



## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛИ ТИПА 316 ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

**А. А. ПОЛИШКО**, канд. техн. наук, **Л. Б. МЕДОВАР**, **В. Я. САЕНКО**, доктора техн. наук,  
**С. Н. СТЕПАНИОК**, **А. Ю. ТУНИК**, кандидаты техн. наук,  
**И. Н. КЛОЧКОВ**, **И. В. БЕРЕЗИН**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты металлографических исследований структуры, химического состава и физико-механических свойств двухслойного модельного слитка из высоколегированной стали типа 316 (AISI), полученного в лабораторных условиях способом укрупнения последовательной кольцевой электрошлаковой наплавкой жидким металлом.

*Ключевые слова:* электрошлаковое наплавление, жидкий металл, модельный двухслойный слиток, высоколегированная сталь, микроструктура, физико-механические свойства

Надежность и срок службы современных машин и механизмов во многом определяются качеством их отдельных деталей. Особые требования предъявляются к деталям машин ответственного назначения, эксплуатируемым в тяжелых и предельно тяжелых условиях при повышенных и высоких температурах (роторы и диски паровых и газовых турбин). Выполнение этих требований приводит к усложнению химического состава металлов и сплавов, вызывает необходимость повышения качества металла заготовок. Особое значение сегодня приобретают прочностные и пластические свойства литого металла [1].

С помощью традиционных способов не всегда можно получать изделия требуемого качества, особенно это касается крупных слитков из высоколегированных сталей и сплавов, поскольку

имеются существенные ограничения по диаметру слитка в связи с риском образования дефектов ликвационного происхождения [2].

В этом случае явное преимущество имеет электрошлаковая технология, позволяющая получать металл с высокими значениями плотности, физической и химической однородности, изотропности свойств, равномерным распределением неметаллических включений, отличающийся высоким уровнем чистоты и мелкодисперсным строением. Все это важно для деталей ответственного назначения, эксплуатируемых в тяжелых условиях, когда требуются стабильно высокие значения физических и механических свойств.

Широкие возможности для формирования требуемых структуры и свойств крупных слитков из высоколегированных сталей типа 316 открывает применение одной из разновидностей электрошлаковых технологий — последовательного кольцевого электрошлакового наплавления жидким металлом (ЭШНУ ЖМ) с целью укрупнения слит-

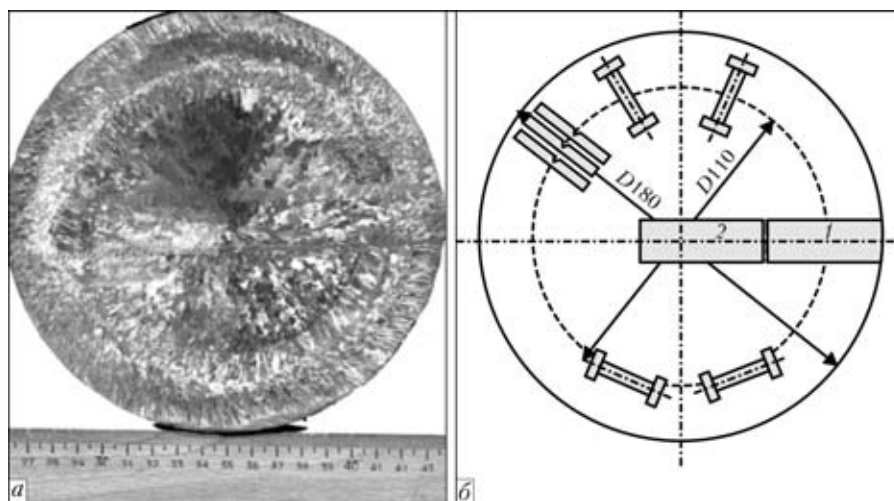


Рис. 1. Макроструктура поперечного темплетта модельного двухслойного слитка после ЭШНУ ЖМ (сталь 316 + сталь 316) (а) и схема вырезки образцов (1, 2) для дальнейших исследований (б)



Таблица 1. Химический состав модельного двухслойного слитка в зоне сплавления слоев, мас. %

