

УДК 669.187.56

С. В. Скрипник, Д. Ф. Чернега*, А. В. Горячек**

НПФ «Титан», Киев,

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

**ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект», Николаев

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФАСОННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 15X12H2МВФАБ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЛИТЬЯ

Предложена новая технология получения крупногабаритных фасонных заготовок массой 0,6 т методом центробежного электрошлакового литья из жаропрочной стали 15X12H2МВФАБ. Разработаны основные параметры технологии: система и качество флюса, используемого при переплаве расходоуемых электродов; электрический режим переплава; способ заливки шлакометаллического расплава во вращающуюся форму; режим вращения формы и др. Показано влияние количества используемого флюса на процесс затвердевания крупногабаритной отливки сложной формы. Предложена конструкция комбинированной стальной формы. Исследованы механические свойства опытных отливок.

Запропонована нова технологія отримання великогабаритних фасонних заготовок масою 0,6 т методом відцентрового електрошлакового лиття з жароміцної сталі 15X12H2МВФАБ. Розроблені основні параметри технології: система та якість флюсу, який використовується при переплаві витратних електродів; електричний режим переплаву; спосіб заливки шлакометалевого розплаву у форму, що обертається; режим обертання форми та ін. Показано вплив кількості флюсу, який використовується на процес твердіння великогабаритних виливків складної форми. Запропонована конструкція комбінованої сталевий форми. Досліджені механічні властивості дослідних виливків.

New technology of receipt of the large shaped purveyances mass of 0,6 t is offered by the method of the centrifugal electroslag casting from heatproof steel of 15X12H2МВФАБ. The basic parameters of technology are developed: system of gumboil, in-use at the remelt of consutrodes; electric mode of remelt; method of inundation of slag-metal fusion in the revolved form; mode of rotation of form and other. Influence of amount of in-use gumboil is rotined on the process of thermosetting of the large founding of difficult form. The construction of the combined steel form is offered. Mechanical properties of the experimental foundings are investigational.

Ключевые слова: центробежное электрошлаковое литье, жаропрочные стали, механические свойства, корпусные детали газовых турбин.

Метод центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) получает широкое распространение в ряде отраслей машиностроения [1-3]. Высокие требования к качеству и свойствам высоколегированных жаропрочных сталей обусловили использование этого метода и в газовых турбинах, и установках.

Одним из сложных по конфигурации изделий в газовых турбинах является корпус компрессора, который в настоящее время изготавливается с помощью довольно трудоемких сварнодеформационных технологий с продолжительным циклом изготовления.

С целью сокращения цикла изготовления, повышения надежности и снижения себестоимости была опробована новая технология получения заготовок этого изделия методом ЦЭШЛ.

Отливки получали на центробежной электрошлаковой установке ЦЭШЛ-1 [4]. В качестве расходоуемых электродов использовали стержни диаметром 200 мм и длиной 2000 мм из жаропрочной стали 15X12H2МВФАБ (ЭП517-Ш), полученные заливкой в стальные кокилы металла открытой выплавки. Расходоуемые электроды переплавляли в плавильной емкости под флюсом системы $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ (АНФ-295), футерованной магнезитовым кирпичом. Этот флюс имеет низкое содержание (10-12 %) химически активного по отношению к магнезиту фтористого кальция. Ток переплава расходоуемых электродов составлял 5,5-6,0 кА; напряжение на шлаковой ванне — 45-48 В; частота вращения кокиля — начальная 60 об/мин, основная — 200 об/мин.

Конфигурация отливки характеризуется сложными конструктивными элементами. Чтобы обеспечить получение фасонной отливки без литейных дефектов с однородным кристаллическим строением, высоким и равномерным уровнем механических и служебных свойств потребовалось разработать ряд технологических мероприятий.

