

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.74.002.6

Гущин Н.С., Ковалевич Е.В., Петров Л.А., Пестов Е.С.

### НОВЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОГРУЖНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ИЗ АУСТЕНИТНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

Для добычи нефти из глубоких скважин применяют бесштанговые центробежные насосы. В зависимости от глубины скважины насосы имеют от 150 до 500 ступеней. Основные рабочие органы каждой ступени состоят из рабочего колеса и направляющего аппарата, которые являются ажурными деталями диаметром 90–120 мм и массой до 0,95 кг. Их проточная часть оформляется спиральными лопатками толщиной до 1,5 мм (рис. 1).

Во всех странах, выпускающих нефтедобывающее оборудование, вышеуказанные детали изготавливают, как правило, из коррозионно-стойкого аустенитного никелевого чугуна с пластинчатым графитом, известного под торговым названием «нирезист», разработанного Международной никелевой компанией [1].

Однако в последние годы наметилась тенденция на создание нового поколения нефтедобывающего оборудования, способного длительное время работать безопасно в любых, подчас неблагоприятных природных и сложных производственных условиях. В частности, эксплуатация погружных центробежных насосов (ПЦН) в среде, со следующими данными:

- пластовая жидкость (смесь нефти, попутной воды и нефтяного газа, смесь промышленных вод и попутного газа);
- водородный показатель попутной воды рН 6,0–8,5;
- максимальная массовая концентрация твердых частиц в откачиваемой жидкости 0,05% (0,5 г/л);
- микротвердость частиц не более 5 баллов по Моссу;
- максимальная массовая концентрация сероводорода 0,125% (1,25 г/л);
- максимальное содержание свободного газа на приеме насоса 55% по объему;



Рис. 1. Отливки рабочих колёс и направляющих аппаратов, залитые из нирезиста с шаровидным графитом

- жидкость перекачивают при температурах от –90 до +140°С

показывает, что их срок службы значительно снижается из-за повышенного абразивно-эрозионного износа рабочих органов (РО) насоса.

Известно, что замена пластинчатой на шаровидную форму графита в любом чугуне, имеющего до и после сфероидизирующего модифицирования примерно одинаковую металлическую основу, очень сильно изменяет его физико-механические и специальные свойства и в большинстве случаев в положительную сторону [2].

В настоящее время для изготовления отливок РО ПЦН из аустенитного чугуна ЧН15Д7 (АЧ) с пластинчатым графитом (ПГ) ООО «Борец» использует многоместную песчаную форму, с помощью которой одновременно получают 5 или 6 отливок. Перед заливкой, которая производится на напольном пульсирующем конвейере, ее устанавливают на движущую тележку и пригружают грузом.

Анализ опытной партии вышеуказанных отливок, изготовленных в условиях научно-экспериментальной базы ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» из АЧ с шаровидным графитом (ШГ) по технологии ООО «Борец» (рис. 2), показал, что количество допустимых дефектов значительно превышает норму, предусмотренную СТП 0501–007–2000. Основными причинами брака литья, который достигал 50%, являются длительное время разлива (более 15 мин) и недостаточное питание отливок в процессе их кристаллизации и охлаждения. В первом случае происходит снижение на 40–50% эффекта модифицирования и 20–30°С температуры жидкого чугуна, что способствует появлению в металлической основе АЧ включений графита неправильной сфероидальной формы и неспаев на рабочей поверхности отливок. Во втором случае создаются необходимые условия для возникновения дефектов усадочного происхождения (рис. 3).

Цель работы – исследование влияния формы включений графита на механические и специальные свойства АЧ и разработка технологии изготовления из него отливок рабочих колёс РКД 5А.250.01 и направляющих аппаратов НАД 5А.250.01 ПЦН, перекачивающих агрессивные жидкие смеси при температурах от –90 до +140°С, методом стопочного литья.

При исследовании влияния сфероидизирующего модифицирования на форму графита аустенитного чугуна марки ЧН15Д7, химический состав которого представлен в табл. 1, и его механические свойства

были опробованы следующие модификаторы: ферроцериевая (FeCe), никель-магниева (Ni-Mg), железо-кремний-кальций-магниева (ЖКМК-6) и железо-кремний-магниева (ДМК) лигатуры (табл. 2).

