



# ОПРОБОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТЛИВОК СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ ИЗ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 15X12H2MVФАБ СПОСОБОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЛИТЬЯ

С. В. Скрипник, Д. Ф. Чернега

Опробована новая технология получения крупных фасонных отливок массой 0,4 т из жаропрочной стали 15X12H2MVФАБ (ЭП 517). Приведены данные об основных технологических параметрах изготовления, химическом составе, структуре, механических свойствах литой электрошлаковой стали ЭП 517, в сравнении с ковальной сталью аналогичного состава. Показана перспективность применения корпусных отливок, полученных способом центробежного электрошлакового литья, в производстве газотурбинных двигателей и установок.

New technology of producing large shaped castings of 0.4 t mass of heat-resistant steel 15Kh12N2MVФАБ (EP 517) was tested. Data are given for main technological parameters of production, chemical composition, structure, mechanical properties of cast electroslag steel EP 517 as compared with a forged steel of similar composition. The prospects of application of body castings of CESC in manufacture of gas turbine engines and units are shown.

**Ключевые слова:** центробежное электрошлаковое литье; состав; структура; механические свойства; горячие трещины; жаропрочность; газотурбинные установки

Стенка компрессора газотурбинного двигателя является одним из наиболее ответственных и трудоемких механических узлов, который длительное время подвергается большим механическим нагрузкам при рабочей температуре, достигающей 580... 600 °С. Этот узел представляет собой крупногабаритную толстостенную обечайку с фланцами на торцах и большим количеством бобышек, расположенных на наружной боковой поверхности.

В настоящее время обечайку стенки компрессора изготавливают из поковки жаропрочной мартенситно-ферритной стали 15X12H2MVФАБ (ЭП 517) ТУ 14-1-2902. Готовые фланцы и бобышки из деформированной стали этой же марки приваривают к обечайке при помощи сварки. Такая технология характеризуется продолжительным циклом изготовления, большой трудоемкостью, низким коэффициентом использования металла (КИМ) и недостаточной надежностью из-за наличия большого количества сварных швов.

Основной проблемой обеспечения сплошности сварных соединений является предотвращение образования горячих и холодных трещин в металле сварных швов. Установлено [1], что при прочих равных условиях склонность металла сварного шва

к образованию трещин определяется содержанием феррита в стали. Наличие 2... 6 % феррита способствует предотвращению возможности появления трещин. Согласно структурной диаграмме Шеффлера для легированных сталей, показывающей влияние эквивалентов хрома и никеля на структуру металла сварного шва, структура шва из стали ЭП 517 или близкой по ее составу будет однофазной, представленной мартенситом, либо двухфазной, состоящей из мартенсита и небольшого количества феррита. Это обусловлено тем, что эквивалент хрома ( $\% Cr + \% Mo + 1,5 \cdot \% Si + 0,5 \cdot \% Nb$ ) в зависимости от марочного состава этой стали находится в пределах 12,9... 15,1 %, а эквивалент никеля ( $\% Ni + 30 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn$ ) составляет 5,7... 7,8 %. Согласно уравнению, предложенному Сеферианом ( $Fc_{\alpha} = 3[Cr_{\text{ЭКВ}} - 0,93Ni_{\text{ЭКВ}} - 6,7]$ ), количество феррита будет образовываться в пределах 1,1... 2,6 %.

Следовательно, отсутствие или низкое содержание феррита не позволяют решить проблему обеспечения сплошности металла сварных швов. Кроме того, при нагреве до 700 °С в результате сварки проявляется склонность к межкристаллитной коррозии, т. е. коррозионному разрушению по границам зерен, связанному с выделением по границам зерен карбидов  $Cr_{23}C_6$  и уменьшением в связи с этим



хрома ниже предела, обеспечивающего коррозионную стойкость, — 12 % [1].

С целью упрощения существующей технологии, повышения КИМ и надежности газовых турбин опробовали технологию центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ), разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона [2]. Переход от деформационно-сварной технологии изготовления корпусных узлов газовых турбин к ЦЭШЛ позволяет создать монолитную крупнозернистую структуру с одинаковым размером зерна, отличающуюся увеличенной жаропрочностью, поскольку при повышенных температурах пластическая деформация происходит преимущественно по границам зерен, а суммарная протяженность границ уменьшается с ростом зерна [3].