Объект исследования	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	P	S
Наплавленный слой	0,059	1,13	0,31	15,6	11,9	0,20	2,2	0,20	0,027	0,006
	0,069	1,02	0,15	15,5	12,0	0,21	2,2	0,23	0,029	0,005
	0,058	1,13	0,32	15,5	11,6	0,21	2,2	0,20	0,027	0,006
	0,065	1,00	0,15	15,3	11,7	0,21	2,2	0,22	0,033	0,005
Центральный слиток	0,052	1,20	0,43	16,3	11,7	0,21	2,2	0,19	0,022	0,011
	0,073	1,03	0,16	15,9	12,1	0,23	2,2	0,23	0,029	0,005
	0,044	1,17	0,41	16,3	11,4	0,21	2,2	0,19	0,023	0,010
	0,069	1,01	0,15	15,6	12,1	0,21	2,2	0,23	0,028	0,005

ков. Применение ЭШНУ ЖМ позволяет существенно уменьшить сечение и объем кристаллизующегося металла, последовательно наплаваемого на укрупняемый слиток и, таким образом, ослабить развитие ликвационных процессов в каждом наплаваемом слое [3–5].

В настоящей работе представлены результаты металлографических исследований структуры и свойств двухслойного модельного слитка диаметром 110...180 мм из высоколегированной стали типа 316 (10X17N14M2), полученного в лабораторных условиях способом последовательного кольцевого ЭШНУ ЖМ.

После выплавки модельного слитка для проведения дальнейших исследований из него вырезали поперечный темплет (рис. 1, а).

Макроструктура поперечного темплета отличалась однородным и плотным строением (рис. 1, а) без дефектов усадочного и ликвационного характера. Толщина наплавленного слоя в поперечном сечении модельного слитка ЭШНУ ЖМ была практически одинаковой.

Химический состав металла определяли методом спектрального анализа (ГОСТ 9717–75). С помощью эмиссионного спектрального анализа на дифракционном фотометрическом спектрометре исследовали распределение элементов в поперечном сечении модельного слитка в зоне сплавления слоев металла аналогичного химического состава. Изучали зоны со стороны наплавленного слоя и центрального слитка по четырем точкам с каждой

стороны. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, распределение элементов в поперечном сечении модельного двухслойного слитка практически равномерное с небольшим разбросом в пределах допустимой погрешности измерений до 2 %.

Металлографические исследования с помощью металлографического микроскопа «Неофот-32», оснащенного приставкой для цифрового фотографирования травленных шлифов (раствор хромовой кислоты  $H_2CrO_4$ ) в соответствии со схемой вырезки (см. рис. 1, б), показали, что микроструктура металла зоны сплавления двухслойного модельного слитка аустенитная с ориентацией кристаллитов, присущей поликристаллическим материалам с дендритной формой кристаллов как со стороны центрального слитка (по линии сплавления), так и в наплавленном слое (рис. 2).

Образцы для исследований физико-механических свойств были вырезаны из металла модельного двухслойного слитка после ЭШНУ ЖМ в поперечном сечении на двух уровнях по высоте слитка в радиальном и тангенциальном направлениях (см. рис. 1, б).

Испытания на статическое (кратковременное) растяжение производили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 на сервогидравлической испытательной машине MTS 318.25 (США) с максимальным усилием 250 кН. Результаты обрабатывали с помощью программного обеспечения

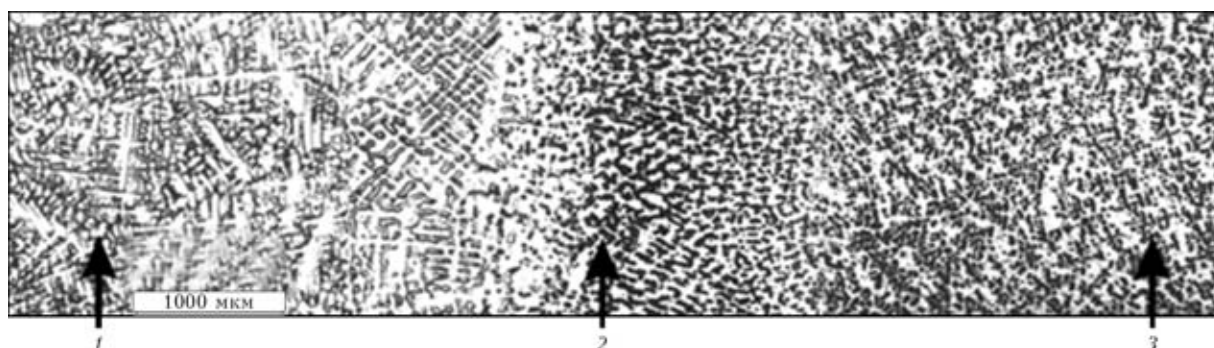


Рис. 2. Микроструктура зоны сплавления металла модельного двухслойного слитка: 1 — наплавленный слой; 2 — зона сплавления; 3 — центральный слиток