Модификаторы на основе Се и Ni, содержащие от



Рис. 2. Многоместная песчаная форма рабочих колес и направляющих аппаратов



Рис. 3. Неспай и недоливы на лопатках рабочего колеса и направляющего аппарата

0 до 16% Mg и изготовленные методом сплавления, являются тяжелыми лигатурами. Благодаря высокой плотности технология модифицирования этими лигатурами сводилась к простой загрузке их в виде кусков размером не менее 40 мм в ковш перед заполнением его чугуном (метод Pig-ovr). Реакция модифицирования протекала бурно, с пироэффектом. Усвоение Mg составляет до 60%.

Комплексные лигатуры (сплавы), содержащие Si, имеют плотность более чем в 2 раза меньшую, чем жидкий чугун, поэтому для удержания их под жидким металлом нижняя часть ковша была разделена на две половины перегородкой из огнеупорного кирпичика. Одна из отгороженных половин дна служила реакционной камерой, куда загружали лигатуру ЖКМК-6, измельченную до кусков в 20–30 мм (Sandvich-процесс). Для предотвращения сплывания лигатуры при заполнении ковша металлом сверху ее пригружали чугунной стружкой. Струю металла при заполнении ковша направляли в свободную от лигатуры часть ковша. Процесс сопровождался сильным пироэффектом и дымовыделением, поскольку после расплавления чугунной стружки модификатор всплывал на поверхность и содержащийся в нем Mg бесполезно сгорал на поверхности металла. Усвоение Mg не превышает 50%.

Технология модифицирования жидкого чугуна МДС-процессом аналогична Sandvich-процессу. Принципиальное различие – в подготовке модификатора. Дисперсная модифицирующая композиция ДМК-1 состоит из механической смеси порошков чистого Mg МПФ1 и ферросилиция ФС75, а ДМК-7 – из механической смеси порошков сплава Mg с Fe и Si и ферросилиция ФС75. Фракция вышеуказанных порошков до 3 мм при наличии пылевидной фракции не менее 35%. За счет фракционного состава модификатора ДМК при сфероидизирующей обработке чугуна он удерживается на дне ковша при заполнении его составом силами поверхностного натяжения до полного завершения МДС-процесса. Усвоение Mg составляет 90–95%, при этом процесс протекал совершенно спокойно без пироэффекта и дымовыделения.

Металлографические исследования АЧ показали, что только обработка его Mg-содержащим ДМК модификатором по технологии МДС обеспечивает получение правильной шаровидной формы графита и карбидов в количестве не более Ц25 по шкале цементита ГОСТ 3443-87 (см. табл. 2). При данной металлической основе исследуемого чугуна его механические свойства достигают максимальных значений ( $\sigma_b = 502$  МПа и  $\delta = 12,2\%$ ), а твердость (170–175 НВ) находится в пределах твердости (160–220 НВ) АЧ с ПГ. Следовательно, ухудшение механической обработки отливок не произойдет.

Что касается FeCe, ФЦМ-5, Ni-Mg и ЖКМК-6 ли-

Таблица 1

Марка чугуна	Содержание химических элементов, % масс.								
	C	Si	Mn	Cu	Ni	C <sub>2</sub>	P	Mg	Ce
ЧН15Д7 с ПГ	2,8–3,0	2,2–2,6	0,8–1,0	6,0–7,5	15,0–16,0	1,5–2,0	-	-	-
ЧН15Д7 с ШГ	2,8–3,0	2,6–2,9	0,8–1,0	6,0–7,5	15,0–16,0	1,5–1,8	≤0,25	≤0,3	≤0,03
ЧН10Д7Г 4 с ШГ	2,8–3,0	2,6–2,9	4,0–4,5	6,5–7,5	9,5–10,5	0,3–0,5	≤0,25	≤0,3	≤0,03

гатур, то их применение в качестве модификатора аустенитного чугуна ЧН15Д7 сдерживается по следующим причинам:

- процесс модифицирования сопровождается сильным пироэффектом и дымовыделением;
- низкий процент усвоения Mg;
- трудность получения правильной шаровидной формы графита;
- металлическая основа содержит повышенное количество карбидов (более 25%);
- наличие в отливках отбела.

Нами проведены сравнительные исследования АЧ с ПГ, применяемым для литья РО ПЦН, и чугуна такого же состава, но с ШГ применительно к условиям их эксплуатации.

Коррозионную стойкость в водном растворе хлоридов определяли по потере массы образцов после испытания длительностью 14 суток при температуре 70–80°С, а в сероводороде – после испытаний в автоклаве, объем коррозионной среды (водный раствор 30% NaСe + 6 г/л Н<sub>2</sub>S) в котором составлял 2,5 л, длительностью 10 суток при температуре 90±1°С.

