



УДК 669.187.56

ОБ АЛЬТЕРНАТИВНОМ СПОСОБЕ ПРОИЗВОДСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК В ГАЗОВОМ ТУРБИНОСТРОЕНИИ

С. В. Скрипник

Рассмотрены ковано-сварные промышленные способы получения полых заготовок деталей и узлов газовых турбин. Проанализировано поведение сварных швов на примере некоторых жаропрочных сварных конструкций. Предложен альтернативный способ получения крупногабаритных центробежных электрошлаковых заготовок вместо ковано-сварного. Приведены примеры эффективного использования электрошлаковых заготовок в турбомашиностроении.

Forging-welding industrial methods of producing billets of parts and sub-assemblies of gas turbines are considered. The behavior of welds on the example of some heat-resistant welded structures is analyzed. Alternative method for producing large-sized centrifugal electroslag billets instead of forged-welded ones is offered. Examples of effective application of electroslag billets in turbine manufacturing are given.

Ключевые слова: хромоникелевые стали; центробежное электрошлаковое литье; сварка; структура; аустенит; мартенсит; феррит; газовые турбины

В предстоящее десятилетие особенно быстро будет развиваться энергетическое газотурбиностроение — прежде всего производство газовых турбин (ГТ) большой (125... 180 МВт) мощности [1]. Создание современных ГТ неразрывно связано с решением ряда сопутствующих научно-технических проблем, в частности, с улучшением технологий сварки, получением крупногабаритных полых заготовок высокого качества, разработкой высокотемпературных конструкционных материалов.

Современные ГТ имеют до 70 % полых деталей и механических узлов сложного профиля. В ГТ большой мощности размеры полых деталей и механических узлов, особенно корпусных, достигают 1000... 1500 мм и более. В настоящее время такие поковки изготавливают по сложной технологической схеме, включающей выплавку металла в открытой печи, получение слитков, биллетирование, разрезку биллетов, осадку, прошивку, разгон по диаметру и раскатку.

Такие операции требуют сложной кооперации с другими предприятиями и использования уникального кузнечно-прессового оборудования. Кроме того, в случае глубокой вытяжки приходится ограничивать диаметр заготовки, а при раскатке — ее высоту. Иногда требуется сложный профиль заготовок. Поэтому в некоторых случаях производство их деформационными способами технически невозможно.

Для ГТ большой мощности экономически выгодно изготавливать корпусные конструкции со сравнительно большой толщиной и значительной конструктивной жесткостью, состоящие из нескольких поковок, соединяемых с применением сварки (рис. 1, а). Однако ковано-сварные технологии отличаются продолжительным циклом изготовления и большой трудоемкостью.

Химический состав некоторых жаропрочных сталей, используемых в сварных конструкциях, представлен в табл. 1. С точки зрения общей химической стойкости и эксплуатационных свойств желательно, чтобы металл сварного шва по составу и структуре не отличался от основного металла [2, 3]. Но в данном случае в высоколегированном металле сварных швов возможно образование горячих и холодных трещин. Это обусловлено такими специфическими особенностями, как развитая транскристаллитная направленность первичной структуры, увеличенная литейная усадка затвердевающего металла, значительные растягивающие напряжения, действующие на сварочную ванну в процессе его затвердевания, многокомпонентное легирование, усиливающее вероятность появления малых количеств легкоплавкой эвтектической составляющей на границе дендритов в момент завершения кристаллизации сварочной ванны [2–6].

Для получения высоколегированного металла сварных швов без трещин зачастую приходится применять присадочные материалы, отличающиеся по композиции от основного металла. В ряде случаев это де-