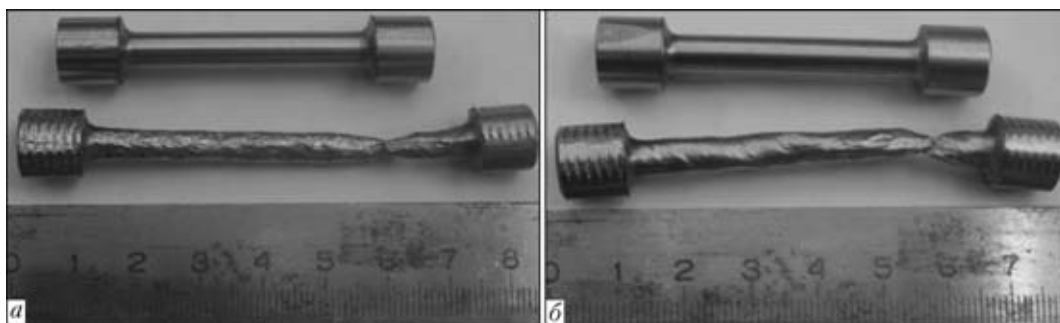


Рис. 3. Образцы металла модельного слитка из стали типа 316 до и после испытаний на статическое (кратковременное) растяжение в тангенциальном (а) и радиальном (б) направлениях

TestWorks4 фирмы MTS. Погрешность полученных результатов составляла  $\pm 0,5\%$ , в то время как по ГОСТ 1497–84 она может достигать 1%.

Испытания на ударный изгиб для определения ударной вязкости  $KCV$  проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78 на образцах с острым надрезом (концентратором напряжений) посередине одним ударом маятникового копра. Надрез на образцах выполнен на расстоянии 2 мм от линии сплавления в зоне термического влияния. Эксперименты производили на маятниковом пневматическом копре типа 2130-КМ-03 с номинальной потенциальной энергией маятника 300 Дж при температуре 20 °С (табл. 2 и рис. 3, 4). Результаты исследований показали стабильно высокий уровень прочностных характеристик металла зоны сплавления модельного слитка, а также однородность свойств металла как по сечению в тангенциальном и радиальном направлениях, так и по высоте на двух уровнях.

Следует отметить, что авторы данной статьи изучали физико-механические свойства на литом металле модельного двухслойного слитка из стали типа 316, в то время как во всех марочниках сталей и сплавов приведены данные для деформированного металла. Поэтому для нас важным является сравнение полученных результатов для литого и деформированного металлов.

Были исследованы поверхности изломов образцов после испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб с применением сканирующего электронного микроскопа JSM-35CF фирмы «JEOL» (Япония) и рентгеновского спектрометра



Рис. 4. Образцы металла модельного двухслойного слитка из стали типа 316 после испытаний на ударный изгиб

с дисперсией по энергии рентгеновских квантов (модель INCA Energy-350 фирмы «Oxford Instruments»), Великобритания.

Фрактографический анализ (рис. 5) показал ямочный излом, подтверждающий вязкий характер разрушения, что свидетельствует о высоком качестве зоны сплавления металла модельного двухслойного слитка после ЭШНУ ЖМ.

Выявлены структурная однородность металла зоны сплавления модельного двухслойного слитка, отсутствие дефектов усадочного и ликвационного характеров, а также формирование однородной структуры. Характерна изотропность прочностных характеристик и высокий уровень ударной вязкости  $KCV$  литого металла (240...298 Дж/см<sup>2</sup>), тогда как для деформированного металла нормативный уровень ударной вязкости  $KCV$  составляет 182...312 Дж/см<sup>2</sup>.

Т а б л и ц а 2. Физико-механические характеристики металла поперечных образцов модельного двухслойного слитка из стали типа 316

Направление вырезки образцов из слитка	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>	$k_{\sigma_n}$	$k_{\sigma_T}$	$k_{\delta}$
Тангенциальное	491,0	201,5	55,0	—	0,98	1,01	1,05
Радиальное	502,4	198,8	52,5	240...298*	0,98	1,01	1,05
Требования «Metals Handbook 9th edition» (American Society for Metals) для деформированного металла	480,0	170,0	40,0	182...312	—	—	—

Примечания. 1. Приведены средние значения  $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta$ . 2. Коэффициенты анизотропии  $k_{\sigma_n}$ ,  $k_{\sigma_T}$ ,  $k_{\delta}$  равны отношению значений показателей образцов, вырезанных в тангенциальном и радиальном направлениях. \* Значения  $KCV$  получены для образцов после испытаний литого металла с надрезом в зоне термического влияния на расстоянии 2 мм от линии сплавления.