Эксперименты проводили на одном из машиностроительных заводов с использованием комплекса электрошлакового кокильного литья КЦЭШЛ-1 [4]. В качестве расходных электродов применяли собственные металлоотходы, расплавленные в дуговой сталеплавильной печи ДСП-5 и отлитые в стальные неохлаждаемые кокилы.

Переплавливали расходные электроды диаметром 300 мм в футерованном тигле с горизонтальным сечением 590×610 мм под флюсом АНФ-295 системы  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ . Выбор этого флюса обусловлен низким содержанием (10... 12 %) химически активного по отношению к магнезиту фтористого кальция. Ток переплава составлял 6... 7 кА, напряжение на шлаковой ванне — 45... 50 В.

В процессе переплава металл раскисляли дозированными порциями (по 0,2 кг) силикокальция марки СК-25 ГОСТ 4762-71 из расчета 1,5 кг на 1 т. В процессе плавки температуру металла измеряли при помощи платино-платинородиевой термопары ТПР 30/6. Для измерений использовали вторичный прибор типа КСП-3.

Температура заливки — важная и самостоятельная характеристика процесса литья [5]. Ее выбирали исходя из следующих условий:

заполнение полости сложной по конфигурации металлической формы без дефектов типа неспаев и шлаковых включений;

уменьшение усадочной рыхлости, пористости и приваривания к форме;

предохранение отливок от образования горячих трещин, а также уменьшение остаточных напряжений.



Рис. 1. Отливки ЦЭШЛ из стали ЭП 517

Поскольку для первого условия требуется увеличение температуры заливки, а для второго и третьего — ее уменьшение, то выбор температуры стал технологическим компромиссом. Ее уровень определяли опытным путем в интервале 1530... 1540 °С. Массовая скорость заливки составляла 8... 9 кг/с, а скорость вращения формы в период заливки — 85 об/мин. Постепенно частоту вращения увеличили до 250 об/мин. При этой частоте вращения коэффициент гравитации на внутренней поверхности формы составил 33 единицы.

Конструкция опытной отливки массой 0,4 т, диаметром 950 мм, высотой 290 мм и толщиной стенок 72... 100 мм характеризуется большим коэффициентом габаритности ( $K_v = V_{\text{отл}}/M_{\text{отл}}$ , где  $V_{\text{отл}}$  — объем;  $M_{\text{отл}}$  — масса отливки), равным  $0,58 \text{ м}^3/\text{т}$  и приведенной толщиной ( $X = V_{\text{отл}}/S_{\text{отл}}$ , где  $S_{\text{отл}}$  — ее поверхность), составляющей 0,103 м.

Развитые наружная и внутренняя поверхности крупногабаритной отливки вызвали необходимость в формировании на свободной поверхности обогревающего слоя шлака значительной толщины, предохраняющего образование усадочных дефектов и встречного фронта кристаллизации.