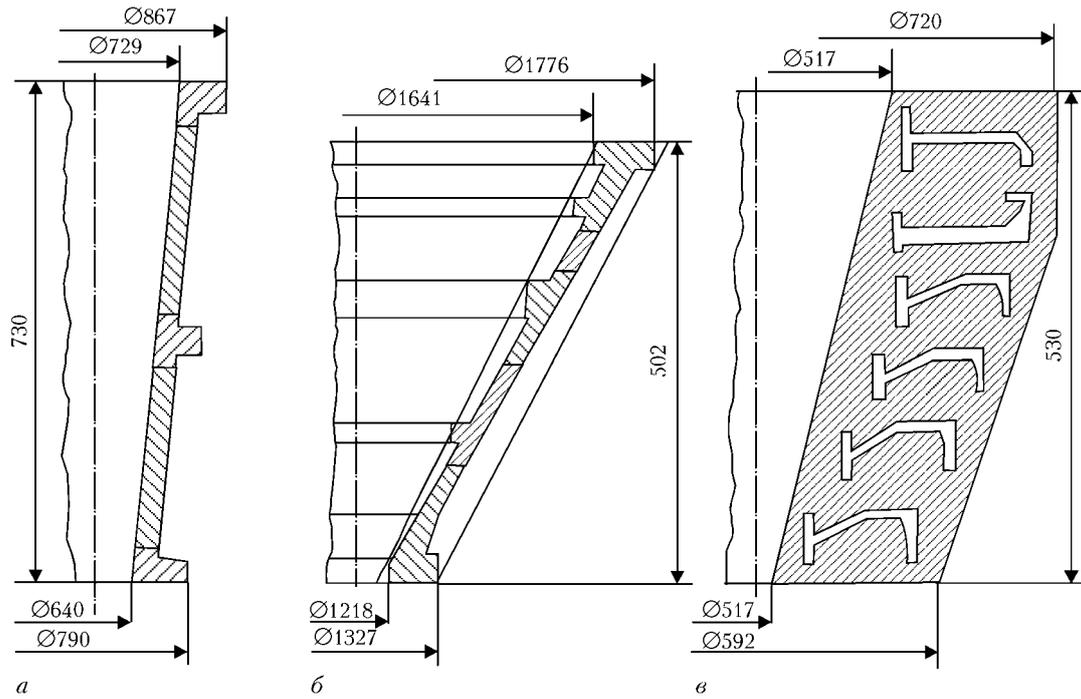


Рис. 1. Эскизы корпусных сварных конструкций компрессора (а), турбины (б), литой заготовки (в), предназначенной для нескольких колец спрямляющего аппарата газовой турбины

ляется даже в ущерб свойствам сварного соединения.

Таким образом, имеется ряд технических трудностей как в получении бездефектных сварных соединений в жаропрочных сварных конструкциях,

так и в обеспечении их химической, структурной и физической однородности.

Задача получения полых заготовок или конструкций высокого качества для ГТ остается актуальной. Успешно решить ее можно путем приме-

Таблица 1. Состав некоторых жаропрочных марок сталей и сплавов, применяемых в производстве газовых турбин

