



УДК 669.117.56

# УКРУПНЕНИЕ СЛИТКОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ КОЛЬЦЕВЫМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫМ НАПЛАВЛЕНИЕМ

А. А. Полишко

Обобщены результаты исследования возможностей укрупнения слитков последовательным кольцевым электрошлаковым наплавлением жидким металлом (ЭШНУ ЖМ). Сформулированы основные технологические этапы изготовления слитков в промышленном производстве. Результаты исследований положены в основу разработки концепции печи для получения крупных слитков ЭШНУ ЖМ.

Results of investigations of enlargement of ingots by successive circumferential electroslag surfacing with liquid metal (ESS LM) are generalized. Main technological stages of manufacture of ingots under industrial conditions are formulated. The results of investigations were used as a basis for development of the conception of furnace for producing large ESS LM ingots.

**Ключевые слова:** последовательное кольцевое ЭШНУ ЖМ; модельные слитки; высоколегированная сталь; зона сплавления

Для производства газовых турбин требуются крупные слитки из высоколегированных сталей и сплавов массой от 12 до 18 т и диаметром от 900 до 1000 мм, в отличие от получаемых, например из сплавов типа Инконель 718, слитков диаметром до 700 мм при сложившемся в производстве тройном переделе (ВИП + ЭШП + ВДП) [1] и одностадийном ЭШП диаметром до 450 мм.

Новые возможности для совершенствования технологии ЭШП производства крупных слитков, в том числе для дисков мощных современных газовых турбин из высоколегированных сталей и сплавов, а также другой крупнотоннажной машиностроительной продукции, открывает разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона технологический процесс электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ), т. е. разработка на основе ЭШН ЖМ нового способа формирования однородной структуры крупных слитков с применением последовательного кольцевого электрошлакового наплавления жидким металлом одного и того же химического состава с целью их укрупнения (ЭШНУ ЖМ) [2] (рис. 1). Применение ЭШНУ ЖМ позволяет существенно уменьшить сечение и объем кристаллизующегося металла, который последовательно наплавляется за один раз на укрупняемый слиток, и соответственно ослабить развитие ликвационных процессов в каждом наплавленном слое.

Однако для реализации этого способа укрупнения слитков требовалось изучить влияние техно-

логических и металлургических особенностей последовательного кольцевого ЭШНУ ЖМ одного и того же химического состава на формирование однородной структуры в укрупняемых слитках, для чего необходимо проведение комплекса дополнительных исследований.

Исследования мы проводили при изготовлении модельных и экспериментальных слитков ЭШНУ ЖМ круглого сечения диаметром 180...350 мм (рис. 2) с использованием токоподводящих кристаллизаторов соответствующих диаметров, которые устанавливались на неподвижной платформе электрошлакового комплекса УШ-149, по схеме вытяжки слитка из кристаллизатора вниз [3].

В результате выполнения теоретических и экспериментальных работ решены следующие задачи: изучены технологические и металлургические особенности последовательного кольцевого ЭШНУ ЖМ на модельных слитках с применением лабораторного оборудования [4];

исследованы особенности формирования путем ЭШНУ ЖМ однородной структуры зоны сплавления модельных слитков [5, 6];

оценено влияние термического цикла последовательного кольцевого ЭШНУ ЖМ на структуру и химическую однородность металла модельных слитков [7];

исследованы механические свойства литого металла зоны сплавления модельного двухслойного слитка из высоколегированной стали типа 316L (03X17H14M3) [8];

разработаны технологические рекомендации относительно реализации процесса ЭШНУ ЖМ для

