УДК 621.651.694

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОКРЫТИЙ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ С ЛАЗЕРНЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

RESULTS OF MECHANICAL RESISTANCE TEST OF LABORATORY SAMPLES COATING APPLIED BY LASER DEPOSITION

С. А. Фролов, В. Н. Светашов, Д. Д. Водорезов, Д. С. Леонтьев, О. М. Столбова
S. A. Frolov, V. N. Svetashov, D. D. Vodorezov, D. S. Leontiev, O. M. Stolbova

Экспериментальный завод буровой техники Тюменского индустриального университета, г. Тюмень

Ключевые слова: износостойкость; лазерная наплавка; лабораторные образцы
Key words: wear resistance; laser surface coating; laboratory specimen

Бурение нефтяных и газовых скважин почти повсеместно осуществляется с применением винтовых забойных двигателей (ВЗД), причем в нашей стране данный привод долота обеспечивает более 70 % всего объема бурения [1].

Увеличение глубин разведочных и добывающих скважин, сложные траектории профилей, содержащих совокупность участков набора, снижение и стабилизация зенитного угла приводят к необходимости создания надежных и долговечных ВЗД [2, 3]. Необходимо отметить, что немаловажным фактором, который обеспечивает сохранность основных элементов двигателя ротор — статор, является снижение твердой фазы в системе бурового раствора. Содержание абразивных частиц приводит к увеличению износа винтовой поверхности ротора. В свою очередь, конструктивная особенность героторного механизма ВЗД предусматривает вращение ротора относительно собственной оси, направленной по часовой стрелке, и переносное движение относительно оси статора в противоположенном направлении [4]. Планетарное движение ротора относительно статора, контакт их зубьев предопределяют наличие трения качения (во впадине) и трения скольжения, сопровождающиеся от основания зуба статора до его вершины [5]. Как правило, это приводит к износу периферийной левой стороны эластомера статора и износу покрытия ротора. Износ ротора обычно представлен отслоением поверхностного слоя, который наносится на винтовую поверхность в завершающей стадии его изготовления.

На экспериментальном заводе буровой техники Тюменского индустриального университета разрабатывается технология создания на поверхностях деталей роторов винтовых забойных двигателей, используемых при бурении нефтяных и газовых скважин, функциональных, износостойких, коррозионно-стойких, антифрикционных, антизадирных, теплостойких покрытий.

В рамках научно-исследовательских работ группой ученых проведены лабораторные испытания физико-механических свойств покрытий лабораторных заготовок, нанесенных лазерным способом.

Объем выполненных работ включал изготовление лабораторных образцов, нанесение защитного покрытия лазерным способом, проведение лабораторных испытаний, а также анализ полученных результатов.

Объем лабораторных испытаний: измерение толщины покрытий; определение пористости; измерение шероховатости; определение адгезии, микротвердости; испытания на коррозионную стойкость; определение предела выносливости покрытия-основы.

Для исследований были использованы 3 марки стали: 40 Х по ГОСТ 4533-71, 20Х13 по ГОСТ 5632-72 и 20 по ГОСТ 1050-88.

Процесс лазерной наплавки заключается в нанесении расплавленного материала на обрабатываемое изделие, поверхность которого разогревается до температуры плавления, или надежном смачивании покрываемым жидким металлом. Созданный таким способом поверхностный слой образует единое целое с основным сплавом.

В случае ремонтных работ на старую деталь может быть наплавлен примерно такой же металл, из которого она изготовлена. При этом будут восстановлены целостность и форма изделия. Но целесообразней наносить другой сплав, который, как и для новой детали, позволит получить изделие с поверхностью, отличающейся от материала основы своими свойствами. В зависимости от условий эксплуатации оборудования это могут быть высокая эрозионная, кавитационная, коррозионная, износо-, жаростойкость и другие. В случае обработки новых деталей наплавка позволяет значительно сэкономить на материале, так как отпадает необходимость изготовления изделия целиком из дорогого сплава. Также во всех случаях использования этой технологии значительно продлевается срок службы обработанных узлов и деталей.

