

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ДВУХСЛОЙНОГО СЛИТКА СТАЛИ ТИПА 316, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ КОЛЬЦЕВОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

А. А. Полишко, канд. техн. наук, науч. сотр.

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев*

**Аннотация.** Представлены результаты металлографических, фратографических исследований, физико-механических испытаний зоны соединения слоев металла в двухслойном модельном слитке из высоколегированной стали типа 316 (AISI), который получен в лабораторных условиях способом укрупнения последовательным кольцевым электрошлаковым наплавлением жидким металлом.

**Ключевые слова:** последовательное кольцевое электрошлаковое наплавление жидким металлом, модельный двухслойный слиток, высоколегированная сталь, зона сплавления, условная линия сплавления, механические свойства.

**Анотація.** Представлено результати металографічних, фратографічних досліджень, фізико-механічних випробувань зони з'єднання шарів металу у двошаровому модельному злитку з високолегованої сталі типу 316 (AISI), що отриманий у лабораторних умовах способом збільшення послідовним кільцевим електрошлаковим наплавленням рідким металом.

**Ключові слова:** послідовне кільцеве електрошлакове наплавлення рідким металом, модельний двошаровий злиток, високолегована сталь, зона сплавлення, умовна лінія сплавлення, механічні властивості.

**Abstract.** The results are represented of metallographic, fractographic studies, physical and mechanical tests of the metal layers fusion zone in the two-layer model ingot of 316-type high-alloy steel (AISI), which was obtained in the laboratory conditions by circular liquid-metal electroslag hard-facing (circular LM ESSE).

**Keywords:** sequential circular LM ESSE, two-layer sample ingot, high-alloy steel, fusion zone, conventional line of fusion, mechanical properties.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Надежность и срок службы современных машин и механизмов во многом определяются качеством их отдельных деталей. Особые требования предъявляются к деталям ответственного назначения, которые эксплуатируются в тяжелых и предельно тяжелых условиях при повышенных и высоких температурах и имеют крупные габариты (роторы и диски паровых и газовых турбин). Выполнение этих требований приводит к усложнению химического состава металлов и сплавов, возникает необходимость повышения качества металла заготовок. Особое значение сегодня приобретают прочностные и пластические свойства литого металла [5].

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

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. Для их изготовления применяют тройной передел (ВИП+ЭШП+ВДП) и при этом максималь-

ный размер «крупного» слитка составляет по диаметру 686 мм [6].

В ИЭС им. Е. О. Патона специально для получения крупных слитков из сталей и сплавов, чувствительных к дефектам ликвационного происхождения, был разработан способ электрошлаковой плавки (ЭШП) с применением токоподводящего кристаллизатора и двухконтурным подключением источников питания [1]. Однако практическая реализация такого способа возможна только при применении расходных электродов.

Принципиально 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 под руководством академика Б. И. Медовара технологический процесс электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ) [4]. Имеется в виду разработка на основе ЭШН ЖМ нового способа формирования однородной структуры крупных слитков с применением последовательного кольцевого электрошлакового наплавления жидким металлом с целью их укрупнения [2, 3].

Однако для реализации этого способа укрупнения слитков необходимо провести комплекс дополнительных

исследований, в том числе изучение свойств зоны сплавления модельного слитка из высоколегированной стали.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — изучение качества зоны сплавления слоев металла двухслойного модельного слитка диаметром 110/180 мм из высоколегированной стали типа 316 (10X17N14M2), который получен в лабораторных условиях способом укрупнения последовательным кольцевым ЭШН ЖМ. **В задачи работы входило** исследование химической и структурной однородности и оценка уровня механических свойств литого металла зоны сплавления модельного двухслойного слитка из высоколегированной стали типа 316.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Широкие возможности для формирования структуры и свойств в слитках из высоколегированных сталей и сплавов типа 316 открывает применение разновидности электрошлаковой технологии — последовательной кольцевой электрошлаковой наплавки жидким металлом с целью укрупнения слитков. Применение ЭШН 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 наплавляемом слое.

Для выплавки центрального слитка диаметром 110 мм и наплавки слоя толщиной 35 мм модельного слитка диаметром 180 мм использовали высоколегированную сталь типа 316 одной и той же плавки (табл. 1).