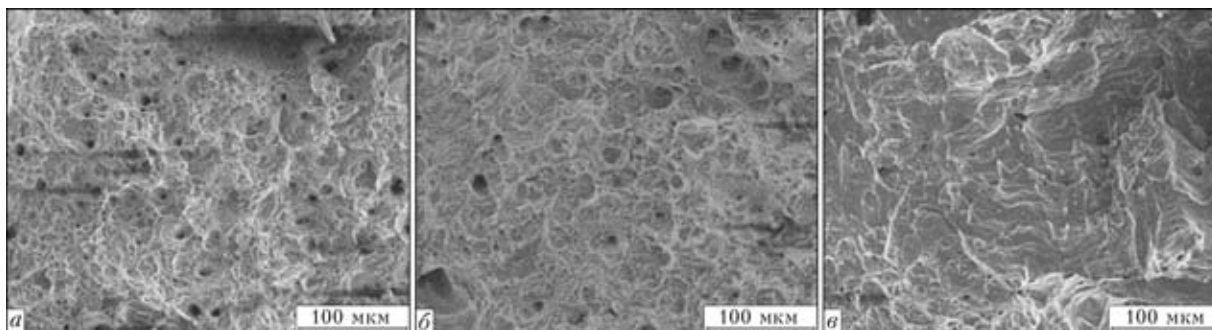


Рис. 5. Фрактограммы поверхностей разрушений образцов, вырезанных в радиальных (а) и тангенциальных (б) направлениях, после испытаний на статическое (кратковременное) растяжение и ударный изгиб КСУ (в)

Полученные результаты исследования особенностей формирования структуры и свойств высоколегированной стали показывают высокий уровень и изотропность физико-механических свойств литого металла модельного слитка после последовательного кольцевого ЭШНУ ЖМ без последующей высокотемпературной термической обработки, обычно применяемой после электрошлаковой сварки. Это свидетельствует о перспективности применения данного способа для укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов.

1. *Электрошлаковый металл* / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.

2. *Неметаллические включения и дефекты в электрошлаковом слитке* / С. Е. Волков, А. Е. Волков, Ю. И. Забалуев, Г. А. Буряковский. — М.: Metallurgia, 1979. — 135 с.  
 3. *Оцінка можливостей отримання круглих сталних зливок вагою 60 т на базі 20-тонної печі ЕШП* / Г. О. Полішко, О. Г. Ремезов, М. Т. Шевченко та ін. // Зб. робіт студентів і випускників кафедри ФХОТМ «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», присвячений 30-річчю кафедри ФХОТМ ІФФ НТУУ «КПІ». — К.: Політехніка, 2007. — С. 17–25.  
 4. *Новый технологический процесс получения сверхкрупных сталных слитков способом ЭШН ЖМ* / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 1. — С. 3–7.  
 5. *Пат. 94333 Україна, МПК<sup>51</sup> В 22 D 19/16, С 22 В 9/18, В 23 К 25/00 С 23 С 6/00*. Спосіб виготовлення великотоннажного металевого зливка / Л. Б. Медовар, Г. П. Стовпченко, В. Я. Саенко та ін. — Опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.

The paper gives the results of metallographic investigations of the structure, composition and physico-mechanical properties of two-layer model ingot from high-alloyed steel of 316 type (AISI) produced under laboratory conditions by successive circular electroslag cladding.

Поступила в редакцию 28.11.2011

## **Двенадцатая международная конференция «ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНОГО, РЕСУРСНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ»**

13-17 февраля 2012 г.

п. Плавье, Карпаты

**В рамках конференции состоятся семинары:**

- Современные технологии ремонтно-восстановительных работ в промышленности
- Композиционные материалы. Оборудование. Инструменты. Оснастка. Технологии. Наноматериалы и нанотехнологии
- Методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики в промышленности
- Перспективы развития автомобильной отрасли. Строительные материалы
- Теоретические и прикладные проблемы трибологии. Защита материалов от коррозии
- Горнодобывающая промышленность: технология, оборудование, безопасность и экология

<http://www.conference.kiev.ua>