Склонность к солеотложению в растворе, имитирующем пластовую жидкость с высоким содержанием карбонатных солей (рН 8,2), определяли по приросту массы образцов после испытаний длительностью 4 ч.

Ростоустойчивость в охлаждающей среде определяли по изменению линейных размеров образцов после испытания длительностью одного часа при температуре –60°С. Охлаждающая среда состояла из твердой двуокиси углерода (3 кг), этилового спирта

(500 мл) и ацетона (200 мл).

Износостойкость в паре трения «нирезист–карбонит» определяли с помощью машины трения «УМТ-1», при этом частота вращения вала составляла 2500 об/мин и осевая нагрузка – 60 Н. В качестве смазочной среды использовали литол 24 с 5% добавкой по массе двуокиси алюминия. Время испытания каждой пары трения равнялась 2 ч, в процессе которого температура в зоне трения достигала 90–100°С.

Износостойкость в паре трения «нирезист–нирезист» определялась на стенде «СТИЗ-1» при удельной радиальной нагрузке 65 Н в три этапа.

I этап – в растворе (30% СОНС + 70% воды) + 10 г/л А<sub>2</sub>О<sub>3</sub> с подачей сжатого воздуха. Время испытания равнялось 6 ч, в процессе которого температура в зоне трения достигала 35–50°С.

II этап – в воде. Время испытания – 2 ч, а температура в зоне трения – 80–90°С.

III этап – в водовоздушной среде. Время испытания – 1 ч.

Несущую способность (прихватаемость) радиальных пар из «нирезист–нирезист» определяли в процессе их сухого трения при начальной нагрузке 20 Н, которую через каждые 5 мин испытания увеличивали на 20 Н.

Относительную износостойкость при гидроабразивном износе определяли при испытаниях на стенде «СТИГ-1» при давлении воды на входе в распылительную головку 4,5 МПа, расходе воды 0,18–0,19 л/с и общем расходе абразива за время испытаний (~82 мин) 5000 г.

Результаты сравнительных исследований представлены в табл. 3.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что замена пластинчатой на шаровидную форму включений графита приводит к существенному улучшению всех исследованных специальных (эксплуатационных) свойств АЧ.

Наибольшее преимущество (в 9 раз) выявлено в несущей способности АЧ с ШГ. В 2–3 раза выше коррозионная стойкость АЧ с ШГ в растворе хлоридов и сероводороде и 1,4 раза увеличивается его гидроабразивная износостойкость. Таким образом, сравнительные исследования показали перспективность и необходимость применения АЧ с ШГ при изготовлении РО ПЦН с целью повышения их срока службы.

Для оценки работоспособности РО

Таблица 2

Тип модификатора	Количество модификатора, %	Размер модификатора, мм	Способ модифицирования	Усвоение магния, %	Свойства			Количество цементита, %	Форма включений графита
					НВ	σв, МПа	δ, %		
FeCe	0,4	≤40	Метод Pur-ovr	–	153	370	5,0	30	ПГф3
	0,8				176	345	1,6	40	ВГф1
ФЦМ-5	0,3	≤40	Метод Pur-ovr	35–45	154	464	6,5	30	ВГф3
	0,4				165	442	5,3	35	ШГф1
	0,8				198	388	1,4	45	ШГф3
	1,0				185	428	4,0	40	ШГф4
Ni-Mg	1,0	≤30	Sandwich-процесс	50–60	185	428	4,0	40	ШГф4
ЖКМК-6	2,4			30–50	160	489	10,0	25	ШГф4
ДМК-1	2,3	≤3	МДС-процесс	90–95	175	500	11,5	25	ШГф5
ДМК-7	2,3				170	502	12,2	20	ШГф5
–	–	–	–	–	160	210	4,0	25	ПГф2

Таблица 3

Марка чугуна	Скорость коррозии, мм/год		Интенсивность солеотложения, г/ч	Ростоустойчивость при температуре –60°С, %	Износостойкость в паре трения с карбонитом, г/ч	Износостойкость в паре из одного материала, мк/км	Несущая способность, Н	Относительная гидроабразивная износостойкость
	в водном растворе хлоридов	в сероводороде						
ЧН15Д7 с ПГ	0,0475	4,483	0,051	0	3,3	2,18	100	1,00
ЧН15Д7 с ШГ	0,0232	1,358	0,048	0	2,4	1,13	900	1,41
ЧН10Д7Г4с ШГ	0,0305	1,840	0,050	0	2,6	1,25	840	1,38

\* Сравнительные исследования специальных свойств аустенитного чугуна проводили в ООО «Борец».