Химический состав металла определяли по ГОСТ 9717-75 для спектрального анализа. С помощью эмиссионного спектрального анализа (ЭСА) на дифракционном фотометрическом спектрометре исследовали распределение элементов в поперечном сечении модельного слитка в трех наиболее характерных областях слоистого слитка: в центральной части исходного слитка, зоне сплавления слоев металла аналогичного химического состава и краевой зоне наплавленного слоя. Для сравнения приведены результаты химического анализа исходного металла расходуемого электрода.

В ходе проведения исследований особенно важное значение получили однородность и изотропность свойств по сечению модельного слитка, так как для его получения применяли кольцевую наплавку. Из наплавленного модельного слитка вырезали темплет (рис. 1, а) в поперечном сечении, который использовали

Таблица 1. Химический состав модельного слитка в зоне сплавления слоев

| Место исследования образца        | Массовая часть, %      |                      |                     |                      |                      |                     |     |                      |                        |                         |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-----|----------------------|------------------------|-------------------------|
|                                   | C                      | Mn                   | Si                  | Cr                   | Ni                   | Cu                  | Mo  | Nb                   | P                      | S                       |
| Край наплавленного слоя           | 0,059–0,069<br>(0,064) | 1,13–1,02<br>(1,075) | 0,15–0,31<br>(0,23) | 15,5–15,6<br>(15,55) | 11,9–12,0<br>(11,95) | 0,2–0,21<br>(0,205) | 2,2 | 0,2–0,23<br>(0,215)  | 0,027–0,029<br>(0,028) | 0,005–0,006<br>(0,0055) |
| Зона сплавления                   | 0,058–0,066<br>(0,062) | 1,13–1,00<br>(1,065) | 0,15–0,29<br>(0,22) | 15,5–16,3<br>(15,9)  | 11,7–12,1<br>(11,9)  | 0,21                | 2,2 | 0,19–0,22<br>(0,205) | 0,022–0,028<br>(0,025) | 0,005–0,011<br>(0,008)  |
| Центральный слиток                | 0,053–0,069<br>(0,061) | 1,17–1,01<br>(1,09)  | 0,16–0,40<br>(0,28) | 15,9–16,3<br>(16,1)  | 11,4–12,1<br>(11,75) | 0,21–0,23<br>(0,22) | 2,2 | 0,19–0,23<br>(0,21)  | 0,023–0,029<br>(0,026) | 0,005–0,01<br>(0,0075)  |
| Исходный металл (деформированный) | 0,056                  | 1,18                 | 0,43                | 15,4                 | 10,9                 | 0,21                | 2,2 | 0,19                 | 0,027                  | 0,022                   |

**Примечание.** В таблице представлены значения min–max, (среднее).

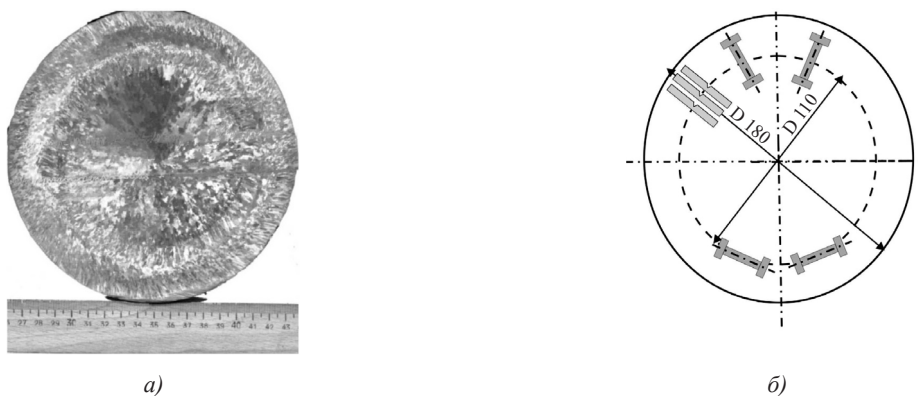


Рис. 1. Макроструктура поперечного темплета модельного двухслойного слитка после ЭШН ЖМ (сталь 316+сталь 316) (а) и схема вырезки образцов для дальнейших исследований (б); пунктиром показана условная линия сплавления слоев металла

для макро- и микроисследований, а также для оценки уровня механических свойств согласно представленной схеме порезки (рис. 1, б).

