

## Перспективы производства полых машиностроительных заготовок методом центробежного электрошлакового литья

*Рассмотрена возможность замены крупногабаритных кованых заготовок из жаропрочной стали марки ЭИ 961 на литые электрошлаковые заготовки. Исследован комплекс механических свойств литого электрошлакового металла в сравнении с требованиями технических условий на поковки. Показаны перспективы производства центробежных электрошлаковых заготовок из высоколегированных сталей в машиностроительной отрасли.*

**Ключевые слова:** центробежное электрошлаковое литье, структура, механические свойства, оборудование для производства, центробежнолитые заготовки

Таблица 1

### Характеристики центробежной машины

Параметр	Величина
Наружный диаметр изложницы, мм	1800
Высота изложницы, мм	1200
Суммарная нагрузка на планшайбу, кг	до 12000
Номинальная частота вращения, 1/мин	1500
Частота вращения изложницы, 1/мин	80...800
Мощность электродвигателя, кВт	110
Масса отливки, кг	до 3000
Масса центробежной машины, кг	4950

Исторически сложилось так, что полые машиностроительные заготовки ответственного назначения изготавливают ковкой или штамповкой в закрытых штампах. Такая технология требует наличия уникального прессового оборудования и оснастки, что ведет к существенному удорожанию производства.

Альтернативой деформационным методам является центробежное электрошлаковое литье (ЦЭШЛ), разработанное в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины [1]. При этом производство таких заготовок намного проще и дешевле, а качество не уступает заготовкам из деформированного металла [2]. В практике литейного производства многие изделия из стали получают при горизонтальной оси вращения изложницы, так как именно этот способ обеспечивает цилиндрическую форму внутренней поверхности отливки. Однако способ получения отливок с вертикальной осью вращения имеет свои преимущества, особенно для коротких по высоте изделий. При вращении вокруг вертикальной оси в отливках не образуется полосчатая структура, полностью отсутствует дождевание [3]. Кроме того, этим способом можно получать заготовки из труднодеформируемых сталей и сплавов не только цилиндрической, но конической и более сложных конфигураций.

Заготовки в виде усеченного конуса наиболее часто встречаются в турбиностроении заготовок из жаропрочных сталей и сплавов. Они применяются как для корпусных деталей, так и для спрямляющих аппаратов в виде набора колец различных диаметра и толщины, вырезанных из одной конусной отливки.

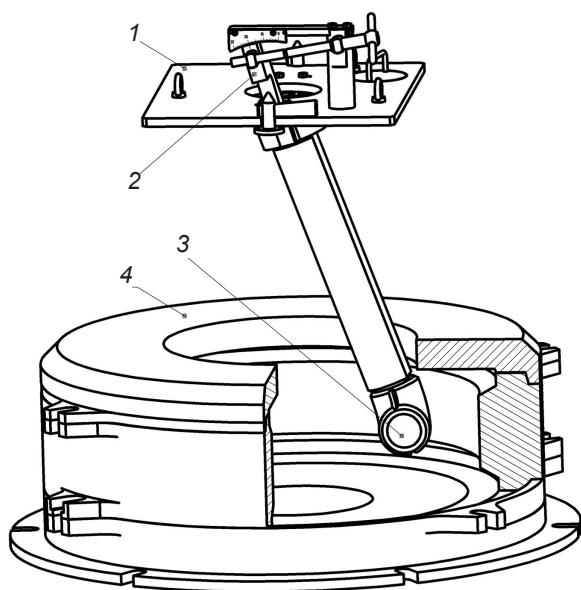
Нашей целью являлось на примере получения конусных отливок ЦЭШЛ из жаропрочной стали марки 13X11H2B2MФ (ЭИ 961) показать перспективность применения метода ЦЭШЛ для производства полых машиностроительных заготовок. Эта сталь широко применяется в газовом турбиностроении и характеризуется большим сопротивлением горячей пластической деформации.