Лазерная наплавка поверхности металла — уникальный и наиболее эффективный метод наплавления износостойких покрытий. Проводят ее с помощью лазерных систем нового поколения, работа которых основана на использовании мощных диодов и специальных сопел.

Сфокусированный лазерный луч создает на поверхности детали сварочную ванну, в которую локально подается металлический порошок. Материал основы подвергается кратковременному расплавлению. Высокий уровень автоматизации управления рабочим процессом обеспечивает регулирование размеров зон плавления и термических циклов.

Точность лазерного излучения гарантирует образование полностью плотного наплавочного слоя с разжижением (смешением с металлом основы) менее 5 %, а также обеспечивает отличное металлургическое сцепление. Возможно нанесение нескольких защитных слоев, это повысит стойкость к разрушению.

В качестве наплавочного материала был использован самофлюсующийся порошок ПРНХ17СР4 с химическим составом, представленным в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав самофлюсующегося порошка ПРНХ17СР4

Марка порошка	Номинальный химический состав, %								Твердость покрытия HRC Типичные значения
	Основные компоненты								
	Ni	Cu	C	Cr	Si	B	Fe	Другие	
ПР-НХ17СР4	основа	–	1,0	17,0	4,1	3,6	< 5,0		55–60

Для проведения усталостных испытаний с помощью дополнительной механической обработки были изготовлены образцы типа IV по ГОСТ 25.502-79, показанные на рис. 1.

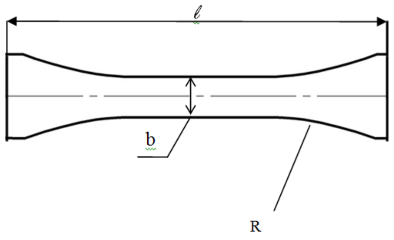

Рис. 1. ***Образцы для усталостных испытаний:***
l — длина образца,
b — ширина рабочей части,
R — радиус скругления

Согласно ГОСТ 25.502-79, размеры l, b, R регламентируются и зависят от толщины испытываемого образца. В нашем случае были использованы образцы с размерами, указанными на рисунке 2.

Образцы при вырезке предварительно испытывают температурное воздействие. Необходимо отметить, что неравномерный нагрев или перегрев выше критических точек могут вызывать негативные изменения структуры и свойств, в частности высокий уровень остаточных напряжений, влияющих на результаты усталостных испытаний. Для исключения влияния термических процессов проводилось фрезерование боковых поверхностей образцов с применением охлаждающей жидкости, а затем шлифование наждачной бумагой с размером зерна 20–28 мкм (P600) в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502-79.

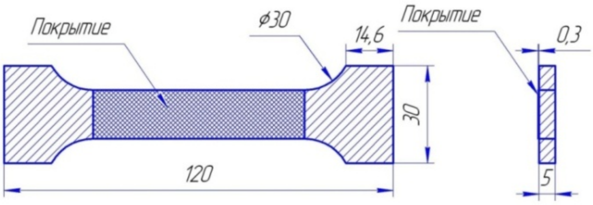

Рис. 2. ***Образец, используемый для усталостных испытаний***

После изготовления на образцы были нанесены защитные покрытия методом лазерной наплавки с последующим оплавлением (выглаживанием).

В таблице 2 указаны название и химический состав самофлюсующихся порошков, применяемых для нанесения защитных покрытий методом лазерной наплавки с последующим оплавлением (выглаживанием).

Таблица 2

Химический состав порошка

Наименование порошка	Размеры частиц порошка, мкм	Химический состав порошка, %									
		C	Cr	Si	W	Fe	Co	Ni	B	S	P
Deloroalloy 56–M	+125/-45	0,57	16,54	4,26	0,067	2,66	0,19	Осн.	3,52	0,004	0,012
Плакарт-03.98.-Р.	+106 /-38	0,81	17,26	4,49	–	4,18	–	Осн.	3,48	–	0,1
Hoganas 74M60	+125/-44	0,589	14,81	3,92	–	4,53	–	Осн.	2,99	–	–

При выполнении испытаний использовались зажимы (Пат. РФ на ПМ № 112083), указанные на рисунке 3, которые обеспечивают надежность крепления образцов и повышение качества эксперимента при проведении усталостных испытаний [6].