Макроструктура поперечного темплета отличается однородным и плотным строением (см. рис. 1, а). Отслоения, трещины, шлаковые включения в зоне сплавления отсутствуют. Толщина наплавленного слоя в поперечном сечении модельного слитка ЭШН ЖМ практически одинакова.

Металлографические исследования зоны сплавления модельного двухслойного слитка после ЭШН ЖМ (сталь 316+сталь 316) проводили при помощи металлографического микроскопа «Неофот-32», оснащенного приставкой для цифрового фотографирования травленного шлифа (раствор хромовой кислоты  $H_2CrO_4$ ). Как видно на рис. 2, микроструктура металла зоны сплавления характеризуется дендритной формой кристаллов. Зона сплавления слоев металла (рис. 2) представляет собой плавный переход от мелкодисперсной дендритной структуры центрального слитка 1 к дендритной структуре наплавленного слоя 3, образуя, таким образом, условную (размытую) линию сплавления 2. По линии сплавления отсутствуют карбиды, нитриды и другого рода образования.

По результатам спектрального анализа распределения основных элементов в поперечном сечении модельного слитка (см. табл. 1) можно сделать вывод об отсутствии существенного разброса в значениях

по характерным исследуемым областям, что свидетельствует о химической однородности металла модельного слитка.

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

Испытания на статическое (кратковременное) растяжение проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84. При этом использовали сервогидравлическую испытательную машину MTS 318.25 (США) с максимальным усилием 250 кН. Результаты обрабатывались при помощи программного обеспечения TestWorks4 фирмы MTS. Точность полученных результатов  $\pm 0,5\%$ , в то время как по ГОСТ 1497-84 допустимая погрешность составляет до 1%.

Испытания на ударный изгиб для определения ударной вязкости KCV проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 на образцах с острым надрезом посередине одним ударом маятникового копра. Надрез был выполнен на образцах на расстоянии 2 мм от линии сплавления в зоне термического влияния (ЗТВ). Испытания проводились на маятниковом пневматическом копре типа 2130-КМ-03 с номинальной потенциальной энергией маятника 300 Дж при температуре 20°C.

Результаты испытаний представлены в табл. 2 и на рис. 3, 4. Исследования показали высокий

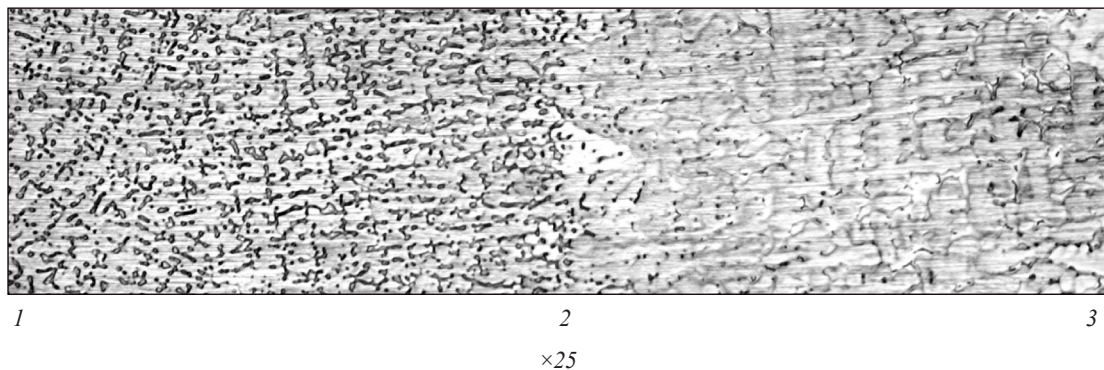


Рис. 2. Микроструктура зоны сплавления модельного двухслойного слитка после ЭШН ЖМ (сталь 316+сталь 316): 1 — центральный слиток; 2 — условная линия сплавления; 3 — наплавленный слой