из АЧ с ШГ в условиях научно-экспериментальной базы ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» было отлито 500 рабочих колес и 500 направляющих аппаратов для изготовления опытного ПЦН.

Согласно СТП 0501-007-2000 на литых поверхностных проточных полостях рабочего колеса и направляющего аппарата не допускается пригар и недоливы на входных и выходных кромках лопаток глубиной более 1,0 мм и шириной более 20% ширины кромки, а также неспаи глубиной более 0,5 мм и длиной более 10 мм.

Чугун с шаровидным графитом отличается от поддобного чугуна с пластинчатым графитом не только повышенной прочностью, пластичностью и другими положительными свойствами, но и несколько худшими литейными свойствами, в частности повышенной объёмной и линейной усадкой и несколько худшей жидкотекучестью. Кроме того, повышенное поверхностное натяжение чугуна с шаровидным графитом, приближающееся по своим значениям к поверхностному натяжению стали, существенно влияет на получение чёткого отпечатка формы на отливке, что имеет очень большое значение при отливке рабочих колёс и направляющих аппаратов, имеющих лопатки с выходными кромками около 1 мм [3].

Высокие требования к качеству поверхности обеспечиваются только при заливке в узком интервале температур. Низкая температура заливки приводит к образованию неспаев и недоливов входных и выходных кромок лопаток, причём большее количество дефектов этого типа наблюдается на направляющих аппаратах. Наличие прибыли на колесе способствует перепуску металла через тонкие сечения лопаток и снижению опасности появления неспаев и недоливов. Высокая температура заливки исключает неспаи и недоливы, но приводит к образованию трудноудаляемого пригара в проточной части РО, что недопустимо и приводит к забракованию отливок, т. к. удаление пригара в тонких каналах проточной части чрезвычайно трудоёмко и в большей части невозможно.

Для обеспечения заливки в необходимом интервале температур была разработана стопочная заливка, при которой 150 кг металла, выплавленного в индукционной печи, заливалось в две стопки форм в течение 45–70 с. Стопки собирались из 10 форм с центральным литниковым каналом. Формы скреплялись посредством струбцин.

В каждой форме располагалось 5 или 6 деталей вокруг общего стояка достаточного размера для обеспечения питания при кристаллизации отливок таким образом, что дефектов усадочного происхождения при отливке опытной партии более 1000 отливок не было обнаружено. Выход годного при отливке по такой технологии составляет 50%, что несколько меньше в сравнении с заливкой отдельных форм, но, самое главное, эта технология сокращает продолжительность заливки и позволяет осуществлять её в узком интервале температур, что в сочетании с хорошим напором позволило получить качественные отливки рабочих колёс и направляющих аппаратов. Вид куста отливок, залитых стопкой, приведен на рис. 4.

Плавку чугуна проводили в индукционной печи вместимостью 160 кг. В качестве шихтовых материалов использовали чугун Л6, содержащий 4,3% углерода,

1,25% кремния, 0,4 марганца, стальную высечку, электродный бой, ФМн78, ФХ 800, катодный никель, стружку меди и возврат 30%. Высечку, электродный бой и чугун давали в завалку, никель и медь – в жидкий металл, ферромарганец – перед выпуском из печи.

Чугун обрабатывали в ковше по технологии МДС, в качестве модификатора использовали ДМК-1 или ДМК-7 в количестве 2,3% от массы обрабатываемого металла. В обоих случаях процесс модифицирования протекал совершенно спокойно, без пирозффекта и дымовыделений. Следует отметить, что процесс модифицирования при обработке нирезиста существенно отличается от процесса модифицирования нелегированного чугуна, т.е. он протекает более спокойно и с меньшими внешними проявлениями. Это можно объяснить высоким содержанием никеля в чугуне. Известно, что магний не растворяется в железе либо (по другим данным) незначительно растворяется, в то время как с никелем образует растворы. В нашем случае реакция модифицирования продолжалась 40–60 с. В процессе реакции и после её окончания при выдержке металла в ковше на поверхности металла образуется трудноудаляемый сметанообразный шлак. По виду шлак, образующийся при модифицировании высоконикелевого чугуна, также отличается и от шлака, образующегося при модифицировании нелегированного чугуна. Шлак на нелегированном чугуне после модифицирования МДС процессом, как правило, сыпучий и легко удаляется с поверхности металла.