Конструкция опытных отливок характеризуется большими коэффициентами габаритности $K_v = V_{\text{отл}} / M_{\text{отл}}$ (где $V_{\text{отл}}$ — объем, а $M_{\text{отл}}$ — масса отливки) и приведенными толщинами $X = V_{\text{отл}} / S_{\text{отл}}$ (где $S_{\text{отл}}$ — ее поверхность). Развитая внутренняя поверхность таких отливок вызвала необходимость в формировании на ней обогревающего слоя шлака значительной толщины, предотвращающего образование усадочных дефектов и встречного фронта кристаллизации. В связи с этим

после заливки из тигельной печи во вращающуюся изложницу шлакометаллического расплава потребовалась подача дополнительной порции шлака (рис. 1). Шлак был приготовлен в отдельной плавильной печи. Ввод во вращающуюся изложницу дополнительной порции высокотемпературного шлака ($T_{\text{ш}} = 1650\text{-}1780$ °С) меняет характер затвердевания отливки по сравнению с затвердеванием под небольшой толщиной (h) шлака (рис. 2).



Рис. 1 Фрагмент процесса заливки шлака из двух тиглей

Увеличивается градиент температур G в металлической ванне, незначительно снижается скорость кристаллизации V , соответственно повышается величина критерия кристаллической структуры G/V . При этом создаются условия для получения сплошной столбчатой структуры радиально-тангенциального направления и условия для последовательного затвердевания от периферии к центру (рис. 3).

По конструктивным соображениям данная отливка на наружной поверхности имеет три поперечные реборды различного профиля и два продольных ребра. Все они образуют тепловые узлы, затвердевающие позже остальных элементов отливки. Из-за этого происходит локализация деформации растяжения в результате торможения свободной линейной усадки, что может привести к образованию горячих трещин. Поэтому возникла необходимость в устранении бассейнов металла, образующихся в процессе затвердевания, путем локального утолщения облицовки в отношении 2,5:1,0 против стенки с относительно малой толщиной (рис. 4).

Еще одной особенностью отливки заданной конструкции является сложное температурно-силовое взаимодействие ее с формой в процессе затвердевания и охлаждения. Зазор между отливкой и формой в поперечном направлении обеспечивается при всех геометрических параметрах. Графоаналитическое исследование влияния геометрических параметров отливки на величину зазора между соответствующими скосами стальной формы и отливки показало следующее: при углах скосов на ребордах $15\text{-}30^\circ$ и выбивке отливки при температурах $700\text{-}1000$ °С возникает натяг. И только угол скосов, равный 45° , обеспечивает минимальный зазор (1,5 мм) между крайними ребордами (рис. 5).

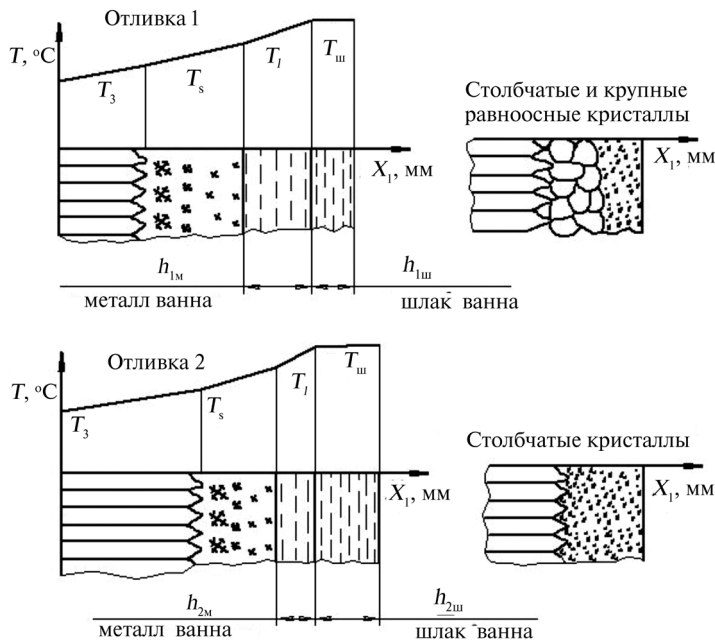


Рис. 2. Схема теплофизических условий затвердевания отливок ЦЭШЛ в конечный период кристаллизации при различной глубине шлаковой ванны