Опыты проводились на комплексе ЦЭШЛ 1 с вертикальной осью вращения на одном из машиностроительных заводов. Характеристики центробежной машины представлены в табл. 1. Расходуемые электро-

ды в виде штанг диаметром 180 мм и длиной 1800 мм переплавляли в футерованном тигле под флюсом системы  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2\text{-MgO-SiO}_2$  (марка АНФ-295). Ток переплава – 4...4,5 кА, напряжение на шлаковой ванне – 45...50 В. При переплаве проводили раскисление металлической ванны силикокальцием (СК 25 ГОСТ 4762-71) из расчета 1,9 кг на одну тонну металла. Металл со шлаком заливали в центробежную форму со скоростью 8...9 кг/с. Температура заливки металла – 1540 °С. Начальная частота вращения изложницы составляла 80 об/мин, рабочая частота – 160 об/мин при коэффициенте гравитации на наружной поверхности  $K = 9,1...10,2$ .

Обычно при вертикальном способе ЦЭШЛ заливку производят по оси вращающейся формы. Такая заливка является единственно возможной для сравнительно небольших по размерам и массе отливок, но когда габариты отливки существенно увеличиваются (например, до  $\varnothing 700...1000$  мм), этот способ обнаруживает существенный недостаток: расплав металла со шлаком, попадая на донную поверхность массивной вращающейся планшайбы, на которой укреплен литейная форма, «намораживается» и образует донную стенку отливки. В дальнейшем ее приходится удалять механической обработкой, что увеличивает трудоемкость изготовления изделия и снижает коэффициент использования металла (КИМ). Кроме того, для крупногабаритных отливок увеличивается протяженность пути движения расплава по холодной поверхности вращающейся планшайбы к боковым стенкам формы, а затем внутренней поверхности

затвердевающей отливки. Поэтому качество наружной боковой поверхности ухудшается. Немаловажно и то, что образовавшаяся донная стенка препятствует свободной усадке отливки, а это способствует возникновению горячих трещин. Чтобы избежать указанных негативных факторов, нами предложена боковая заливка расплава при получении цилиндрических, конических и более сложной формы крупногабаритных отливок. При данном способе подача расплава осуществляется по облицованному изоляционным материалом желобу непосредственно к внутренним стенкам формы (рис. 1). В этом случае



**Рис. 1.** Поворотный желоб: 1 – неподвижная несущая плита; 2 – механизм угла поворота; 3 – поворотный узел протока металла; 4 – форма

максимально сокращается протяженность пути движения потока расплава. Изменяется характер потока, вместо турбулентного он становится ламинарным, направленным по касательной к движению уже залитой части расплава во вращающейся форме. Качество наружной поверхности отливки улучшается, а ее усадка протекает без торможения. Новый технологический прием обеспечивает получение хорошо сформированной отливки с высоким качеством наружной и внутренней поверхностей. Так, на наружной поверхности исследуемой конусной отливки трещин, пережимов и других дефектов не обнаружено.

Кристаллическую структуру полых конусных отливок диаметрами 715/365 мм, высотой 270 мм контролировали на поперечных макрошлифах на трех уровнях. Структура одного из них приведена на рис. 2. Она представлена тремя характерными зонами: наружной мелкозернистой коркой, столбчатыми кристаллами и равноосными кристаллами вблизи свободной (внутренней) поверхности. На глубине 10...15 мм от внутренней поверхности обнаружена усадочная рыхлота. Этот слой удаляется при обдирке. Следует отметить, что благодаря наличию обогревающего слоя шлака на внутренней поверхности отливки отсутствует встречный фронт кристаллизации с зоной стыка кристаллов вблизи этой поверхности.



**Рис. 2.** Макроструктура стали кольца (×1)

Микроскопические исследования структуры проводили после термической обработки. Она заключалась в закалке с  $T = 1223 \pm 20$  К, выдержке 1,2...2,0 ч, охлаждении на воздухе и отпуске при  $T = 953 \pm 20$  К, с охлаждением на воздухе. Микроструктура представлена в виде игольчатого мартенсита и равномерно распределенных в теле отливки карбидов (рис. 3).