Таблица 1. Химический состав металла стенки

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

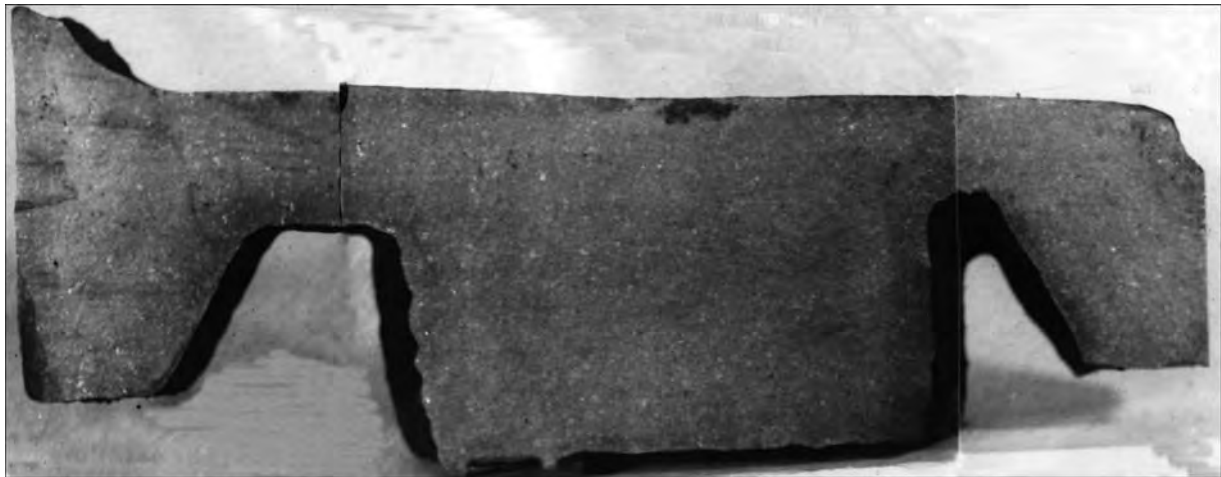


Рис. 2. Макроструктура вертикального сечения отливки

В связи с этим одновременно с заливкой шлако-металлического расплава из тигельной электрошлаковой печи во вращающуюся форму потребовалась подача дополнительной порции шлака. Шлак приготовили в отдельной флюсоплавильной печи. Ввод во вращающуюся форму дополнительной порции шлака системы  $\text{CaF}_2\text{-CaO-SiO}_2$  (АНФ-28), отличающегося невысокой температурой плавления (1180... 1200 °С), обеспечивает необходимый обогрев свободной поверхности, дополнительное рафинирование металла и улучшение качества поверхности отливки.

Уменьшение пористости металла и содержания неметаллических включений способствует увеличению пластичности и относительного удлинения, и, таким образом, снижению вероятности образования горячих трещин в реальных отливках [6].

Поскольку в конструкции корпуса стенки компрессора предусмотрены торцевые фланцы и ряд бобышек, то в опытной отливке образуются тепловые узлы, затвердевающие позже остальных ее элементов. Из-за этого происходит локализация деформации растяжения в результате торможения свободной линейной усадки, что может привести к образованию горячих трещин. Поэтому возникла необходимость в предотвращении образующихся в процессе затвердевания бассейнов металла путем локаль-

ного утолщения облицовки в соотношении 3:1 относительно стенок со сравнительно малой толщиной.

Еще одной особенностью отливки заданной конструкции является сложное температурно-силовое взаимодействие с формой в процессе охлаждения. В поперечном направлении зазор между отливкой и формой обеспечивается при всех геометрических параметрах. Однако в продольном направлении, как показывает графоаналитическое исследование, возможен натяг. Для его предотвращения или хотя бы уменьшения потребовалось раннее раскрепление собранной формы и извлечение отливки.

В результате такие технологические меры, как заливка дополнительной порции обогревающего шлака, регулирование скорости теплоотвода, использование облицованной металлической формы, раннее извлечение отливки обеспечили получение партии (3 шт.) крупногабаритных отливок с двумя фланцами и 25 бобышками диаметрами 21... 140 мм без литейных дефектов и хорошей поверхностью (рис. 1). Размеры опытной отливки следующие: наружные диаметры по фланцам равняются 952 мм, по обечайке — 865 мм; внутренний диаметр составляет от 750 до 800 мм; высота — 290 мм; масса отливки — 350 кг.

Из полученных отливок вырезали вертикальные темплеты и пробы с целью исследования химического состава, макро- и микроструктуры, а также механических свойств.

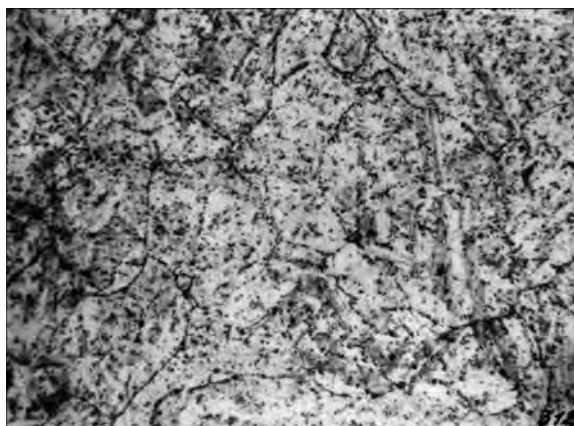


Рис. 3. Микроструктура (X500) отливки после термической обработки

Таблица 2. Содержание неметаллических включений в отливке ЦЭШЛ

Место отбора проб (№ образца)	Размер единичных неметаллических включений в разных частях образца, мм		
	Верхняя	Средняя	Нижняя
Верх (Т1)	0,03	0,03	0,03
Середина (Т2)	0,05	0,04	0,05
Низ (Т3)	0,05	0,04	0,05

**Примечание.** Средний размер включений во всех частях образца составлял 0,01 мм.



Таблица 3. Механические свойства отливки ЦЭШЛ при комнатной температуре

Место отбора проб	Направление вырезки образцов	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
Верх отливки	Аксиальное	1140	940	14,1	48	42
	Тангенциальное	1160	920	12,0	45	40
Низ отливки	Аксиальное	1180	950	14,0	46	41
	Тангенциальное	1140	920	10,0	42	40
ТУ 14-1-2918-80 на поковки	Продольное	≥ 1100	≥ 850	≥ 14,0	≥ 55	≥ 60
	Тангенциальное	≥ 1050	≥ 800	≥ 10,0	≥ 45	≥ 50
	Радиальное	≥ 990	≥ 770	≥ 7,0	≥ 33	≥ 30

Примечание. Длительная прочность образцов при напряжении 450 МПа и температуре испытания 550 °С составила 161...175 ч, а в требованиях, оговоренных в технических условиях на поковки, она равняется не менее 100 ч.

Химический состав проб, отобранных от диаметрально противоположных частей А и Б отливок ЦЭШЛ (рис. 1), определен с использованием спектральных и химических методов (табл. 1). Существенных изменений в содержании основных легирующих элементов не обнаружено. Характерной особенностью в содержании примесей является значительная десульфурация металла.

На рис. 2 представлена макроструктура вертикального разреза отливки. Структура отличается плотностью, однородностью, отсутствием зональной ликвации. Лишь со стороны внутренней поверхности просматриваются неглубокие участки залегания дефектов усадочного происхождения. После снятия припуска с помощью механической обработки этот слой металла удаляется. Микроструктура металла отливки представляет собой сорбит отпуска с равномерно распределенными карбидами легирующих элементов (рис. 3). Однородное распределение мелких частиц упрочняющих фаз внутри зерен и на их границе является благоприятным для повышения жаропрочности [3]. Указанная микроструктура получена после термической обработки по следующему режиму: гомогенизация при (1120 ± 10) °С, 4,0...4,5 ч, воздух; повторная гомогенизация; нормализация от (1130 ± 10) °С, 1,0...1,5 ч, воздух; закалка от (1120 ± 10) °С в масле; отпуск при (650 ± 20) °С, 1,0...1,5 ч, воздух.

В результате контроля неметаллических включений зафиксированы высокая чистота металла крупногабаритной отливки ЦЭШЛ, дисперсность неметаллических включений и их равномерное распределение по телу отливки (табл. 2).

Исследования механических свойств отливок (табл. 3) показали, что по характеристикам прочности и относительного удлинения электрошлаковая сталь

ЭП 517 соответствует требованиям ТУ 14-1-2918-80 на поковки из металла аналогичного состава. Твердость образцов составила 3410...3420 МПа. Длительная прочность литой электрошлаковой стали существенно выше, чем оговаривается в технических условиях на кованный металл. Однако относительное сужение и ударная вязкость имеют более низкие значения. Для отливок ЦЭШЛ из жаропрочной стали 20Х13 простой конфигурации характерно существенное повышение характеристик пластичности и ударной вязкости, в сравнении с требованиями технических условий на кованный металл [7]. Работы с целью улучшения механических и служебных свойств отливок ЦЭШЛ продолжают в направлении оптимизации основных технологических параметров изготовления, термической обработки и совершенствования конструкции формы.

1. Гривняк И. Свариваемость сталей / Пер. со словац. Л. С. Гончаренко; Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
2. Медовар Б. И., Маринский Г. С., Шевцов В. Л. Центробежное электрошлаковое литье. — Киев: О-во «Знание» УССР, 1983. — 48 с.
3. Материаловедение / Под ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.
4. Комплекс КЦЭШЛ-1 для получения электрошлаковых кольцевых заготовок весом до 1000 кг / Ю. Н. Бондин, А. В. Горячек, С. В. Скрипник и др. // Металлургия машиностроения. — 2006. — № 3. — С. 35-37.
5. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливок. — М.: Машиностроение, 1979. — 335 с.
6. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. — Л.: Машиностроение, 1976. — 214 с.
7. Скрипник С. В., Чернега Д. Ф., Горячек А. В. Исследование качества конусных заготовок из стали 20Х13, полученных способом центробежного электрошлакового литья // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 3. — С. 15-17.

НПФ «Титан», НТУУ «КПИ», г. Киев

Поступила 03.12.2008