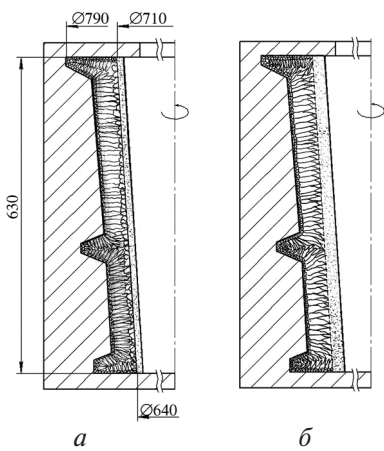


Рис. 3. Схема кристаллической структуры отливки ЦЭШЛ при различной толщине слоя обогревающего шлака, мм: а – 15; б – 40

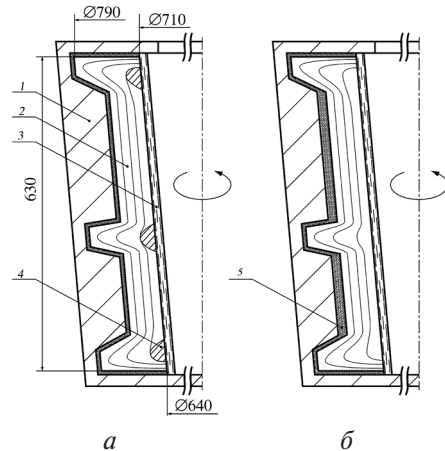


Рис. 4. Схема нанесения теплоизолирующего покрытия для устранения бассейнов металла: 1 – изложница; 2 – отливка; 3 – шлаковая ванна; 4 – бассейны металла; 5 – теплопокрытие

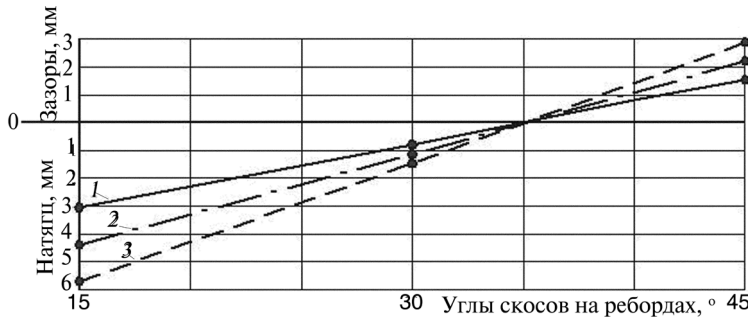


Рис. 5. Влияние геометрических параметров отливки ЦЭШЛ на величину зазора между отливкой и изложницей; заливка при температуре формы +150 °С: 1 – выбивка при температуре отливки 1100; 2 – выбивка при температуре отливки 900; 3 – выбивка при температуре отливки 700 °С

Однако утолщение реборд до величины угла 45° ухудшает условия затвердевания и создает предпосылки для образования горячих трещин. Оптимальным решением по устранению натяга, улучшению условий выбивки отливки, предотвращению торможения свободной линейной усадки явилось использование комбинированной металлической изложницы с податливыми вставками в районе расположения реборд (рис. 6).

В результате такие технологические меры, как заливка дополнительной порции обогревающего шлака, регулирование скорости теплоотвода, использование облицованной металлической формы обеспечили получение крупногабаритной отливки сложной конфигурации с однородной столбчатой структурой без литейных дефектов.

Для реализации процесса была спроектирована и изготовлена литейная металлическая форма, состоящая из верхней и нижней крышек, соединяющих четыре боковые секции. Материал формы – Сталь 20. Толщина стенок формы – 70-105 мм.

В результате получена партия фасонных конических заготовок диаметром 890/795 мм, высотой 653 мм и массой 530 кг (рис. 7).

Из полученных крупногабаритных фасонных отливок корпусов газовых турбин были вырезаны кольцевые пробы сечением 20x20 мм для исследования химического состава, макро- и микроструктуры, а также механических свойств.