**Рис. 3.** Микроструктура стали кольца (×500)

Механические испытания разрывных и ударных образцов показали, что по прочности, пластичности, ударной вязкости и длительной прочности электрошлаковая литая сталь марки ЭИ 961 существенно превосходит требования ТУ 14-12918-80 на деформированный металл (табл. 2).

Испытания проводили на десяти разрывных и ударных образцах. В табл. 2 представлены средние значения. Как показали проведенные испытания литой стали марки ЭИ 961, механические характеристики не зависят от направления вырезки образцов.

Различие в свойствах катаной и кованой стали в зависимости от направления вырезки образцов обычно имеет большие величины, которые возрастают с увеличением степени деформации.

Таблица 2 благодаря использованию в приводе центробежной машины электродвигателя с электронным частотным приводом японской фирмы «Hitachi». Следует отметить, что применение вертикальной оси вращения существенно упрощает конструкцию центробежной машины и позволяет без переналадки устанавливать на планшайбу различные по размерам литейные формы. Центробежная машина в комплексе с электрошлаковой тигельной печью, снабженной попеременно

**Механические характеристики**

Состояние металла	Направление вырезки образцов	$\sigma$ в, МПа	$\sigma$ 0,2, МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
Литой	продольное	103,1	91,6	14,7	44,2	6,8
	тангенциальное	104,2	91,1	11,4	44,3	6,7
	радиальное	104,5	92,1	13,1	46,9	6,6
Требования ТУ 14-1-2918-80 на поковки	продольное	90,0	75,0	10,0	40,0	4,5
	тангенциальное	85,0	71,0	7,5	32,0	3,5
	радиальное	81,0	67,0	5,0	24,0	2,5

Высокая изотропность литого электрошлакового металла имеет важное значение при наличии в условиях эксплуатации объемного напряженного состояния, например, в деталях газовых турбин.

Для реализации технологии получения литых полых заготовок нами разработан, а на ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект» изготовлен комплекс центробежного электрошлакового литья КЦЭШЛ-1[4]. Он позволяет получать центробежные электрошлаковые заготовки диаметром до 1200 мм и массой до 1 т. С учетом производственной необходимости по изготовлению крупных полых отливок диаметром 1500...1800 мм и массой до 2,5 т была спроектирована новая центробежная машина с вертикальной осью вращения литейной формы. Она обеспечивает частоту вращения формы от 80 до 800 об/мин с возможностью динамического воздействия на затвердевающую отливку путем торможения и разгона в одном направлении вращения. Такой характер вращения стал возможным

но работающими расходуемыми и нерасходуемыми электродами, может работать практически в непрерывном режиме, лишь с остановками при извлечении отливок.

Еще одной возможностью повысить производительность центробежной машины является применение многоместных литейных форм. В таких формах может использоваться дозирующее устройство, обеспечивающее практически одинаковые внутренние диаметры центробежных полых отливок. Избыточное количество металла и часть шлака свободно переливаются в верхнюю полость под действием центробежных сил.

Проведенные работы показывают, что в ряде случаев имеется реальная возможность замены стальных деформированных заготовок на более дешевые центробежно-литые электрошлаковые заготовки со свойствами, не уступающими катаному металлу открытой выплавки.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Медовар Б. И., Маринский Г. С., Шевцов В. Л. Центробежное электрошлаковое литье. – Киев: Знание, 1983. – 48 с.
2. 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.
3. Шевченко А. И. Центробежное литье под флюсом. – Киев: Наук. думка, 1991. – 192 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.

**Анотація**

Скрипник С. В., Чернега Д. Ф.

Перспективи виробництва порожнистих машинобудівних заготовок методом відцентрового електрошлакового лиття

Роглянуто можливість заміни великогабаритних кованих заготовок із жаростійкої сталі марки E1 961 на електрошлакові. Досліджено комплекс механічних властивостей литого електрошлакового металу в порівнянні з вимогами технічних умов кування. Показано перспективи виробництва відцентрових електрошлакових заготовок з високолегованих сталей у машинобудівній галузі.