Структурный класс	Рабочая температура, °С	Марка стали	Массовая доля элементов, %											
			C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	Nb	Ti	V	S	P
Ф	Нет данных	08X17T	≤0,08	≤0,8	0,80	16,0... ... 18,0	-	-	-	-	5xC- 0,80	-	≤0,025	≤0,035
Ф	600	15X25T	≤0,15	≤1,0	≤0,80	24,0... ... 27,0	-	-	-	-	5xC- 0,90	-	≤0,025	≤0,035
М	450... ... 500	20X13	0,16... ... 0,25	0,20... ... 0,80	0,30... ... 0,80	12,0... ... 14,0	-	-	-	-	-	-	≤0,025	≤0,030
М-Ф	580	15X11МБФ	0,12... ... 0,18	≤0,55	0,60... ... 1,20	10,0... ... 12,0	0,50... ... 0,90	-	0,80... ... 1,05	0,10... ... 0,20	-	0,50... ... 0,90	≤0,025	≤0,030
М	600	13X11Н2В2МФ (ЭИ 961)	0,10... ... 0,16	≤0,60	≤0,60	10,5... ... 12,5	1,50... ... 1,80	1,60... ... 2,00	0,35... ... 0,50	-	-	0,18... ... 0,30	≤0,025	≤0,030
М	Нет данных	07X12НМБФ (ЭП 609)	0,05... ... 0,09	≤0,60	≤0,60	10,5... ... 12,0	1,40... ... 1,80	-	0,35... ... 0,50	0,05... ... 0,15	-	0,15... ... 0,25	≤0,02	≤0,03
М	600... ... 650	15X12Н2МВФАБ (ЭП 517)	0,13... ... 0,18	≤0,50	≤0,50	11,0... ... 12,5	1,70... ... 2,10	0,65... ... 1,00	1,35... ... 1,65	0,20... ... 0,35	-	-	≤0,015	≤0,03
М	570	20X12ВНМФ (ЭП 428)	0,17... ... 0,23	≤0,60	0,50... ... 0,90	10,5... ... 12,5	0,50... ... 0,90	0,70... ... 1,10	0,50... ... 0,70	-	-	0,15... ... 0,30	≤0,025	≤0,030
М-Ф	Нет данных	14X17Н2	0,11... ... 0,17	≤0,80	≤0,80	16,0... ... 18,0	1,50... ... 2,50	-	-	-	-	-	≤0,025	≤0,030
А	600	10X18Н9Т (ЭЯ1Т)	≤0,10	≤0,80	1,00... ... 2,00	17,0... ... 19,0	8,0... ... 9,5	-	-	-	5xC- 0,70	-	≤0,020	≤0,035
А	600	12X18Н10Т-Ш	≤0,12	≤0,80	≤2,00	17,0... ... 19,0	9,0... ... 11,0	-	-	-	5xC- 0,80	-	≤0,020	≤0,035
А	650... ... 700	20X23Н18	≤0,20	≤1,0	≤2,00	22,0... ... 25,0	17,0... ... 20,0	-	-	-	-	-	≤0,020	≤0,035



Рис. 2. Полая отливка ЦЭШЛ массой 0,5 т из стали 13X11H2B2MФ (ЭИ 961)

ния центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) полых заготовок [7].

Использовать в турбостроении крупногабаритные заготовки ЦЭШЛ можно как простой геометрической формы, например в виде толстостенного усеченного конуса, так и фасонной — с необходимым количеством различных фланцев или приливов.

Полую заготовку в виде усеченного конуса можно использовать либо как цельнолитую (вместо пяти сваренных между собой кованых деталей) для различных изделий (рис. 1, б), либо с последующей разрезкой на мерные кольца различного диаметра (рис. 1, в). Такие литые кольца могут применяться, например, как элементы спрямляющих аппаратов ГТ вместо цельнокатаных. Это позволит сократить цикл и упростить технологию изготовления, а также снизить стоимость производства.

Для опробования второго варианта изготовили полые заготовки ЦЭШЛ в виде усеченного конуса из стали 13X11H2B2MФ (ЭИ 961) массой 0,5 т с наружными диаметрами 720 и 517 мм и внутренними 592 и 380 мм (в обоих случаях первый размер относится к верхнему срезу, второй — к нижнему)

высотой 530 мм. Указанные заготовки (рис. 2) получили на комплексе центробежного электрошлакового литья КЦЭШЛ-1 с вертикальной осью вращения формы. Каждую конусную заготовку разрезали на шесть колец. Одно из них подвергли подробным исследованиям.

Макроструктура литого кольца характеризуется высокой плотностью, однородностью и отсутствием дефектов ликвационного и усадочного происхождения, что обусловлено постепенной и направленной кристаллизацией металла под шлаком в поле центробежных сил. Микроструктура представляет собой сорбит отпуска.

Предварительная термическая обработка состояла в нормализации от температуры $(1070 \pm 20)^\circ\text{C}$, выдержке 2,0... 2,5 ч, воздух, а также двойном отпуске при $(720 \pm 20)^\circ\text{C}$, 3... 4 ч, воздух. Окончательная термическая обработка заключалась в закалке от температуры $(950 \pm 20)^\circ\text{C}$, 1,2... 2,0 ч, воздух, а также отпуске при $(680 \pm 20)^\circ\text{C}$, воздух. Так как при электрошлаковой тигельной плавке использовали литые расходные электроды с добавлением металлической стружки, то важно было сравнить свойства полученных отливок с требуемыми в технических условиях.