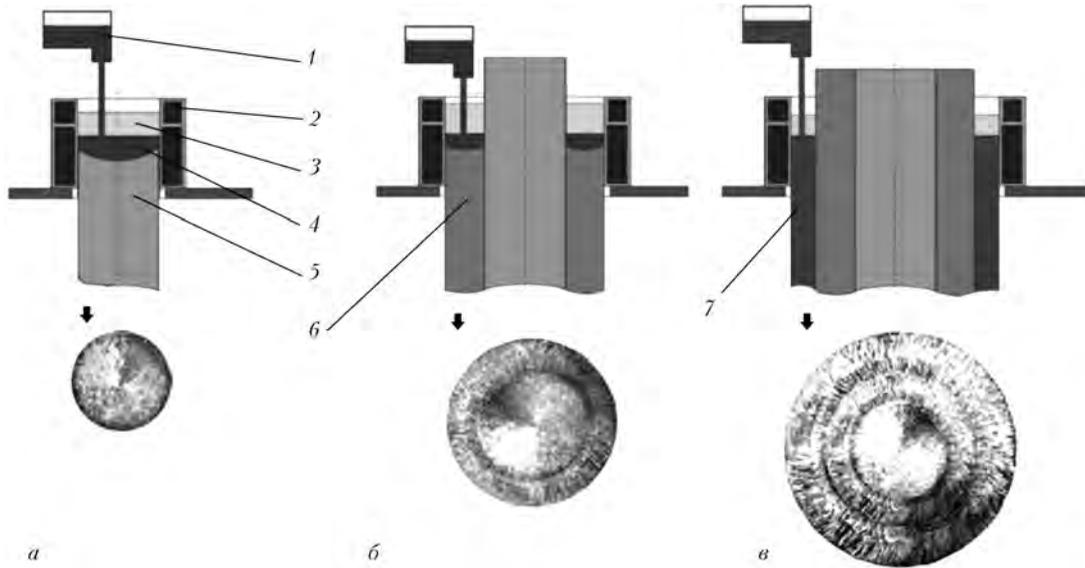


Рис. 1. Схема укрупнения слитков последовательным кольцевым ЭШНУ ЖМ: *а* – выплавка исходного слитка; *б* – однократное электрошлаковое наплавление; *в* – последовательное двукратное наплавление; 1 – заливочное устройство для подачи жидкого металла в кристаллизатор; 2 – токоподводящий кристаллизатор; 3 – шлаковая ванна; 4 – металлическая ванна; 5 – центральный слиток; 6, 7 – слой металла соответственно после одно- и двукратного наплавления

получения крупных слитков в промышленном производстве [9].

В процессе оценки возможностей последовательного кольцевого ЭШНУ ЖМ для укрупнения слитков использовали современные аналитические, расчетные и экспериментальные методы с привлечением общепринятых методик металлографических исследований макро- и микроструктуры металла, в том числе фрактографические, стандартные методики определения механических свойств металла.

В связи с тем, что изготовление крупных слитков экспериментальным путем на стадии разработки нового способа ЭШНУ ЖМ требует больших затрат, особенно с учетом стоимости материала, электрической энергии, в лабораторных условиях оно просто невозможно без применения методов математического и физического моделирования. Кроме того, в ИЭС им. Е. О. Патона специально разработана методика, представленная в работе [10].

Исследования с использованием математического и физического моделирования процесса укрупнения слитков последовательным кольцевым ЭШНУ ЖМ, результатов прямых экспериментов и металлографического анализа модельных слитков, в том числе с применением исследовательского комплекса Gleeble 3800 с полностью цифровой системой термических испытаний [11–13], дали возможность определить параметры кристаллизации двухфазной зоны

для укрупненных слитков ЭШНУ ЖМ диаметром до 1030/1200 мм (градиент температур, время пребывания в двухфазной зоне, дисперсность дендритной структуры). Установлено, что для слитка ЭШНУ ЖМ диаметром 520... 690 мм градиент температур составляет 47, а для обычного слитка ЭШП диаметром 690 мм – 9... 10 °С/см, время пребывания в двухфазной зоне – соответственно 490 и 2200 с; расстояние между осями дендритов второго порядка для слитков ЭШНУ ЖМ с увеличением диаметра от 350/520 до 1030/1200 мм уменьшается от 127 до 105 мкм, тогда как для обычных слитков ЭШП данный параметр с увеличением диаметра от 350 до 690 мм повышается и составляет соответственно 130 и 174 мкм. Это объясняется уменьшением сечения и



Рис. 2. Внешний вид модельных слитков ЭШНУ ЖМ: *а* – двухслойный диаметром 110/180 мм (сталь типа 316L + сталь типа 316L); *б* – трехслойный диаметром 110/180/350 мм (сталь 10 + сталь 10 + сталь 20)



объема металла, который одновременно кристаллизуется в процессе последовательного кольцевого ЭШНУ ЖМ, а также влиянием дополнительного теплоотвода к центральному слитку.

Для определения качества литого металла использовали общепринятую методику оценки расстояний между осями дендритов второго порядка при помощи компьютерной программы «Tescan». Таким образом, определили уровень дисперсности дендритной структуры и установили достоверность математической модели на основе сравнения расчетных расстояний между осями дендритов второго порядка для слитков ЭШНУ ЖМ и данных, полученных в результате экспериментальных исследований.