Таблица 2. Физико-механические свойства металла поперечных образцов модельного двухслойного слитка из стали типа 316

| Направление вырезки образцов  | Характеристики механических свойств |                  |              |                         |          |          |              |
|---|-------------------------------------|------------------|--------------|-------------------------|----------|----------|--------------|
|   | $\sigma_b$ , МПа                    | $\sigma_r$ , МПа | $\delta$ , % | KCV, Дж/см <sup>2</sup> | $k_{об}$ | $k_{ст}$ | $k_{\delta}$ |
| Тангенциальное  | 491,0                               | 201,5            | 55,0         | —                       | 0,98     | 1,01     | 1,05         |
| Радиальное  | 502,4                               | 198,8            | 52,5         | 240,0...298,0*)         |          |          |              |
| Требования согласно Metals Handbook 9th edition, American Society for metals (для деформированного металла) | 480                                 | 170              | 40           | 182,0...312,0           | —        | —        | —            |

Примечание.  $\sigma_b$ ,  $\sigma_r$ ,  $\delta$  — приведены средние значения. Коэффициенты анизотропии  $k_{об}$ ,  $k_{ст}$ ,  $k_{\delta}$  равны отношению значений показателей для тангенциальных и радиальных образцов.\*) После испытаний образцов в литом состоянии с надрезом в ЗТВ на расстоянии 2 мм от линии сплавления.

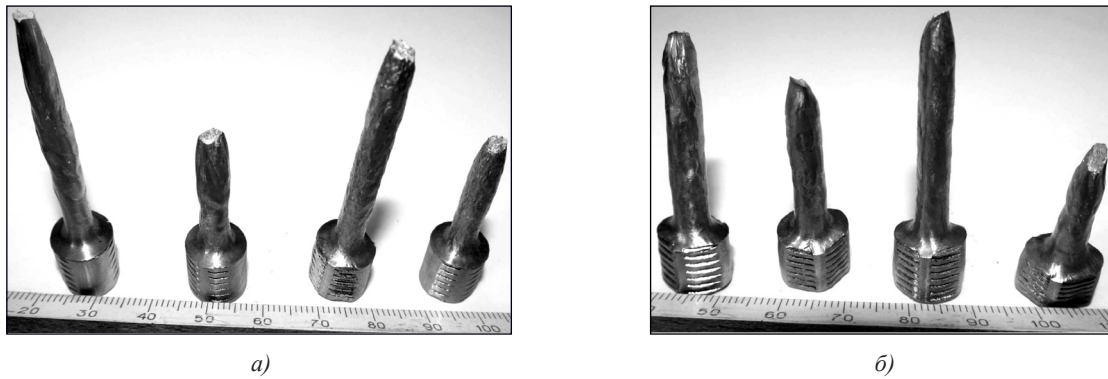


Рис. 3. Образцы металла модельного слитка из стали типа 316 после испытаний на статическое (кратковременное) растяжение, вырезанные в радиальном (а) и тангенциальном (б) направлениях

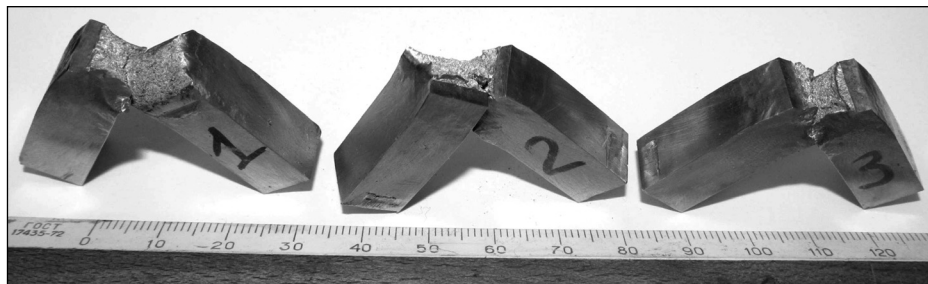


Рис. 4. Образцы металла модельного двухслойного слитка из стали 316 после исследований на ударный изгиб (KCV)

стабильный уровень прочностных и вязкостных характеристик металла зоны соединения модельного слитка, а также однородность свойств металла по сечению в тангенциальном и радиальном направлениях.

Следует отметить, что исследование физико-механических свойств проводились на литом металле модельного двухслойного слитка из стали 316, в то время как во всех марочниках сталей и сплавов приведены данные для деформированного металла. Поэтому в табл. 2 для сравнения приведены данные для деформированного металла — стали AISI типа 316.