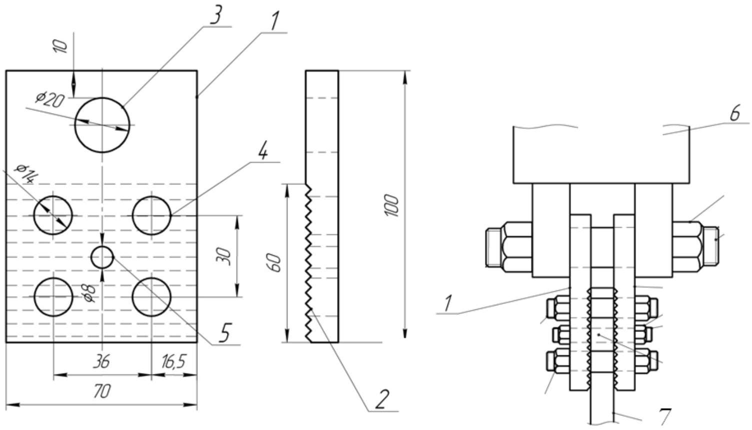

Рис. 3. ***Зажимное устройство для усталостных испытаний:*** *1 — пластины; 2 — поперечные канавки; 3 — отверстия для крепления; 4 — отверстия для фиксации образца; 5 — отверстие в образце для его удержания; 6 — захват испытательной машины; 7 — крепежный элемент в сборе; 8 – образец*

Существует несколько методик проведения усталостных испытаний. Малообразцовые методики позволяют получать данные о выносливости материалов, с использованием нескольких образцов, которые на всем цикле испытаний подвергаются различным нагрузкам. Многообразцовые — дают более точные результаты при исследовании усталостных характеристик. В нашем случае сделан акцент на многообразцовые методики.

Знание механических свойств исследуемых материалов позволяет выбрать оборудование для усталостных испытаний с оптимальными характеристиками, прежде всего нагрузочными, а также шумо-вибрационными, так как вибрация может негативно повлиять на результаты испытаний в связи с резонансными явлениями. Анализ технических характеристик испытательных стендов показал, что наиболее отвечающей нашим задачам установкой для проведения усталостных испытаний является ЦД20 с пульсатором Пу10, имеющей следующие характеристики:

- наименование оборудования — ЦД-20;
- способ нагружения — гидравлический;
- максимальная растягивающая нагрузка — 200 кН;
- уровень шума — 40 дБ;
- минимальная частота амплитуды — 8 Гц;
- максимальная частота амплитуды — 25 Гц;
- погрешность измерений — 3 %;
- максимальная потребляемая мощность — 20000 Вт;
- уровень вибрации — умеренный.

Нагрузка на образцы составила 120 % от предела текучести материала подложки, амплитуда изменения нагрузки 12 % от предела текучести.

В табл. 3 указано количество образцов с покрытием, нанесенным методом лазерной наплавки с последующим оплавлением (выглаживанием), подвергнутых испытаниям.

Таблица 3

Количество образцов подвергнутых испытаниям

Наименование стали	Наименование порошка используемого для нанесения защитного покрытия	Серии испытания	Кол-во, шт.
40х	Deloroalloy 56M	4	20
	Плакарт-03.98.-Р	4	20
	Hoganas 74M60	4	20
20х13	Deloroalloy 56M	4	20
	Плакарт-03.98.-Р	4	20
	Hoganas 74M60	4	20
20	Deloroalloy 56M	4	20
	Плакарт-03.98.-Р	4	20
	Hoganas 74M60	4	20

Испытания проводили при знакопостоянном нагружении с коэффициентом асимметрии цикла 0,9. База испытания составила 106 циклов. Результаты усталостных испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты усталостных испытаний образцов с лазерной наплавкой

Наименование стали	Наименование порошка, используемого для нанесения защитного покрытия	Максимальное напряжение растяжения σ_{max}, МПа	Размах напряжений цикла A_{σ}, МПа
40х	Deloroalloy 56M	255	23
	Плакарт-03.98.-Р	257	23
	Hoganas 74M60	255	23
20х13	Deloroalloy 56M	340	30,6
	Плакарт-03.98.-Р	345	30,6
	Hoganas 74M60	342	30,6
20	Deloroalloy 56M	190	17,1
	Плакарт-03.98.-Р	199	17,1
	Hoganas 74M60	196	17,1

На рисунке 4 изображен образец после испытаний.