Механические свойства металла кольца (табл. 2) оказались выше оговоренных техническими условиями на кованый металл открытой выплавки. Важно отметить высокую изотропность литого металла, что для сложнапряженных деталей является одной из наиболее важных характеристик металла. Полученные свойства позволили использовать остальные пять литых колец из конусной заготовки в производстве. В 2008 г. комплект деталей из упомянутых литых колец установлен на газовый двигатель ДГ 90, который в настоящее время эксплуатируется в обычных производственных условиях.

Большие значения пластичности и вязкости чистой электрошлаковой стали ЭИ 961 позволили увеличить объем упрочняющей дисперсной фазы и тем самым достичь большей жаропрочности в корпусной детали из стали 15X12H2MВФАБ (ЭП 517).

Таблица 2. Механические свойства стали ЭИ 961 в отливке ЦЭШЛ массой 0,5 т

Металл	Направление вырезки образца	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	Длительная прочность при T = 450 °C, ч
Отливка ЦЭШЛ	Продольное	1031... 1032 1031,5	902... 930 916	13,8... 15,6 14,7	43,9... 44,5 44,2	63,0... 72,0 67,5	100 без разрыва
	Тангенциальное	1028... 1055 1042	907... 915 911	11,0... 11,8 11,4	42,0... 46,5 44,3	67,0... 69,0 68,0	100 без разрыва
Требования ТУ 14-1-2918-80 на поковки (не менее)	Продольное	900	750	10,0	40,0	45	100
	Тангенциальное	850	710	7,5	32,0	35	100

Примечание. В числителе — наименьшее и наибольшие значения, в знаменателе — среднее значение по восьми образцам.



Для опробования варианта получения цельнолитой фасонной детали взамен собираемой из пяти колец по ковано-сварной технологии изготовили партию из трех крупногабаритных заготовок ЦЭШЛ стенки компрессора из стали 15X12H2MBФAB (ЭП 517). Заготовки отличались сложной конфигурацией и имели на наружной поверхности три поперечные реборды различного профиля и два продольных ребра (рис. 3). Диаметры реборд составляют 890 мм, внутренняя полость большего диаметра конусных отливок — 700 мм, высота — 750 мм.



Рис. 3. Крупногабаритные фасонные отливки ЦЭШЛ массой 0,6 т из стали 15X12H2MBФAB (ЭП 517)

Из одной из заготовок вырезали продольный темплет и кольцевые пробы сечением 20X20 мм для исследования химического состава, макро- и микроструктуры, а также механических свойств. Химический состав заготовки соответствует требованиям технических условий для этой стали. Макроструктура заготовок — плотная, без дефектов металлургического характера. Микроструктура металла представляет собой сорбит отпуска с равномерно распределенными карбидами легирующих элементов.

Заготовки термообработали 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 от $(1120 \pm 10)^\circ\text{C}$, масло; отпуск при $(650 \pm 20)^\circ\text{C}$, 1,0... 1,5 ч, воздух. Результаты механических испытаний заготовок из стали 15X12H2MBФAB (ЭП 517) (табл. 3) свидетельствуют о соответствии характеристик прочности, пластичности и вязкости техническим условиям на кованую сталь этой марки.

Изготовление цельнолитых заготовок из стали 15X12H2MBФAB (ЭП 517) взамен сварной конструкции из нескольких цельнокатаных колец позволило сократить цикл изготовления, снизить трудоемкость, а также повысить эксплуатационную надежность изделия в результате исключения применения сварных соединений. Следует отметить, что длительная прочность в этом случае превышает требования технических условий на кованный металл в 1,7 раза.

С целью определения экономической эффективности на примере применения литых колец из отливок ЦЭШЛ взамен поковок на одном из маши-

ностроительных предприятий Украины выполнили соответствующий экономический расчет (использован уровень цен 2008 г.). Суммарные статьи расходов по действующему деформационному технологическому процессу (сырье и материалы, возвратные отходы, трудоемкость, основная и дополнительная зарплата, отчисления на страхования, общепроизводственные расходы цехов) на изготовление одного комплекта (шесть деталей) составляют 10451 грн. При альтернативном варианте (из отливки ЦЭШЛ) аналогичные расходы равняются 10194 грн. Согласно годовой программе выпуска (116 комплектов, 50 т металла) экономия только для газового двигателя модели ДГ 90 достигает 29788 грн.