Исследование химического состава заготовок ЦЭШЛ из стали 15X12H2МВФАБ, выполненное количественным спектральным анализом, показывает, что он соответствует требованиям ТУ 14-1-2902-80 для этой стали (табл. 1). Макроструктура заготовок (рис. 8) плотная без дефектов усадочного происхождения. Она состоит из двух основных зон: периферийной протяженностью 8-12 мм с мелкокристаллической структурой и основной с более крупной кристаллической структурой со столбчатыми кристаллами. Проведенный ультразвуковой контроль дефектов литейного характера не обнаружил.

Микроструктура металла отливки представляет собой сорбит отпуска с равномерно распределенными карбидами легирующих элементов. Характеристики прочности, пластичности и вязкости получены после термической обработки по следующему режиму: гомогенизация при $1120 \pm 10^\circ\text{C}$, 4,0-4,5 ч, воздух; гомогенизация повторно; нормализация от $1130 \pm 10^\circ\text{C}$, 1,0-1,5 ч, воздух; закалка с $1120 \pm 10^\circ\text{C}$ в масле; отпуск при $650 \pm 20^\circ\text{C}$, 1,0-1,5 ч, воздух.

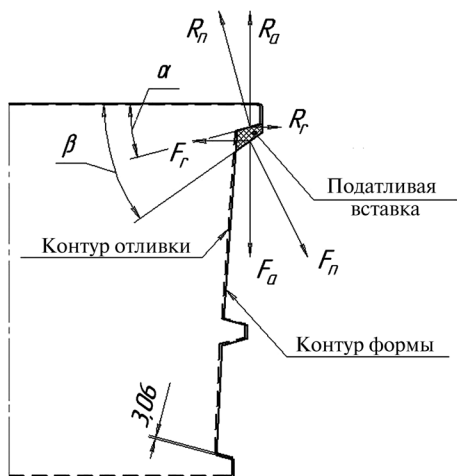


Рис. 6. Компенсация натяга между отливкой и формой за счет применения податливой огнеупорной вставки



Рис. 7. Партия фасонных заготовок из стали ЭП 517



Рис. 8. Макроструктура отливки в продольном разрезе (повернуто на 90°)

Таблица 1. Химический состав металла стенки

| Химический состав, % | Место отбора проб | | | |
|----------------------|-------------------|-------|----------|-----------------|
| | А | Б | электрод | ТУ 14-1-2902-80 |
| C | 0,17 | 0,18 | 0,18 | 0,13-0,18 |
| Si | 0,27 | 0,27 | 0,31 | ≤ 0,50 |
| Mn | 0,15 | 0,15 | 0,15 | ≤ 0,50 |
| Cr | 11,20 | 11,20 | 11,20 | 11,0-12,5 |
| Ni | 1,82 | 1,80 | 1,82 | 1,70-2,10 |
| W | 0,77 | 0,80 | 0,80 | 0,65-1,00 |
| Mo | 1,42 | 1,40 | 1,42 | 1,35-1,65 |
| V | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,18-0,30 |
| Nb | 0,30 | 0,31 | 0,31 | 0,20-0,35 |
| S | 0,007 | 0,007 | 0,014 | ≤ 0,015 |
| P | 0,03 | 0,03 | 0,03 | ≤ 0,03 |

Полученные результаты испытаний (табл. 2) корпуса компрессора из стали ЭП-517-Ш показывают, что литой термически обработанный металл практически по всем величинам характеристик соответствует требованиям, оговоренным ТУ У 27.1-0019414-030-2004. Длительная прочность литой электрошлаковой стали в отливках ЦЭСЛ существенно выше, чем оговаривается в требованиях ТУ У на кованный металл. Замена деформационно-сварной технологии изготовления корпусов компрессоров турбины на технологию центробежного электрошлакового литья позволит сократить цикл изготовления, снизить трудоемкость, повысить КИМ, а также повысит надежность изделия за счет устранения сварных соединений.