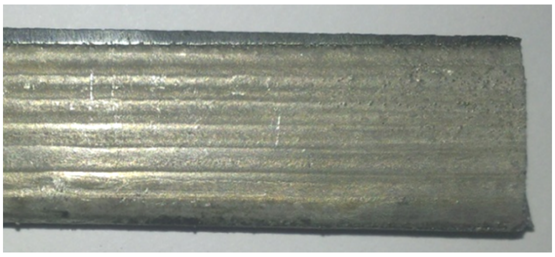

Рис. 4. **Образец после усталостных испытаний**

Определение износостойкости покрытия. Согласно ГОСТ 23.002-78, изнашивание — это процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопление его остаточной деформации при трении, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ — результат изнашивания, выраженный в единицах длины, объема, массы и др. К основным характеристикам износа относится скорость изнашивания и интенсивность изнашивания. Скорость изнашивания представляет собой отношение величины износа ко времени, в течение которого он возник, а интенсивность изнашивания − отношение величины износа к пути трения, на котором происходило изнашивание, или к объему затраченной работы.

На основании приведенных определений, под износостойкостью понимают свойство материалов оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратно скорости или интенсивности изнашивания. Износостойкость является одной из важнейших характеристик покрытий, использующихся для восстановления деталей машин.

Износостойкость покрытий, как правило, не только не коррелирует с другими свойствами, но и является зависимой от материала контртела. Без учета этого фактора данные по сопротивлению покрытий механическому износу не представляют информативной ценности. Кроме того, испытания на износостойкость должны по возможности моделировать условия трения и геометрию реальных пар. Например, испытания цилиндрических образцов при возвратно-поступательном движении имитируют трение наружных поверхностей цилиндрических элементов. При этом нагрузку, число ходов, скорость, смазку и прочие параметры следует принимать исходя из режимов эксплуатации реальной пары.

Многочисленные испытательные устройства и существующие методики проведения испытаний позволяют выбрать кинематическую схему установки и смоделировать конкретные режимы эксплуатации деталей с покрытиями.

Испытания на износ проводились на машине трения ИИ 5018. Изображение образца показано на рисунке 5. Перед проведением испытания провели притирку образца. При проведении испытания нагрузка на образец составляла 100 Н, время испытания — 2 мин. Схема испытания диск-колодка. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 5.

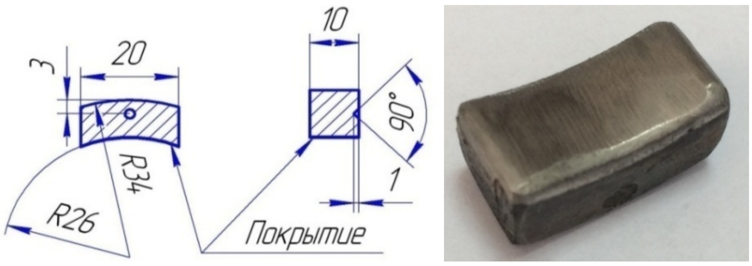

Рис. 5. **Образец для испытаний на износостойкость покрытия**

Таблица 5

Результаты испытаний образцов с нанесенным защитным покрытием, нанесенных методом лазерной наплавки

Наименование стали	Наименование порошка, используемого для нанесения защитного покрытия	Кол-во, шт.	Коэффициент трения,	Относительная износостойкость, отн. ед.
40х	Deloroalloy 56M	5	0,193	4,1
	Плакарт-03.98.-Р	5	0,201	4,3
	Hoganas 74M60	5	0,222	4,2
20х13	Deloroalloy 56M	5	0,193	4,1
	Плакарт-03.98.-Р	5	0,201	4,3
	Hoganas 74M60	5	0,222	4,2
20	Deloroalloy 56M	5	0,193	4,1
	Плакарт-03.98.-Р	5	0,201	4,3
	Hoganas 74M60	5	0,222	4,2

Таким образом, экспериментально установлено, что материал подложки и способ нанесения покрытия исследуемых материалов не оказывает влияния на коэффициент трения и относительную износостойкость. Защитное покрытие, нанесенное методом лазерной наплавки с применением порошка Плакарт-03.98.-Р, обладает более высокой износостойкостью по сравнению с испытываемыми и может применяться для покрытия роторов забойных двигателей.