Капиталовложения по инвестиционному проекту «Создание участка электрошлаковых технологий» на данном машиностроительном предприятии составляют 14,2 млн грн, а период окупаемости при планируемом годовом объеме производства 350 т — 9,5 мес.

Использование литого электрошлакового металла, вместо кованого, позволит предприятию решить ряд задач: сократить количество материалов,купаемых у поставщиков; уменьшить сырьевую зависимость от поставщиков и контрагентов; получить качественные литые детали простой и сложной конфигурации; снизить себестоимость продукции пред-

Таблица 3. Механические свойства стали 15X12H2MBФAB (ЭП 517) в отливке ЦЭШЛ массой 0,6 т

Металл	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	Длительная прочность при T = 550 °C, ч
Отливка ЦЭШЛ	$\frac{1095... 1119}{1104,66}$	$\frac{891... 953}{916,33}$	$\frac{12,2... 12,4}{12,3}$	$\frac{45,4... 45,9}{46,63}$	$\frac{53,2... 55,2}{53,96}$	170
Требования ТУУ 27.1-0019414-030-2004 на поковки (не менее)	1050	800	10	45	50	100

Примечание. Наплавление вырезки — тангенциальное в обоих случаях.



приятия за счет замены покупных деформированных материалов литыми собственного изготовления.

Выводы

1. Установлено, что крупногабаритные заготовки ЦЭШЛ из жаропрочных сталей отличаются механическими свойствами, превышающими таковые в требованиях технических условий на кованный металл открытой выплавки, и могут применяться вместо жаропрочных кованных, ковано-сварных конструкций как более простые в изготовлении и надежные в эксплуатации.

2. Определено, что высокая пластичность и ударная вязкость литой электрошлаковой стали, обусловленная технологическими особенностями ЦЭШЛ, позволяет увеличить объем упрочняющей дисперсной фазы и достичь большего уровня жаропрочности путем применения сталей с более значительной степенью легирования.

3. Показано, что высокое значение изотропности литой электрошлаковой стали является важной ха-

рактеристикой металла, способствующей повышению эксплуатационной надежности и длительности функционирования в условиях объемной нагрузки и высокой температуры.

1. *Энергетическое* газотурбостроение: современное состояние и тенденция развития / Б. Е. Патон, А. А. Халатов, Д. А. Костенко и др. — Киев: Ин-т технич. теплофизики, 2008. — 74 с.
2. *Технология* электрошлаковой сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 786 с.
3. *Гривняк И.* Свариваемость сталей / Пер. со словац. Л. С. Гончаренко. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
4. *Гудремон Э.* Специальные стали. Т. 1. — М.: Металлургия, 1966. — 736 с.
5. *Справочник* по сварке. Т. 4 / Под ред. А. И. Акулова. — М.: Машиностроение, 1971. — 416 с.
6. *Медовар Б. И.* Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. — М.: Машиностроение, 1966. — 328 с.
7. *Медовар Б. И., Маринский Г. С., Шевцов В. Л.* Центробежное электрошлаковое литье. — Киев: О-во «Знание», 1983. — 48 с.

НПФ «Титан», Киев

Поступила 26.02.2009

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ



Объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:

ДОКТОРАНТУРА

- ☞ сварка и родственные технологии
- ☞ автоматизация технологических процессов
- ☞ металловедение и термическая обработка металлов
- ☞ металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

АСПИРАНТУРА

- ☞ сварка и родственные технологии
- ☞ автоматизация технологических процессов
- ☞ металловедение и термическая обработка металлов
- ☞ металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием документов проводится в сентябре.

Контактный телефон: 289-84-11.

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): [www: paton.kiev.ua](http://www.paton.kiev.ua)

Документы направлять по адресу:

03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11,

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю