



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 кокили.

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.

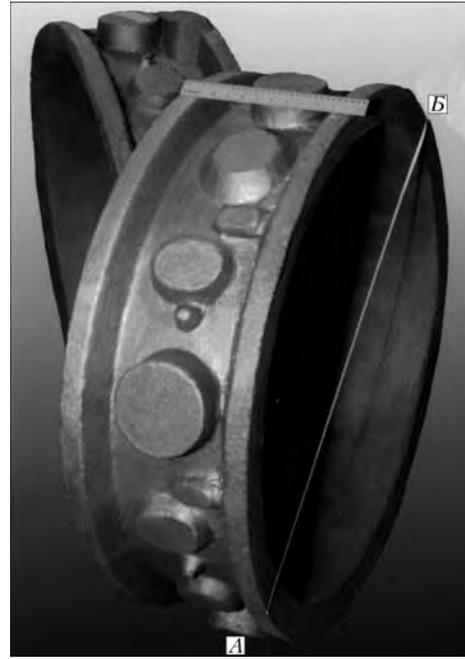


Рис. 1. Отливки ЦЭШЛ из стали ЭП 517

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

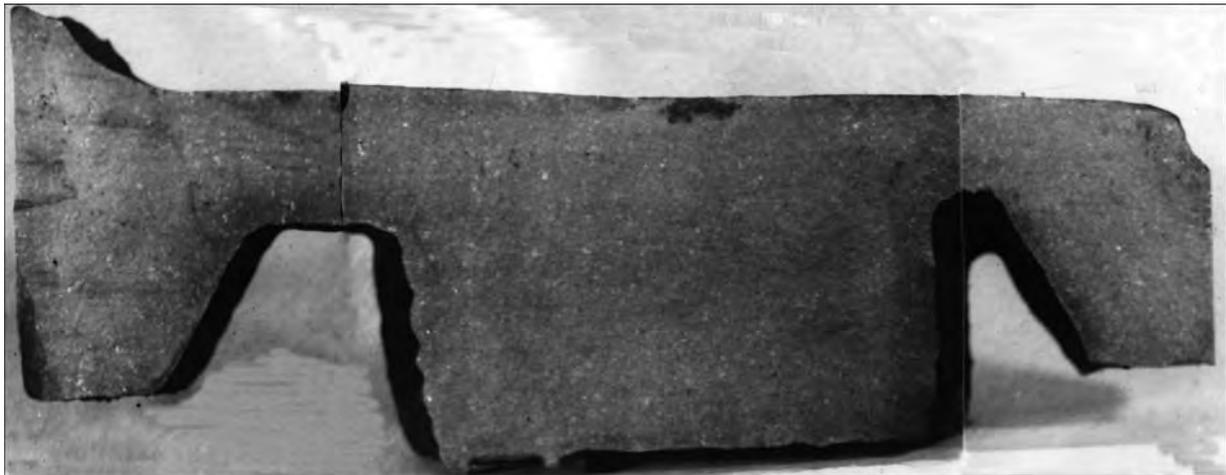


Рис. 2. Макроструктура вертикального сечения отливки

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-

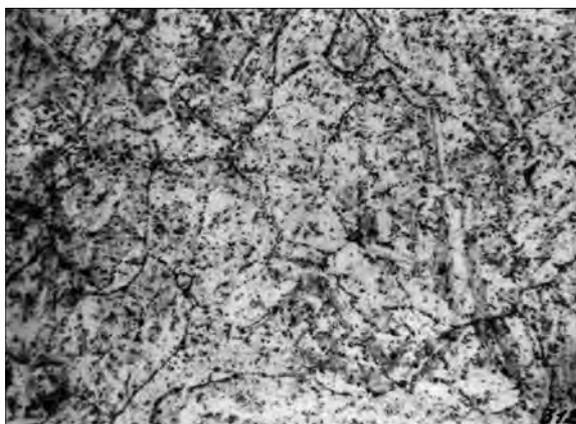


Рис. 3. Микроструктура (X500) отливки после термической обработки

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.

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	δ_5 , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
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 продолжаются 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 «Знання» 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