Так, для слитка диаметром 110/180 мм математически рассчитанное расстояние составляет 82 мкм, а после экспериментальных исследований — 85 мкм, а для слитка диаметром 860/1030 мм — соответственно 108 и 106 мкм.

Применение металлографических, фрактографических исследований, физико-механических испытаний зоны сплавления слоев металла показали высокую химическую и структурную однородность, стабильные значения физико-механических свойств на разных уровнях по высоте модельного слитка. Ударная вязкость  $KCV$  литого металла в зоне термического влияния после ЭШНУ ЖМ составляет 240... 298 Дж/см<sup>2</sup> (согласно нормативам AISI для исходной стали типа 316L (03X17H14M3), в деформированном состоянии — 182... 312 Дж/см<sup>2</sup>).

Таким образом, подтверждена возможность формирования крупных слитков последовательным кольцевым ЭШНУ ЖМ слоя металла заданного химического состава на центральный слиток аналогичного химического состава с обеспечением высокой химической и структурной однородности металла зоны сплавления в укрупненном слитке.

Полученные результаты положены в основу разработки концепции печи для изготовления крупных слитков диаметром от 1400 до 3200 мм и массой до 300 т. Также определены основные технологические этапы их изготовления [9].

1. *Large 718 forgings for land based turbines* / R. C. Schwant, S. V. Thamboo, A. F. Anderson et al. // Proc. of Intern. Symp. Superalloys 718, 625, 706 and Various derivatives by the MMMS (June 15–18, 1997, Pennsylvania). — Pennsylvania, 1997. — P. 141–152.

2. *Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ* / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 1. — С. 3–7.
3. *Полішко Г. О. Особливості укрупнення зливків послідовним кільцевим електрошлаковим наплавленням*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2011. — 19 с.
4. *Оцінка можливості отримання круглих сталевих зливків вагою 60 т на базі 20-тонної печі ЕШП* / Г. О. Полішко, О. Г. Ремізов, М. Т. Шевченко та інш. // Спец. металургія — вчора, сьогодні, завтра: Зб. наук. робіт студентів і випускників кафедри ФХОТМ. — Київ: Політехніка, 2007. — С. 17–25.
5. *Полишко А. А. Металлографические исследования переходной зоны соединения модельного многослойного слитка, полученного методом ЭШН ЖМ из высоколегированной стали 316L (AISI)* // Зб. наук. праць НУК. — 2008. — № 5. — С. 47–51.
6. *Оценка распределения неметаллических включений в литом металле стали типа 316 после кольцевого электрошлакового наплавления жидким металлом* / А. А. Полишко, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2012. — № 1. — С. 19–21.
7. *Влияние термического цикла ЭШН ЖМ на структуру модельного многослойного слитка* / Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. А. Полишко и др. // Зб. наук. праць НУК. — 2010. — № 1. — С. 75–83.
8. *Формирование структуры и свойств стали типа 316 при последовательной кольцевой электрошлаковой наплавке жидким металлом* / А. А. Полишко, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Автомат. сварка. — 2012. — № 2. — С. 29–32.
9. *Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков* / Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, Стовпченко А. П. и др. // Современ. электрометаллургия. — 2010. — № 3. — С. 5–10.
10. *Математическое моделирование процессов укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов способом электрошлаковой наплавки жидким металлом в токоподводящем кристаллизаторе* / В. И. Махненко, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Там же. — 2008. — № 4. — С. 30–37.
11. *Полишко А. А., Королева Т. В., Костин В. А. Особенности формирования зоны сплавления слоев при укрупнении слитков ЭШНУ ЖМ* // V Всеукр. наук.-техн. конф. молодых ученых та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»: Тез. доп. (27–30 травня 2009 р., м. Київ, Україна). — Київ, 2009. — С. 133.
12. *О моделировании процесса ЭШН ЖМ для укрупнения слитков* / В. И. Махненко, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Сб. тез. докл. V междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (25–28 мая 2010 г., пос. Кацивели, республика Крым, Украина). — Київ, 2010. — С. 46.
13. *Моделирование процесса укрупнения слитков методом ЭШН ЖМ* / В. И. Махненко, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Сб. тр. V междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2010. — С. 126–133.

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

Поступила 24.04.2012