**Ключові слова**

відцентрове електрошлакове лиття, структура, механічні властивості, обладнання для виробництва, відцентроволиті заготовки

## Summary

Skrypnyk S., Chernega D.

### Hollow-section machine-building billets, made by centrifugal electroslag casting manufacturing perspectives

Possibility of replacement of the large-size forged billets from heatproof steel of EI 961 with the cast electroslag billets is considered. The complex of mechanical properties of the cast electroslag metal compared with the requirements of technical requirements on forgings is investigated. The prospects of production of centrifugal electroslag billets from high-alloy steels in machine-building industry are shown.

## Keywords

centrifugal electroslag casting, structure, mechanical properties, production equipment, centrifugalcast billets

Поступила 13.01.11

УДК 669.715:66.096.

**В. Л. Найдек, Д. М. Беленький, Н. С. Пионтковская, А. В. Наривский**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Технология газифлюсового рафинирования алюминиевых расплавов

Представлены результаты исследований по влиянию газифлюсового рафинирования расплава на качество отливок из алюминиевого сплава АК7.

**Ключевые слова:** газ, флюс, расплав, алюминий, скоростная струя, рафинирование

Высокая степень рафинирования алюминиевых сплавов достигается при продувке расплава газифлюсовой смесью в атмосферных условиях или в вакууме [1-6]. При такой обработке из расплава хорошо удаляются оксидные включения, степень дегазации сплавов увеличивается на 20-30 % и в 5 раз уменьшается расход рафинирующего газа [2]. Несмотря на высокую эффективность, указанные технологии не получили широкого распространения. Это обусловлено тем, что для уменьшения окисления сплавов при рафинировании их обработке необходимо проводить с ограниченным расходом газа, которым транспортируют флюс в расплав. В результате происходит закупоривание продувочных устройств твердыми и оплавившимися частицами флюса.

В ФТИМС НАН Украины разработан процесс рафинирования сплавов, при котором флюс замешивают в жидкометаллическую ванну скоростной ( $\approx 120$  м/с) струей инертного газа, заглубленной в расплав [7]. Основные гидродинамические параметры предложенной технологии были определены физическим моделированием [8]. В работе представлены результаты исследований по влиянию газифлюсовой обработки на плотность и механические свойства литого металла.

В исследованиях использовали алюминиевый сплав марки АК7 (ДСТУ 2839-94), имеющий интервал кристаллизации 610-577 °С. Для рафинирования спла-

ва использовали аргон первого сорта (ГОСТ 1057-79) и флюс (%мас.: 39 NaCl, 50 KCl, 6,6 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> и 4,4 CaF<sub>2</sub>) с температурой плавления 670 °С. Плавку и рафинирование сплава массой 50 кг проводили в электрической печи сопротивления с графитошамотным тиглем. Газифлюсовая обработка сплава происходила под давлением 0,5 МПа.

После расплавления и перегрева металла до 700-710 °С отливки получали из исходного сплава. Затем сплав наводороживали с помощью влажного асбеста и обрабатывали расплав газифлюсовой смесью. На поверхности ванны наводили жидкий флюс в количестве  $\approx 0,5$  % от массы металла, открывали доступ аргона в фурму и погружали ее в расплав на 2/3 глубины ванны. Когда флюс с поверхности ванны был полностью замешан, расплав продолжали продувать аргоном в течение минуты. По завершении обработки фурму извлекали из жидкого металла. Сплав выдерживали 5 мин. в плавильной печи и разливали в формы.

Среднее содержание водорода в сплаве определяли на установке RHEN-602 фирмы «LECO» по результатам измерений в 4 образцах из исходного и рафинированного металла. Плотность литого металла определяли гидростатическим взвешиванием, пористость ( $\Pi$ ) в процентах рассчитывали по уравнению:

$$\Pi = \frac{\rho_{\text{этал}} - \rho_{\text{вак}}}{\rho_{\text{этал}}} \cdot 100 \%$$