Для лучшей очистки поверхности металла в ковше использовали флюсперлит марки «Барьер», который коагулирует шлак, то есть связывает его в единую вязкую массу. Это позволяет также снизить количество шлака, попадающего в процессе заливки жидкого чугуна в стопку. А для исключения возникновения брака



Рис. 4. Стопка форм, подготовленных к заливке

литья по шлаковым включениям заливку колёс и направляющих аппаратов осуществляли через фильтрующую сетку, устанавливаемую под литниковую чашу.

При изготовлении партии отливок РО из чугуна с ШГ для изготовления опытного ПЦН была поставлена задача получения ШГ при сохранении металлической основы, характерной для аустенитного чугуна с ПГ с содержанием не более 25% карбидной фазы. Твёрдость по Бринеллю 120–180 НВ, как у чугуна с ПГ, для того, чтобы избежать затруднения при механической обработке деталей. Кроме того, и химический состав чугуна с ШГ должен быть в пределах, рекомендуемых для чугуна с ПГ при отливке этих деталей. Задача почти невыполнимая, однако, с помощью МДС модификатора, обладающего сильным графитизирующим эффектом, нами была получена заданная структура (рис. 5) и свойства чугуна при отливке партии колёс и направляющих аппаратов для опытного насоса.

Опытный насос 10.1ЭЦНД 5А-250-2100 был изготовлен на фирме ООО «Борец» и в настоящее время проходит испытание в условиях работы скважины ОАО «РН-Юганск-Нефтегаз».

На основании проведенного исследования был создан новый аустенитный чугун с шаровидным графитом и пониженным содержанием никеля, химический состав которого представлен в табл. 1 [4].

Как показали сравнительные исследования специальных свойств АЧ с ШГ, снижение в нем содержания никеля с 16 до 10% приводит к их незначительному ухудшению (см. табл. 3).

Основные рабочие органы ступени из нового АЧ марки ЧН10Д7Г4Ш в количестве 1000 шт. были изготовлены по новой технологии ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» в условиях литейного цеха фирмы ООО «ЛеМаЗ», г. Лебедянь.

После механической обработки они были использованы для изготовления опытного насоса П10.1ЭЦНД 5А-35-2300, который фирма ООО «Борец» отправила для прохождения испытаний на скважину ОАО «Сибнефть-Ноябрьск-Нефтегаз».

#### Выводы

1. Сфероидизирующая обработка ДМК модификаторами методом МДС является в настоящее время наиболее экологически чистой технологией, которая обеспечивает стабильное получение аустенитного чугуна ЧН15Д7 с правильной шаровидной формой



Рис. 5. Отливки рабочих колёс (а) и направляющих аппаратов (б), полученных методом столочного литья

включений графита.

2. Замена пластинчатой на шаровидную форму включений графита позволяет не только увеличить в 2,5–3,0 раза прочность и пластичность аустенитного чугуна ЧН15Д7, но и существенно повысить его специальные свойства, в частности коррозионно-абразивную стойкость за счет более компактной формы включений графита, играющих роль каналов, через которые агрессивная среда проникает в глубь металлической основы детали.

3. Разработка принципиально нового технологического процесса изготовления отливок рабочих колёс РКД 5А.250.01 и направляющих аппаратов НАД 5А.250.01 погружных центробежных насосов методом столочного литья позволила использовать в качестве материала для их производства аустенитный чугун ЧН15Д7 с шаровидным графитом, при этом качество отливок существенно повысилось, а брак литья снизился с 50 до 3%.

#### Список литературы

1. Пивоварский Е. Высококачественный чугун. М.: Металлургия, 1965. Т. 1. 848 с.
2. Ковалевич Е.В. Теоретические основы и практика получения чугуна с шаровидным графитом легкодисперсными модификаторами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1996. 36 с.
3. Исследование структуры и свойств аустенитных чугунов при высоких температурах / Л.В. Ильичева, Н.Н. Александров, Е.В. Ковалевич, В.И. Куликов // Труды «ЦНИИТМАШ». 1966. № 58. С. 21–32.
4. Заявка № 2006127138/02 от 03.03.2008.

#### List of literature

1. Pivovarsky E. High-quality cast iron. M.: Metallurgy, 1965. V. 1. P. 848.
2. Kovalevich E.V. Theoretical principles and practice of cast iron production with spherical graphite through the light disperse modifiers: Abstract of the Dr. of technical science. M., 1996. P. 36.
3. The research of the structure and properties of austenitic cast iron at the high temperatures / L.V. Ilicheva, N.N. Alexandrov, E.V. Kovalevich, B.I. Kulikov // Work «TSNIITMASH». 1966. № 58. P. 21–32.
4. Request № 2006127138/02 dated 03.03.2008.