Работа выполнена Тюменским индустриальным университетом и ООО «Производственной фирмой Сокол» по комплексному проекту создания высокотехнологичного производства «Разработка, проектирование, изготовление и монтаж линии по нанесению защитных покрытий», шифр 2014-218-05-128. Проект реализуется за счет субсидии на государственную поддержку кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Список литературы

1. Двойников М. В. Бурение нефтяных и газовых скважин модернизированными винтовыми забойными двигателями (научное обобщение, результаты исследований и внедрения): дисс. докт. техн. наук. – Тюмен, 2011. – С. 129-150.
2. Ошибков А. В., Двойников М. В. Анализ проектных решений и технологических приемов проектирования и реализации профилей наклонно направленных и горизонтальных скважин // Известия вузов. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 40-44.
3. Ковенский И. М., Ошибков А. В., Фролов С. А., Двойников М. В. Упрочнение поверхностного слоя роторов винтовых забойных двигателей газотермическими покрытиями // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 89-92.
4. Балденко Д. Ф., Балденко Ф. Д., Гноевых А. Н. Одновинтовые гидравлические машины: В 2 т. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. – Т 2. – С. 3-20.
5. Карапетов Р. В. Повышение эффективности бурения скважин с применением винтовых забойных двигателей за счет увеличения их моторесурса: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2006. – С. 6.
6. Патент на ПМ № 112083 Российская Федерация. B25B1/00. Зажимное устройство для усталостных испытаний образцов / Кусков Константин Викторович (RU), Ковенский Илья Моисеевич (RU); заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный нефтегазовый университет» (ТюмГНГУ) (RU) – начало действия патента: 26.08.2011. публикация патента: 10.01.2012.
7. Двойников М. В., Ковенский И. М., Ошибков А. В., Фролов С. А. Анализ результатов исследований износостойкости ротора винтового забойного двигателя // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 86-88.

Сведения об авторах

Фролов Сергей Андреевич, *директор Экспериментального завода буровой техники, Тюменский индустриальный университет, тел. +79068203000, e-mail: frolov_72@inbox.ru*

Светашов Владимир Николаевич, *начальник конструкторского отдела Экспериментального завода буровой техники, Тюменский индустриальный университет, тел. +792204444764, e-mail: svetashov@mai.ru*

Information about the authors

Frolov S. A., *Director of Experimental plant of drilling technique, Industrial University of Tyumen, phone: +79068203000, e-mail: frolov_72@inbox.ru*

Svetashov V. N., *head of the designing department of Experimental plant of drilling technique, Industrial University of Tyumen, phone: +792204444764, e-mail: svetashov@mail.ru*

***Водорезов Дмитрий Дмитриевич**, инженер Экспериментального завода буровой техники, Тюменский индустриальный университет, тел. +79068203000, e-mail: vodorezov@gmail.com*

***Леонтьев Дмитрий Сергеевич,** ассистент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», ТИУ, г. Тюмень, тел. +79323202656, e-mail: leonfob@mail.ru*

***Столбова Ольга Михайловна**, магистрант, Тюменский индустриальный университет, тел. 89829113082, e-mail: olga.stolbowa2013@yandex.ru*

***Vodorezov D. D.,** engineer of Experimental plant of drilling technique, Industrial University of Tyumen, phone: +79068203000, e-mail: vodorezov@gmail.com*

***Leontiev D. S.,** assistant of the chair «Drilling of oil and gas wells», Industrial University of Tyumen, phone: +79323202656, e-mail: leonfob@mail.ru*

***Stolbova O. M.,** postgraduate, Industrial University of Tyumen, phone: +79829113082, e-mail: olga.stolbowa2013@yandex.ru*