Специальные способы производства крупных кузнечных слитков // *Электрошлаковый перепад*. — Киев: Наук. думка. — 1983 — Вып. 7. — С. 51–60.
9. *Электрошлаковый процесс с использованием жидкого металла — новый путь в развитии электрошлаковой технологии* / Б. И. Медовар, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. В. Чернец // *Пробл. спец. электрометаллургии*. — 1999. — № 3. — С. 3–9.
10. Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я. Новые возможности электрошлаковой технологии в машиностроении // *Металлургия машиностроения*. — 2003. — № 1. — С. 2–5.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 19.07.2004