Были исследованы поверхности изломов образцов после испытаний на статическое растяжение и ударный изгиб при помощи фрактографических исследований с применением сканирующего электронного

микроскопа JSM-35CF фирмы JEOL (Япония) и рентгеновского спектрометра с дисперсией по энергии рентгеновских квантов (модель INCA Energy-350 фирмы «Oxford Instruments») (Великобритания) — рис. 5.

Фрактографический анализ показал ямочный излом, который подтверждает вязкий характер разрушения, что свидетельствует о высоком качестве зоны соединения металла модельного двухслойного слитка после ЭШН ЖМ.

В результате физико-механических испытаний установлена изотропность прочностных характеристик и высокий уровень KCV литого металла — 240,0...298,0 Дж/см<sup>2</sup>. Отметим, что для деформированного металла нормативный уровень KCV составляет 182,0...312,0 Дж/см<sup>2</sup>.

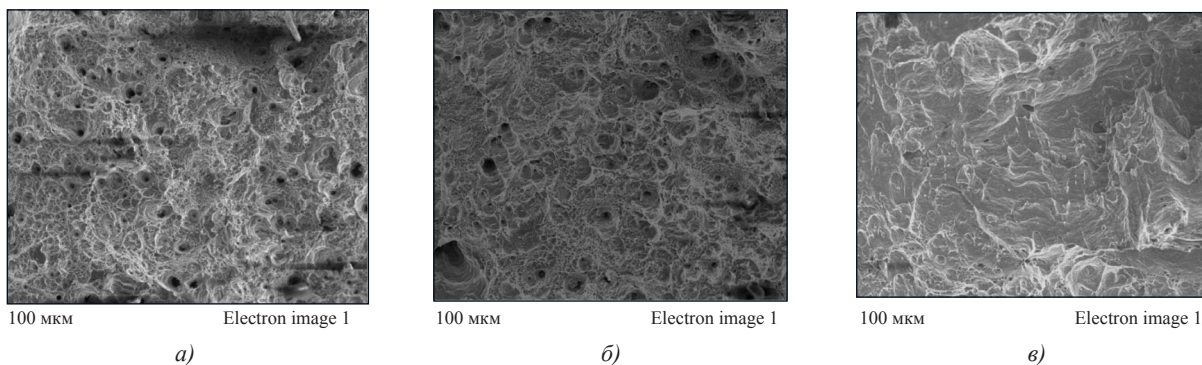


Рис. 5. Фрактограммы поверхностей разрушений образцов: а, б — после испытаний на статическое (кратковременное) растяжение тангенциальных (рис. 3, а) и радиальных (рис. 3, б) образцов соответственно; в — образцов после испытаний на ударный изгиб (KCV)

**ВЫВОДЫ**

В результате проведенных исследований зоны соединения слоев высоколегированной стали типа 316 модельного слитка после кольцевого электро-

шлакового наплавления установлены высокая химическая и структурная однородность, высокий уровень прочностных характеристик, а также изотропность свойств в поперечном сечении модельного слитка.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны [Текст] / Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. В. Чернец [и др.] // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 4. — С. 3–7.
- [2] Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ [Текст] / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2007. — № 1. — С. 3–7.
- [3] Оцінка можливостей отримання круглих сталених зливків вагою 60 т на базі 20-тонної печі ЕШП [Текст] / Г. О. Полишко, Г. Ремезов, М. Т. Шевченко [та ін.] // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра : зб. праць студентів і випускників кафедри ФХОТМ ІФФ НТУУ «КПІ». — К. : Політехніка, 2007. — С. 17–25.
- [4] Электрошлаковая наплавка жидким металлом — новый способ производства высококачественных композитных заготовок валков прокатных станов [Текст] / Б. И. Медовар, Л. Б. Медовар, А. В. Чернец [и др.] // Черная металлургия : бюллетень. — 2001. — № 4. — С. 42–45.
- [5] Электрошлаковый металл [Текст] / под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — К. : Наукова думка, 1981. — 680 с.
- [6] Large 718 forgings for land based turbines [Text] / E. A. Loria, R. C. Schwant, S. V. Thamboo, A. F. Anderson [et al.] : ed. E. A. Loria // Proc. of Intern. Symposium Superalloys 718, 625, 706 and Various derivatives by the MMS June 15–18, 1997. — P. 141–152.

© А. А. Полишко

Надійшла до редколегії 17.02.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2012