Таблица 2. Механические свойства корпуса турбины из стали ЭП-517-Ш

| Механические свойства | | Место отбора проб отливки | | | |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------|------|---------------------------------------|
| | | верх | середина | низ | ТУ У 27.1-0019414-030-2004 на поковки |
| При комнатной температуре | σ_b , МПа | 1119 | 1095 | 1100 | ≥ 1050 |
| | $\sigma_{0,2}$, МПа | 963 | 891 | 895 | ≥ 800 |
| | δ_5 , % | 12,2 | 12,4 | 12,3 | ≥ 10 |
| | ψ , % | 46,4 | 46,9 | 46,6 | ≥ 45 |
| | КСУ Дж/см ² | 55,2 | 53,5 | 53,2 | ≥ 50 |
| Твердость | $d_{отп}$, мм | 3,3 | - - | - - | 3,3 |
| | НВ | 341 | - - | - - | 341 |
| Длительная прочность | $T_{исп}$, °С | 550 | - - | - - | 550 |
| | напряжение σ , МПа | 450 | - - | - - | 450 |
| | время до разрушения τ , ч | 161 | 170 | 175 | ≥ 100 |

* Направление вырезки образцов — тангенциальное

1. Медовар Б. И., Миринский Г. С., Шевцов В. Л. Центробежное электрошлаковое литье. — Киев: Знание, 1983. — 48 с.
2. Электрошлаковая тигельная плавка и разливка металла / Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. М. Мартын и др. / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара — Киев: Наук. думка, 1988. — 216 с.
3. Электрошлаковый металл / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
4. Участок электрошлаковых технологий на Государственном предприятии «Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря» - «Машпроект» / А. В. Горячек, В. В. Романов, С. В. Блохин и др. // Металлургия машиностроения. — 2007. — № 6. — С. 34-36.

Поступила 15.07.2008

УДК 669.18-412: 621746.6

А. Н. Смирнов, В. Е. Ухин, Е. Ю. Жибоедов*

Донецкий национальный технический университет МОН Украины, Донецк

*ОАО «Енакиевский металлургический завод», Енакиево

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СОРТОВОЙ ЗАГОТОВКИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МНЛЗ

Рассмотрены существующие подходы к обеспечению высокоскоростной непрерывной разливки сортовой заготовки. Представлены результаты физического моделирования процесса формирования твердой корочки в кристаллизаторе и установлены основные факторы, влияющие на темп ее наращивания. Выполнен сравнительный анализ влияния интенсивности теплоотвода на характер формирования твердой корочки в кристаллизаторе. Показано влияние локального изменения теплоотвода от поверхности заготовки на изменение ее конфигурации.

Розглянуті існуючі підходи до забезпечення високошвидкісного безперервного розливання сортової заготовки. Представлені результати фізичного моделювання процесу формування твердої скоринки в кристалізаторі й встановлені основні фактори, що впливають на темп її нарощування. Виконано порівняльний аналіз впливу інтенсивності тепловідводу на характер формування твердої скоринки в кристалізаторі. Показано вплив локальної зміни тепловідводу від поверхні заготовки на зміну її конфігурації.

Existing approaches for high-speed continuous billet casting ensuring are considered. The results of physical simulation of solid shell formation the mould are presented and the major factors that have an influence on its growth rate build-up are determined. The comparative analysis of heat removal intensity influence on the nature of solid shell formation in the mould is made. The influence of local heat removal changing from billet surface on its reconfiguration is shown.

Ключевые слова: заготовка, разливка, непрерывное литье, кристаллизатор, физическое моделирование.

Эволюция развития технологии непрерывного литья сортовой заготовки характеризуется стремлением производителей максимально увеличить скорость разливки при обеспечении высоких кондиций твердой заготовки в части геометрической конфигурации и отсутствия поверхностных трещин [1-3]. В последние два десятилетия основной прогресс в разливке сортовой заготовки достигается при использовании гильзовых кристаллизаторов, внутренняя полость которых имеет сложную геометрическую форму и